

Un approccio innovativo alla gestione energetica degli impianti siderurgici a ciclo elettrico

A cura di: V. Colla, S. Dettori, S. Cateni, M. Vannucci, T.A. Branca, E. Paluzzano, C. Pietrosanti, D. Onesti, D. Venier, N. Holtzknecht, A. Wolff, F. Nkwitichoua

Nel contesto della produzione dell'acciaio da forno elettrico, la gestione dell'energia è un fattore chiave per ridurre i costi di produzione garantendo la soddisfazione delle esigenze dei processi coinvolti. L'ottimizzazione dei consumi energetici della filiera produttiva dell'acciaio può essere raggiunta solo guardando contemporaneamente ai singoli processi come a una rete di utenze, nella quale ogni singolo processo è già vicino al punto di lavoro ottimale. Ciò comporta un gran numero di consumatori di energia da gestire e, per questo scopo, di solito viene utilizzato uno schedatore. Il progetto Europeo EnerMIND mira a una produzione di acciaio efficace ed efficiente e a un alto tasso di utilizzo degli impianti di produzione, tramite l'implementazione di un dimostratore software basato su di un nuovo modello di gestione dell'energia che utilizza un'infrastruttura flessibile. Tale dimostratore, comprendente l'intera catena di produzione, considera le aree degli stabilimenti siderurgici in cui è maggiore la domanda di energia, ovvero i processi di fusione e affinamento dell'acciaio e i forni di riscaldamento dei semi-lavorati che alimentano i laminatoi, sia in termini di valori totali sia di picco.

PAROLE CHIAVE: EAF, ACCIAIERIA, EFFICIENZA ENERGETICA, ENERGY MANAGEMENT, TRANSIZIONE DIGITALE;

INTRODUZIONE

L'industria siderurgica europea, parte della categoria delle industrie ad alta intensità energetica, è anche caratterizzata da considerevoli emissioni dirette e indirette di CO₂. A causa di ciò, le azioni intraprese dalla UE volte alla regolamentazione hanno un impatto significativo sull'industria siderurgica, a causa della corrente volatilità dei mercati combinata con requisiti ambientali molto più stringenti di quelli cui è soggetta la concorrenza extraeuropea. Per poter produrre a prezzi competitivi, l'industria siderurgica europea ha compiuto e sta compiendo grandi sforzi per ridurre i propri consumi energetici, anche attraverso numerosi progetti di ricerca. Per esempio, in [1] è stato sviluppato un nuovo controllo adattivo in linea per il forno elettrico che considera le proprietà dei materiali effettivamente caricati per ottimizzare l'efficienza dell'energia chimica in ingresso, ridurre il consumo totale di energia e migliorare la resa metallica. Tuttavia, i singoli processi come la fusione nel forno elettrico, le fasi di successivo riscaldamento in forno dei semilavorati da fusione e colaggio che alimentano i laminatoi a valle, sono già caratterizzati da un elevato livello di efficienza molto vicino alle condizioni ottimali riducendo significativamente gli ulteriori margini di miglioramento. Vantaggi molto maggiori possono, inve-

**Valentina Colla, Stefano Dettori,
Silvia Cateni, Marco Vannucci,
Teresa Annunziata Branca**

Scuola Superiore Sant'Anna, TeCIP Institute, Pisa, Italia

**Enrico Paluzzano, Costanzo Pietrosanti,
Davide Onesti, Daniele Venier**

Danieli Automation S.p.A., Buttrio, Italia

**Norbert Holtzknecht, Andreas Wolff,
Fabien Nkwitichoua**

VDEh-Betriebsforschungsinstitut, Düsseldorf, Germania

ce, essere conseguiti attraverso un approccio integrato che considera l'intera catena produttiva e gestisce la schedulazione dei processi considerando sia le esigenze produttive sia gli eventi che caratterizzano i mercati dell'energia e la rete di trasmissione. Molti risultati di letteratura evidenziano l'importanza della gestione combinata di processi ed energia [2]: per esempio in [3] viene presentato un algoritmo basato sul prezzo che viene determinato in tempo reale, riducendo al minimo il costo energetico degli impianti industriali e soddisfacendo i requisiti di produzione allo stesso tempo.

In [4, 5] viene implementato un approccio basato su agenti per la gestione degli eventi provenienti dal mercato (per esempio, le variazioni anche negative del prezzo collegate con sovra-disponibilità di energia) e dalla rete di distribuzione dell'energia elettrica (la già menzionata sovra-disponibilità o eccesso di domanda con le necessarie interruzioni etc.). Tuttavia, nonostante tutti gli sforzi anche in termini di ricerca di algoritmi in grado di collegare significativamente la domanda e l'offerta di energia e i relativi prezzi, la combinazione dell'evento pandemico e l'instabilità geopolitica ha di fatto impedito di cogliere le relative opportunità da

parte dei grandi consumatori, in particolare l'industria siderurgica, spingendoli a privilegiare promise ed efficienza produttiva, cioè a irrigidirsi sul rispetto dei vincoli contrattuali rinunciando alla flessibilità produttiva in senso lato.

Solo secondariamente al programma di produzione sono stati introdotti fattori di ottimizzazione dell'approvvigionamento energetico per determinare il miglior portafoglio energetico disponibile.

Tale soluzione solitamente è sub-ottimale e negli ultimi tre anni si è dimostrata particolarmente complessa e bisognosa di un ripensamento metodologico, basato all'introduzione di tecnologie digitali e all'utilizzo sempre più spinto di soluzioni basate sull'intelligenza artificiale. In questo periodo è stata registrata infatti una rottura delle serie storiche basate su domanda-offerte-prezzo dell'energia a causa della sempre più spinta volatilità di tali fattori (vedi figura 1) [6], che emerge anche dalla variabilità del cosiddetto *Day-Ahead Price*, il quale regola di fatto la negoziazione delle forniture energetiche inclusi i contratti di interruzione [6]. Sussiste dunque una difficoltà sostanziale a prevedere le condizioni ottimali di fornitura energetica e l'influenza sulla produzione.

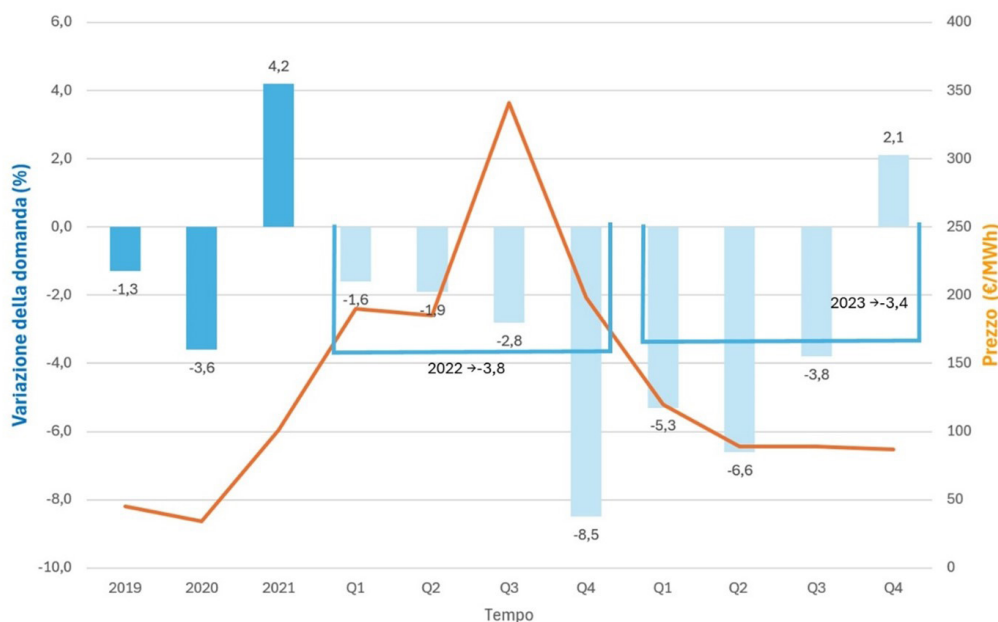


Fig.1 - Domanda di energia elettrica: calo complessivo nel 2023, ripresa nell'ultimo trimestre. Variazioni del consumo di energia elettrica e dei prezzi medi del giorno prima nell'UE-27/SEE (Norvegia), Svizzera, 2019-2023 (rispettivamente % e EUR/MWh) [6] / Electricity demand: overall decrease in 2023, rebound at the last quarter. Changes in electricity consumption and average day-ahead prices in the EU-27/EEA (Norway), Switzerland, 2019-2023 (% and EUR/MWh, respectively) [6].

In tali condizioni operative di crisi e incertezza permanente, è evidente come la pianificazione combinata e l'ottimizzazione dell'approvvigionamento energetico, formulate come un modello di ottimizzazione integrato, risultino di particolare difficoltà in questo periodo di intensi cambiamenti rendendo difficilmente trattabile dal punto di vista matematico la definizione di soluzioni affidabili, la cui determinazione già in tempi normali richiedeva ingenti risorse di calcolo. Per esempio, in [7] l'applicazione di un approccio iterativo basato su *Mean Value Cross Decomposition* (MVCD) per risolvere il problema combinato. In [8] i problemi della schedulazione vengono formulati tramite *Mixed Integer Linear Programming* (MILP), mentre per l'ottimizzazione del costo energetico si impiega un modello di tipo *Minimum-Cost Flow Network* (MCFN). I prodotti commerciali esistenti sono principalmente focalizzati sul monitoraggio e la gestione della fornitura di energia e molto pochi sono specificatamente progettati per il settore acciaio. Inoltre, la maggior parte di essi è ancora basata su un'architettura ICT convenzionale non ancora allineata con l'approccio Industria 4.0 orientato a una maggiore flessibilità e disponibilità dei dati, per un loro utilizzo anche in ottica predittiva.

Nonostante tutto ciò, in ottemperanza alle condizioni operative del periodo in cui il Progetto EnerMIND è stato pensato, si pensa che sia sempre più importante porsi l'ambizioso obiettivo di implementare un dimostratore su scala industriale di un nuovo approccio e di nuovi sistemi di *Energy Management* (EMS) basati su componenti innovativi e infrastrutture flessibili, che siano progettati per gestire l'intera catena produttiva, considerando le aree più importanti dell'acciaieria (per esempio l'area a caldo e i laminatoi) in cui sono installate apparecchiature che sono particolarmente energivore, ovvero i processi di fusione

e affinamento dell'acciaio e i forni a riscaldamento che alimentano i laminatoi. Tale sistema è pensato per supportare la gestione dei consumi anche tramite una ottimizzazione del programma di produzione che consideri le fluttuazioni del mercato insieme ai vincoli di produzione. Grazie alla disponibilità di modelli in grado di stimare i consumi associati ai singoli lotti produttivi, è possibile ottenere una stima di massima del profilo di consumo dell'intero impianto su un orizzonte temporale anche abbastanza ampio (svariati giorni) e modificarlo in maniera da avere i maggiori consumi nei periodi di minor costo dell'energia, armonizzando allo stesso tempo i consumi dei diversi aggregati in maniera da evitare "picchi" che possono incrementare drasticamente i costi dell'energia.

STRUMENTI E CAMPO DI DIMOSTRAZIONE

Il sito di prova che è stato selezionato per la dimostrazione del sistema EnerMIND è Acciaierie Bertoli Safau (ABS) Sisak d.o.o. Si tratta del sito produttivo situato in Croazia non lontano da Zagabria che produce, con la route basata sul forno elettrico, billette e blumi a sezione quadrata o circolare in acciai al carbonio e bassoalegati (vedi figura 2a) e ha una capacità produttiva media di 300.000 ton/a con 15 turni/sett. e una capacità massima di circa 440.000 ton/a, raggiungibile con 20 turni/sett. La catena produttiva, schematicamente rappresentata in figura 2 (b), è composta da un forno elettrico (EAF) con una capacità di 70 ton che raggiunge una temperatura del bagno di fusione di 1.700°C, un forno siviera (LF) per la metallurgia secondaria, una stazione di degassaggio sottovuoto (VD) è per la produzione di acciaio degasato al 100% e per il raggiungimento di una pressione del vuoto inferiore a 1 Torr, e una macchina di colata continua.

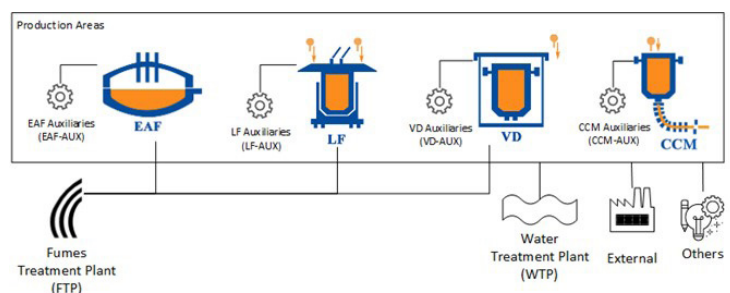


Fig.2 - a) laminatoio di ABS Sisak d.o.o.; b) schema del ciclo di produzione / a) rolling mill of di ABS Sisak d.o.o.; b) scheme of the production cycle.

Come base per la realizzazione del software è stato utilizzato il sistema Q3I di Danieli Automation, partner del progetto, che permette un efficace ed efficiente monitoraggio continuo dei consumi energetici nei processi produttivi. In particolare, è stato preso a riferimento ed esteso per gli scopi del progetto il modulo Q3-DEMS dedicato al forno elettrico in quanto già realizzato come strumento intuitivo e facile da usare; già dotato di strumenti per l'analisi di dati, oltre che di una interfaccia utente semplice e logica che permette di gestire misure in tempo reale e di analizzare l'andamento dei dati storici, registrare eventuali allarmi e ottenere informazioni diagnostiche di rete e strumentazione. Questo ha consentito di focalizzare il lavoro sugli aspetti realmente innovativi del progetto, ossia l'adattamento della architettura, lo sviluppo di modelli predittivi per i consumi energetici degli aggregati più significativi e lo sviluppo di logiche di ottimizzazione.

NUOVA ARCHITETTURA ICT

L'installazione del dimostratore in uno stabilimento di concezione tradizionale ha richiesto un adattamento del sistema ICT esistente, nel quale era implementata la classica architettura gerarchica per l'automazione di impianto

conforme alle norme IEC 66242/ISA88-ISA95. Ogni Area di Produzione (AP) è collegata orizzontalmente (ma non integrata) alle altre tramite la dorsale Ethernet. All'interno di ogni AP, i dati fluiscono dal basso verso l'alto e viceversa, a seconda delle relazioni tra mittente e destinatario della query seguendo la piramide gerarchica (si veda la parte superiore di figura 3). Ogni AP segue tale schema a seconda della sua complessità in termini di apparecchiature, dispositivi e processi. Tale soluzione gerarchica, che è ancora la più diffusa nel settore siderurgico almeno per questo tipo di impianti, offre alcuni vantaggi, per esempio in termini di sicurezza, ma si è dimostrata non favorevole alle applicazioni *data-driven* in particolare nella loro fase di sviluppo. Inoltre, le prestazioni in termini di scambio di dati e condivisione di risorse di calcolo, intercambiabilità e interoperabilità sono limitate. L'accelerazione dei processi e l'efficienza (uno dei fattori chiave per la sostenibilità) dipendono anche dal miglioramento dell'hardware locale che richiede grandi investimenti, e rappresenta una differenza qualificante per promuovere l'implementazione dei paradigmi tipici di Industria 4.0/5.0.

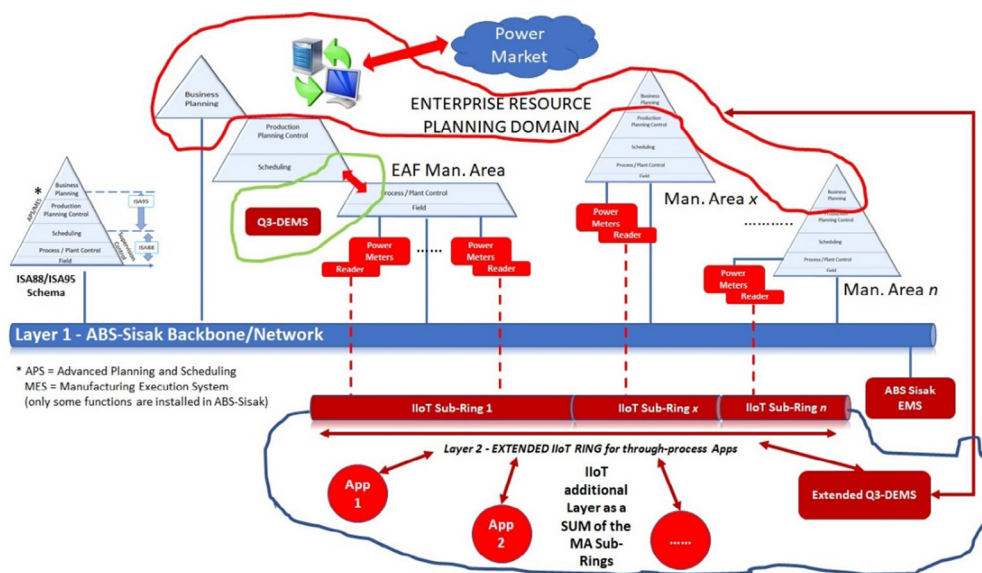


Fig.3 - ICT landscape adeguato alle esigenze dell'EMS di nuova concezione realizzato nel progetto / *ICT landscape adapted to the demands of the novel EMS realised in the project.*

Pertanto, per gli scopi del progetto è stato necessario aggiornare ed estendere l'architettura ICT dello stabilimento, aggiungendo il cosiddetto *Extended IIoT ring*, che in figura 3 è evidenziato dal cerchio blu, al fine di migliorare

il flusso dei dati e rendere direttamente disponibili al server di sviluppo i dati energetici (energia prenotata, energia consumata, ecc.). Esso si trova all'interno del dominio *Enterprise Resource Planning*; tuttavia, questo non è un

obbligo. È stato inoltre introdotto il concetto di *extended Q3-DEMS*, ossia un sistema con le capacità del Q3-DEMS installato nell'AP del forno elettrico ma estendibile a tutte le altre AP. Tale sistema raccoglie i dati direttamente dove vengono generati, ovvero dai misuratori di potenza, che sono collegati direttamente a un secondo livello da implementare in parallelo alla dorsale. Quanto sopra può essere realizzato in due modi: il primo consiste nel collegare i misuratori di potenza alla linea di alimentazione tramite l'applicazione di livello 1 e renderli disponibili alla dorsale e quindi al livello Q3-DEMS esteso, ma così facendo si riduce significativamente la velocità e persino la larghezza di banda per lo scambio di dati. Alternativamente, occorre duplicare la connessione tra il lettore e la dorsale su un lato anche al nuovo strato. In questo modo, le applicazioni esistenti in esecuzione sui livelli 1 e 2 non richiedono modifiche e aggiornamenti, e lo scambio di dati tra il campo e il sistema Q3-DEMS esteso è più efficiente perché è diretto.

Questa seconda modalità è stata preferita per lo sviluppo del progetto, in quanto ha il vantaggio di consentire il superamento dei problemi di legacy aumentando le prestazioni del flusso di dati grazie alla connessione diretta non mediata da dispositivi più lenti. Inoltre, offre una maggiore sicurezza della gestione dei dati, dove devono essere posizionati i dispositivi di backup e risulta più adattabile alle successive evoluzioni del sistema. L'implementazio-

ne dell'anello IIoT, separatamente dalla soluzione convenzionale IEC62264/ISA95-ISA88, consente di sfruttare il potenziale delle tecnologie digitali più avanzate garantendo intercambiabilità e interoperabilità, ivi incluse tecnologie cloud per archiviare i dati e aumentare la potenza di calcolo, anche se in questo caso sono preferibili soluzioni di *Edge Computing*.

BLOCCHI FUNZIONALI

Il nucleo del dimostratore sviluppato in EnerMIND risiede nell'*extended Q3-DEMS*, ossia il sistema di monitoraggio, controllo e gestione dell'energia sviluppato da Danieli Automation, il quale interagisce con l'impianto ricevendo da esso il programma di produzione originario (non ottimizzato), nonché le informazioni su costi e disponibilità dell'energia (vedi schema semplificato in figura 4a). Il sistema di gestione richiama due web-app: la prima fornisce una previsione del fabbisogno energetico futuro dei singoli aggregati utilizzando modelli di vario tipo a seconda dei dati a disposizione, quali modelli statistici o basati su strumenti di *Machine Learning* [9]. La seconda ottimizza il programma di produzione sulla base dei consumi futuri stimati e delle informazioni sull'energia e può utilizzare al momento due diverse strategie (selezionabili dall'utente) e restituisce al sistema un programma di produzione ottimizzato.

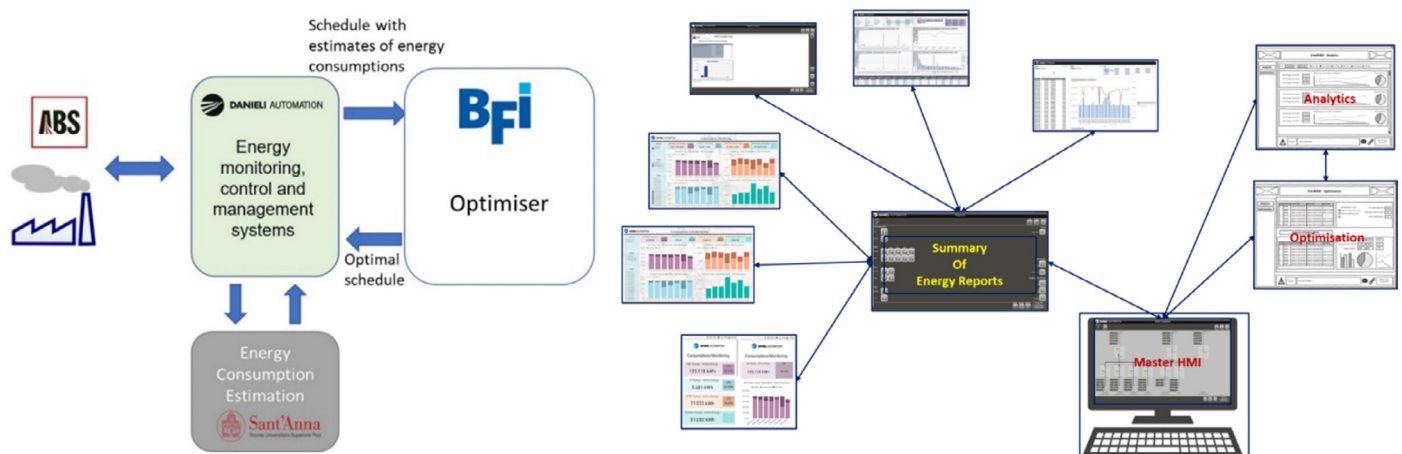


Fig.4 - a) Rappresentazione schematica del dimostratore; b) schema dell'interfaccia utente del sistema / a) *Schematic overview of the demonstrator; b) overview of the Human-Machine Interface of the system.*

Il sistema di monitoraggio è dotato di una interfaccia utente di facile impiego e pensata per gli energy manager che lavorano sull'impianto (vedi Figura 4b), che permette di visualizzare i diversi report di consumo, effettuare analisi di base e avanzate sui dati raccolti, visualizzare le stime dei modelli e confrontarle con i dati reali per valutarne le prestazioni, visualizzare il risultato della ottimizzazione, modificandolo ove necessario.

Il sistema così concepito è altamente flessibile e adattabile nel tempo, in quanto la complessità dei modelli, che vengono realizzati a partire da dati storici, può essere variata nel tempo man mano che si raccolgono dati nuovi, che sono utili per affinare i modelli e consentire una loro evoluzione necessaria sia al variare della produzione, sia perché lo stabilimento può dotarsi in futuro di nuovi sistemi di misura che acquisiscono più informazioni e/o sono caratterizzati da frequenze di campionamento superiori. Inoltre, anche le strategie e gli algoritmi di ottimizzazione possono essere modificati per adattarli alle specifiche configurazioni di impianto nonché alle dinamiche del mercato dell'energia con il quale l'impianto interagisce.

CONCLUSIONI

Questa memoria descrive le caratteristiche del prototipo su scala industriale di un EMS avanzato, che sfrutta le potenzialità di paradigmi e strumenti tipici di Industria 4.0/5.0 ma è pensato per essere installato in impianti siderurgici a ciclo elettrico esistenti, facilitando una loro evoluzione e modernizzazione grazie a una architettura digitale flessibile e alle relative infrastrutture. Il sistema supporta non solo la gestione ottimale dei consumi dell'intero processo, ma anche una interazione dinamica e vantaggiosa con il mercato dell'energia, le cui caratteristiche variano a seconda della nazione e per il quale è prevista una evoluzione consistente, anche sulla spinta della progressiva elettrificazione dei sistemi di trasporto e di produzione industriale connessa con gli ambiziosi obiettivi di riduzione dell'impatto climatico che l'Europa si è posta.

Le opportunità fornite da un EMS che tenga conto del mercato dell'energia possono essere viste da due prospettive distinte: la prospettiva degli operatori di rete e la prospettiva dei consumatori di elettricità. L'obiettivo principale del gestore di rete è quello di aumentare l'efficienza (in termini di attenuazione delle fluttuazioni e per-

sino di interruzione del servizio energetico, garantendo l'equilibrio tra la domanda di energia e l'offerta effettiva, ovvero la stabilità della rete elettrica). In questo contesto, un EMS avanzato come quello sviluppato in EnerMIND, oltre a monitorare i consumi contribuendo a ridurre e a evitare gli sprechi, appiattisce la curva di carico e riduce la capacità di generazione di picco richiesta. Inoltre, fornisce la flessibilità necessaria per reagire rapidamente allo squilibrio tra domanda e offerta nella rete, regolando i carichi aumentando la flessibilità della programmazione produttiva e l'accesso all'energia in modo quanto più possibile ottimizzato e prevedibile, anche in condizioni particolarmente difficili come quelle passate e probabilmente ancora a venire. D'altra parte, l'obiettivo dei consumatori di energia elettrica è prevalentemente la riduzione dei costi per diminuire parallelamente l'impatto ambientale. Per i consumatori di energia elettrica l'ESM aiuta ad adattarsi alle fluttuazioni di prezzo del mercato energetico e a trarre vantaggio da nuovi incentivi finanziari creati appositamente per i mercati digitali. Inoltre, specialmente in impianti complessi e con molti impianti altamente energivori, uno scenario sempre più realistico nella prospettiva attuale della transizione verso processi C-lean, evitare i picchi di consumo risulta fondamentale sia per l'operatività sia per limitare i costi energetici. Pertanto, idealmente, un EMS di questo tipo porta a una situazione vantaggiosa per tutti in cui sia la rete elettrica sia i consumatori ne traggono vantaggio.

RINGRAZIAMENTI

Il lavoro descritto nel presente articolo è stato sviluppato nell'ambito del progetto intitolato "Energy Management in the Era of Industry 4.0," (Rif. – EnerMIND, Grant Agreement No. 899345)", finanziato dall'Unione europea attraverso il Research Fund for Coal and Steel, a cui vanno i nostri ringraziamenti. La responsabilità dei temi trattati nel presente lavoro è unicamente degli autori; la Commissione non è responsabile dell'uso che potrà essere fatto delle informazioni qui contenute.

BIBLIOGRAFIA

- [1] L. Schlinge, R. Pierre, T. Kordel, S. Gogolin, S. Haverkamp, O. Hellermann, T. Rekersdrees, S. Elsabagh, B. Kleimt. Adaptive on-line control of the EAF based on innovative sensors and comprehensive models for improved yield and energy efficiency (AdaptEAF – RFSR-CT-2014-00004) 1/7/14-30/6/17.
- [2] D.C. Mazur, J.A. Kay, K.D. Mazur, B.K. Venne. The value of integrating power and process for the metals industry, *Iron and Steel Technology*, 15 (5): 56-62, 2018.
- [3] L. Renzhi, B. Ruichang, Y. Huang, L. Yuting, J. Jiang, Y. Ding. Data-driven real-time price-based demand response for industrial facilities energy management, *Applied Energy*, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116291>
- [4] F. Marchiori, M. Benini, S. Cateni, V. Colla, A. Ebel, M.J. Neuer, L. Piedimonte, A. Vignali. Agent-based approach for energy demand-side management, *Stahl und Eisen*, 138(2): 25-29, 2018.
- [5] F. Marchiori, A. Belloni, M. Benini, S. Cateni, V. Colla, A. Ebel, M.J. Neuer, L. Piedimonte, A. Vignali. Integrated dynamic energy management for steel production *Energy Procedia*, 105, 2772-2777, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.597>
- [6] European Union Agency for the Cooperation of Energy Regulators (ACER) Key developments in EU electricity wholesale markets 2024 Market Monitoring Report, 20.03.2024, Last access July 12, 2024 https://www.acer.europa.eu/sites/default/files/documents/Publications/ACER_2024_MMR_Key_developments_electricity.pdf
- [7] H. Hadera, J. Ekström, G. Sand, J. Mantasaari, I. Harjiunkoski, S. Engell. Integration of production scheduling and energy-cost optimization using Mean Value Cross Decomposition, *Computers and Chemical Engineering*, 129, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2019.05.002>
- [8] P.M. Castro, G. Dalle Ave, S. Engell, I.E. Grossman, I. Harjiunkoski. Industrial Demand Side Management of a Steel Plant Considering Alternative Power Modes and Electrode Replacement, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 59: 13642-13656, 2020. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.0c01714>
- [9] V. Colla, C. Pietrosanti, E. Malfa, K. Peters. Environment 4.0: How digitalization and machine learning can improve the environmental footprint of the steel production processes, *Materiaux et Techniques*, 108: 5-6, (2020). <https://doi.org/10.1051/mattech/2021007>

An innovative approach to the energy management of electric steelworks

In the context of electric steelworks, energy management is a key factor to reduce production costs while ensuring satisfaction of energy demands of all the different processes. Energy consumption optimization in the steel production chain can only be achieved by jointly considering individual processes as a network of users, in which each process is already close to the optimal operating point. This results in a large number of energy consumers to be managed, and to this aim a scheduler is usually adopted. The European project EnerMIND aims at effective and efficient steel production and a high utilization rate of production facilities through the implementation of a software demonstrator of a new energy management system based on a new energy management model exploiting a flexible infrastructure. This demonstrator, which covers the whole production chain, considers the areas of the steelworks showing the highest energy demands, i.e. Electric Arc Furnace, secondary steelmaking and the reheating furnaces that feed the rolling mills, in terms of total and peak values.

KEYWORDS: EAF, STEELMAKING, ENERGY EFFICIENCY, ENERGY MANAGEMENT, DIGITALISATION;

TORNA ALL'INDICE >