

Metodologie per l'ottimizzazione della distribuzione di energia nell'industria siderurgica a ciclo integrale

S. Dettori, I. Matino, V. Colla, S. Cateni, M. Vannucci, C. Mocci, L. Vannini

Le acciaierie a ciclo integrale sono impianti energivori che hanno un notevole impatto ambientale. La loro richiesta interna di energia è caratterizzata da una grande diversificazione delle fonti energetiche, e questa richiesta può variare molto durante una singola giornata produttiva. Tuttavia, durante la produzione dell'acciaio sono recuperati ingenti quantità di gas di processo che, oltre a essere utilizzati per la produzione interna di calore, sono valorizzati per la produzione di elettricità e vapore. Ottimizzare la loro distribuzione richiede la previsione accurata dei flussi di energia e di risolvere in tempo reale complessi problemi di ottimizzazione. In questo contesto, la memoria presenta alcune metodologie utilizzate per lo sviluppo di un sistema di supporto alle decisioni basate su tecniche di *machine learning*, adatte alla predizione di consumi e produzioni di energia, e di tecniche di ottimizzazione lineare mista intera. Queste metodologie sono state applicate per l'ottimizzazione della distribuzione energetica in un impianto siderurgico reale con risultati promettenti.

PAROLE CHIAVE: OTTIMIZZAZIONE ENERGETICA, GESTIONE GAS DI SCARICO, RETI VAPORE, INTELLIGENZA ARTIFICIALE;

INTRODUZIONE

Le industrie energivore stanno investendo cospicui sforzi per migliorare la sostenibilità dei loro processi produttivi, aumentando l'efficienza della trasformazione di energia e materiali, diminuendo gli sprechi di energia e migliorando la sincronizzazione dei processi nei grandi impianti. Il raggiungimento di questi obiettivi richiede un ulteriore passo in avanti verso la digitalizzazione dei sistemi di produzione [1] e il miglioramento degli strumenti di gestione e controllo dei processi attraverso strumenti avanzati di simulazione, ottimizzazione e di acquisizione e utilizzo dei dati. In questo contesto, i cosiddetti "gemelli digitali", utilizzati nei sistemi di supporto alle decisioni (DSS) [2] possono svolgere un ruolo chiave, stabilendo una comunicazione attiva con i sistemi fisici che rappresentano. Inoltre, l'interazione tra gemello digitale e processo permette di adattare e migliorare l'accuratezza della loro rappresentazione numerica attraverso l'addestramento continuo dei modelli. Se questi, per esempio, sono basati su reti neurali, beneficiano di meccanismi di addestramento automatico ad apprendimento continuo [3]. Negli ultimi anni, anche l'industria siderurgica ha adottato più fre-

Stefano Dettori, Ismael Matino,
Valentina Colla, Silvia Cateni, Marco
Vannucci, Claudio Mocci, Lorenzo Vannini
Scuola Superiore "Sant'Anna" TeCIP, Pisa, Italy

quentemente tali metodologie per diminuire i propri impatti economici e ambientali, in un mercato delle risorse e dell'energia in continua evoluzione. In questo contesto, le acciaierie a ciclo integrale stanno migliorando la loro flessibilità produttiva e la loro sostenibilità, per esempio, migliorando i sistemi di gestione delle reti energetiche e dei processi connessi attraverso la digitalizzazione [4].

Le acciaierie a ciclo integrale soddisfano parzialmente il proprio fabbisogno energetico attraverso la valorizzazione dei gas di processo (POG) prodotti principalmente nelle cokerie, negli altiforni (BF) e nei convertitori (BOF). Questi gas vengono utilizzati principalmente per la produzione di elettricità nella centrale elettrica interna (PP), per la produzione di vapore o per la produzione di calore. Tuttavia, questi gas sono caratterizzati da una produzione discontinua (in particolare il gas del convertitore, BOFG), con composizione e potere calorifico netto (NCV) variabili nel tempo. La distribuzione dei POG si sviluppa attraverso grandi reti, la cui gestione è un compito impegnativo per gli operatori di processo, a causa della difficoltà di sincronizzare i vari processi produttori e consumatori, che portano spesso a situazioni in cui è necessario gestire l'eccesso o la carenza di gas attraverso torce, gasometri o l'utilizzo di Gas naturale (NG) da fonti esterne. Inoltre, la domanda interna di energia è difficile da prevedere, se non attraverso metodi di modellazione avanzati che fanno un uso massiccio dei dati degli impianti. I consumi interni di gas devono essere costantemente sincronizzati e compensati da sistemi di controllo avanzati, poiché le metodologie e gli approcci di gestione tradizionali usati dagli operatori non consentono di ottimizzare il loro comportamento. Questi problemi possono essere gestiti efficacemente attraverso l'utilizzo di DSS intelligenti, che devono essere progettati sul caso specifico. Tuttavia, lo sviluppo di tali software custom può diventare oneroso e, per livellarne il costo, è necessario l'utilizzo di metodologie e librerie open-source stabili e affidabili.

In letteratura sono riportati diversi studi e metodologie che possono essere utilizzati per lo sviluppo del DSS. I gemelli digitali per la predizione dei flussi energetici sono tipicamente sviluppati attraverso approcci di *Machine Learning* (ML) [5], mentre le metodologie di controllo sono spesso basate sulla programmazione lineare [6], o sulla programmazione lineare mista intera (MILP), per ottimiz-

zare gli aspetti economici e le emissioni di CO₂. La MILP è la formulazione più frequente in questo contesto, poiché consente di considerare il comportamento booleano o intero di alcuni processi, per esempio le modalità di funzionamento delle apparecchiature e le condizioni di accensione e spegnimento [7]. In generale, molti lavori propongono approcci offline per le analisi di scenario o forniscono formulazioni utili per il controllo online, descrivendo strategie di ottimizzazione con orizzonti di previsione fino a 60-90 minuti che tuttavia trascurano importanti aspetti dinamici dei POG, delle reti di vapore e delle apparecchiature coinvolte. In letteratura, nessun approccio sembra davvero esser stato utilizzato per lo sviluppo di DSS da utilizzarsi in tempo reale.

Con lo scopo di superare le limitazioni menzionate, in questo articolo presentiamo le principali metodologie utilizzate per lo sviluppo di un prototipo di DSS per il monitoraggio e l'ottimizzazione della distribuzione dei gas di processo e dei flussi energetici in acciaierie a ciclo integrato. Sono stati sviluppati un'architettura e un software di uso generale, poi adattati al caso di studio di Arcelor-Mittal Bremen, implementando strumenti per la creazione di un gemello digitale, interfacce grafiche utente (GUI) e metodi di ottimizzazione.

CONTESTO INDUSTRIALE

Le acciaierie a ciclo integrato distribuiscono i POG attraverso reti grandi e complesse. Le reti dei POG includono tipicamente una serie di apparecchiature per il controllo della pressione lungo le tubazioni e per la miscelazione quando l'impianto utilizzatore ha bisogno di volumi e NCV entro specifici intervalli operativi. Nel caso studio dell'acciaieria ArcelorMittal Bremen (schematizzata nella figura 1), i POG sono il BFG e il BOFG, in quanto il COG non è disponibile poiché l'impianto importa il coke da fonti esterne. Entrambe le reti gas sono dotate di gasometri e torce per gestire eccedenze o carenze di gas. I gasometri di fatto sono il principale limite del sistema, in quanto hanno vincoli stringenti sul livello di gas. Il BOFG viene usato principalmente nei forni per semilavorati (WBF), in una miscela con NG, oppure viene parzialmente trasferito alla rete BFG, per sfruttarne l'eccesso nella PP. Il BFG viene consumato nella PP, e parzialmente sfruttato nei *cowpers* (circa il 25% del BFG totale) e in volumi minori in

altri processi. La PP consuma una miscela di BFG e NG (e occasionalmente BOFG) quando il suo potere calorifico è insufficiente. I suoi vincoli operativi limitano la potenza massima erogabile, la variazione di potenza erogata, i flussi di gas e il NCV del mix di gas usato. La rete vapore è alimentata principalmente dal vapore prodotto tramite il recupero del calore del BOFG, caratterizzato da un andamento discontinuo gestito attraverso specifici accumulatori. La produzione di vapore viene inoltre integrata attraverso l'utilizzo di caldaie ausiliarie per stabilizzare la pressione in rete e coprire le richieste aggiuntive degli uti-

lizzatori. L'eccesso di vapore viene gestito attraverso un condensatore. Tramite un sistema di scambiatori di calore e condutture, è possibile inoltre alimentare la rete vapore tramite la PP o invertire il flusso per utilizzare il calore in eccesso nella caldaia della centrale. Nella rete del vapore, i vincoli principali riguardano i limiti di pressione nell'accumulatore e nelle condutture, le modalità di funzionamento delle caldaie ausiliarie in termini di potenza termica minima e massima e di produzione di portata massica.

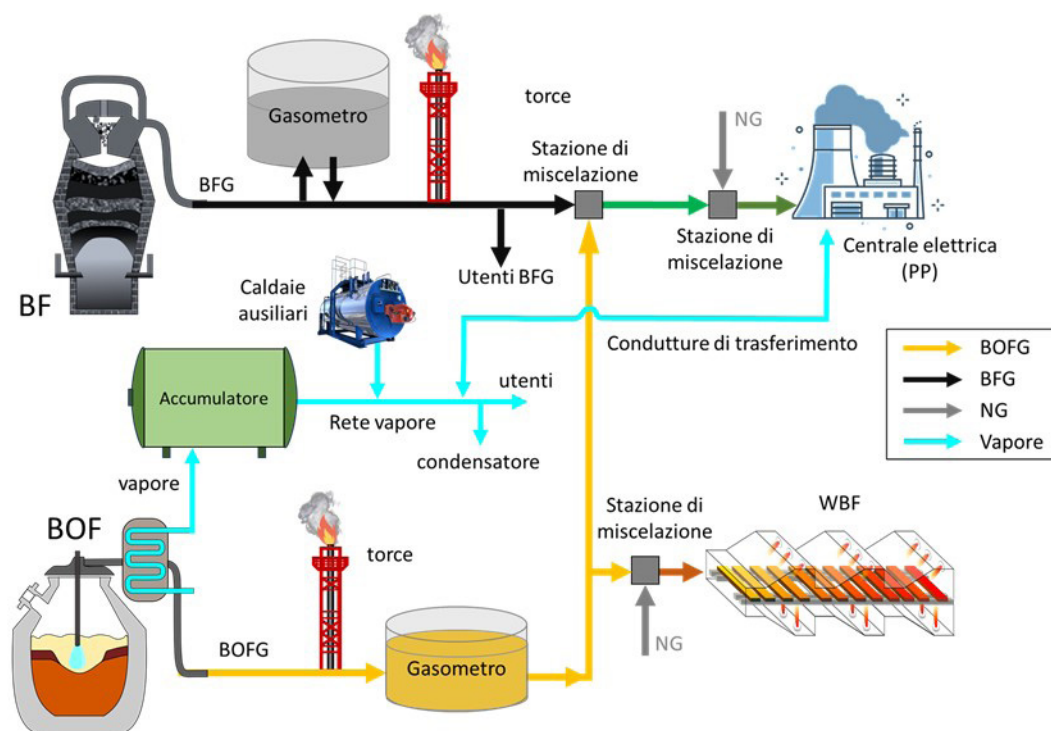


Fig.1 - Rappresentazione delle reti di distribuzione di gas di processo e vapore ad ArcelorMittal Brema / *Schematic representation of the process off-gases and steam distribution networks at ArcelorMittal Bremen.*

IL SISTEMA DI SUPPORTO ALLE DECISIONI

All'interno del progetto "Steam and gas networks revamping for the steelworks of the future – Smarter", co-finanziato dal Research Fund for Coal and Steel (RFCS) della comunità europea, è stato sviluppato un DSS che ha il compito di:

- sincronizzare lo sfruttamento e la distribuzione dell'energia attraverso un controllo ottimizzato della schedulazione della PP e della generazione di vapore;
- stabilizzare il livello dei gasometri, evitando i limiti di livello superiore e inferiore, e stabilizzare la pressione del vapore nelle tubazioni, evitando brusche varia-

ni dei setpoint delle apparecchiature;

- minimizzare l'impatto ambientale, evitando gli sprechi di energia nelle torce nel condensatore di vapore, e quelli economici, considerando i prezzi attuali dei mezzi energetici e trovando la migliore distribuzione dei POG agli impianti interni;
- monitorare lo stato attuale delle reti energetiche da una prospettiva globale, prevedere i principali flussi di energia e tracciare i principali indicatori di prestazione (KPI).

Il DSS sviluppato include un insieme di strumenti e architetture software: (I) un database (DB) e un sistema di co-

municazione; (II) un gemello digitale atto alla rappresentazione di flussi e fabbisogni energetici dell'acciaieria, (III) un framework per l'ottimizzazione e (IV) una serie di interfacce grafiche utente (GUI). In dettaglio, un DB Oracle e un sistema di comunicazione raccolgono e distribuiscono i principali dati dei processi più energivori. L'attuale elenco delle misure usate nel DSS comprende circa 800 punti di misura e la schedulazione dei processi principali. Questi dati vengono sfruttati per monitorare e stimare lo stato attuale del sistema e per prevedere le produzioni future e la domanda di energia, in termini di elettricità, calore, vapore e gas. Il DB inoltre permette di raccogliere i risultati delle previsioni e delle simulazioni del gemello digitale e del sistema di ottimizzazione, supportando inoltre il funzionamento del software, definendo i collegamenti tra i modelli inclusi nel gemello digitale, le relazioni input-output di ciascun modello e le trasformazioni sui dati. Il sistema di comunicazione di ArcelorMittal Bremen è gestito dal framework interno ProDiss, in grado di fornire endpoint per vari protocolli di trasferimento dati, tra cui TCP/IP e REST (http). Questo sistema fornisce un *web-service* per gestire le richieste di dati in entrata dai moduli di calcolo in modo flessibile e resiliente e consente di raccogliere i dati di tutti gli impianti e processi e di distribuirli dal DSS, dal DB e dai centri dati aggiuntivi.

Il software del DSS è composto da tre moduli principali

scritti in linguaggio C#: un'applicazione server, un'applicazione che implementa il gemello digitale e un'applicazione viewer per la visualizzazione dei dati. L'applicazione server gestisce la comunicazione, le query al DB, invia e riceve dati da/verso gli altri moduli, memorizza i risultati nella macchina locale e li invia al sistema ProDiss. L'applicazione del gemello digitale, mostrata in figura 2a, include un insieme di modelli e architetture di modellazione che permettono di prevedere i principali flussi energetici e di simulare il funzionamento delle apparecchiature di trasformazione dell'energia coinvolte. L'applicazione del gemello digitale consente di configurare e addestrare i modelli e di simularli. Il modulo fornisce anche un framework di ottimizzazione basato su *Google Or-tools* per formulare e calcolare la strategia ottimale di distribuzione dell'energia. Inoltre, fornisce un framework basato su *webservice* per dialogare con modelli esterni sviluppati con linguaggi aggiuntivi (per esempio Python). L'applicazione *viewer* mostra i dati dell'impianto, i risultati delle previsioni e le strategie di controllo ottimizzate. Mostra anche gli indicatori di prestazione (KPI) mensili passati e attuali di ciascuna rete energetica. La relativa interfaccia grafica utente (GUI) è illustrata nella figura 2b, che consente di categorizzare e monitorare i dati relativi a ciascuna rete energetica e di interagire con i grafici.

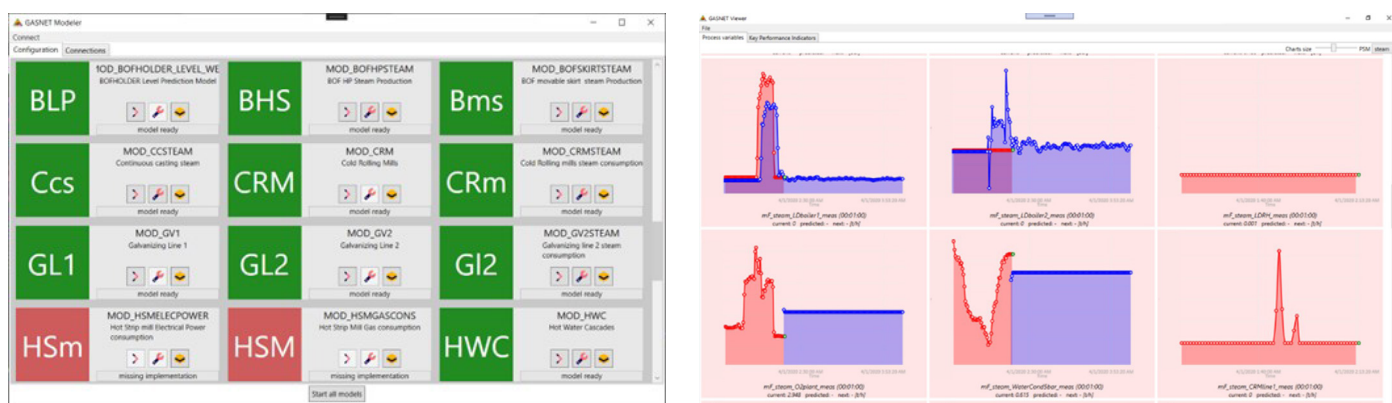


Fig.2 - Interfaccia grafica del gemello digitale (a) e del visualizzatore dati (b) / *Graphical user interface of the digital twin (a) and the data viewer (b).*

DESCRIZIONE DEL GEMELLO DIGITALE

Il cuore del DSS è un gemello digitale progettato per descrivere i flussi energetici dell'acciaieria nel suo complesso, focalizzandosi sugli aspetti dinamici delle reti e sui comportamenti delle apparecchiature di trasformazione dell'energia. Prevede il consumo e la produzione interna non controllabile di POG, calore, elettricità e vapore che agiscono sulle reti come disturbi, e simula il comportamento delle apparecchiature di stoccaggio e trasformazione, come i gasometri, caldaie ausiliarie, accumulatori, torce e la PP. Dal punto di vista del controllo, questi si trovano all'interno dell'anello di controllo. I disturbi citati sono predetti per un orizzonte temporale di 2 ore in avanti, a partire dalle principali misure di ogni spe-

cifico processo e la sua schedulazione dettagliata. Il tempo di campionamento delle misure è pari a 1 minuto per il vapore e la potenza termica, 5 minuti per i flussi POG e di 15 minuti per l'elettricità. Le metodologie di modellazione utilizzano architetture ML e *deep learning*, con l'obiettivo di bilanciare la complessità computazionale e le esigenze di accuratezza. Per questo motivo, le DESN [8] sono state particolarmente efficaci, per la loro rapidità di addestramento e l'accuratezza. Questa caratteristica consente di implementare procedure di apprendimento continuo, adattando il modello quando le sue prestazioni decrescono al di sotto di una determinata soglia.

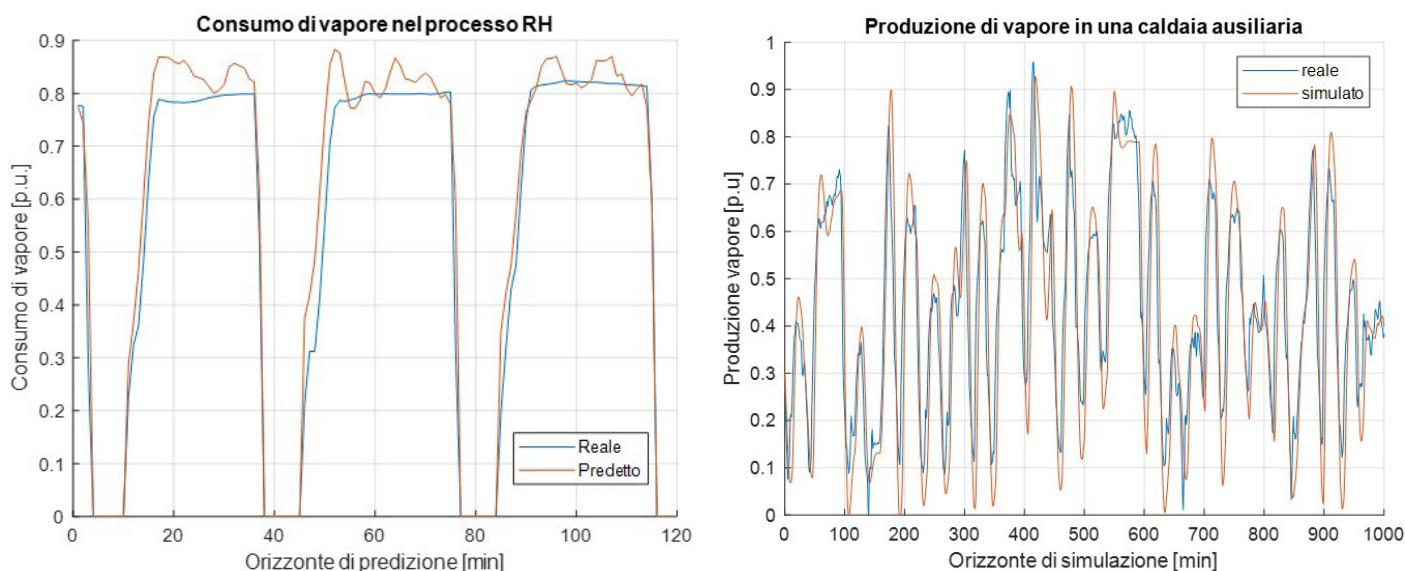


Fig.3 - Esempi di simulazione e predizione del gemello digitale; (a) consumo di vapore nel processo RH, (b) produzione di vapore in una caldaia ausiliaria / *Examples of simulation and forecast of the digital twin. (a) steam consumption in the RH process, (b) steam production in an auxiliary boiler.*

Le *Gaussian Mixture Regression* e le reti neurali *Feed Forward* si sono rivelate le più accurate per la previsione dei flussi di energia elettrica. Alcuni dei risultati ottenuti sono disponibili in [9]. Per i processi controllabili, sono state usate metodologie basate sull'identificazione dei sistemi (modelli a spazio di stato, modelli auto-regressivi lineari) che permettono di rappresentare la dinamica dei sistemi controllati con errori inferiori al 4% in termini di errore assoluto medio percentuale all'interno dei confini operativi. Inoltre, l'approccio lineare permette di semplificare notevolmente l'architettura di controllo. La figura 3

mostra rispettivamente un esempio di previsione di consumo di vapore nel processo di degassaggio (RH) e la simulazione del modello di una caldaia ausiliaria (valori reali in blu, valori simulati/predetti in rosso).

IL SISTEMA DI CONTROLLO

La sincronizzazione dei processi di produzione e consumo di energia all'interno di acciaierie è in generale un compito complesso. Richiede una conoscenza accurata di tutti i futuri flussi di energia distribuiti nel tempo, e soprattutto richiede il coordinamento della produzione

di impianti che sono spazialmente anche molto distanti tra loro. Questo compito viene solitamente gestito dagli operatori di processo e dai gestori degli impianti in modo locale, per ottimizzare il più possibile l'uso delle risorse nelle singole sottoreti, considerando gli scambi di energia e le interazioni reciproche attraverso euristiche di controllo o *best practice* apprese con l'esperienza. Tuttavia, un'ottimizzazione globale va oltre le capacità degli operatori e richiede l'uso di DSS personalizzati. Nel contesto delle acciaierie a ciclo integrale, il problema di ottimizzazione può essere efficacemente approssimato con MILP come spesso è stato presentato in letteratura [10]. Questa formulazione permette di descrivere il funzionamento dinamico e le logiche di controllo delle apparecchiature e dei sistemi complessi. All'interno del progetto SMARTER è stato sviluppato un sistema di controllo rappresentato nella figura 4. Il sistema calcola la strategia di controllo manipolando: (I) nella rete BFG (che include il PP come principale impianto di trasformazione), i consumi di BFG, BOFG e NG nella PP e il consumo di BFG nelle torce; (II)

nella rete vapore, il consumo di gas nelle caldaie ausiliarie, la portata massica di vapore nel condensatore, il trasferimento di calore tra la rete del vapore e la PP.

La struttura matematica del problema di ottimizzazione implementa un approccio di tipo *Economic Hybrid Distributed Model Predictive Control* che include un insieme di vincoli per descrivere le dinamiche principali, il principio di conservazione della massa/energia in ogni rete, i vincoli principali dei processi di trasformazione e una funzione obiettivo che considera i costi economici globali dell'acciaieria e l'impatto ambientale. L'approccio distribuito permette di avere controllori/agenti multipli che collaborano tra di loro per la soluzione di un problema complesso in tempo reale. Ciascuna rete è ottimizzata dal proprio controllore, che implementa una formulazione MILP. L'impatto ambientale è formulato considerando gli sprechi di energia nelle torce o la condensazione del vapore nel condensatore. I dettagli sono riportati nell'articolo [11].

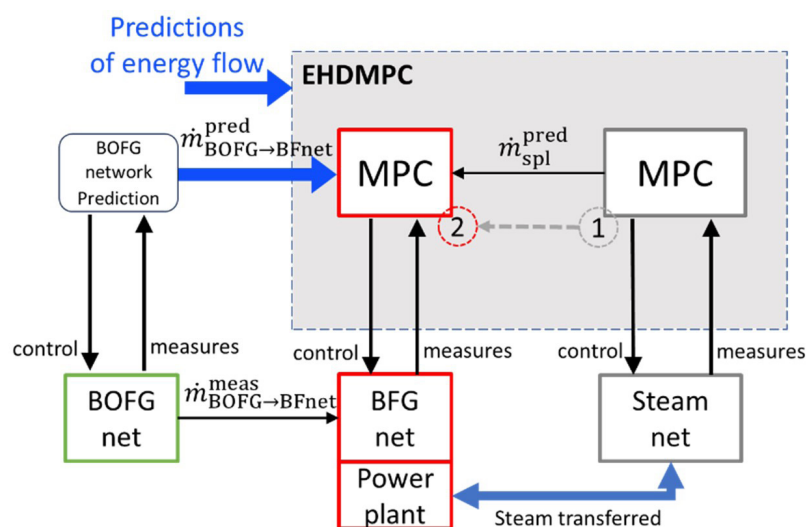


Fig.4 - Schema del sistema di controllo e ottimizzazione / *Scheme of the control/optimization system.*

Durante la fase di prototipazione, il sistema di controllo è stato simulato in anello chiuso per valutare i potenziali benefici economici e ambientali dell'approccio proposto. I risultati della simulazione sono molto promettenti, e mostrano un potenziale risparmio di costi energetici di circa il 41% per la parte di energia controllabile, attraverso uno sfruttamento intelligente dell'eccesso di POG, evitando l'uso di torce, diminuito di circa il 96,9%. La sincronizzazione delle caldaie au-

siliarie con le esigenze interne consente di ridurre potenzialmente la condensazione del vapore nel condensatore di circa il 50%. Lo sfruttamento efficiente dei POG consente di ridurre i costi di acquisto di NG (nelle apparecchiature controllabili) di circa il 27,5%, con una riduzione proporzionale delle emissioni di CO₂. Lo stato corrente dei lavori sul DSS si concentra sul test del controllore della rete di vapore sul campo per valutare i reali risparmi sulla gestione e sull'impatto ambientale.

CONCLUSIONI

In questa memoria viene presentato un approccio allo sviluppo di un sistema di supporto alle decisioni per operatori di processo e i responsabili di impianto, con lo scopo di ottimizzare i flussi energetici nelle acciaierie a ciclo integrale. Il software comprende un gemello digitale dell'acciaieria che permette di prevedere e simulare i principali flussi energetici in termini di elettricità, vapore, gas di processo e potenza termica richiesta dai principali processi. Il gemello digitale, sviluppato attraverso tecniche di machine learning e d'identificazione dei sistemi, interagisce con un sistema di controllo il cui scopo è calcolare dei setpoint per la sincronizzazione dei principali sistemi manipolabili, con l'obiettivo di minimizzare i costi di gestione, gli sprechi energetici e l'impatto ambientale. Il sistema è in fase di sperimentazione nell'acciaieria ArcelorMittal Bremen. I risultati ottenuti durante la campagna di simulazione mostrano che la strategia di controllo suggerita dal software può ridurre l'impatto economico del 41% per la frazione controllabile dei flussi energetici, sfruttando in modo efficiente i gas di processo e il vapore, grazie a una so-

stanziale riduzione degli sprechi energetici. Inoltre, la frazione controllabile del consumo di gas naturale potrebbe essere ridotta del 27,5%. Il lavoro è attualmente focalizzato sui test in campo e sul tuning dei parametri dei sistemi di controllo.

RINGRAZIAMENTI

Il lavoro descritto nel presente lavoro è stato sviluppato nell'ambito del progetto dal titolo "*Steam and gas net-works revamping for the steelworks of the future*" (SMARTER GA 101034060), co-finanziato dall'Unione europea tramite il *Research Fund for Coal and Steel* (RFCS), che gli Autori ringraziano. La responsabilità esclusiva delle questioni trattate nel presente lavoro è degli autori; l'Unione non è responsabile per l'uso che può essere fatto delle informazioni ivi contenute.

BIBLIOGRAFIA

- [1] M. Kaniappan Chinnathai, B. Alkan. A digital life-cycle management framework for sustainable smart manufacturing in energy intensive industries. *J Clean Prod.* 2023;138259. doi: [10.1016/j.jclepro.2023.138259](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138259)
- [2] E. van der Horn, S. Mahadevan. Digital Twin: Generalization, characterization and implementation. *Decision Support Systems.* 2021 Jun;113524. doi: [10.1016/j.dss.2021.113524](https://doi.org/10.1016/j.dss.2021.113524)
- [3] R. Hadsell, D. Rao, A. A. Rusu, R. Pascanu. Embracing Change: Continual Learning in Deep Neural Networks. *Trends Cogn Sci.* 2020; (12):1028–40. doi: [10.1016/j.tics.2020.09.004](https://doi.org/10.1016/j.tics.2020.09.004)
- [4] T. A. Branca, B. Fornai, V. Colla, M. M. Murri, E. Streppa, A. J. Schröder. The Challenge of Digitalization in the Steel Sector. *Metals.* 2020; (2):288. doi: [10.3390/met10020288](https://doi.org/10.3390/met10020288)
- [5] I. Matino, S. Dettori, V. Colla, V. Weber, S. Salame. Two innovative modelling approaches in order to forecast consumption of blast furnace gas by hot blast stoves. *Energy Procedia.* 2019;4043–8. doi: [10.1016/j.egypro.2019.01.834](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.834)
- [6] Zhang K., Zheng Z., Feng L., Su J., Li H. A byproduct gas distribution model for production users considering calorific value fluctuation and supply patterns in steel plants. *Alexandria Engineering Journal.* 2023;821–34. doi: [10.1016/j.aej.2023.06.063](https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.06.063)
- [7] J. G. C. Pena, V. B. de Oliveira, J. L. F. Salles. Optimal scheduling of a by-product gas supply system in the iron and steel-making process under uncertainties. *Comput Chem Eng.* 2019;351–64. doi: [10.1016/j.compchemeng.2019.01.025](https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2019.01.025)
- [8] C. Gallicchio, A. Micheli, L. Pedrelli. Design of deep echo state networks. *Neural Networks.* 2018; 33–47. doi: [10.1016/j.neunet.2018.08.002](https://doi.org/10.1016/j.neunet.2018.08.002)
- [9] S. Dettori, I. Matino, V. Colla, R. Speets. A Deep Learning-based approach for forecasting off-gas production and consumption in the blast furnace. *Neural Comput Appl.* 2021;(2):911–23. doi: [10.1007/s00521-021-05984-x](https://doi.org/10.1007/s00521-021-05984-x)
- [10] S. Dettori, I. Matino, V. Iannino, V. Colla, A. Hauser, P. Wolf-Zöllner, et al. Optimizing methane and methanol production from integrated steelworks process off-gases through economic hybrid model predictive control. *IFAC Pap OnLine.* 2022;(2):66–71. doi: [10.1016/j.ifacol.2022.04.171](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.04.171)
- [11] S. Dettori, I. Matino, V. Colla, A. Wolff, M. Neuer, V. Baric, et al. Optimizing integrated steelworks process off-gas distribution through Economic Hybrid Model Predictive Control and Echo State Networks. *IFAC Pap OnLine.* 2022;(40):301–6. doi: [10.1016/j.ifacol.2023.01.089](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2023.01.089)

Methods for optimizing energy distribution in the integrated steel making industry

Integrated steelworks are energy-intensive facilities that also have a significant environmental impact. Their internal energy demand is characterized by a large diversification of energy sources, and this demand can vary widely during a single production day. However, during steel production, large amounts of process gases are recovered which, besides being used for the internal heat production, are valorized for producing electricity and steam in the power plant. Optimizing their distribution requires accurate forecasting of energy flows and solving complex real-time optimization problems. In this context, this paper presents some methodologies used for developing a decision support system based on machine learning techniques, suitable for the prediction of energy consumption and production, and linear mixed integer optimization techniques. These methodologies have been applied for the optimization of energy distribution in a real steel plant with promising results.

KEYWORDS: ENERGY OPTIMIZATION, OFF-GAS MANAGEMENT, STEAM NETWORKS, ARTIFICIAL INTELLIGENCE;

[TORNA ALL'INDICE >](#)