

Thermal Energy Storage a servizio di Comunità Energetiche Rinnovabili industriali

Letizia Magaldi, Fulvio Bassetti, Lorenzo Romagnoli *Magaldi Green Energy*

• Federico Santi, Marca Carmen Falvo *La Sapienza Università di Roma* • Antonio Iliceto *Terna Rete Italia*

Una sinergia tra energia elettrica e termica per la decarbonizzazione del calore industriale.

L'articolo presenta soluzioni innovative che consentono di ottimizzare la produzione e il consumo di energia termica ed elettrica, in ottica di sector integration e con prospettiva di decarbonizzazione del settore industriale

Introduzione

Ci troviamo nel pieno di una transizione verso un sistema energetico decarbonizzato, che richiede l'impiego su vasta scala di nuove tecnologie intelligenti e abilitanti. Gli impianti di produzione dell'energia elettrica e dell'energia termica alimentati da combustibili fossili giocheranno un ruolo sempre più marginale, sostituiti da tecnologie a energia rinnovabile. A causa della natura intermittente delle risorse rinnovabili, soprattutto solari ed eoliche, sarà sempre più sfidante gestire e rendere disponibile l'energia ai consumatori in maniera continua ed affidabile. Per raggiungere questo risultato, sarà indispensabile l'impiego di sistemi in grado di modulare la produzione di energia rinnovabile "spostandone" quantità importanti dalle ore di massima disponibilità a quelle di maggiore richiesta. I sistemi di energy storage cercano appunto di rispondere a questa esigenza.

Nel quadro della transizione energetica, la sfida che appare più ardua è la decarbonizzazione dei processi industriali, per la maggior parte alimentati da energia termica - in forma di vapore o di aria calda - comunemente prodotta da combustibili fossili [1].

Più in generale, il 48% della domanda globale di energia è rappresentata da calore e circa la metà di tale calore è destinato ai processi industriali, come riportato in **figura 1**.

In questo contesto, gli stakeholders della transizione energetica sono dunque chiamati ad

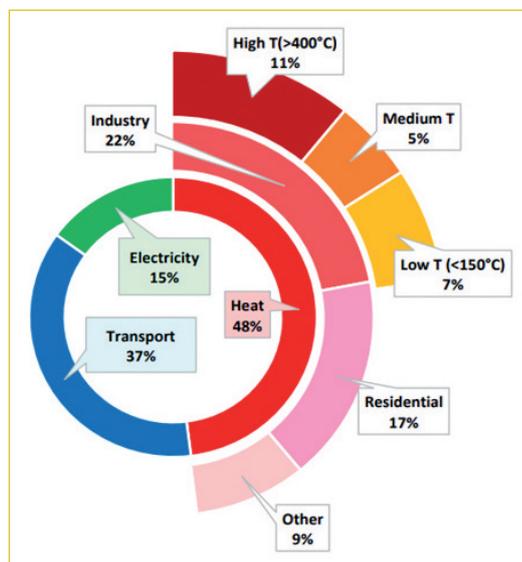


Figura 1
Domanda globale di energia per settore e per uso

individuare soluzioni innovative e intelligenti, in grado di rispondere alla necessità di decarbonizzazione del calore di processo nei diversi settori industriali.

Considerata la relativa semplicità ed economicità delle “rinnovabili elettriche”, cioè della produzione di energia elettrica da impianti fotovoltaici, eolici, idroelettrici e geotermoelettrici, una delle soluzioni più promettenti per la decarbonizzazione del settore industriale sembra essere l’elettrificazione dei processi industriali stessi, attraverso l’impiego di tecnologie cross-settoriali che possono rappresentare veri e propri “hub energetici”. La variabilità delle fonti primarie rinnovabili convertite in energetica elettrica richiede l’impiego di sistemi di accumulo dell’energia, anche in relazione ai profili temporali di assorbimento dell’energia termica da parte dei processi industriali, in generale diversi dalle curve di produzione dell’elettricità rinnovabile.

In questo articolo si intende appunto presentare una tecnologia emergente di *Thermal Energy Storage* (TES) dedicata alla decarbonizzazione del calore industriale a media/alta temperatura attraverso l’utilizzo di energia elettrica rinnovabile.

Long Duration Energy Storage

In ogni sistema elettrico, dal più piccolo (micro-grid) al più esteso (grandi reti elettriche continentali interconnesse), l’aumento di penetrazione delle fonti rinnovabili variabili all’interno del mix di generazione è necessariamente accompagnato dall’aumento del fabbisogno di energy storage [2], per mantenere bilanciato il sistema stesso.

Come mostrato in **figura 2** [2], il fabbisogno di energy storage è nell’ordine di alcune ore (rispetto alla potenza di picco annuale del sistema elettrico) finché la penetrazione di eolico e fotovoltaico resta inferiore al 50% della domanda annuale di energia elettrica, dopo di che aumenta in maniera esponenziale fino a molte centinaia di ore, essendo necessario un accumulo settimanale e stagionale.

All’aumentare della penetrazione delle tecnologie eolica e fotovoltaica è dunque necessaria l’installazione di sistemi di energy storage di grande capacità (*Long Duration Energy Storage*, o LDES). I sistemi LDES sono da considerare abilitanti per la decarbonizzazione del sistema elettrico e devono essere scalati economicamente per poter mantenere in equilibrio il sistema elettrico per ore, giorni, mesi e addirittura stagioni.

Le tecnologie LDES disponibili sono diverse, ciascuna in grado di immagazzinare energia in varie forme (meccanica, termica, elettrochimica, chimica) e tutte possono contribuire in modo significativo alla decarbonizzazione efficiente dei sistemi elettrici, in termini di costi e prestazioni.

I sistemi LDES basati su accumulo di energia termica (*Thermal Energy Storage*, TES) possono rappresentare il perno intorno al quale ruotano sia la decarbonizzazione del sistema elettrico, sia la decarbonizzazione del calore industriale. Essi sono appunto concettualmente inquadabili come bipoli energetici, cross-settoriali (**figura 3**) che possono essere “caricati” da elettricità rinnovabile e/o da calore rinnovabile o di scarto dei processi industriali (doppio input: termico ed elettrico) e possono essere “scaricati” producendo energia elettrica (attraverso gli usuali processi di conversione dell’energia termica in energia elettrica) e/o calore (doppio output: termico ed elettrico), immagazzinando energia in forma termica per lunghe durate.

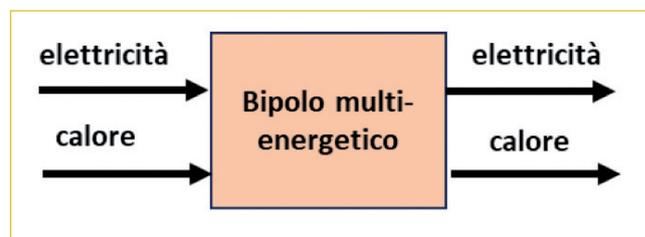


Figura 3
Concetto di doppio bipolo energetico

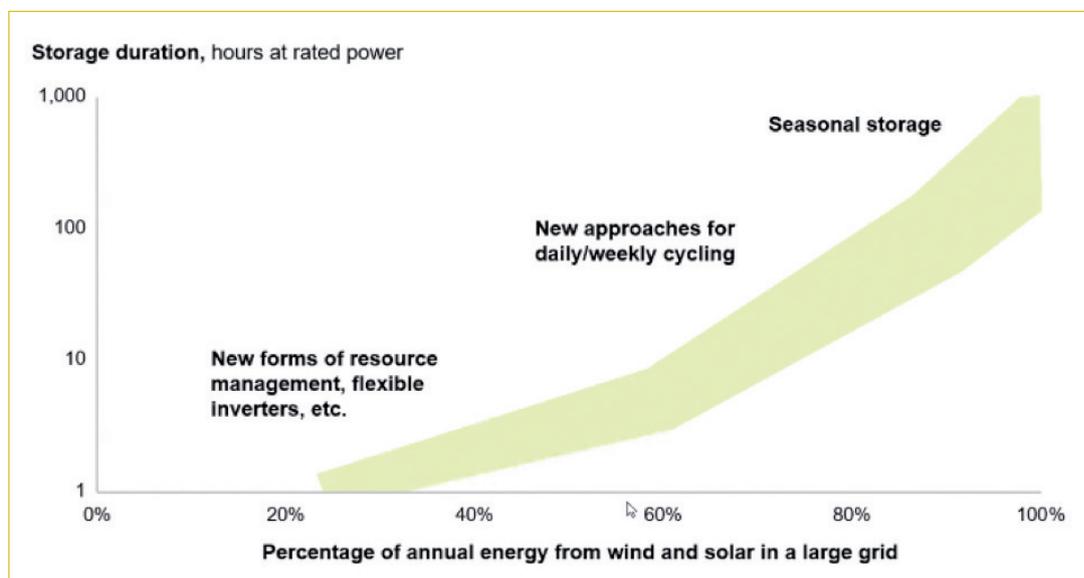


Figura 2
Capacità complessiva di energy storage (ore) necessaria al funzionamento di un sistema elettrico esteso, in funzione della penetrazione dell’energia rinnovabile variabile (% della domanda annuale di energia)

Attraverso sistemi TES di questo tipo è possibile utilizzare le tecnologie a fonti rinnovabili “elettriche” anche al di fuori del sistema elettrico stesso, nel quadro più ampio del sistema energetico. D'altronde, la decarbonizzazione della domanda di energia termica è fondamentale per realizzare un sistema energetico a emissioni nulle entro il 2050, considerando che il 45% di tutte le emissioni di gas serra legate all'energia viene dall'impiego dell'energia termica prodotta da fonti fossili. I sistemi TES aiutano appunto a decarbonizzare la domanda di energia termica, potenzialmente a tutti i livelli di temperatura, elettrificando i processi mediante l'utilizzo delle fonti energetiche rinnovabili variabili. Inoltre, attraverso i sistemi TES si possono ottimizzare/efficientare i consumi di calore nei processi industriali, facilitare il riutilizzo del calore di scarto e integrare di fonti di calore rinnovabili “non elettriche” (ad esempio solare termico/termodinamico).

Concettualmente, esiste un'ampia varietà di tecnologie TES in grado di affrontare a costi relativamente contenuti un'ampia gamma di durate di accumulo, da orario a stagionale, e di temperature (da temperature inferiori allo zero fino a 2.400 °C).

Alcune tecnologie TES sono già oggi disponibili in commercio per differenti impieghi, soprattutto a temperature medio/basse. Ad oggi, le tecnologie TES più comunemente utilizzate prevedono l'impiego di vapore a media pressione, per applicazioni dell'industria chimica o alimentare. Le tecnologie TES in via di sviluppo ampliaranno lo spazio delle applicazioni con concetti innovativi e soddisferanno le esigenze di temperatura al di sopra dei 1.000 °C.

“Calore rinnovabile”

La decarbonizzazione del settore industriale richiede una profonda trasformazione dei processi di generazione di calore. Se la transizione verso un'energia a basse emissioni di CO₂ è ben avviata nel settore elettrico, non è stato invece fatto alcun progresso significativo per decarbonizzare il calore industriale.

I combustibili fossili a basso costo, gas e carbone, rappresentano la fonte di riferimento per la generazione dell'energia termica utilizzata nei processi industriali. Per raggiungere la neutralità climatica è necessario un cambiamento profondo e nessuna organizzazione produttiva può ridurre le proprie emissioni senza ristrutturare i si-

stemi di generazione e utilizzo dell'energia. Secondo stime IRENA, saranno necessari, da oggi al 2050, circa 3,7 trilioni di dollari di investimenti per sostenere la decarbonizzazione di tutti i processi industriali su scala globale [3]. Questo permetterebbe all'industria di attuare un percorso per raggiungere gli obiettivi fissati nei noti Accordi di Parigi, ossia contenere l'incremento della temperatura media superficiale del Pianeta Terra entro 1,5 °C a metà del secolo in corso.

Circa la metà del calore industriale globale è utilizzato a temperature inferiori ai 400 °C, utilizzato nella maggior parte dell'industria leggera, ovvero quella che impiega materie prime e prodotti semilavorati per produrre articoli per uso privato e consumo. La generazione di queste quantità di energia termica è un enorme problema ambientale, perché oltre il 75% viene prodotto bruciando combustibili fossili che emettono circa il 10% delle emissioni mondiali di CO₂ (in proporzione è una quantità 2,5 volte superiore alle emissioni planetarie di aeroplani e navi messe insieme, paragonabile alle emissioni dell'intero settore del trasporto su strada). La combustione di gas e carbone emette peraltro anche altri gas inquinanti, come NO_x, SO_x, idrocarburi policiclici aromatici e particolato solido, particolarmente dannosi per la salute e altri settori, primo fra tutti l'agricoltura.

Il principale ostacolo al cambiamento è, oggi, di tipo economico: malgrado esistano già diverse possibilità di produrre calore da fonti rinnovabili e tecnologie da tempo disponibili, il combustibile fossile risulta ancora più competitivo nella maggior parte dei mercati e ciò frena l'adozione di soluzioni sostenibili. La redditività commerciale del calore da fonti rinnovabili può essere raggiunta in breve termine adottando politiche di incentivazione delle tecnologie rinnovabili emergenti, onde costruire infrastrutture durature e innescare un cambiamento nei mercati. La diffusione di massa delle tecnologie che favoriscono la produzione e gestione del calore rinnovabile ridurrà i costi di capitale e aumenterà la competitività al livello internazionale.

Tecnologia MGTES

Nel campo dei sistemi di Long Duration Energy Storage di tipo termico (TES), è stata sviluppata una tecnologia tutta italiana, tra le più avanzate al mondo da diversi punti di vista, tra cui il livello di maturazione (TRL 7, secondo le scale di misura di Technology Readiness Level comune-

mente usate nei programmi di ricerca europei).

La tecnologia MGTES (*Magaldi Green Thermal Energy Storage*) è stata messa a punto dal gruppo Magaldi in oltre dieci anni di ricerche industriali teoriche e applicative, sfruttando la competenza e l'esperienza nella movimentazione di materiali solidi ad alta temperatura, ambito in cui il gruppo Magaldi è leader mondiale da quasi un secolo.

MGTES è un sistema per l'accumulo di energia termica ad alta temperatura in materiali solidi, che utilizza in particolare un letto fluido di sabbia silicea contenuto in un cassone in acciaio rivestito internamente con materiali refrattari.

Il sistema non utilizza materie prime rare o critiche, ma solo sabbia, acciaio e altri materiali comuni. Può essere appunto inquadrato nella famiglia delle tecnologie di Long Duration Energy Storage applicabili sia come *Power-To-Heat* (PTH) che *Power-To-Heat-To-Power* (PTHTP) e, oltre alle applicazioni industriali, può essere integrato anche con impianti di generazione termoelettrica esistenti, a ciclo Rankine o a ciclo combinato, per migliorarne la flessibilità (minimo tecnico, rampe di presa del carico, etc.) e l'efficienza ai regimi fuori progetto.

Il mezzo di immagazzinamento dell'energia termica del MGTES è sabbia silicea che può essere riscaldata fino a temperature superiori a 600 °C, per un numero pressoché illimitato di cicli di carica e scarica senza subire degrado o perdita di prestazioni.

Il letto di particelle solide può essere riscaldato da energia elettrica, attraverso resistenze elettriche immerse direttamente nel letto di sabbia, o da energia termica attraverso un fluido ad alta temperatura in scambiatori di calore immersi nel letto fluido stesso (figura 4).

L'energia in ingresso viene immagazzinata come calore sensibile, ad alta temperatura e ad alta densità di energia, nel letto di sabbia. Quando la sabbia è fluidizzata, la sua conducibilità termica favorisce il trasferimento di calore nelle fasi di carica e scarica; quando la sabbia è "ferma" (non fluidizzata), in fase di storage, le perdite termiche nel tempo attraverso la superficie esterna del cassone risultano relativamente limitate, a meno del 2% al giorno. L'energia accumulata è ceduta

sotto forma di vapore surriscaldato, alla temperatura richiesta dal processo industriale a cui il MGTES è collegato. Nella configurazione attualmente più matura a livello di produzione industriale, il range di temperature del vapore ottimali per l'utilizzo di MGTES è tra 150 °C e 400 °C.

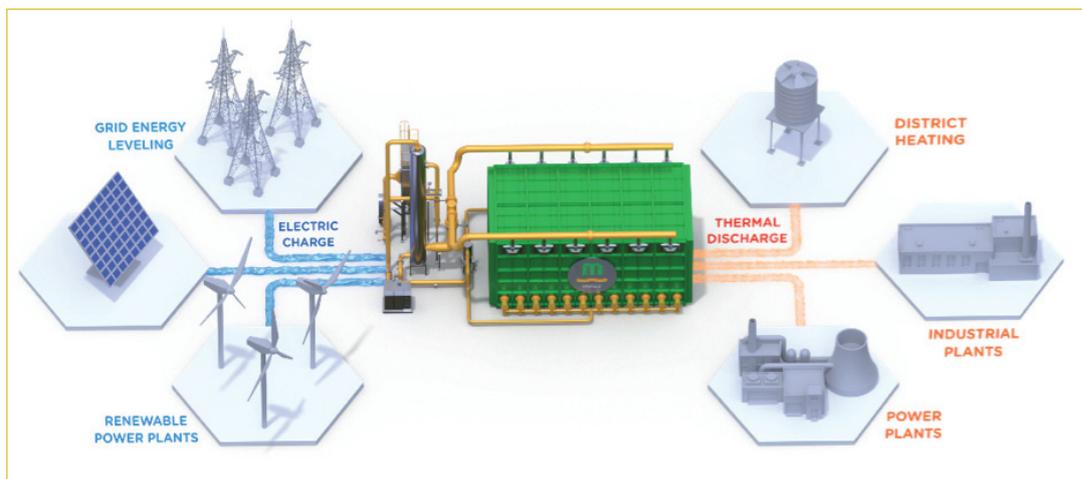
Un elemento chiave per aumentare il trasferimento di energia termica durante la carica e la scarica dell'MGTES è appunto il caratteristico sistema di fluidizzazione della sabbia. Quando il sistema è in modalità di carica e scarica, una portata d'aria di valore predefinito viene soffiata attraverso il fondo del letto di sabbia e, risalendo, permette alle particelle solide di comportarsi come un fluido. Il letto fluido di particelle solide consente importanti vantaggi rispetto a una soluzione TES in materiali solidi non in movimento. La diffusività termica è infatti molto più elevata, fino a 2 o 3 ordini di grandezza. Il coefficiente di scambio termico è più elevato e il tempo di risposta dell'intero sistema è molto basso durante il processo di acquisizione e rilascio dell'energia termica, da e verso il mezzo di accumulo.

La tecnologia MGTES è modulare e offre quindi un'elevata flessibilità per soddisfare le esigenze delle utenze industriali in termini di temperature del vapore, durata dell'accumulo di energia, capacità di seguire il profilo della domanda di energia termica.

Le potenze di carica e scarica e la durata dell'accumulo sono scalabili in modo indipendente, in funzione rispettivamente del dimensionamento delle resistenze elettriche inserite nella sabbia, del dimensionamento dello scambiatore di calore immerso nel letto fluidizzato e della quantità di sabbia. Variando la massa di particelle solide contenute, è possibile configurare la capacità di accumulo termico di un modulo MGTES tra 5 e 100 MWh termici. Collegando insieme più moduli MGTES, in serie e/o in parallelo, si possono raggiungere i livelli richiesti dall'utenza, tanto in termini di capacità/durata dell'accumulo, quanto in termini di potenza in carica/scarica, nonché in termini di temperatura, pressione e portata del vapore in uscita.

Un sistema MGTES, costituito da uno o più moduli, in serie e/o in parallelo, può essere alimentato da impianti a ener-

Figura 4
Esempio di integrazione della tecnologia MGTES all'interno di un sistema energetico



gie rinnovabili elettriche variabili - ad esempio fotovoltaici o eolici, oppure anche da una rete elettrica alimentata a sua volta da impianti di generazione a energie rinnovabili variabili - può sostituire i combustibili fossili utilizzati per produrre calore a media entalpia in un processo industriale.

Attraverso MGTES, fonti di energia elettrica intermittenti ed a basso costo possono essere raccolte e trasformate in un generatore di calore programmabile in base alle esigenze del processo industriale ed al profilo della domanda termica. È quindi possibile la produzione di calore industriale *carbon-free*, rinnovabile, 24 ore su 24, 7 giorni su 7.

Applicazioni

In accordo con le caratteristiche tecniche del sistema MGTES, è possibile riassumere la sua applicabilità in 3 categorie principali:

1. Generazione di calore rinnovabile. Include tutte le applicazioni *Power-to-Heat* (PTH) o *Heat-to-Heat* (HTH) per decarbonizzare i processi termici industriali. Applicazioni valide possono essere identificate in settori industriali come quelli cartario, alimentare, chimico, nonché nel teleriscaldamento. Sono ancora allo studio altre potenziali applicazioni industriali, in configurazioni diverse. MGTES può anche essere integrato in centrali termiche industriali esistenti, con impianti di cogenerazione e/o con caldaie a gas, per aumentare la flessibilità e ridurre le emissioni di gas serra e di inquinanti gassosi.
2. Aumento della flessibilità. Gli impianti termoelettrici e gli impianti a ciclo combinato (CCGT) - che con la penetrazione delle energie rinnovabili variabili con priorità di dispacciamento sono passati da un funzionamento *baseload* a uno altamente modulante - richiedono un adattamento del carico operativo in base alle condizioni di mercato o alle esigenze della produzione industriale. MGTES è particolarmente adatto ad essere integrato in un ciclo Rankine a vapore come buffer termico, dove può accumulare parte dell'energia termica prodotta durante il funzionamento al minimo carico, quando la produzione non è conveniente ma forzata al fine di evitare spegnimento e riaccensione.

Grazie alla possibilità di interfacciare il sistema di accumulo termico direttamente con la rete elettrica, MGTES può ridurre il *curtailment* della produzione da fonti rinnovabili in caso di eccesso di generazione rispetto alla

domanda, acquisendo le sovrapproduzioni di energia e fornendo al TSO servizi ancillari (es. *demand response*), anche attraverso i mercati della flessibilità (es. MSD).

3. Applicazioni *Power-to-Heat-to-Power*. In uno scenario a lungo termine di penetrazione delle energie rinnovabili nel sistema elettrico prossima al 100%, con notevole sovrapproduzione di energia elettrica in alcuni periodi del giorno o del mese, è possibile concepire il sistema MGTES in applicazioni di grande capacità di accumulo, nell'ordine dei GWh (ad esempio, nello spazio di un campo da calcio è possibile accumulare circa 1 GWh termico, collegando insieme poche decine di moduli MGTES) al fine di immagazzinare l'eccesso di produzione da rinnovabili, ad esempio nei weekend, e cederla nuovamente alla rete, ad esempio nei giorni lavorativi di punta, attraverso turbomacchine (uguali a quelle oggi in servizio).

In quest'ottica è altresì possibile recuperare centrali elettriche a combustibili fossili dismesse per decarbonizzazione e/o obsolescenza, riutilizzando power block esistenti senza ulteriore consumo di suolo e senza la necessità di sviluppare nuovi siti industriali. In questo modo, nei vecchi siti termoelettrici si potranno creare centri Long Duration Energy Storage già opportunamente ubicati nei nodi delle reti elettriche.

Case study Comunità Energetiche Rinnovabile di Buccino con Enel-X

La crisi energetica ed il balzo del prezzo delle commodities hanno dato una spinta senza precedenti alla ricerca di soluzioni energetiche alternative nel settore industriale, soprattutto per le aziende energivore. Sinora l'ostacolo all'elettrificazione dei processi industriali che richiedono calore a temperatura media/alta è stato legato alla difficoltà per le pompe di calore (con energy storage elettrochimico) di andare oltre i 190 °C. In questo contesto, la Energy Service Company Enel X e il gruppo Magaldi hanno avviato una collaborazione per sperimentare industrialmente e commercialmente la tecnologia MGTES. La visione comune fa leva anche sul fatto che MGTES è una tecnologia interamente ideata e realizzata in Italia ed è quindi possibile realizzare una filiera completamente italiana, che può poi trovare sbocchi anche in mercati esteri.

Il progetto, già avviato, prevede che la "batteria termica" (MGTES), dimensionata per una capacità di circa 14 MWh termici, venga alimentata da impianti fotovoltaici installati all'uopo e tra-

sformi il calore accumulato nella sabbia a letto fluido in vapore di processo a circa 200 °C utilizzato da una fabbrica nell'area industriale di Buccino (Salerno), attiva nel settore del *food & beverage*, in particolare per la lavorazione di olii a fini alimentari. Il progetto prevede la realizzazione di una "Comunità Energetica Rinnovabile" (CER) industriale, per lo sfruttamento condiviso delle energie rinnovabili disponibili nell'area, secondo i recenti orientamenti normativi e regolatori comunitari e nazionali che favoriscono l'uso locale delle risorse rinnovabili. Nel caso specifico si tratta di un raggruppamento di imprese della zona industriale di Buccino, supportate dall'ASI (Area per lo Sviluppo Industriale) di Salerno, che condividono risorse e infrastrutture per produrre ed utilizzare energia rinnovabile, con l'obiettivo di limitare l'impatto ambientale delle attività produttive, ridurre la spesa energetica ed ottenere ulteriori benefici economici grazie alla condivisione. La CER industriale di Buccino nasce grazie a una interessante collaborazione degli industriali dell'area insieme ai rappresentanti della politica e delle amministrazioni locali.

Prospettive

La flessibilità dell'approvvigionamento di energia per il settore industriale ed i servizi di bilanciamento resi disponibili alla rete elettrica sono enormi vantaggi di sistema offerti dall'elettrificazione del calore industriale. Gli utenti industriali che utilizzano elettricità da fonti rinnovabili non sono vincolati all'utilizzo di un solo tipo di combustibile (es. gas o carbone) per alimentare i propri forni o caldaie. Piuttosto, possono scegliere tra solare, eolico, idroelettrico, geotermico ed eventualmente anche nucleare, in funzione della propria domanda di energia e delle condizioni di mercato. Il bilanciamento attraverso la rete elettrica consente di svincolare temporalmente il prelievo di elettricità dal momento in cui è richiesta la domanda di calore (a differenza degli impianti combinati di produzione di elettricità e calore), essendo il calore stesso più facile ed economico da immagazzinare rispetto all'elettri-

cità. Inversamente, i sistemi di accumulo di calore possono essere gestiti in modo flessibile per bilanciare le fluttuazioni dei prezzi dell'elettricità e la produzione variabile da solare ed eolico. Pertanto le batterie termiche consentono varie configurazioni utilizzabili a seconda delle esigenze prevalenti dell'utente, e gli assetti operativi sono adattabili ai diversi cicli operativi.

Nonostante le dimensioni del problema ambientale e l'opportunità economica, l'elettrificazione del calore industriale è ancora ampiamente trascurata. Uno dei motivi principali è che non esistono politiche di promozione dell'elettrificazione del calore con fonti rinnovabili (a differenza di alternative come l'idrogeno, ad esempio, ampiamente sostenute). Nonostante questa notevole inerzia verso il cambiamento, i vantaggi economici del calore rinnovabile sono indubbi, soprattutto in ottica di decarbonizzazione, visti anche i costi legati alle emissioni di CO₂ destinati ad aumentare nei prossimi anni. La decarbonizzazione industriale non può avvenire senza trasformare la generazione di calore e l'elettrificazione diretta è la migliore via da seguire, grazie ai vantaggi ambientali, di efficienza, di processo e di sistema che le tecnologie di riscaldamento elettrico diretto comunemente utilizzate già oggi possono offrire. A lungo termine, quando l'energia elettrica non sarà più prodotta da impianti a fonti fossili mediante trasformazioni termodinamiche e dunque la trasformazione dell'energia elettrica in calore non sarà più da considerare un "degrado" in termini exergetici, l'elettrificazione del calore industriale consentirà non solo di decarbonizzare il settore, bensì anche di evitare il curtailment di ingenti quantità di elettricità di origine fotovoltaica ed eolica, inevitabilmente sovrapprodotte, ottimizzando la struttura del sistema elettrico stesso. L'accoppiamento dell'elettrificazione del calore industriale con sistemi di thermal energy storage efficaci ed efficienti come MGTES consentirà altresì di bilanciare i sistemi elettrici fornendo preziosi servizi di flessibilità.

bibliografia

[1] Technologies and policies to decarbonize global industry: Review and assessment of mitigation drivers through 2070; Jeffrey Rissman et alia; *Applied Energy journal*, 2020 - <https://energyinnovation.org/wp-content/uploads/2020/04/Technologies-and-policies-to-decarbonize-global-industry-review-and-assessment-of-mitigation-drivers-through-2070.pdf>

[2] Intermittent Renewable Energy Sources: The Role of Energy Storage in the European Power System of 2040; H. Zsiborács et alia, 2019; *MDPI Open access Journal* - <https://www.mdpi.com/2079-9292/8/7/729>

[3] IRENA: World Energy Transitions Outlook 2023: 1.5°C Pathway, vol. 1, *International Renewable Energy Agency*.