

UN SISTEMA PER L'OTTIMIZZAZIONE DI UN FORNO DELL'ACCIAIERIA FERALPI

Controllo avanzato per un forno di preriscaldamento in acciaieria

Il presente articolo descrive un progetto di efficienza energetica orientato all'installazione di un sistema di controllo avanzato per l'ottimizzazione di un forno di preriscaldamento di billette. Tale progetto è stato svolto mediante una collaborazione tra Alperia Bartucci SpA e il Gruppo Feralpi.

Giovanni Bartucci,
Giacomo Astolfi,
Sofia Montironi,
Lorenzo Orlietti,
Crescenzo Pepe,
Chiara Valzecchi,
Maurizio Fusato,
Fabio Morandini,
Stefano Salvagno,
Giuseppe Politano',
Gabriele Mazzi,
Giuseppe Forbice

Al giorno d'oggi, i sempre più stringenti requisiti di efficienza energetica e di riduzione dell'impatto ambientale hanno portato ad innovazioni nel ciclo produttivo dell'industria dell'acciaio, accompagnate dall'aumento del livello di automazione. La catena di produzione tipica di un'industria dell'acciaio è rappresentata in ► **Figura 1**. Da una prima fase di lavorazione delle materie prime, vengono ottenuti dei semilavorati (esempio: billette) d'acciaio, i quali vengono poi riscaldati in un forno di preriscaldamento. Bruciatori aria/gas innescano le reazioni di combustione lungo il percorso dei semilavorati all'interno del forno; la specifica principale consiste nel garantire un riscaldamento appropriato dei semilavorati nel corso del loro spostamento all'interno del forno, al fine di assicurare una deformazione opportuna nelle gabbie di laminazione per l'ottenimento del prodotto finito [1], [2]. Il forno di preriscaldamento rappresenta una fase critica per quanto riguarda l'efficienza energetica e la qualità dei prodotti. In tale contesto, l'installazione di **Sistemi di Controllo Avanzato** (Advanced Process Control, APC)

garantisce l'ottenimento di efficienza energetica e di risparmio nei costi di produzione nel lungo periodo [3], [4], [5], [6].

Il presente articolo descrive la progettazione e l'installazione di un sistema APC per l'ottimizzazione di un forno di preriscaldamento di billette denominato LAM1, localizzato all'interno dell'acciaieria del Gruppo Feralpi con base a Lonato del Garda (BS). **Il sistema APC è stato progettato dalla Business Unit CAM (Control Automation & Monitoring) di Alperia Bartucci S.p.A.** La soluzione proposta da Alperia Bartucci si basa su un metodo di controllo ad-hoc per l'ottimizzazione di forni di preriscaldamento, il quale ha ottenuto un **brevetto italiano** nel 2016 [7] e un **importante riconoscimento** nel 2015 (CESEF - Centro Studi sull'Economia e il Management dell'Efficienza Energetica - Project Energy Efficiency Award).

Il **Gruppo Feralpi** è tra i principali produttori siderurgici in Europa specializzato negli acciai per l'edilizia con una produzione che, ad oggi, si attesta in oltre due milioni di tonnellate l'anno

A FIL DI RETE

www.alperiabartucci.it
www.feralpigroup.com

GLI AUTORI

G. Bartucci, G. Astolfi, S. Montironi, L. Orlietti, C. Pepe, C. Valzecchi - Alperia Bartucci S.p.A., Soave (VR); M. Fusato, F. Morandini, S. Salvagno, G. Politano', G. Mazzi, G. Forbice - Feralpi Group, Lonato (BS)

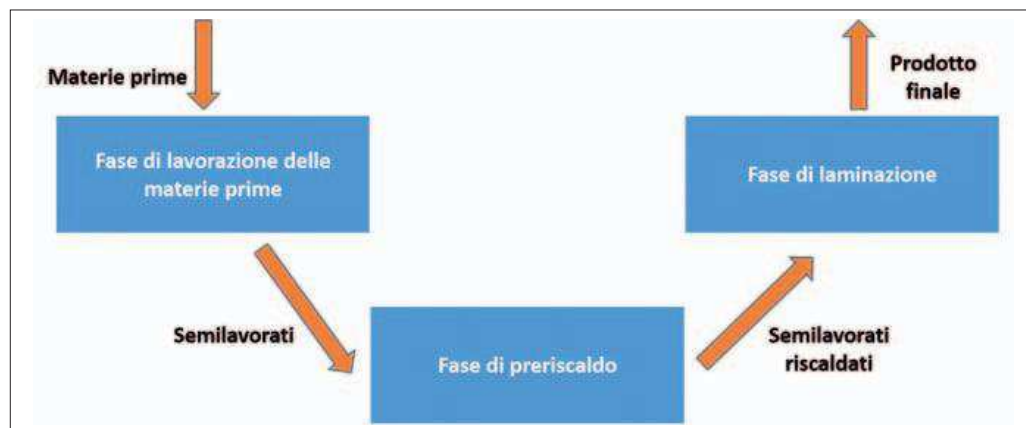


Figura 1 - Workflow generale dell'industria dell'acciaio

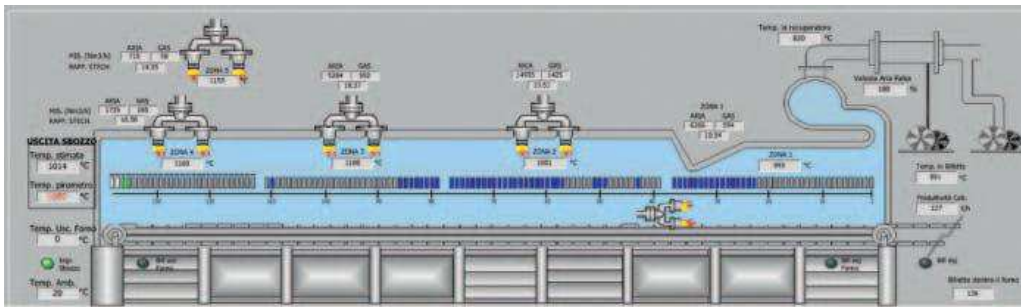


Figura 2 - Rappresentazione schematica del forno di preriscaldamento

ed occupa stabilmente 1.400 dipendenti tra Italia, Europa e Nord Africa. Motore dello sviluppo, l'innovazione per Feralpi è una componente imprescindibile della propria strategia aziendale affinché la ricerca della competitività passi attraverso progetti capaci di dare concretezza alla sostenibilità. Ovvero, raggiungere le migliori performance tecniche riducendo i consumi, abbattendo le emissioni e incrementando gli standard di sicurezza in una progressione continua utilizzando le migliori tecnologie disponibili: tra queste è possibile annoverare il sistema APC proposto da Alperia Bartucci.

Alperia Bartucci è attiva nello studio, nella progettazione e nella realizzazione di interventi di efficienza energetica industriale, anche con investimenti diretti, ed offre ai propri clienti consulenza tecnica e gestionale in ambito energetico. Presente su tutto il territorio nazionale con sedi operative a Soave, Milano e Falconara M.ma, Alperia Bartucci segue oggi oltre 300 clienti dislocati in tutta Italia e si avvale di un team di lavoro composto da più di 50 professionisti capaci di individuare le migliori soluzioni per minimizzare i consumi energetici dei processi produttivi.

Descrizione del processo

La ► **Figura 2** mostra una pagina della Graphical User Interface (GUI) del sistema APC sviluppato, nella quale viene riportata una rappresentazione schematica del forno di preriscaldamento analizzato. Il forno analizzato è di tipo *pusher type*: le 138 ($m_b=138$) billette all'interno del forno sono poste una vicina all'altra e il loro transito viene attuato mediante l'azione di opportuni spintori. Le billette vengono caricate singolarmente o a coppie e la loro temperatura di ingresso nel forno può essere molto varia (range 0-910 °C). La temperatura superficiale delle billette in ingresso viene misurata attraverso l'azione di due pirometri ottici posti vicino all'entrata del forno (► **Figura 3**). La produttività del forno può raggiungere le 170



Figura 3 - Fotografia della parte di informamento delle billette

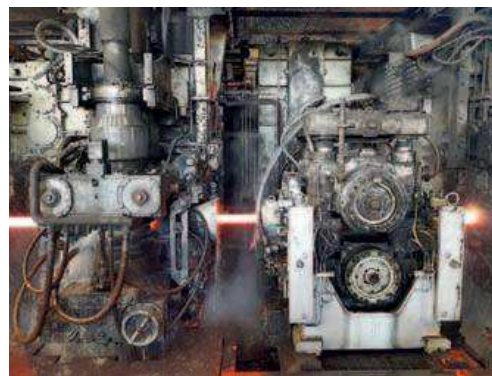


Figura 4 - Fotografia della parte di laminazione delle billette

t/h. Il forno è suddiviso come segue: la zona 1 permette un preriscaldamento iniziale delle billette, le zone 2 e 3 effettuano il riscaldamento vero e proprio mentre l'equalizzazione viene effettuata dalle zone 4 e 5 (disposte una vicina all'altra perpendicolarmente all'asse del forno). La temperatura superficiale delle billette in uscita viene misurata da un pirometro ottico posto dopo le prime tre gabbie di laminazione (► **Figura 4**). Un range di esempio per la temperatura di uscita delle billette è 930-1030 °C. Le specifiche per la temperatura di uscita delle billette possono variare in base al diametro del prodotto finito richiesto. La combustione all'interno del forno è regolata da **controllori PID** (Proportional Integral Derivative) di temperatura che

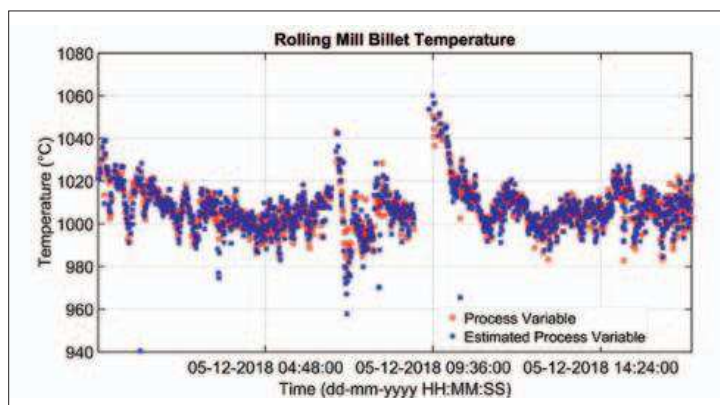


Figura 5 - Stima del sensore virtuale

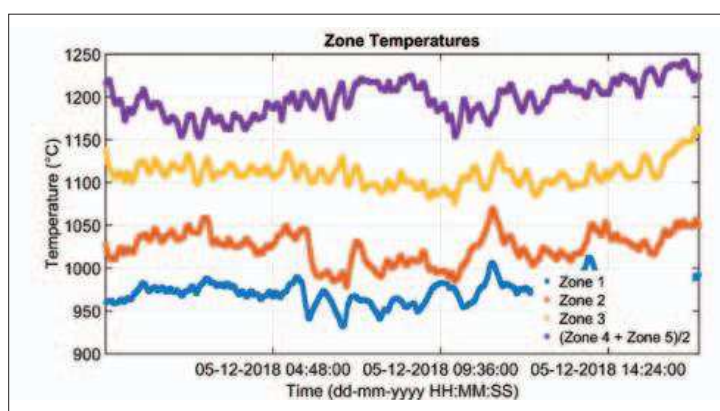


Figura 6 - Ingressi del sensore virtuale

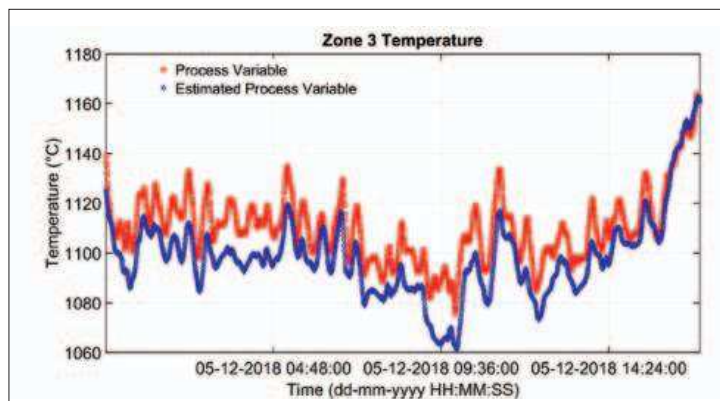


Figura 7 - Prestazioni del modello relativo alla zona 3

agiscono in cascata su aria e gas di ogni singola zona del forno. Prima dell'installazione del sistema APC, gli operatori, in base alla loro esperienza e alle condizioni del forno, assegnavano il *setpoint* di temperatura di ogni zona.

La soluzione innovativa proposta da Alperia Bartucci

Una criticità molto importante in un forno di preriscaldamento è costituita dalla mancanza di misure della temperatura delle billette all'interno del forno; il sistema APC proposto da Alperia Bar-

tucci è dotato di un sensore virtuale per la stima della temperatura delle billette a partire dal loro ingresso nel forno fino ad arrivare all'ultima gabbia di laminazione (il forno considerato è caratterizzato da 6 gabbie di laminazione) [7]. Il sensore virtuale si basa su un modello ai principi primi non lineare con coefficienti che vengono adattati in linea. Inoltre, al fine di tracciare la posizione delle billette nel forno, è stato sviluppato un algoritmo di tracciamento basato sui segnali forniti dai PLC (Programmable Logic Controller) di impianto. Gli ingressi del modello non lineare sono costituiti dalle temperature di zona 1, 2, 3 e dalla media tra le temperature delle zone 4 e 5 (misurate da opportune termocoppie). La ► Figura 5 mostra un esempio di prestazioni del sensore virtuale, i cui ingressi sono stati riportati nella ► Figura 6. Nella ► Figura 5 la misura fornita dal pirometro ottico situato dopo le prime tre gabbie di laminazione (colore rosso) viene confrontata con la stima del sensore virtuale (colore blu). È da sottolineare il fatto che la temperatura di ingresso nel forno relativa alle billette considerate nella figura varia in tutto il range 0-910 °C. In condizioni di marcia regolare, l'RMSEP (Root Mean Square Error of Prediction) relativo alla temperatura delle billette in corrispondenza del pirometro ottico situato dopo le prime tre gabbie di laminazione si assesta nel range 8-15 °C (poco superiore all'1% del range di misura).

Il modello non lineare relativo al sensore virtuale è stato opportunamente linearizzato al fine di essere incluso in una strategia di controllo basata su modelli lineari. Come tipico nelle applicazioni di controllo industriale, sono state selezionate le Variabili Manipolate (MVs, u) e le Variabili Controllate (CVs). Le MV del sistema APC sono i *set-point* di temperatura relativi alle cinque zone del forno; il gruppo delle CV è stato suddiviso in due sottocategorie: le CV relative al forno (y ; esempio: le misure dei sensori di temperatura delle varie zone del forno e dell'ingresso recuperatore) e le CV relative alle billette (b ; la temperatura delle billette che transitano nel forno). Al fine di ottenere dei modelli matematici tra u e y , è stato utilizzato un approccio di tipo *black-box*; la ► Figura 7 riporta un esempio di tale modellazione, relativo alla zona 3 del forno. Mediante i modelli matematici u - y , sono stati ricavati dei modelli matematici u - b .

Il sistema APC proposto da Alperia Bartucci si basa su tecniche di controllo predittivo (Model Predictive Control, MPC) [8]. Esso utilizza il modello globale lineare del forno descritto in precedenza. La ► Figura 8 mostra

uno schema relativo al sistema APC: uno **Scada** (Supervisory Control and Data Acquisition) provvede a fornire i segnali e i parametri ad ogni istante di controllo; il blocco Data Conditioning & Decoupling Selector (DC&DS) esegue diverse funzioni, come la validazione dei segnali che arrivano dal processo reale; il blocco MPC calcola gli ingressi ottimi da fornire al processo reale ($u(k)$) ad ogni istante di controllo.

La strategia MPC sviluppata da Alperia Bartucci si basa su un'architettura a due livelli, rappresentati in ► **Figura 8** (DO e TOCS) [7], [8]. I moduli TOCS e DO risolvono dei problemi di ottimizzazione, formulati calcolando la predizione di tutte le variabili impiegate su un orizzonte di predizione H_p . Il modulo TOCS risolve un problema di programmazione lineare (LP), caratterizzato dalla seguente funzione di costo (da minimizzare) e dai seguenti vincoli:

$$V_{TOCS}(k) = c_u^T \cdot \Delta \hat{u}_{TOCS}(k) + \rho_{y,TOCS}^T \cdot \varepsilon_{y,TOCS}(k)$$

s.t.

$$\begin{aligned} & \text{i. } lb_{du,TOCS} \leq \Delta \hat{u}_{TOCS}(k) \leq ub_{du,TOCS} \\ & \text{ii. } lb_{u,TOCS} \leq \hat{u}_{TOCS}(k) \leq ub_{u,TOCS} \\ & \text{iii. } lb_{y,TOCS} - \gamma_{by,TOCS} \cdot \varepsilon_{y,TOCS}(k) \leq \hat{y}_{TOCS}(k) \leq ub_{y,TOCS} + \gamma_{by,TOCS} \cdot \varepsilon_{y,TOCS}(k) \\ & \text{iv. } \varepsilon_{y,TOCS}(k) \geq 0 \end{aligned}$$

Il modulo DO risolve un problema di programmazione quadratica (QP), caratterizzato dalla seguente funzione di costo (da minimizzare) e dai seguenti vincoli:

$$V_{DO}(k) = \sum_{i=0}^{H_p-1} \|\hat{u}(k+i|k) - u_r(k+i|k)\|_{S(i)}^2 + \sum_{i=1}^{H_p} \|\hat{y}(k+i|k) - y_r(k+i|k)\|_{Q(i)}^2 + \sum_{i=1}^{H_u} \|\Delta \hat{u}(k+M_i|k)\|_{R(i)}^2 + \|\varepsilon_y(k)\|_{\rho_y}^2 + \sum_{j=1}^{m_b} \|\hat{b}_j(k+e_j|k) - lb_{b,DO_j}\|_{T_j}^2 + \|\varepsilon_b(k)\|_{\rho_b}^2$$

s.t.

$$\begin{aligned} & \text{i. } lb_{du,DO}(i) \leq \Delta \hat{u}(k+M_i|k) \leq ub_{du,DO}(i), i = 1, \dots, H_u \\ & \text{ii. } lb_{u,DO}(i) \leq \hat{u}(k+M_i|k) \leq ub_{u,DO}(i), i = 1, \dots, H_u \\ & \text{iii. } lb_{y,DO}(i) - \gamma_{by,DO}(i) \cdot \varepsilon_y(k) \leq \hat{y}(k+i|k) \leq ub_{y,DO}(i) + \gamma_{by,DO}(i) \cdot \varepsilon_y(k), i = 1, \dots, H_p \\ & \text{v. } lb_{b,DO_j} - \gamma_{bb,DO_j} \cdot \varepsilon_b(k) \leq \hat{b}_j(k+e_j|k) \leq ub_{b,DO_j} + \gamma_{bb,DO_j} \cdot \varepsilon_b(k), j = 1, \dots, m_b \\ & \text{v. } \varepsilon_y(k) \geq 0; \varepsilon_b(k) \geq 0 \end{aligned}$$

L'architettura di controllo sviluppata permette di raggiungere condizioni operative ottimizzate ma che allo stesso tempo rispettano le specifiche di controllo del forno. Una gestione ottimale dei set-point delle temperature di zona permette infatti di soddisfare i requisiti di riscaldamento delle billette che transitano nel forno. Il sistema di controllo garantisce l'ottimizzazione

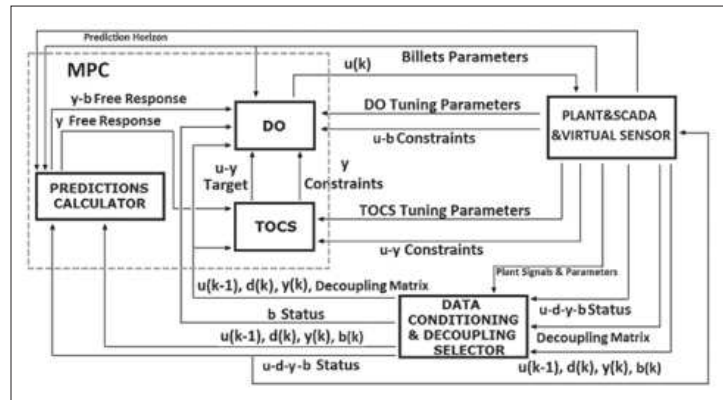


Figura 8 - Architettura del sistema APC

di tutte le condizioni operative: marcia regolare (le billette vengono fatte avanzare nel forno di riscaldamento senza interruzioni temporali), soste del forno programmate (il movimento delle billette deve essere arrestato, ad esempio a causa di cambiamenti nella linea di produzione), soste del forno non programmate (il movimento delle billette deve essere improvvisamente arrestato,

ad esempio a causa di un incaglio nella fase di laminazione).

Il sistema APC è stato sviluppato mediante un'integrazione tra

l'ambiente di sviluppo **MatLab** (MathWorks) e la piattaforma **Scada/HMI** (Human-Machine Interface) **Movicon** (Progea). Oltre al sistema di controllo, la soluzione proposta da Alperia

Bartucci è dotata di un simulatore di processo (sia in MatLab sia in Movicon), il quale permette di effettuare simulazioni in ambiente virtuale utili all'individuazione di condizioni critiche dell'impianto e all'ottimizzazione dei parametri di tuning del controllore.

Le ► **Figure 9-10**

rappresentano esempi della HMI/GUI sviluppata per il sistema APC. La ► **Figura 9** mostra la pagina relativa alle CV sulla piattaforma Movicon: si noti ad esempio l'opzione on/off su ogni singola CV. La ► **Figura 10** mostra la pagina che permette, lato PLC di stabilimento, di abilitare il controllo da parte del sistema APC per ogni singola zona del forno.

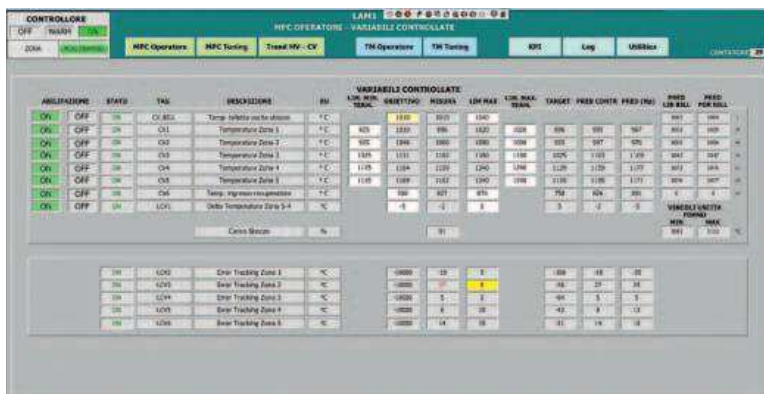


Figura 9 - Pagina relativa alle CV (Movicon)



Figura 10 - Pagina per l'abilitazione delle MV (HMI stabilimento)

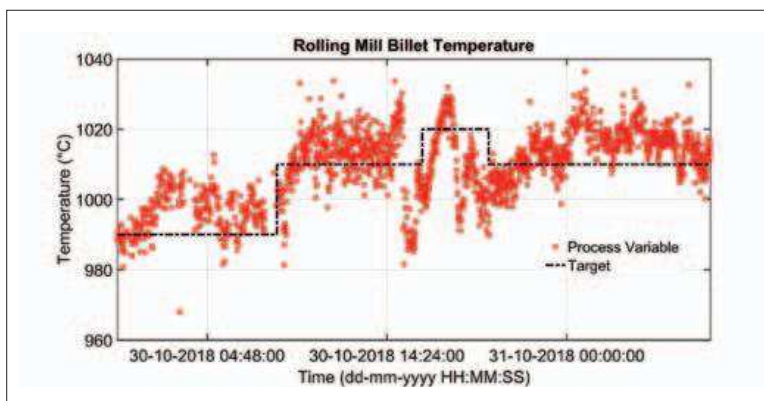


Figura 11 - Temperatura misurata dal pirometro ottico situato dopo le prime tre gabbie di laminazione e relativo target

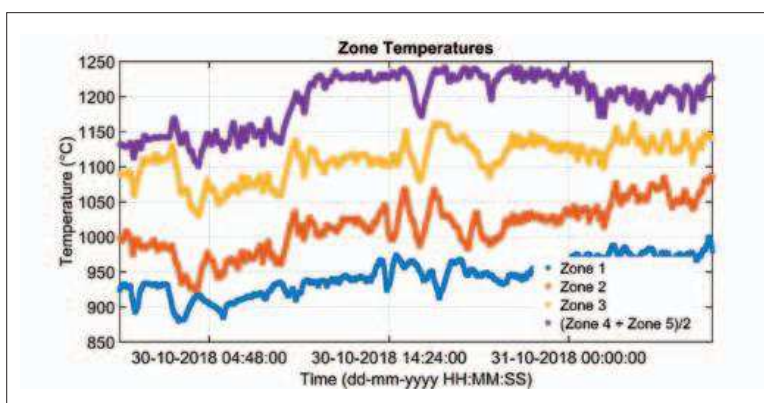


Figura 12 - Temperatura delle zone del forno sotto sistema APC

Risultati reali

A valle delle fasi di modellazione e simulazione in ambiente virtuale, il sistema APC è stato commissionato in impianto (aprile 2018). Una forte cooperazione tra il personale del Gruppo Feralpi e quello di Alperia Bartucci ha consentito di realizzare la fase di commissioning in tempi molto rapidi raggiungendo, fin da subito, alte performance in termini di ottimizzazione dei profili di riscaldamento delle billette e, conseguentemente, di efficienza energetica generata.

Le ► **Figura 11-12** rappresentano una condizione del processo reale sotto il controllo del sistema APC. Lo scenario proposto ricopre un periodo di 31 ore. Il periodo considerato è affetto da forti variazioni della produttività del forno (range 0-150 t/h) e della temperatura di ingresso delle billette (0-910 °C). La temperatura delle billette misurata dal pirometro situato dopo le prime tre gabbie di laminazione è stata riportata in ► **Figura 11** (colore rosso), insieme al target di temperatura desiderato (colore nero). La temperatura delle zone del forno è stata riportata in ► **Figura 12**. La ► **Figura 11** mostra un andamento soddisfacente della temperatura delle billette, ottenuto grazie a una stabilizzazione dell'errore di controllo rispetto al target assegnato: il sistema APC riesce a gestire con successo la produttività non costante e la carica mista (differenti temperature) in ingresso al forno.

Grazie all'installazione del sistema APC, è stata incrementata l'efficienza energetica del forno rispetto alla conduzione precedente. È stata effettuata una valutazione del consumo specifico di gas naturale sulle campagne produttive relative ai prodotti finali più frequenti: l'approccio, basato sul calcolo di una baseline estratta in un periodo precedente alla messa in servizio del sistema APC, ha evidenziato una significativa riduzione del consumo specifico.

Valutando la quantità di billette informate e di prodotto finale ottenuto, l'efficienza di produzione, la temperatura di ingresso delle billette nel forno, la percentuale di carica calda in ingresso al forno e la misura degli assorbimenti delle gabbie di laminazione, sono state scartate le campagne produttive meno significative ('outlier'), ottenendo così un insieme di campagne confrontabili.

Ad esempio, considerando le campagne produttive di uno dei prodotti finali analizzati, sono state ottenute cinque campagne ex-ante (► **Figura 13**, nero) e sette campagne ex-post (► **Figura 13**, blu) installazione. Utilizzando i dati cumulativi delle campagne ex-ante per il calcolo della

baseline (► **Figura 13**, rosso), il consumo specifico cumulativo ex-post (► **Figura 13**, verde) è risultato essere inferiore del 2.88%.

L'analisi condotta su tutti i prodotti finali più frequenti e significativi ha portato al **calcolo del risparmio medio generato dal sistema APC**, che si è rivelato essere **pari al 2%**.

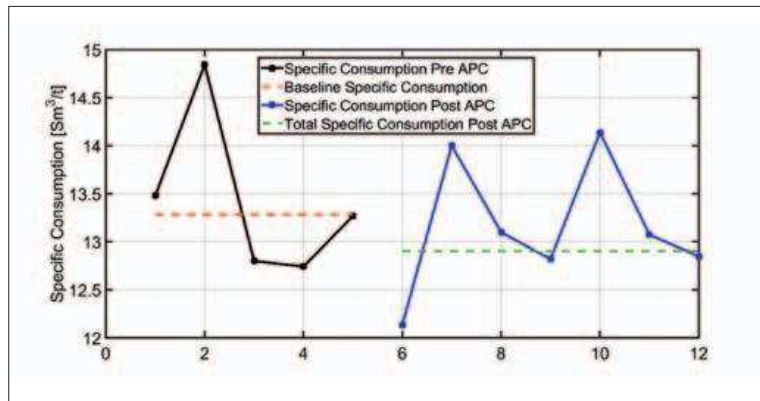


Figura 13 - Valutazione dei risparmi per uno dei prodotti finali analizzati

Conclusioni

I risultati presentati nel presente articolo nascono dall'ottima sinergia tra la Business Unit CAM (Control Automation & Monitoring) di Alperia Bartucci e lo staff del Gruppo Feralpi, orientata alla realizzazione del progetto di ottimizzazione del forno di preriscaldamento LAM1 presente nello stabilimento di Lonato del Garda (BS). Il progetto ha riguardato l'installazione di una soluzione brevettata di controllo avanzato, proprietaria di Alperia Bartucci e la sua applicazione ha apportato miglioramenti rispetto alla precedente gestione manuale del forno.

Il commissioning del sistema APC è avvenuto agevolmente attraverso la stretta collaborazione del team Alperia Bartucci con quello del Gruppo Feralpi. Gli operatori di sala controllo sono stati formati sulle caratteristiche e sul funzionamento del sistema di controllo avanzato, il quale ha consentito di incrementare il loro profilo tecnico e la loro professionalità.

A valle della messa in servizio del sistema di controllo avanzato, sono stati valutati i risparmi di consumo specifico di combustibile generati, confrontando i dati storici ex-ante con quelli ex-post installazione. Prendendo come riferimento le campagne produttive relative ai prodotti finali più frequenti e significativi, si è registrato **un abbassamento del consumo specifico di gas naturale pari al 2%**: un risultato molto interessante considerando che il forno di riscaldamento in questione è un processo fortemente energivoro caratterizzato da un grande consumo di gas naturale.

La specifica configurazione hardware e software del sistema di controllo avanzato, costituita da un PC interconnesso alla rete di stabilimento e in grado di ospitare gli algoritmi che supervisionano il processo produttivo e che generano i comandi che automaticamente vengono inviati al forno

di preriscaldamento, rendono la soluzione proposta da Alperia Bartucci eleggibile ai **benefici fiscali previsti della Legge 11 dicembre 2016, n. 232** (Industria 4.0).

Riferimenti

- [1] W. Trinks, M. H. Mawhinney, R. A. Shannon, R. J. Reed, J. R. Garvey, *Industrial Furnaces*. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, 2004.
- [2] A. Martensson, "Energy efficiency improvement by measurement and control: a case study of reheating furnaces in the steel industry," in *Proc. 14th National Industrial Energy technology Conference*, pp. 236-243, 1992.
- [3] M. Bauer, I. K. Craig, "Economic assessment of advanced process control – A survey and framework," *Journal of Process Control*, vol. 18, no. 1, pp. 2-18, 2008.
- [4] H. S. O. Santos, P. E. M. Almeida, R. T. N. Cardoso, "Fuel Costs Minimization on a Steel Billet Reheating Furnace Using Genetic Algorithms," *Modelling and Simulation in Engineering*, 2017, Article ID 2731902, 2017.
- [5] Z. Yi, Z. Su, G. Li, Q. Yang, W. Zhang, "Development of a double model slab tracking control system for the continuous reheating furnace," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 113, 861–874, 2017.
- [6] Y. X. Liao, J. H. She, M. Wu, "Integrated Hybrid-PSO and Fuzzy-NN Decoupling Control for Temperature of Reheating Furnace," *IEEE Trans. Ind. Electr.*, 56(7), 2704-2714, 2009.
- [7] G. Astolfi, L. Barboni, F. Cocchioni, C. Pepe, "Metodo per il controllo di forni di riscaldamento," *Brevetto Italiano n. 0001424136*, Ufficio Italiano Brevetti e Marchi (UIBM), 2016.
- [8] J. Maciejowski, *Predictive Control with Constraints*. Harlow: Prentice Hall; 2002. ■