



## Proposte di attività di ricerca del Consiglio Nazionale delle Ricerche nell'ambito delle aree prioritarie di intervento

### Premessa

Il presente documento definisce le linee programmatiche del Consiglio Nazionale delle Ricerche nell'ambito delle attività previste dal Piano Triennale 2015-2017 del Ministero dello Sviluppo Economico sulla Ricerca di Sistema Elettrico. Come indicato nel decreto le attività di pertinenza dell'Ente sono state finanziate con 2,6 M€ per la prima annualità da svolgersi nell' ambito

Successivamente con un secondo decreto in data 7/8 2017 il Ministero ha provveduto ad assegnare lo stesso importo del I anno al II e III anno di attività ma con una diversa ripartizione delle aree di intervento. Nella tabella seguente si fornisce l'entità delle risorse delle varie tematiche assegnate;

	<i>tematiche affidate al CNR</i>	<b>POA 2015</b>	<b>POA 2016</b>	<b>POA 2017</b>	<i>tot per linea</i>
B.1.1	Bioenergia	<b>0,7</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0,7</b>
C.5	Materiali e tecnologie per l'accumulo di energia per il sistema elettrico	<b>0,8</b>	<b>1,3</b>	<b>1,3</b>	<b>3,4</b>
D.3	Processi e macchinari industriali	<b>0,4</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0,4</b>
D.4	Impianti di conversione di energia di piccola taglia	<b>0,5</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>2,5</b>
D.7	Smart cities e Smart communities	<b>0,2</b>	<b>0,3</b>	<b>0,3</b>	<b>0,8</b>
	<b>totali</b>	<b>2,6</b>	<b>2,6</b>	<b>2,6</b>	<b>7,8</b>

Vista la nuova ripartizione, il CNR deve provvedere ad una rimodulazione delle attività che tenga conto del blocco al primo anno di due tematiche.

Quindi, per ottimizzare i progetti e per recuperare il ritardo accumulato rispetto agli altri affidatari, il CNR ha chiesto al MISE di poter articolare le attività secondo il seguente schema:

	<i>tematiche affidate al CNR</i>	<b>POA 2015</b>	<b>POA 2016-2017</b>	<i>tot per linea</i>
B.1.1	Bioenergia	0,7	0	<b>0,7</b>
C.5	Materiali e tecnologie per l'accumulo di energia per il sistema elettrico	0,8	2,6	<b>3,4</b>
D.3	Processi e macchinari industriali	0,4	0	<b>0,4</b>
D.4	Impianti di conversione di energia di piccola taglia	0,5	2	<b>2,5</b>
D.7	Smart cities e Smart communities	0,2	0,6	<b>0,8</b>
<b>TOTALE</b>		<b>2,6</b>	<b>5,2</b>	<b>7,8</b>

In particolare il POA 2015 ha validità dal 1/1/2017 al 31/12/2017, il POA 2016-2017 ha validità dal 1/1/2018 al 31/12/2018. I tempi così suddivisi ci permettono di ridefinire i progetti tenendo conto delle tematiche che devono concludersi al primo anno e di quelle che avranno vita anche nel POA 2016/2017.

#### **Quadro di riferimento programmatico**

Secondo le priorità indicate dalla Direzione Generale per il Mercato Elettrico, le Rinnovabili e l'Efficienza Energetica, il Nucleare del Ministero dello Sviluppo Economico, le Aree Tematiche del Piano Triennale 2015-2017 in cui sono previste le attività del CNR sono, per la prima annualità :

1. B 1.1 Bioenergia
2. C5 Materiali e tecnologie per l'accumulo di energia per il sistema elettrico
3. D3 Processi e macchinari industriali
4. D4 Impianti di conversione di energia di piccola taglia
5. D7 Smart Cities e Smart Communities.

Per la seconda e terza annualità, su richiesta del Mise, sono previste attività nei settori :

6. C5 Materiali e tecnologie per l'accumulo di energia per il sistema elettrico
7. D4 Impianti di conversione di energia di piccola taglia
8. D7 Smart Cities e Smart Communities.

Tali tematiche sono state declinate operativamente in tre progetti esecutivi ed in particolare:

- 1) Sistemi elettrochimici per l'accumulo di energia afferente all' area tematica C5 per tutte e tre le annualità;
- 2) **MI**cro BIO – CHP afferente alle aree tematiche B1.1 (solo per la prima annualità) e D4 per tutte e tre le annualità
- 3) Efficientamento dei processi di produzione e gestione integrata di utenze energivore con fonti

rinnovabili e sistemi di accumulo mediante periferiche ICT in un contesto “Smart District” afferente alla aree tematiche D3 (solo per il primo anno di attività) e D7.

Tutti e tre i progetti saranno attivi per l'intero triennio.

## Progetto Sistemi elettrochimici per l'accumulo di energia

---

### Quadro generale di riferimento

Per sostenere i futuri requisiti in termini di efficienza, disponibilità e flessibilità di accesso, le reti di trasmissione elettrica europee subiranno nel prossimo futuro modifiche sostanziali che necessitano lo sviluppo di nuove architetture d'impianto e di dispositivi che ne incrementino la flessibilità e la capacità di gestire un numero crescente di generatori, modificando l'attuale schema prettamente “distributivo” in “distribuito” con notevole riduzione delle taglie degli impianti di generazione.

Il progetto è organizzato in **6 WP** ed in particolare

### **WP1. Sviluppo di componenti innovativi per batterie ad alta temperatura a cloruri metallici**

I sistemi di accumulo elettrochimico a cloruri metallici operano a temperature superiori a 270°C e fino a circa 300 °C. Sono caratterizzati da valori di densità di energia fino 140 Wh/kg o in termini di densità volumica fino a 200 Wh/l mentre le caratteristiche di potenza specifica permettono di raggiungere livelli fino a 180 W/kg. Tali sistemi sfruttano elettroliti di Na-β"-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> caratterizzati da conduzione cationica mediante ioni sodio. La capacità di queste celle di sopportare condizioni critiche in termini di temperatura e umidità relativa le rende particolarmente adatte a lavorare in contesti ambientali particolari.

L'elevata ciclabilità, l'assenza di self-discharge che è garantita dall'elettrolita solido, la tolleranza rispetto ad eventuali corto-circuiti di questi sistemi favorisce la loro l'applicazione come dispositivi “load-leveling” in combinazione con fonti rinnovabili, dove è necessaria sia una elevata risposta in frequenza ma anche la proprietà di rimanere per periodi più o meno lunghi senza essere utilizzati pur mantenendo le caratteristiche specifiche.

Malgrado queste caratteristiche molto promettenti, i costi elevati non hanno ancora permesso uno sviluppo e relativa produzione su larga scala di questi sistemi. Ciò deriva soprattutto dall'utilizzo di una architettura tubolare per facilitare il sealing mediante laser welding, e la necessità di mantenere il sistema in condizioni di alto vuoto. Tale architettura richiede una interconnessione monopolare caratterizzata da elevate cadute ohmiche con elevate perdite di potenza. Mentre per le applicazioni nel campo delle rinnovabili oltre alla densità di energia è soprattutto richiesta una elevata potenza specifica che potrebbe essere notevolmente favorita da una architettura bipolare. Pertanto L'obiettivo di questa attività è quello di sviluppare una architettura bipolare tramite la messa a punto e l'ottimizzazione di celle basate su elettroliti ceramici planari di Na-β"-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, la realizzazione di sealing compressivi di gasket ceramici e una nuova semplificata geometria di cella. La finalità è di realizzare un dispositivo più economico, più robusto un approccio più semplice per il sealing e di ridurre le cadute ohmiche permettendo così il raggiungimento di potenze elevate rispetto al prototipo realizzato nell'ambito del PT 2012-2014. A ciò dovrà contribuire lo sviluppo di un chimismo adeguato per i sistemi redox impiegati e l'utilizzo di elettroliti più sottili per facilitare il funzionamento con rate più elevate.

## WP2. Sviluppo di componenti innovativi per batterie redox

L'attività interesserà lo studio di materiali elettrodici e separatori polimerici a elevata selettività alla permeazione degli ioni vanadio, fino allo sviluppo di un appropriato design di stack costituito da una componentistica innovativa per Redox Flow Batteries.

Nell'ottica di ridurre i costi totali correlati alla componentistica di stack verranno sviluppati materiali elettrodici ad elevata reversibilità cinetica e stabili nel tempo, in grado di ciclare a elevate correnti. Muovendo dai risultati ottenuti nel precedente PT 2012-2014, verranno sviluppati elettrodi convenzionali supportati su materiali carboniosi, ovvero costituiti da strutture a spinello misti del tipo  $\text{MnCoO}_4/\text{CNF}$ ,  $\text{MnNi}_2\text{O}_4/\text{CNF}$ ,  $\text{CoNi}_2\text{O}_4/\text{CNF}$  etc. Tali elettrodi verranno sintetizzati mediante tecniche di electrospinning, un sistema di elettrofilatura a basso costo, che consente di sintetizzare ossidi di metalli di transizione e nanofibre di carbonio a partire da precursori di sali organici e polimerici, rispettivamente.

Inoltre, si svilupperà un ulteriore sistema a basso costo per la produzione di film carboniosi nanostrutturati con elevata porosità (~ 80%) mediante la deposizione termoforetica di nanoparticelle primarie carboniose (CNP) su substrati inseriti in fiamma. Si valuteranno le caratteristiche chimico-fisiche, morfologiche ed elettrochimiche dei materiali prodotti (degradazione, combustione, annealing) ai fini del loro utilizzo nei sistemi elettrochimici di interesse. Si condurranno studi sull'effetto di post-processing mediante trattamento di annealing termico per carbonizzare/grafitizzare il materiale, inducendo variazioni nanostrutturali che migliorino le caratteristiche elettriche al fine di migliorarne le prestazioni.

Un ulteriore screening verrà condotto su materiali innovativi del tipo carbon-free, ovvero elettrodi non supportati su materiali carboniosi, ma basati su sub-ossidi di titanio a diversi rapporti stechiometrici (es.  $\text{TiNbO}_x$ ,  $\text{TiWO}_x$ ,  $\text{TiMnO}_x$ , ect.) caratterizzati da elevate aree superficiali ed alta conducibilità elettrica. Anche tali materiali verranno realizzati mediante tecnica di electrospinning.

Membrane a scambio anionico a bassa permeabilità verso gli ioni vanadio ed elevata resistenza meccanica verranno sintetizzate mediante elettrofilatura a partire da differenti polimeri quali polisulfone clorometilato (CMPSF) come precursore per tetrametilammonio ed un polimero inerte di rinforzo quale polifenilsulfone (PPSU), ovvero un blend di polibenzimidazolo (PBI) e polieteresulfone sulfonato (SPES). Le stesse membrane verranno preparate anche mediante tecnica di casting. La realizzazione di tali membrane ha lo scopo di ridurre il fenomeno del cross over degli ioni vanadio impedendo così il mescolamento delle soluzioni di elettroliti allo scopo di limitare perdite di capacità della batteria. Caratterizzazioni di conducibilità ionica e Wuptake consentiranno di validarne le proprietà chimico-fisiche, mentre analisi di spettrofotometria UV-Vis, consentiranno la determinazione della permeabilità della membrana in termini di riduzione del crossover degli ioni vanadio tra i compartimenti di reazione ( $< 10^{-8} - 10^{-9} \text{ cm}^2/\text{min}$ ).

Completerà l'attività di sviluppo di componentistica innovativa il parallelo sviluppo di una nuova configurazione di stack per batterie al vanadio con componentistica a basso costo. Uno dei principali costi del prototipo di stack realizzato nella scorsa attività risiedeva nella lavorazione del materiale grafítico e nel sistema di isolamento elettrico tra i componenti. Il nuovo approccio prevederà la costruzione di un piatto realizzato in materiale metallico e polimerico. Il materiale metallico servirà per garantire la conduttività elettrica tra le celle dello stack e a raccogliere/distribuire la corrente sugli elettrodi durante le fasi di carica/scarica. Il materiale polimerico fungerà da guarnizione ed avrà il compito di indirizzare uniformemente l'elettrolita dentro la cella. Il materiale polimerico avrà anche la funzione di isolare elettricamente i canali di adduzione dello stack (manifolds) al fine di ridurre le correnti di auto scarica. Tale soluzione permetterà di ridurre la componentistica di cella al fine di ridurre i costi e facilitare la fase di montaggio. La struttura

generale della cella ricalcherà i concetti dello scorso anno. Tuttavia, sarà necessario progettare nuovi componenti per migliorare l'assemblaggio e ridurre al minimo i pezzi. Se necessario, saranno valutate nuove soluzioni di cella sulla base dell'evoluzione tecnologica e scientifica della componentistica attiva di cella; l'area geometrica sarà superiore a 300 cm<sup>2</sup>.

### **WP3. Caratterizzazione chimico-fisica ex-situ ed elettrochimica in-situ e analisi della degradazione di batterie con diversi chimismi litio-ione soggette a servizi di regolazione della rete elettrica**

Obiettivo principale dell'attività è la verifica dell'andamento delle performance e del decadimento di batterie litio-ione quando utilizzate nei servizi di regolazione della rete elettrica, in modo da ottenere una matrice che tenga in considerazione i chimismi e le prestazioni, riferite allo specifico servizio di rete selezionato.

Tra i chimismi più promettenti sono stati selezionati i seguenti: LiFePO<sub>4</sub>, LiNiMnCoO<sub>2</sub>, LiNixOx, Litio Polimeri. I campioni saranno sottoposti a profili di carica scarica che riproducano, in scala, il servizio di regolazione primaria della frequenza.

Il ciclo di regolazione, già individuato nel precedente PT 2012-2014, sarà applicato ai chimismi selezionati in prove di durata, in modo da poter verificare la degradazione delle prestazioni (capacità, Voc, Efficienza energetica, Efficienza amperometrica) e dei materiali.

### **WP4. Sviluppo di un innovativo processo di accumulo di energia elettrica attraverso la riduzione di CO<sub>2</sub> a combustibili organici attraverso l'utilizzo di SOEC (Solide Oxide Electrolyzer Cell)**

I processi di conversione "Power to Gas" sono divenuti elementi chiave nello sviluppo dei futuri sistemi energetici in Europa e capaci di potere assicurare l'accumulo di significative quantità di energia elettrica sotto forma chimica<sup>1</sup>. Il processo si basa sulla produzione di idrogeno dall'acqua per via elettrolitica e la successiva sintesi di composti chimici differenti (metano, dimetiletere, metanolo, ecc.).

L'attività proposta è volta alla sintesi di metano attraverso la conversione di syngas prodotto per via elettrolitica di anidride carbonica (CO<sub>2</sub>) e acqua in elettrolizzatori ad ossidi solidi (SOEC) operanti a temperatura intermedia (750°C-600°C). Il metano prodotto è iniettato nella rete di gas naturale che diventa quindi il sistema di stoccaggio e distribuzione. Al momento della combustione, il metano così prodotto restituisce all'ambiente la CO<sub>2</sub> assorbita nel processo dando luogo ad un ciclo neutro esente da emissioni di CO<sub>2</sub>. Il processo si basa su tecnologie disponibili o in uno stato avanzato di studio (>TRL3) quali l'elettrolisi in celle SOEC e il processo di metanazione catalitica.

Per favorire la reazione di metanazione, può essere associata al processo principale la separazione selettiva dell'idrogeno dalla miscela in uscita dal reattore condotta a temperature medio-alte (400-800 °C) che oltre a mantenere l'equilibrio di reazione spostato verso la produzione di metano, permette di assorbire il calore di formazione del metano. A questo scopo si rivelano efficaci i processi di separazione non galvanici a membrana densa, estremamente selettivi all'idrogeno (>95%) nel range di temperatura di interesse (400-800 °C).

L'accumulo di energia elettrica sotto forma di metano permette anche di fornire energia elettrica quando richiesto dalla rete contribuendo a ridurre lo sfasamento temporale tra domanda ed offerta tipico delle fonti rinnovabili. Il processo ha in comune, con la produzione di idrogeno elettrolitico da fonti rinnovabili, alcune

problematiche relative allo sviluppo di materiali ceramici per sistemi SOEC, ma rispetto alla semplice produzione di idrogeno garantisce un prodotto finale più facilmente utilizzabile con maggiori vantaggi economici nell'immediato a parità di riduzione di emissioni.

#### **WP5. Sviluppo di componenti innovativi e nuove configurazioni di cella per batterie metallo-aria**

Le batterie Ferro-aria sono caratterizzate da elevata capacità specifica (nominale fino a 960 Ah/kg), elevate densità di energia (fino a 400 Wh/kg), costi ridotti e superiori requisiti di sicurezza rispetto alle tecnologie concorrenti (es. Litio-ione). Si rende, comunque, necessario un aumento delle prestazioni, la riduzione dei costi e un parallelo aumento del ciclo di vita e della ciclabilità rispetto allo stato dell'arte della tecnologia.

Per le batterie metallo-aria a bassa temperatura si rende necessario migliorare la densità di energia dell'anodo che normalmente è un composito di Ferro e Carbone. L'approccio consiste nell'utilizzare sia procedure convenzionali di sintesi (cost-effective) quali ball milling, calcinazione ed affiancare a queste l'utilizzo di metodologie avanzate di elettrospinning in grado di realizzare materiali composti per l'anodo con elevata area superficiale e conducibilità appropriate derivanti da un confinamento fisico monodimensionale (materiali fibrosi).

Nel PT 2015-2017 l'attività riguarderà la messa a punto di additivi a base di solfuri (in particolare di Bismuto) per limitare l'evoluzione dell'idrogeno sull'elettrodo negativo. Inoltre, le sintesi di ossido di ferro tramite procedure di elettrospinning e di tipo "Adams Fusion" verranno ottimizzate in modo da ottenere dimensioni di particelle tali da garantire un buon compromesso in termini di prestazioni e stabilità ai cicli di operazione. Inoltre, si cercherà di ridurre il contenuto di carbone nell'elettrodo di Ferro in modo da aumentare la materia attiva e quindi la capacità, mantenendo una buona conducibilità elettrica dell'elettrodo. Per l'elettrodo positivo ad aria, anche in questo caso l'obiettivo è migliorare la ciclabilità; quindi, particolare attenzione verrà rivolta all'uso di supporti più stabili (nanofibre di carbone, carboni grafitici, etc.). Fra i materiali catalitici si procederà all'ottimizzazione delle perovskiti e degli spinelli sintetizzati nel precedente programma. In aggiunta, altre perovskiti e altri ossidi (anche misti) verranno presi in considerazione per aumentare le prestazioni della batteria in particolare durante la scarica (reazione di riduzione dell'ossigeno). Per aumentare la bifunzionalità del catalizzatore si valuterà la possibilità di utilizzare piccole quantità di metalli nobili (Pd) in combinazione con i materiali non nobili quali perovskiti e ossidi misti. Al fine di ottimizzare le caratteristiche elettrodiche, sia anodiche che catodiche, verrà ulteriormente valutato lo sviluppo di materiali a base di carbonio microporosi, con porosità elevata e modulabile e contenuto variabile (per quantità e tipologia) di eteroatomi e doping metallico. In questo contesto verranno sfruttate le caratteristiche di carboni microporosi ottenuti sia dall'assemblaggio bottom-up di materiali grafenici (strutture 3D e/o fibre) che dal trattamento/attivazione di biomasse carbonizzate in condizioni controllate, in quanto presentano buona conducibilità elettrica, elevata area specifica e superfici facilmente modificabili chimicamente. Infine, si esploreranno metodi di produzione di materiali innovativi nanostrutturati a basso costo con elevata conducibilità (graphite-like) mediante sintesi in fiamma. Si produrranno nanoparticelle primarie (CNP) con distribuzioni dimensionali variabili tra 2-50 nm ed agglomerati con caratteristiche chimico-fisiche tunabili agendo sui parametri di sintesi e post-trattamento.

Per i sistemi metallo aria operanti ad alta temperatura sarà necessario mettere a punto elettroliti ceramici ad ossidi solidi in grado di poter realizzare un abbassamento della temperatura di funzionamento da 800 °C a 600 °C. A tal fine sarà necessario migliorare la morfologia della materia anodica per incrementare la cinetica a bassa temperatura e la reversibilità del sistema. Il funzionamento a 600 °C potrà inoltre ridurre la degradazione e favorire l'utilizzo di sealing compressivi rispetto a quelli vetro-ceramici e quindi di una

architettura di cella semplificata e caratterizzata da una elevata risposta dinamica.

#### **WP6. Dimostrazione di sistemi di accumulo per il Telecom-to-Grid**

In precedenti progetti (incluso il PT 2009-2011) il CNR – ITAE ha sviluppato e realizzato, in collaborazione con aziende italiane ed europee (FIAMM Energy Storage Solutions s.r.l., Loccioni, HTCeramix SA, Bonfiglioli Vectron GmbH, TDE Macno), due sistemi di accumulo avanzato basati su tecnologie Litio, Sodio Nichel Cloruri e Celle a combustibile specificatamente per applicazioni di generazione e accumulo diffuso. Il crescente interesse mostrato da operatori del mondo delle telecomunicazioni per il cosiddetto Telecom to Grid (T2G) ha permesso di poter definire con Ericsson e Telecom Italia un'attività di sperimentazione di sistemi di accumulo innovativi presso una centrale telefonica sita a Palermo in contesto urbano. Il concetto del T2G si basa sull'utilizzo di sistemi di accumulo presenti nelle centrali telefoniche e nei datacenter in *dual use*, sia come UPS che come sistema di accumulo attivo capaci di scambiare energia elettrica con la rete di distribuzione al fine di poter offrire anche servizi al DSO. Le attività di dimostrazione in cooperazione con l'operatore TLC e il DSO locale consentiranno di analizzare limiti e potenzialità dei prototipi sviluppati per tale applicazione ed in una prospettiva di T2G diffuso.



*Sistema di accumulo sviluppato in collaborazione con Loccioni con batterie Litio (Hitachi Chemicals)*



*Sistema di accumulo sviluppato in collaborazione con FIAMM Sonick e HTCeramix/SOLIDpower con batterie Sodio Nichel Cloruri e generatore SOFC*



#### **PRODOTTI MAGGIORMENTE SIGNIFICATIVI NEL TRIENNIO**

- A) Proo-of-concept di cella planare per batteria ad alta temperatura con densità d'energia elettrica volumica e massiva superiore a 200 Wh/l, 140 Wh/kg, rispettivamente e Round trip efficiency > 80% [M36]
- L1B) Realizzazione di un prototipo di batteria VRFB con componentistica a basso costo [M36]
- C) Proof-of-concept di reattore di metanazione integrante stack SOEC.
- D) Prototipo di cella Fe-aria operante a temperature comprese tra 600°C e 750 °C con le seguenti caratteristiche]
- E) Data-set delle prestazioni dei due prototipi in configurazione T2G

#### **Costi del progetto nel triennio**

Il costo del progetto per l'intero triennio ammonta 3,4 M€ di cui 0,68M€ per collaborazioni con Dipartimenti Universitari.

### **Eventuali sovrapposizioni di attività di ricerca e sviluppo con gli altri Affidatari (ENEA e RSE spa)**

L'attività del CNR, sulla base dell'attività scientifica degli altri affidatari della Ricerca di Sistema (RSE ed ENEA nell'ambito del Gruppo di Coordinamento "Ricerche su reti attive, generazione distribuita e sistemi di accumulo") è coordinata e sarà complementare all'attività di questi ultimi, puntando sullo sviluppo e caratterizzazione di sistemi di accumulo avanzati state-of-art (Litio Ione, Na-NiCl<sub>2</sub>, Redox) e sullo sviluppo di materiali e componentistica innovativa con l'obiettivo di sostenerne lo sviluppo tecnologico in termini di riduzione dei costi e incremento delle prestazioni (densità di energia, ciclabilità, durata) fornendo, a conclusione delle attività, dimostratori a scala di laboratorio.

Le seguenti attività sono condotte congiuntamente dai tre affidatari:

- a) Definizione di procedure di prova comuni per sistemi di accumulo
- b) Caratterizzazione di batterie al litio per uso stazionario
- c) Analisi comparativa (energetico-ambientale) di differenti sistemi di accumulo
- d) Comunicazione e diffusione dei risultati

e pertanto non vi sono sovrapposizioni con gli altri affidatari (ENEA e RSE spa).

## **Progetto: Micro Bio-CHP**

---

### **Quadro generale di riferimento**

La necessità di ridurre le emissioni serra accoppiata alla disponibilità limitata delle fonti di combustibili fossili hanno reso le risorse rinnovabili sempre più attraenti per le economie mondiali.

L'obiettivo di una conversione di energia rinnovabile al 100% può diventare realizzabile solo attraverso la combinazione e l'integrazione di fonti di energia diversificate. In un arco temporale di medio termine, sistemi energetici ibridi basati su fonti rinnovabili e fossili rappresentano un approccio graduale a questo obiettivo con una riduzione della componente non rinnovabile. Tuttavia, l'ibridazione di fonti di energia differenziate coinvolge alcune criticità dovute principalmente alla caratteristica non programmabilità delle sorgenti rinnovabili più utilizzate (solare ed eolica) che, per tale natura, non possono soddisfare la domanda di energia né su scala oraria né giornaliera quando utilizzate da sole. L'uso di risorse programmabili, ancorché non rinnovabili come i combustibili fossili, è quindi necessario per assicurare la compensazione dello squilibrio tra offerta e domanda di energia. I generatori elettrici basati su motori a combustione interna o esterna, accoppiati a sistemi di accumulo, possono realizzare questo obiettivo compensando gli squilibri di rete. Tale aspetto è stato uno degli obiettivi del progetto *Bioenergia Efficiente* sviluppato dal CNR nel precedente Accordo di Programma (PT 2012-2014).

In un futuro non troppo lontano, la biomassa e i combustibili da essa derivati potrebbero costituire le fonti di energia primaria in sostituzione dei combustibili fossili. L'elaborazione di tale prospettiva richiede lo sviluppo di sistemi di conversione della bioenergia che siano flessibili, efficienti e a basso impatto ambientale. Il Progetto intende affrontare gli aspetti specifici della cogenerazione sulla scala tipica delle applicazioni residenziali basata sull'utilizzo di combustibili rinnovabili. A questo scopo è focalizzato sullo sviluppo di soluzioni innovative per l'utilizzo ottimale di biomasse e biocombustibili gassosi in impianti di conversione di energia di piccola taglia, così come del cascame termico disponibile. Ciò ha richiesto l'integrazione delle due



Linee Progettuali “Bioenergia Efficiente” e “Micro Cogenerazione Flessibile” afferenti rispettivamente ai temi B.1.1 *Bioenergia* e D.4 *Impianti di conversione di energia di piccola taglia* del Piano Triennale 2015-2017.

Il Progetto nelle sue linee essenziali si allinea alle tematiche e gli scenari individuati dall’Unione Europea che prevedono un incremento significativo dell’utilizzo di energia rinnovabile in connessione a sistemi H&C e CHP (ad es. il documento “Reference Scenario 2016, Energy, transport and GHG emissions Trends to 2050, Main results” pubblicato dalla Commissione Europea a luglio del 2016).

#### **LINEA PROGETTUALE “BIOENERGIA FLESSIBILE ED EFFICIENTE”**

In tale Linea, le attività riguardano lo sviluppo di sistemi per la conversione efficiente e a basso impatto ambientale del contenuto energetico delle biomasse. In particolare, le ricerche sono concentrate sulle tecnologie di gassificazione delle biomasse e sulle tecnologie per la produzione diretta di energia elettrica mediante combustione di biomasse in sistemi a basse emissioni ed energeticamente efficienti.

Per quanto concerne la gassificazione, verranno sviluppati due approcci con differente grado di maturità tecnologica. Il primo è basato su processi di gassificazione di biomasse a letto fluido per la produzione di syngas con specifiche richieste. Le attività riguarderanno nello specifico lo sviluppo di strategie combinate di trattamento della biomassa (macinazione, essiccazione, trattamenti di rimozione di inorganici, pellettizzazione, torrefazione) e la valutazione delle caratteristiche del gas prodotto al variare del pretrattamento e delle biomasse utilizzate. Il secondo approccio, in una fase più speculativa, riguarda lo sviluppo su scala di laboratorio di un pirogassificare innovativo dove l’energia richiesta per il riscaldamento della biomassa è integrata da energia solare. In questo caso, l’obiettivo è lo studio delle potenzialità del sistema, al variare della composizione della biomassa, in termini di efficienza energetica e di resa in syngas.

Per quanto riguarda la produzione diretta di energia elettrica mediante combustione di biomasse, il tema verrà affrontato attraverso lo sviluppo della tecnologia del bioslurry (sospensione di biomassa micronizzata in un liquido combustibile o acqua). Attraverso tale tecnologia si analizzeranno le potenzialità energetiche della biomassa tal quale in una filiera tecnologica parallela alla conversione termochimica mediante gassificazione. La tecnologia del bioslurry ha il vantaggio di consentire l’utilizzo di biomasse, in sistemi di generazione elettrica disegnati per l’utilizzo di combustibili liquidi, con minime modifiche impiantistiche e con bassi costi energetici in ragione di una semplificazione degli stadi di pretrattamento della biomassa. Questa tematica, introdotta nel precedente AdP, ha dato riscontro di notevoli potenzialità su scala di laboratorio. Nel presente progetto gli studi verranno finalizzati ad applicazioni su scala reale. Nello specifico, le attività riguarderanno la formulazione di bioslurry formati con biomasse di diversa natura e caratteristiche e della loro ottimizzazione per la generazione di spray da utilizzare in combustori prototipo.

La Linea Progettuale è, pertanto, operativamente strutturata nei seguenti WP:

#### **WP1 Gassificazione di biomasse in reattore a letto fluido**

Le attività prevedono la messa a punto di strategie combinate (macinazione, essiccazione, trattamenti di rimozione di inorganici, pellettizzazione, torrefazione, etc.) in processi di gassificazione di biomasse a letto fluido per la produzione di un syngas con specifiche richieste (potere calorifico, concentrazione di particolato, tar, alcali, cloruri, solfuri, etc.) per utilizzo in motori a combustione interna, combustori tradizionali od innovativi associati a motori stirling.

I principali risultati attesi sono:

- Ottimizzazione di pretrattamenti termici e/o chimici nei processi di gassificazione a letto fluido

- Ottimizzazione del processo di gassificazione catalitica in letto fluido di biomasse diverse tipologie di biomasse e/o loro miscele

### **WP2 Pirogassificazione di biomasse “solar assisted”**

Le attività sono mirate allo sviluppo di un sistema di pirogassificazione di biomasse innovativo assistito da energia solare. In particolare, si intende realizzare un reattore di gassificazione dove l'energia solare integri la richiesta energetica endotermica del processo di pirogassificazione. Nello specifico, l'energia solare concentrata è funzionale all'ottenimento di velocità di riscaldamento estremamente elevate tali da determinare fenomeni chimici peculiari nella fase di pirolisi e nella fase di gassificazione della biomassa.

I principali risultati attesi sono:

- Pirogassificatore da banco integrabile con energia solare.
- Pirogassificazione di biomasse di varia origine e caratterizzazione chimica dei prodotti

### **WP3 Bioslurry per la generazione elettrica**

La tecnologia del bioslurry, ovvero di una sospensione di biomassa micronizzata in un liquido combustibile o acqua, come metodologia per l'utilizzo di biomasse in sistemi di generazione elettrica progettati per combustibili liquidi, è stata introdotta nel precedente AdP. Tali studi hanno dimostrando le notevoli potenzialità di tale tecnologia su scala di laboratorio. Nel presente progetto le attività concluderanno gli studi sulle caratteristiche di combustione dei bioslurry, condotti nel triennio precedente, mediante l'estensione della matrice di formulazione alle composizioni più adatte ad un utilizzo su scala reale.

Le attività riguarderanno la formulazione di bioslurry formati con biomasse di diversa natura e caratteristiche e della loro ottimizzazione per la produzione di spray.

I principali risultati attesi sono:

- Formulazione di bioslurry formati con biomasse di diversa natura
- Caratterizzazione proprietà di combustione

### **LINEA PROGETTUALE “MICRO COGENERAZIONE FLESSIBILE”**

Il tema D.4 *Impianti di conversione di energia di piccola taglia* è affrontato considerando diverse soluzioni impiantistiche in grado di convertire efficientemente biocombustibili. Gli studi riguarderanno sistemi basati su motori a combustione esterna (motore Stirling) ed interna (motore alternativo a rapporto di compressione variabile) della potenza di 3-6 kWe. Saranno inoltre valutate concezioni innovative di cogenerazione basate sull'utilizzo combinato di combustione ed irraggiamento solare.

I due motori primi, rispettivamente a combustione esterna ed interna, servono a realizzare un sistema di produzione di energia elettrica 100% basato su bioenergia in grado di soddisfare le richieste energetiche in termine di potenza media e di picco. Uno degli aspetti più critici nella generazione di energia elettrica da fonti rinnovabili è la necessità di disporre di un sistema in grado di rispondere e di adeguarsi flessibilmente ai flussi energetici richiesti. Il motore Stirling, grazie alla configurazione con combustore esterno, risulta ottimale per lo sfruttamento energetico di biomasse di diversa natura. Ma proprio per la sua intrinseca configurazione (combustore, scambiatore, generatore), le costanti di tempo caratteristiche della conversione energetica complessiva non sono compatibili con le veloci richieste energetiche dell'utenza. Pertanto, in parallelo allo

Stirling, si intende sviluppare un'unità da 3-6 kWe a rapido adeguamento del carico elettrico richiesto basato su di un motore a combustione interna innovativo. In particolare, si intende realizzare un prototipo di motore a c.i. a "pistoni opposti" con correnti unidirezionali ed un'unica camera di combustione. Tale schema, oltre a mirare alla decisiva riduzione degli ingombri complessivi e al quasi totale annullamento delle vibrazioni (aspetti decisivi per applicazioni residenziali), consente la rapida variazione del rapporto di compressione e della durata della fase di scarico. Il controllo di questi due fattori permette di contenere il fenomeno della detonazione al variare della composizione del gas combustibile aspirato (aspetto di fondamentale importanza nel caso di alimentazione con biogas o syngas) e con un beneficio notevole su rendimento globale ed emissioni. Un sistema di controllo e gestione dei flussi energetici consentirà l'accoppiamento dei due motori e la gestione del loro funzionamento rispetto alle richieste energetiche dell'utenza (allo scopo si utilizzeranno i database disponibili a livello nazionale per le varie tipologie di utenze). Nell'ottica di uno sfruttamento quanto più razionale possibile della risorsa energetica da biomassa, verranno infine effettuati confronti fra l'utilizzo di motori Stirling e quello di impianti basati su cicli ORC, nonché verrà studiata la possibilità di integrare gli stessi in diverse configurazioni, sia in serie che in parallelo. L'utilizzo in serie permetterebbe la realizzazione di un sistema di cogenerazione ad alta efficienza grazie al recupero del calore refluo dallo Stirling. L'attività si focalizzerà su taglie e dimensioni adatte ad un utilizzo in ambito residenziale.

La realizzazione di impianti di cogenerazione basati su motore Stirling (motore a combustione esterna) efficienti e flessibili, in grado cioè di ottimizzare l'uso di syngas e biomasse di varia tipologia e qualità, richiede lo sviluppo di combustori specificamente progettati. Le attività relative al sistema di cogenerazione basato su motore Stirling sono, pertanto, completate con lo studio di un bruciatore ciclonico funzionante in modalità MILD. Tale bruciatore consente di realizzare emissioni di ossidi di azoto inferiori a 10 ppm con un elevatissimo grado di conversione e sostanziale assenza di particolati submicronici grazie all'assenza delle zone di reazione ad altissima temperatura tipiche dei sistemi tradizionali. Le potenzialità di tale bruciatore per la combustione di syngas prodotti dalla gassificazione di biomasse è già stata verificata per una composizione tipica. Nell'ambito di questo AdP si propone di estendere il campo a syngas di composizione varia e di sperimentare, per la prima volta, l'utilizzo dei bioslurry prodotti nell'ambito del presente progetto (Linea Progettuale "Bioenergia Flessibile ed Efficiente"). Verrà infine valutato l'accoppiamento del bruciatore Mild al motore Stirling per la generazione di energia elettrica efficiente ed a basse emissioni.

Come sopra anticipato, la necessità di sviluppare un sistema di cogenerazione in grado di rispondere e di adeguarsi flessibilmente ai flussi energetici richiesti dall'utenza, richiede, in parallelo al motore Stirling, un'unità a rapido adeguamento del carico elettrico che, nel presente progetto è realizzata mediante un motore a combustione interna innovativo. La peculiare caratteristica del motore qui proposto è la capacità di adeguare velocemente il carico ed, in particolare, di essere in grado di utilizzare efficientemente biogas/syngas di composizione variabile. Naturalmente, la reale efficienza di un sistema energetico, ed in particolare la durabilità dello stesso, si basa sull'ottimizzazione dell'intera filiera. Allo scopo, il sistema di micro cogenerazione è completato con l'integrazione di una unità di gassificazione per la produzione di syngas e del sistema di cleaning per l'abbattimento di CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>S.

Nell'ambito dei sistemi di micro-cogenerazione che utilizzano energie rinnovabili è previsto, infine, lo sviluppo di un sistema innovativo basato sull'utilizzo combinato dell'entalpia di combustione e della radiazione solare per la generazione di un fluido ad alto contenuto entalpico. Con tale tecnologia si prevede di realizzare un sistema modulare costituito da una serie di bruciatori a diffusione di piccola taglia (circa 500 W per singola unità).

La Linea Progettuale è, pertanto, operativamente strutturata nei seguenti WP:

**WP1 Microgenerazione efficiente di energia basata sull'integrazione di motori Stirling e ORC**

Le attività riguardano lo sviluppo di sistemi di cogenerazione/trigenerazione di piccola taglia basati sul ciclo Stirling. Nell'ottica di uno sfruttamento quanto più razionale possibile della risorsa energetica da biomassa, verranno effettuati confronti fra l'utilizzo di motori Stirling e quello di impianti basati su cicli ORC (Organic Rankine Cycle), nonché verrà studiata la possibilità di integrare gli stessi in diverse configurazioni, sia in serie che in parallelo. L'attività si focalizzerà su taglie e dimensioni adatte ad un utilizzo in ambito domestico/condominiale.

La realizzazione di impianti di cogenerazione a combustione esterna (motore Stirling) efficienti e flessibili, in grado cioè di ottimizzare l'uso di syngas e biomasse di varia tipologia e qualità, richiede lo sviluppo di combustori specificamente progettati. Le attività relative al sistema di cogenerazione basato su motore Stirling sono, pertanto, completate con lo studio di un bruciatore ciclonico funzionante in modalità MILD. Tale bruciatore consente di realizzare emissioni di ossidi di azoto inferiori a 10 ppm con un elevatissimo grado di conversione e sostanziale assenza di particolati submicronici grazie all'assenza delle zone di reazione ad altissima temperatura tipiche dei sistemi tradizionali. Le potenzialità di tale bruciatore per la combustione di syngas prodotti dalla gassificazione di biomasse è già stata verificata per una composizione tipica. Nell'ambito di questo AdP si propone di estendere il campo a syngas di composizione varia e di sperimentare, per la prima volta, l'utilizzo dei bioslurry prodotti nell'ambito del presente progetto (Linea Progettuale "Bioenergia Flessibile ed Efficiente"). Per quanto riguarda i bioslurry, verranno valutate diverse configurazioni impiantistiche/tecnologiche per la loro atomizzazione e studiate le caratteristiche di atomizzazione di tali fluidi non-Newtoniani al variare dei parametri operativi (pressione, portate, temperatura, ecc.). Verrà infine valutato l'accoppiamento del bruciatore Mild al motore Stirling per la generazione di energia elettrica efficiente ed a basse emissioni.

I principali risultati attesi nel triennio sono:

- Impianto sperimentale per lo studio del funzionamento di un sistema di microgenerazione cogenerativo/trigenerativo basato su motore Stirling
- Caratterizzazione delle prestazioni energetiche ed ambientali dell'impianto (emissioni inquinanti della sorgente primaria ed efficienze di conversione energetica)
- Modellazione e simulazione dell'impianto basato su motore Stirling
- Modello CFD 3D dell'intera macchina ORC (Whole ORC Model – WOM)
- Studio di un sistema integrato di piccola taglia per la conversione di energia basata su motore Stirling e impianto ORC
- Impianto spray e caratterizzazione spray di bioslurry per utilizzo in bruciatori prototipo
- Bruciatore MILD con potenza termica di 10 kW e
- Prestazioni del bruciatore al variare del combustibile (syngas, bio-oli, biomasse solide/slurry)
- Sviluppo di un sistema di controllo e gestione dei flussi energetici per l'accoppiamento dei diversi sistemi di conversione (Stirling, ORC, motore c.i. (vedi WP2)) e la gestione del loro funzionamento rispetto alle richieste energetiche dell'utenza

**WP2 Sistema di Microgeneratore da 3 kW elettrici innovativo**

La proposta consiste nel realizzare un'unità da 3 kW<sub>e</sub> a rapido adeguamento del carico elettrico richiesto dall'utenza e basata su di un motore a combustione interna innovativo che intende affrontare e risolvere le problematiche tipiche di tali unità (ridotto rendimento elettrico, elevato tasso di rumorosità e di vibrazioni,



elevato costo di acquisto). Ulteriore caratteristica dell'unità è la capacità di utilizzare efficientemente biogas/syngas in un ampio intervallo di composizioni. Le attività riguarderanno, pertanto, anche studi relativi a sistemi ottimizzati di gassificazione e di cleaning ed upgrading del gas e delle loro caratteristiche di ignizione.

Per quanto riguarda la gassificazione, le attività prevedono la messa a punto di strategie combinate in processi di gassificazione di biomasse a letto fluido per la produzione di un syngas con specifiche richieste (potere calorifico, concentrazione di particolato, tar, alcali, cloruri, solfuri, etc.) per utilizzo in motori a combustione interna. In particolare si effettuerà l'ottimizzazione dei parametri operativi del processo di gassificazione (mediante utilizzo di gassificatore a letto fluido con potenzialità da 40kWth) e la determinazione dell'efficienza di conversione in termini di qualità di syngas prodotto mediante prove di gassificazione al variare del rapporto aria/combustibile e steam/combustibile, della velocità superficiale dei gas, della temperatura, dei materiali del letto, tipologia di pretrattamento e sistemi catalitici per l'abbattimento degli inquinanti. I biocombustibili gassosi secondari derivati da biomasse e residui organici necessitano di specifici trattamenti di purificazione prima di ulteriori impieghi. Tra i principali inquinanti da rimuovere vi è l'acido solfidrico (H<sub>2</sub>S), un composto tossico che già in concentrazioni molto basse (poche ppm) comporta problemi di corrosione delle condutture e serbatoi e che in processi di combustione, porta alla formazione di SO<sub>2</sub> e acido solforico. Inoltre, la necessità di un vettore ad alto contenuto energetico richiede lo studio di sistemi di abbattimento della CO<sub>2</sub>. Il tema della gassificazione è, pertanto, integrato con le attività di purificazione e upgrading del biocombustibile gassoso.

I principali risultati attesi sono:

- Mappa di ignibilità di miscele gassose ad alto tenore di CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub> a pressioni tipiche del motore c.i. innovativo
- Abbattimento di CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>S mediante chemisorbimento su solidi funzionalizzati con gruppi amminici.
- Realizzazione e test del microgeneratore e prove estensive di generazione elettrica.
- Ottimizzazione del processo di gassificazione catalitica in letto fluido
- Configurazioni reattoristiche innovative nel processo di gassificazione di biomasse a letto fluido
- Abbattimento di CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>S mediante chemisorbimento su solidi funzionalizzati con ossidi metallici misti o gruppi amminici.

### **WP3 Sviluppo e prova di un sistema combinato combustione/irraggiamento solare per la produzione di energia elettrica e termica da sistemi di mini e micro-cogenerazione**

L'obiettivo del WP è lo sviluppo di un modulo di bruciatore a diffusione di piccola taglia (500 W) che utilizzi il flusso termico solare concentrato in un fluido vettore derivante dalla combustione. Con tale tecnologia si prevede di realizzare un sistema modulare costituito da una serie di bruciatori a diffusione di piccola taglia (circa 500 W per singola unità). Il combustore sarà alimentato con combustibili di scarso pregio quali ad esempio syngas non purificato, contenenti aromatici o residui carboniosi (tar, fasi condensate ecc.) che producono fiamme con più elevata concentrazione di "assorbitori" in grado di assorbire adeguatamente la radiazione solare incidente. Nonostante l'alta concentrazione di fuliggine e altre specie inquinanti si ottimizzeranno i parametri operativi al fine di stabilizzare fiamme non-smoking; inoltre l'ossidazione della fuliggine sarà favorita dall'incrementata temperatura della fiamma per effetto dell'assorbimento della radiazione solare concentrata. Si valuterà l'utilizzo di tale sistema innovativo accoppiato ad un ciclo ORC per la realizzazione di un impianto di micro-cogenerazione ad alta efficienza e basse emissioni.

I principali risultati attesi sono:

- Studio modellistico di una fiamma a diffusione combinata con la radiazione solare concentrata; individuazione delle condizioni operative che massimizzino la potenza termica prodotta e progettazione dell'apparato sperimentale.
- Realizzazione di un modulo di bruciatore a diffusione di piccola taglia (500 W) che utilizzi il flusso termico solare concentrato in un fluido vettore derivante dalla combustione e test di validazione.

### **Sovrapposizione e coordinamento con attività di ENEA e RSE**

Non si rilevano attività in sovrapposizione a ricerche sviluppate nell'ambito degli accordi di programma degli altri affidatari ENEA ed RSE. Verrà comunque eseguito un monitoraggio continuo delle attività svolte così da verificare la complementarità e sinergia degli studi e dei risultati conseguiti.

### **Costi del progetto nel triennio**

Il costo del progetto per l'intero triennio ammonta 3,2 M€ di cui 0,64M€ per collaborazioni con Dipartimenti Universitari.

## **Progetto: Efficientamento dei processi di produzione e gestione integrata di utenze energivore con fonti rinnovabili e sistemi di accumulo mediante periferiche ICT in un contesto "Smart District"**

---

### **Quadro generale di riferimento**

Il sistema elettrico nazionale sta attraversando una fase di profonda trasformazione in cui la classica architettura gerarchica adottata per la produzione, la distribuzione e il consumo dell'energia elettrica viene ad essere soppiantata da modelli di tipo distribuito più efficienti e sostenibili volti a favorire la produzione diffusa di energia da fonti rinnovabili, l'integrazione di sistemi di accumulo di energia ed un utilizzo locale dell'energia prodotta. Questo è reso possibile anche dal diffondersi di utenti finali sempre più avanzati in grado di implementare in tempo reale azioni di Demand Response (DR) per ottimizzare la domanda di energia in base alla disponibilità da fonti non programmabili. Tali trasformazioni stanno facendo emergere con forza il concetto di distretti energetici intelligenti (o *Smart Districts*) in cui si punta a realizzare un elevato grado di integrazione tra la generazione distribuita dell'energia e differenti categorie di utenti finali, dagli edifici intelligenti ai moderni sistemi di produzione. Gli *Smart Districts* saranno uno dei componenti fondamentali delle Smart Cities del futuro, visto che contribuiranno a rendere le Smart Cities efficienti dal punto di vista energetico. In particolare, è sempre più chiaro che i futuri distretti energetici non saranno classificabili in base ad una unica destinazione d'uso (e cioè residenziali, commerciali, rurali od industriali), ma avranno una natura fortemente mista, ed in particolare legata alla co-esistenza nello stesso distretto di zone abitative e zone di produzione industriale.

Questo è dovuto anche alla recente evoluzione dell'industria manifatturiera ed allo sviluppo di un modello produttivo basato sulle mini-fabbriche, capaci di realizzare prodotti personalizzati, economici con tempi di consegna brevi e vicini all'utente finale. Il ridimensionamento e l'efficientamento energetico del sistema produttivo di una fabbrica rappresenta un'opportunità di ricollocamento dell'industria manifatturiera vicino ai clienti, e più in generale all'interno dell'ambiente urbano. Lo scopo principale del progetto è lo studio e la realizzazione di sistemi di efficientamento energetico per Smart District in quest'ottica, cioè nella prospettiva

della presenza all'interno dello Smart District di realtà eterogenee inclusive di impianti industriali avanzati. In particolare, il progetto si articola su quattro direttrici principali: (i) l'efficientamento del consumo energetico di macchinari ed impianti industriali; (ii) il monitoraggio, tramite tecnologie IoT, del consumo e produzione energetica dei dispositivi e macchinari e lo sviluppo di una piattaforma ICT sicura per il brokeraggio energetico nello Smart District; (iii) lo studio di nuove architetture di potenza per la gestione di flussi energetici bidirezionali all'interno di sistemi per Smart District, e (iv) lo sviluppo di tecnologie per il recupero energetico. Tali direttrici vengono brevemente presentate nel seguito.

L'efficace integrazione della fabbrica all'interno del distretto energetico urbano richiede profonde trasformazioni del processo produttivo anche in ambito di efficientamento energetico. Infatti, oggi le fabbriche interagiscono con il sistema energetico sostanzialmente con una logica di consumo. La potenza viene consumata in relazione alle necessità del processo produttivo ed i relativi costi vengono imputati - a seconda del contratto - tipicamente su prezzo fisso e/o fascia oraria. Gli interventi di ottimizzazione dei consumi energetici vengono essenzialmente fatti in ottica di massimizzazione dell'efficienza, quindi riduzione dei consumi a parità di quantitativo di bene prodotto. La generazione diffusa da fonti energetiche rinnovabili che caratterizza il distretto energetico, richiede un ripensamento totale del paradigma di consumo. Le fabbriche, soprattutto quello maggiormente energivore, devono trasformarsi in consumatori intelligenti ed attivi, indirizzando strategie di utilizzo tali da considerare la disponibilità di energia rinnovabile e rimodulando di conseguenza il profilo di consumo. Uno sviluppo di questo tipo permetterebbe di estendere fortemente la flessibilità (e la conseguente disponibilità) rispetto agli attuali programmi di DR su carico prefissato, che deve risultare ovviamente molto basso per evitare di disturbare la produzione. Ciò richiede un cambio totale di paradigma, evolvendo dalle odierne politiche di gestione e controllo del processo produttivo mono-obiettivo (e.g. massimizzazione produttività) verso approcci multi-obiettivo di nuova generazione (e.g. produttività, efficienza energetica ed inseguimento del profilo di consumo ottimale). Le fabbriche potrebbero migliorare i margini operativi riducendo i costi energetici, da un lato riconfigurando la produzione in base al prezzo orario (e.g. mercato day-ahead), dall'altro contribuendo attivamente alla realizzazione di un mercato con costi ridotti.

Tale obiettivo necessita una nuova concezione dei sistemi e tecnologie di controllo e gestione processo, adottando tecniche model-based auto-ottimizzanti. Chiaramente, l'ottenimento di un sistema di gestione e controllo del processo produttivo "globalmente efficiente" in termini energetici richiede un approccio integrato. Infatti, intervenendo singolarmente sui componenti di controllo di basso livello (cioè, i PLC) è possibile migliorare le performance di specifici componenti meccatronici o macchinari ma il comportamento del sistema complessivo può risultare comunque inefficiente. Ovviamente, prerequisito per una gestione ottimale dell'efficienza energetica del processo produttivo è quello di avere una *metodologia generale per l'assessment energetico dei singoli macchinari* utilizzati negli impianti produttivi, caratterizzati da diversissime tipologie costruttive e condizioni di lavoro variabili, data anche la continua riduzione delle dimensioni dei lotti di produzione anche nella prospettiva della "mass customization" secondo i paradigmi Industry4.0. È opportuno sottolineare che la Comunità Europea ha stimolato diverse iniziative per regolamentare l'efficienza energetica dei macchinari di produzione, nell'ambito del più generale Ecodesign of Energy-related Products (ErP-Directive 2009/125/EC): la Self Regulatory Initiative di CECIMO (associazione europea dei costruttori di macchine utensili e robot), lo studio preliminare Eco Machine Tools degli istituti Fraunhofer IZM e IPK, il Point System Study (coordinato dal Waide Strategic Efficiency), a cui ITIA-CNR ha partecipato. Nonostante i notevoli sforzi, non si è ancora giunti alla definizione di una metodologia condivisa, e questo è uno degli obiettivi di questo progetto.

Tali tecnologie di ottimizzazione energetica necessitano di nuovi sistemi di monitoraggio integrato, basati il

più possibile su tecnologie open source e plug&play. In quest'ottica, l'integrazione di tecnologie IoT è fondamentale, perché permette un monitoraggio continuo del processo produttivo, e quindi una analisi dei profili di consumo energetico. Ciò può essere sfruttato sia per scoprire malfunzionamenti attuali o futuri (in un'ottica di manutenzione predittiva), che per capire come meglio configurare il processo produttivo per un'ottimizzazione del risparmio energetico. Nell'ottica degli Smart District, l'applicazione di tecnologie IoT non si limita al monitoraggio del profilo energetico (sia degli impianti industriali che delle altre realtà del Distretto), ma possono essere sfruttate anche per la realizzazione di soluzioni avanzate per la gestione della produzione distribuita dell'energia ed il suo consumo all'interno di uno stesso distretto. L'integrazione all'interno di uno stesso distretto energetico di diverse categorie di utenti finali con requisiti energetici e profili di consumo molto differenti; diverse tipologie di carichi attivi e passivi; sistemi di accumulo stazionario e mobile (i veicoli elettrici) dell'energia elettrica; ed unità di generazione di piccola taglia dislocate su un territorio molto ampio e caratterizzate da potenza piuttosto ridotte, richiedono una complessa gestione dei flussi energetici. In questo contesto emerge e si sviluppa la nuova figura dell'Aggregatore che fornisce *servizi di brokeraggio energetico, al fine di coordinare gli scambi di energia sia all'interno che all'esterno del distretto energetico, e regolare le interazioni economiche di compravendita dell'energia sul mercato nazionale*. Le sfide tecnologiche per la realizzazione di questo scenario vanno affrontate attraverso un approccio trasversale ed interdisciplinare che, partendo da un'analisi previsionale nel breve e nel lungo periodo di diffusione di sistemi distribuiti di generazione, accumulo ed utilizzo dell'energia elettrica, e prevedendone diversi schemi di aggregazione ad elevato livello gerarchico, integri competenze legate a sistemi innovativi di conversione dell'energia elettrica con competenze relative ad architetture di comunicazione e gestione che siano aperte, interoperabili, sicure ed affidabili. Infatti da un lato è necessario sviluppare *piattaforme aperte ed interoperabili per comunicazione e la raccolta di dati* da parte di dispositivi e macchinari (ad esempio presenti nell'ambiente industriale), sviluppando modelli distribuiti per l'estrazione di conoscenza dai dati raccolti. Dall'altro è necessario predisporre *piattaforme di comunicazione che possano abilitare un mercato peer-to-peer dell'energia elettrica* in cui le apparecchiature possono acquistare e vendere energia automaticamente, in base ai criteri definiti dall'utente in modo affidabile e sicuro. A tale scopo l'emergente tecnologia delle blockchain verrà presa in considerazione.

Particolare rilievo assume inoltre lo studio di nuove architetture di potenza che siano capaci di meglio gestire i flussi energetici bidirezionali che emergono nel normale funzionamento di uno Smart District. Infatti, l'interconnessione di convertitori elettronici di potenza alla rete è stata fatta per lungo tempo mediante raddrizzatori trifase di tipo passivo, combinati con induttanze collocate sul lato a corrente alternata o continua. Questi raddrizzatori sono semplici, raggiungono elevate efficienze e sono robusti, ma comportano una distorsione armonica delle correnti (THDi) tipicamente del 30-50% e mostrano un fattore di potenza relativamente basso. In aggiunta, non consentono l'inversione del flusso di potenza e non sono dunque adatti ad applicazioni emergenti, come i sistemi smart grid o di generazione distribuita. Alcune normative attuali (e soprattutto quelle di prossima emissione), che prevedono limiti rigorosi di emissioni armoniche, hanno limitato l'utilizzo dei semplici raddrizzatori a diodi o a tiristori, favorendo la diffusione di altre tipologie di convertitori. Tra di esse, le più utilizzate sono quelle dei raddrizzatori attivi con modulazione PWM a tensione o a corrente impresse (voltage/current source rectifiers, VSRs e CSRs). I raddrizzatori attivi permettono un fattore di potenza unitario, una distorsione di corrente sotto il 5% e un'elevata densità di potenza, ma comportano una riduzione dell'efficienza in confronto alle soluzioni passive. Inoltre vi sono numerose normative che definiscono i limiti delle emissioni di armoniche di tensione e corrente in rete, tra cui le norme CEI EN 50160 e CEI EN 61000-2-4, e lo standard IEEE Std 519-2014. Il filtro d'ingresso è uno degli elementi chiave del convertitore, in quanto ne accresce il volume, ne riduce il rendimento ed influenza la stabilità del sistema di controllo. È dunque indispensabile lo sviluppo di schemi di controllo e convertitori che siano in





grado di ridurre i requisiti sui filtri stessi e nel contempo il contenuto armonico delle correnti.

Come è stato evidenziato precedentemente, una delle caratteristiche essenziali del distretto energetico è l'utilizzo di fonti energetiche rinnovabili e di tecnologie ad alta efficienza per il recupero energetico. In questo ambito una tecnologia interessante è rappresentata dai generatori termoelettrici (TEG) ad effetto Seebeck per la conversione di energia termica in energia elettrica, che è considerata adatta per tutte quelle applicazioni in cui il costo, la silenziosità, il basso peso e l'affidabilità siano tra le caratteristiche ricercate o comunque sufficientemente importanti per compensare la non elevata efficienza di questi dispositivi (5-6%), soprattutto se la differenza di temperatura tra giunto caldo e giunto freddo può essere fornita e mantenuta senza considerarne il costo. In questo caso, la bassa efficienza di conversione non è più un problema e la generazione termoelettrica permette di trasformare il freddo in elettricità a basso costo ottenuta da sistemi silenziosi, sicuri, assimilabili ai motori termici (vedi come esempio il recupero del freddo proveniente dai serbatoi di LNG dove  $T_h=5-10\text{ }^\circ\text{C}$  e  $T_c=-162\text{ }^\circ\text{C}$ ). Per applicazioni di piccola taglia i TEG sono interessanti come dispositivi ancillare nella razionalizzazione della spesa energetica attraverso il miglioramento dell'efficienza complessiva del sistema. In questo caso il recupero dell'energia termica si configura come produzione di energia elettrica aggiuntiva per l'alimentazione di dispositivi e sensori non collegati alla rete elettrica, ad esempio lungo i gasdotti o in stabilimenti industriali di grandi dimensioni. Un discorso a parte meritano le applicazioni di bassissima potenza in condizioni di bassa exergia, come le reti wireless di sensori. In questo caso la ricerca è indirizzata verso lo sviluppo di dispositivi TEG a base polimerica, costituiti da materia prima ampiamente disponibile e la cui fabbricazione può essere progettata per la produzione di moduli a basso costo, leggeri e meccanicamente flessibili. Per tutte queste applicazioni, la sfida alla base della generazione termoelettrica è lo sviluppo di materiali efficienti e la loro integrazione nella componentistica.

### Struttura del Progetto

Il progetto è strutturato intorno alle seguenti cinque linee di attività principali.

**WP1: Sistemi di controllo avanzati model based per l'ottimizzazione congiunta delle performance produttive e dei consumi energetici.** Le attività di questo WP sono rivolte alla progettazione e messa a punto di moduli termoelettrici 1) inorganici a base di tetraedriti e siliciuri e 2) organici con matrice "attiva" polimerica (polianilina -PANI) e nanostrutture carboniose (SWCNH) e semiconduttori inorganici di tipo-p come filler. Nell'arco del triennio saranno sviluppate parallelamente entrambe le classi di moduli, inorganici (range di temperatura di applicazione compresa tra  $-100$  e  $600\text{ }^\circ\text{C}$ ) e a base polimerica (range di temperatura di applicazione compresa tra RT e  $120\text{ }^\circ\text{C}$ ). Gran parte dell'attività sarà indirizzata allo sviluppo e al testing dei moduli e alla risoluzione delle problematiche tecnologiche relative all'integrazione dei materiali impiegati nel dispositivo e all'ottimizzazione delle loro proprietà di scambio termico e di conduttività elettrica.

**WP2: Efficienza energetica dei beni strumentali.** Il work package sviluppa una metodologia modulare per l'analisi dell'efficienza energetica di beni strumentali, basata sul riconoscimento di moduli comuni, quali i sistemi di movimentazione, gli attuatori di processo (per es. un mandrino), centraline idrauliche che forniscono olio in pressione, frigoriferi, sistemi di ricircolo e condizionamento dei fluidi di processo, ecc. Il lavoro copre le diverse fasi, dalla definizione metodologica, allo sviluppo di strutture appropriate per la gestione dell'informazione a livello di fabbrica e, a più basso livello, strumentazione per la caratterizzazione sperimentale ed il monitoraggio energetico continuo dei macchinari. Viene sviluppata una meta-modellazione dei processi e delle risorse produttive (es. macchine utensili, trasportatori, forni, ecc.) insieme a quella degli impianti industriali e dei sistemi di produzione al cui interno sono inseriti.

**WP3: Sviluppo di un dimostratore di smart micro-grid, basato su un'architettura in corrente continua che**



**integra fonti rinnovabili - sistemi di accumulo stazionari e carichi energivori, ed ottimizzazione della power quality mediante controllo di convertitori active front end.** L'attività è volta allo sviluppo e caratterizzazione sperimentale di un dimostratore da laboratorio di micro-grid, dimensionato su una potenza di circa 50 kW, basata su un bus in corrente continua per l'integrazione intelligente di fonti rinnovabili, unità di accumulo elettrochimico di tipo stazionario ed utenze energivore, intese sia come singole utenze che come aggregazione di utenze industriali. In tal modo l'efficientamento delle richieste di potenza dei processi produttivi industriali può essere supportato all'interno della micro-grid in esame mediante l'ausilio di sistemi di accumulo stazionario di energia elettrica e fonti di energia rinnovabili, gestiti in modo coordinato. Inoltre, con questa tipologia di architettura, l'energia elettrica proveniente dalle fonti di energia rinnovabili in DC, come ad esempio pannelli fotovoltaici, non richiede alcuno stadio di conversione DC/AC e può essere direttamente fornita al bus DC per mezzo di convertitori di potenza ad elevata efficienza di tipo DC/DC. Tale architettura è basata su sistemi di conversione di tipo bidirezionale, che consentono l'interazione della micro-grid con la rete elettrica e con altre micro-grid, secondo schemi di aggregazione di tipo smart-district, che tengano conto delle richieste provenienti dal gestore della rete elettrica e dell'ottimizzazione dei costi dell'energia (*brokeraggio energetico*).

**WP4: Sviluppo di architetture e soluzioni per la raccolta, gestione ed analisi distribuita di dati a supporto di sistemi industriali complessi tramite tecnologie IoT, e di piattaforme di comunicazione per il supporto di servizi di brokeraggio energetico sicuri ed affidabili in una logica di Smart Districts.** Le attività di questo work package risultano trasversali a quelle dei WP1, WP2, WP3. Infatti da un lato il work package si propone di sviluppare soluzioni distribuite per la raccolta, la gestione e l'analisi dei dati dai vari macchinari e dai loro componenti, a supporto delle applicazioni di monitoraggio e controllo di sistemi industriali complessi. Dall'altro, si propone di sviluppare soluzioni distribuite per il supporto di comunicazioni sicure ed affidabili per applicazioni di brokeraggio energetico tra gli utenti di uno Smart District. In particolare, nell'ottica dei paradigmi di Industry4.0, la raccolta e la gestione dei dati generati da sensori e dispositivi IoT, così come dai dispositivi degli operatori della fabbrica, sono uno degli asset fondamentali per la gestione efficiente dei macchinari e dei processi produttivi. Essi devono essere raccolti tramite architetture flessibili basate il più possibile su tecnologie standard e non proprietarie, in modo da garantire la possibilità di integrazioni "plug&play" di nuovi macchinari o di nuovi sensori in tali architetture.

**WP5: Sviluppo di moduli per la generazione termoelettrica applicata al recupero energetico nell'ambito dell'efficientamento dei processi di produzione.** Le attività di questo WP sono rivolte alla progettazione e messa a punto di moduli termoelettrici 1) inorganici a base di tetraedriti e siliciuri e 2) organici con matrice "attiva" polimerica (polianilina -PANI) e nanostrutture carboniose (SWCNH) e semiconduttori inorganici di tipo-p come filler. Nell'arco del triennio saranno sviluppate parallelamente entrambe le classi di moduli, inorganici (range di temperatura di applicazione compresa tra -100 e 600 °C) e a base polimerica (range di temperatura di applicazione compresa tra RT e 120 °C). Gran parte dell'attività sarà indirizzata allo sviluppo e al testing dei moduli e alla risoluzione delle problematiche tecnologiche relative all'integrazione dei materiali impiegati nel dispositivo e all'ottimizzazione delle loro proprietà di scambio termico e di conduttività elettrica. (Spostare in accumulo)

I principali risultati attesi nel triennio sono:

Per il WP1



1. Sistema di controllo predittivo model-based in grado di ottimizzare in modo congiunto performance produttive e consumi energetici.
2. Dashboard semantico avanzato in grado di integrare informazioni sull'esecuzione della produzione con informazioni riguardanti la produzione e consumo di energia.

#### Per il WP2

1. Definizione della metodologia di qualificazione energetica di beni strumentali, esemplificata su macchine utensili ad asportazione di truciolo.
2. Modello di dati per la fabbrica digitale sostenibile comprensivo di ontologie sviluppate in linguaggio standard OWL.
3. Sintesi della metodologia per la qualificazione energetica di beni strumentali ed individuazione di soluzioni alternative migliorative.

#### Per il WP3

1. Data-set sperimentale delle prestazioni di un dimostratore di laboratorio di smart micro grid basato su bus in corrente continua e comprensivo di sistemi di accumulo stazionari. [M1-M12]
2. Impiego di regolatori ripetitivi per ottenere valori di THDi della corrente di rete inferiori a 2-3%.
3. Individuazione delle tecnologie, dimensionamento ed allestimento di sistemi di generazione da fonti rinnovabili connesse al dimostratore di laboratorio di smart micro grid.
4. Controllo ed analisi delle prestazioni di convertitori bidirezionali multilivello.
5. Individuazione ed analisi sperimentale delle strategie di controllo dei flussi energetici all'interno del dimostratore gestito in contesto smart district.
6. Progettazione, simulazione e controllo di convertitori basati su componenti in SiC e in GaN.

#### Per il WP 4

1. Identificazione di tecnologie, definizione e prototipi di architetture di rete IoT per la raccolta di dati da sensori e dispositivi mobili distribuiti. Installazione di un prototipo iniziale IoT per la raccolta e l'analisi dei dati
2. Definizione e valutazione di algoritmi e protocolli distribuiti per la raccolta e gestione dei dati, e loro integrazione nel prototipo.
3. Modelli distribuiti di learning dei processi industriali basati sui dati raccolti e loro integrazione nel prototipo.
4. Definizione dell'architettura e sviluppo del prototipo di un sistema di comunicazione affidabile e sicuro per il supporto di servizi di brokeraggio energetico.
5. Integrazione di sistema e sperimentazione.

#### Per il WP5

1. Pellet drogati ottimizzati in termini di densità e stabilità chimica e meccanica, estesamente caratterizzati.
2. Opportune quantità di composito PANI-DBSA (acido dodecilbenzensolfonico)/SWCNH con PF superiore a  $5 \mu\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-2}$ .
3. Moduli termoelettrici non ottimizzati
4. Moduli termoelettrici leggeri a base polimerica, con discreto grado di flessibilità e facile integrabilità in dispositivi esistenti (wearable electronics) con  $\text{PF} > 10 \mu\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-2}$ .

**Eventuali sovrapposizioni di attività di ricerca e sviluppo con gli altri Affidatari (ENEA e RSE spa);**

Dalla documentazione in possesso relativa alla programmazione triennale approvata degli altri Enti affidatari non si sono ravvisate sovrapposizioni con le attività degli altri affidatari. In particolare, l'attività del CNR, sulla base dell'attività scientifica degli altri affidatari della Ricerca di Sistema (RSE ed ENEA) è coordinata e sarà complementare all'attività di questi ultimi, puntando sulla Gestione integrata di utenze energivore con fonti rinnovabili e sistemi di accumulo mediante periferiche ICT basate su protocolli di comunicazione aperti e bidirezionali in un contesto di polo tecnologico e sullo sviluppo di materiali e componentistica innovativa con l'obiettivo di sostenerne lo sviluppo tecnologico in termini di riduzione dei costi e incremento delle prestazioni (efficienza, durata, riduzione emissioni inquinanti) fornendo, a conclusione delle attività, dimostratori a scala di laboratorio.

**Diffusione dei risultati**

La diffusione dei risultati delle attività proposte avverrà mediante partecipazione a conferenze nazionali/internazionali e le pubblicazioni su riviste scientifiche del settore. I risultati saranno anche diffusi attraverso web site specificatamente approntato dal CNR-DIITET per la ricerca di sistema elettrico: [www.ricercadisistema.cnr.it](http://www.ricercadisistema.cnr.it).

Inoltre, è prevista l'organizzazione di 15th convegni scientifici specifici nonché riunioni/iniziativa con partner italiani e partner europei in ambito dei Joint program di EERA e la diffusione sui portali web specialistici.

**Costi del progetto nel triennio**

Il costo del progetto per l'intero triennio ammonta 1,2 M€ di cui 0,24M€ per collaborazioni con Dipartimenti Universitari.

Il responsabile per il CNR della Ricerca di Sistema

Claudio Bertoli