

'I.PROCESS | CEMENT': UN ALGORITMO PER I PROCESSI DI PRODUZIONE DEL CEMENTO

# Ottimizzazione della produzione di clinker con tecniche di controllo avanzato

Questo articolo descrive 'i.Process | Cement', un algoritmo per il controllo e l'ottimizzazione di forni rotativi per la produzione del clinker nell'industria del cemento. 'i.Process | Cement', basato su strategie di controllo avanzato, consente di aumentare l'efficienza energetica.

Giacomo Astolfi  
Luca Barboni  
David Barchiesi  
Francesco Cocchioni  
Lorenzo Orlietti  
Crescenzo Pepe  
Matteo Rocchi  
Silvia Maria Zanoli

Il cemento costituisce la base dell'ingegneria civile e delle sue applicazioni e rappresenta un elemento fondamentale nella costruzione di abitazioni e infrastrutture [1].

La necessità di **aumentare la qualità del cemento** e i sempre più stringenti requisiti di **efficienza energetica** e di **riduzione dell'impatto ambientale**, hanno portato ad innovazioni nel ciclo produttivo, accompagnate dall'aumento del livello di automazione nei cementifici. In tale contesto, al fine di ottenere efficienza energetica e risparmio nei costi di produzione nel lungo periodo, soluzioni di *controllo avanzato* (Advanced Process Control, APC) rappresentano una strategia ampiamente utilizzata [2].

**i.Process** è una società italiana che si dedica allo sviluppo di tecnologie innovative per il risparmio energetico. Essa svolge attività di ingegneria dell'automazione e nello specifico sviluppa sistemi APC orientati al controllo e all'ottimizzazione di processi industriali [3].

Tra le varie problematiche affrontate, i.Process ha investigato riguardo al problema dell'aumento dell'efficienza energetica nell'industria del cemento. L'attività di ricerca è stata focalizzata sulla fase di produzione del clinker, basata sull'utilizzo di un forno rotativo. In tale ambito sono stati portati a termine due progetti, mediante una collaborazione con il laboratorio **L.I.S.A.** (Laboratory for Interconnected Systems Supervision and Automation) dell'**Università Politecnica delle Marche** (Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione, DII). Entrambi i

progetti realizzati sono stati basati su strategie di *controllo predittivo* (Model Predictive Control, MPC) [4]. Per l'implementazione del primo progetto è stato utilizzato un software non proprietario, mentre nel secondo è stato sviluppato un pacchetto APC proprietario per il controllo e l'ottimizzazione della fase di produzione del clinker, denominato '**i.Process | Cement**'.

## Descrizione del processo e specifiche di controllo

La rappresentazione schematica del flusso produttivo di uno dei cementifici analizzati (processo a via secca) è riportata in ► **figura 1**.

Nella catena di produzione del cemento considerata, la farina cruda, derivante dal pre-processamento di materie prime in un mulino, interagisce con il combustibile (polverino di carbone) dando luogo al componente principale del cemento, il *clinker*. Successivamente, il clinker viene macinato e quindi combinato con altri componenti in diverse ricette, dando luogo a differenti tipi di cemento [1].

### A FIL DI RETE

[www.iprocess.it](http://www.iprocess.it)

### GLI AUTORI

G. Astolfi, L. Barboni, D. Barchiesi, F. Cocchioni, L. Orlietti, C. Pepe, M. Rocchi - i.Process S.r.l., Via del Consorzio 2/B 60015 Falconara Marittima (AN), Italia; S. M. Zanoli - Università Politecnica delle Marche D.I.I. (Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione), L.I.S.A. (Laboratory for Interconnected Systems Supervision and Automation), Via Brece Bianche 12, 60131 Ancona (AN), Italia.

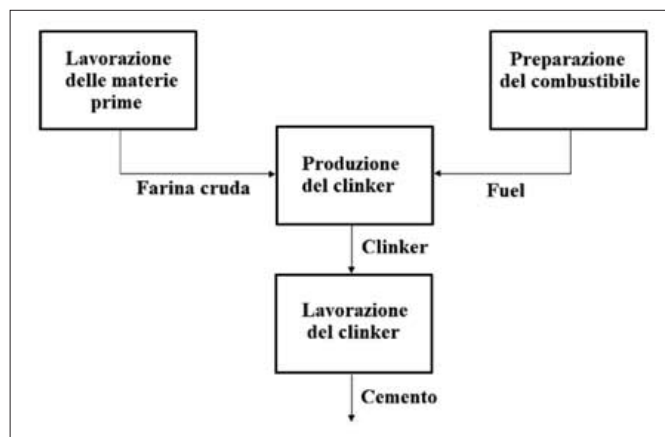


Figura 1 - Workflow di uno dei cementifici analizzati

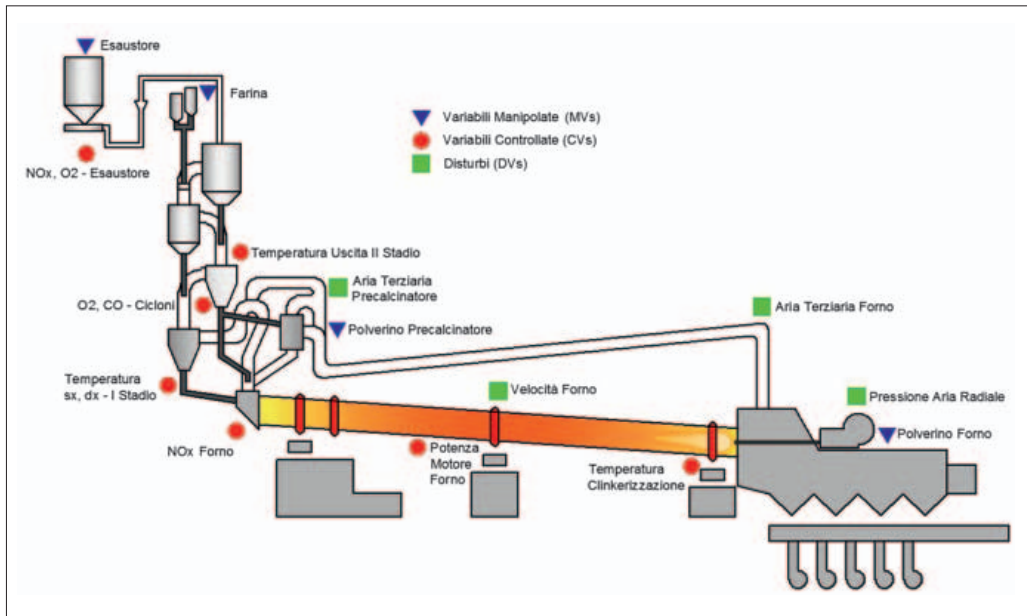


Figura 2 - Rappresentazione di una fase di produzione del clinker con precalcinatore

La fase di produzione del clinker è il sottoprocesso più critico della produzione del cemento, in termini di risparmio energetico, riduzione delle emissioni, qualità e costo del prodotto finale. La fase di produzione del clinker relativa ad un caso di studio reale (processo a via secca, con precalcinatore) è schematizzata in ► **figura 2**.

Il processo considerato può essere suddiviso in varie fasi, caratterizzate da temperature crescenti. Inizialmente, la farina cruda alimenta un preriscaldatore a cicloni (► **figura 2**, lato sinistro); possono essere presenti diversi stadi (quattro stadi nella ► **figura 2**). La farina cruda viene sottoposta a diverse fasi di lavorazione, per esempio preriscaldamento/disidratazione, calcinazione/decarbonatazione e clinkerizzazione (cottura). Alcune di queste reazioni hanno luogo all'interno di un **forno rotativo**; la combustione nel forno rotativo viene alimentata principalmente da un bruciatore aria/combustibile (polverino di carbone) situato presso l'uscita del forno stesso (► **figura 2**, lato destro); inoltre, in alcuni casi è presente anche un ulteriore bruciatore, situato al precalcinatore (► **figura 2**).

Lo scopo dell'installazione di un sistema di controllo avanzato in un'unità di produzione del clinker è quello di consentire un aumento della produttività e dell'efficienza energetica, assicurando la qualità desiderata del cemento; l'impatto ambientale (emissioni) deve essere mantenuto entro certi limiti e il consumo specifico di combustibile deve essere minimizzato. Per il raggiungimento di tali obiettivi,

si deve assicurare **un corretto svolgimento delle reazioni chimiche e fisiche necessarie**, tenendo conto di vincoli di tipo termodinamico, ambientale e meccanico [5], [6]. I principali vincoli termodinamici sono relativi alle temperature dei cicloni, alle temperature delle varie zone del forno e alla concentrazione di ossigeno ( $O_2$ ). Le specifiche ambientali riguardano le emissioni di monossido e diossido di carbonio ( $CO$ ,  $CO_2$ ) e di ossidi d'azoto ( $NO_x$ ). Ulteriori specifiche includono vincoli di qualità, riguardanti ad esempio l'analisi della calce libera, effettuata su campioni di clinker raccolti all'uscita del forno rotativo. Data la natura **multivariabile** del processo considerato e la presenza di ritardi sui canali ingresso-uscita, il soddisfacimento simultaneo delle specifiche citate non è facilmente ottenibile attraverso una conduzione manuale. In molti cementifici, la fase di produzione del clinker viene condotta manualmente dagli operatori. Poiché il mantenimento di temperature adeguate lungo la catena di produzione del clinker rappresenta un obiettivo primario e considerata la natura multivariabile del processo, le manovre degli operatori difficilmente garantiscono anche la massimizzazione dell'efficienza energetica.

### La tecnologia del sistema APC 'i.Process | Cement'

L'architettura generale del sistema APC 'i.Process | Cement', customizzata per il caso di studio considerato nel presente lavoro è riportata in ► **figura 3**. Le princi-

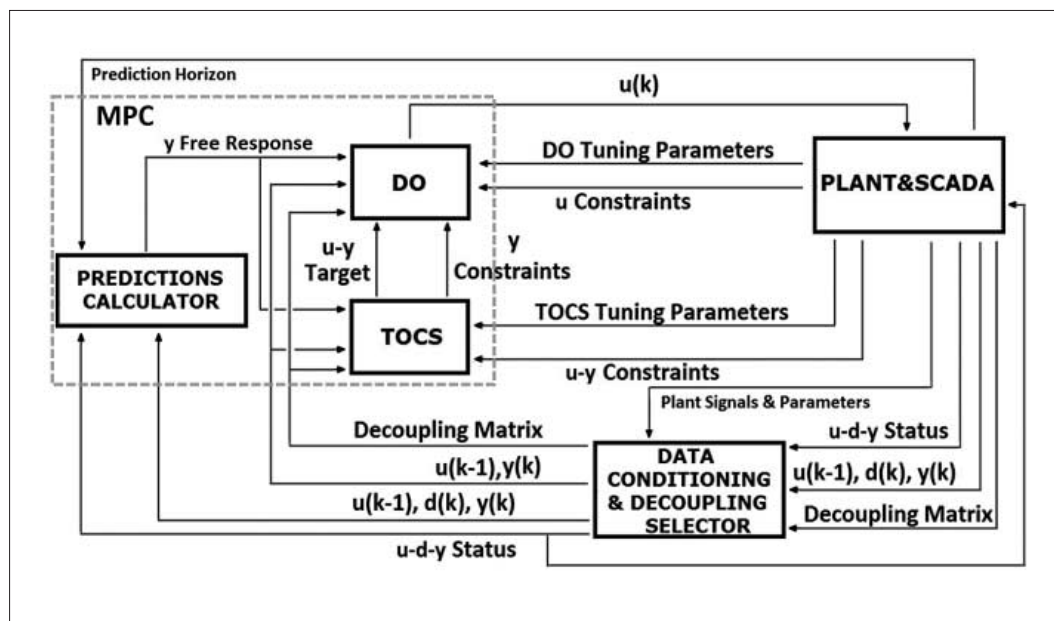


Figura 3 - Architettura del sistema APC 'i.Process | Cement'

pali variabili controllate (CVs,  $y$ ), le variabili manipolate (MVs,  $u$ ) e i disturbi misurati in ingresso (DVs,  $d$ ) sono riportati in ► **figura 2**, dove se ne può osservare la collocazione; le ► **Tabelle 1-3** mostrano esempi di range operativi. Inoltre, nel cementificio considerato (impianto italiano), al fine di valutare la qualità del clinker, analisi di laboratorio su campioni raccolti all'uscita del forno rotativo

vengono eseguite quattro volte al giorno.

Valori di calce libera presente nel clinker nel range 0.8 [%] - 1.2 [%] vengono considerati accettabili. Fuori dal range specificato, si incontrano situazioni critiche per la qualità del clinker, legate a fenomeni di overburning o cooling. Nella formulazione matematica alla base del sistema APC 'i.Process | Cement', la sporadica (intermittente) retroazione relativa alle analisi della calce libera può essere tenuta in con-

siderazione secondo diverse strategie.

'i.Process | Cement' può utilizzare differenti tipologie di **modelli matematici**; i modelli sviluppati sono stati opportunamente introdotti in una strategia di controllo predittivo MPC a due livelli in grado di gestire differenti condizioni operative [7]. Nella formulazione del controllore è stata inclusa la possibilità di gestire ritardi sui canali ingresso-uscita

Nome Variabile	Range
Farina	130 [t/h] - 140 [t/h]
Polverino Forno	3900 [kg/h] - 4500 [kg/h]
Polverino Precalcinatore	3800 [kg/h] - 4100 [kg/h]
Esaustore	660 [rpm] - 690 [rpm]

Tabella 1 - Variabili Manipolate (MVs)

Nome Variabile	Range
Velocità Forno	1 [rpm] - 2.5 [rpm]
Aria Terziaria Forno	4 [%] - 40 [%]
Aria Terziaria Precalcinatore	10 [%] - 50 [%]
Pressione Aria Radiale	100 [mbar] - 250 [mbar]

Tabella 2 - Disturbi (DVs)

Tabella 3 - Variabili Controllate (CVs)

Nome Variabile	Tipologia Misura	Range
Ossigeno Cicloni	Analizzatore	1.5 [%] - 3 [%]
Ossigeno Esaustore	Analizzatore	5.3 [%] - 7 [%]
Ossidi d'Azoto Forno	Analizzatore	1100 [ppm] - 1230 [ppm]
Ossidi d'Azoto Esaustore	Analizzatore	700 [ppm] - 800 [ppm]
Monossido di Carbonio Cicloni	Analizzatore	0 [%] - 0.06 [%]
Temperatura Destra Primo Stadio	Sensore	830 [°C] - 860 [°C]
Temperatura Sinistra Primo Stadio	Sensore	830 [°C] - 860 [°C]
Temperatura Uscita Secondo Stadio	Sensore	705 [°C] - 730 [°C]
Potenza Motore Forno	Sensore	105 [kW] - 125 [kW]
Temperatura Clinkerizzazione	Sensore	1100 [°C] - 1300 [°C]

VARIABILI MANIPOLATE																
ABILITAZIONE	STATO		TAG	DESCRIZIONE	EU	LIM. MIN.	RSP	LIM. MAX.	MISURA	TARGET	PRED	MOSSA	RSP	DEVIA	BLOCCA INCREM	BLOCCA DECREM
ON	OFF	OFF	FTC_M130_F1	Portata farina Schenk 2	t/h	133,00	136,00	139,00	68,10	134,00	135,5000	-0,100	68,00			
		OFF	FTC_M132_F1	Portata farina Schenk 1	t/h				68,10			-0,100	68,00			
ON	OFF	OFF	FTS_M029-1_F1	Portata polverino testata	Kg/h	3900	4200,0	4500	4190,0	4500,0	4310,0000	8,200				
ON	OFF	OFF	FTS_M035-1_F1	Portata polverino precalcinatore	Kg/h	3800	3900,0	4100	3920,0	3800,0	3850,0000	-3,200				
ON	OFF	DV	FTC_M144_S1	Giri esastore forno	rpm	660,0	670,0	690,0	670,0	0,0	670,0000	0,000				

VARIABILI CONTROLLATE PRINCIPALI												
ABILITAZIONE	STATO		TAG	DESCRIZIONE	EU	LIM. MIN.	MISURA	LIM. MAX.	PRIORITA' CV	TARGET	PRED CONTR	PRED (Hp)
ON	OFF	ON	FTC_0301_A2_O2	Ossigeno in torre	%	1,50	1,72	3,00	1	2,70	2,20	2,70
ON	OFF	OFF	FTC_0101_A2_O2	Ossigeno all'esastore	%	5,30	5,50	7,00	0	0,00	0,00	0,00
ON	OFF	ON	FTC_0501_A4_NO	NOx al forno	Ppm	1100	1080	1230	3	1230	1180	1160
ON	OFF	OFF	FTC_0101_A3_NO	NOx all'esastore	Ppm	700,0	692,3	800,0	0	800,0	790,0	760,0
ON	OFF	ON	FTC_0301_A1_CO	CO in torre	%	0,00000	0,054200	0,06000	5	0,000000	0,054000	0,053400
ON	OFF	ON	FTC_T301F1B	Temp. 1° stadio lato Fanna	° C	830,0	832,0	860,0	2	830,0	830,0	830,2
ON	OFF	ON	FTC_T301F1A	Temp. 1° stadio lato Maniago	° C	830,0	828,3	860,0	2	830,0	829,8	831,3
ON	OFF	ON	FTC_T302-F1	Temp. uscita 2° stadio	° C	705,0	712,3	728,0	2	706,5	707,3	706,8
ON	OFF	ON	FTC_M145_J1	Potenza motore forno	kW	105,0	110,3	125,0	4	110,3	111,2	113,5
ON	OFF	OFF	FTS_T8	Temp. di clinkerizzazione	° C	1100	1234	1300	5	1234	1234	1234

Figura 4 - Esempio di pagina della GUI di 'i.Process | Cement': MVs e principali CVs

[8]. Nell'architettura di controllo è stato introdotto uno stato logico per ogni variabile di processo, il quale viene calcolato sulla base di azioni eseguite dagli operatori tramite l'interfaccia sviluppata (► figura 4) e di operazioni logiche interne (► figura 3, blocco *Data Conditioning & Decoupling Selector*). Lo stato logico definisce se e in che modo una determinata variabile di processo deve essere inclusa nel problema di controllo.

Una variabile che deve essere inclusa nel problema di controllo deve essere accesa (attiva), cioè caratterizzata da uno stato *ON*. In ► figura 4 si nota la possibilità di accendere (attivare) o spegnere (disattivare) una variabile di processo da parte degli operatori. In ► figura 5 è riportato un esempio di malfunzionamento dell'analizzatore relativo agli ossidi d'azoto del forno.

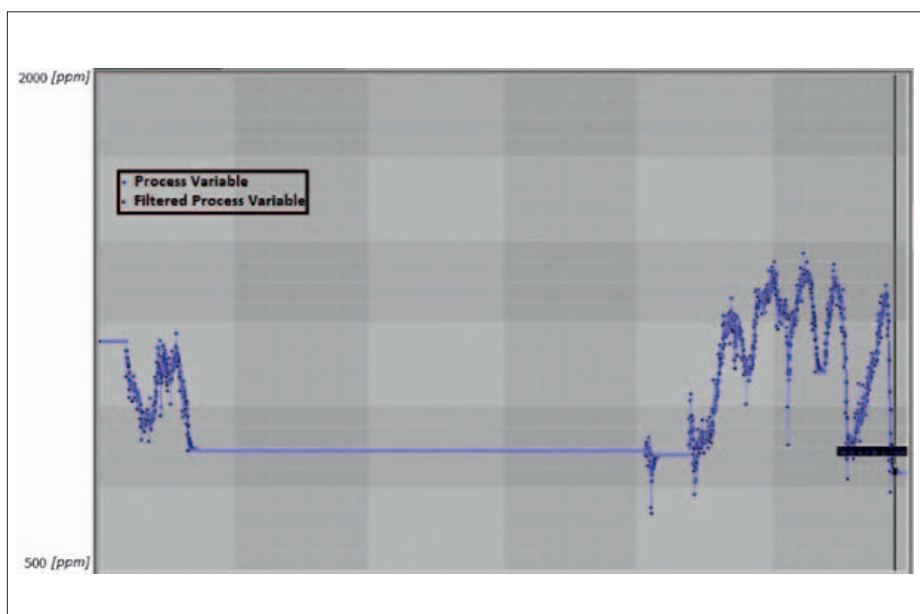


Figura 5 - Esempio di malfunzionamento relativo all'analizzatore degli ossidi d'azoto del forno

Grazie alle operazioni logiche interne del blocco *Data Conditioning & Decoupling Selector*, tale malfunzionamento può essere rilevato dal sistema APC 'i.Process | Cement'. Di conseguenza, la variabile considerata viene spenta (disattivata, stato *OFF*) dal

sistema APC. Il blocco relativo al controllore predittivo (*MPC*) è costituito da tre moduli: modulo *Dynamic Optimizer (DO)*, modulo *Targets Optimizing and Constraints Softening (TOCS)* e modulo *Predictions Calculator* (► figura 3). Il modulo *TOCS*, risolvendo un problema di programmazione lineare o quadratica (lineare nel caso di studio considerato), fornisce al modulo *DO* dei target di steady-state per le variabili di processo. Il

modulo *DO*, minimizzando una funzione di costo quadratica soggetta a vincoli lineari, guida il processo verso le zone di funzionamento più opportune. Se necessario, il *TOCS* svolge funzioni di pre-rilassamento di deter-



minate categorie di vincoli per il *DO* [8]. Le formule (1)-(2) riportano la funzione di costo e i vincoli relativi al problema di programmazione lineare che il modulo *TOCS* risolve ad ogni istante di controllo.

$$V_{TOCS}(k) = c_u^T \cdot \Delta \hat{u}_{TOCS}(k) + \rho_{y_{TOCS}}^T \cdot \varepsilon_{y_{TOCS}}(k) \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{i. } & lb_{du_{TOCS}} \leq \Delta \hat{u}_{TOCS}(k) \leq ub_{du_{TOCS}} \\ \text{ii. } & lb_{u_{TOCS}} \leq \hat{u}_{TOCS}(k) \leq ub_{u_{TOCS}} \\ \text{iii. } & lb_{y_{TOCS}} - \gamma_{lby_{TOCS}} \cdot \varepsilon_{y_{TOCS}}(k) \leq \hat{y}_{TOCS}(k) \leq ub_{y_{TOCS}} + \gamma_{uby_{TOCS}} \cdot \varepsilon_{y_{TOCS}}(k) \\ \text{iv. } & \varepsilon_{y_{TOCS}}(k) \geq 0 \end{aligned} \quad (2)$$

Nell'espressione (1), il vettore  $c_u$  permette di pesare la variazione di steady-state relativa alle MVs ( $\Delta \hat{u}_{TOCS}(k)$ ). Nel caso di studio considerato, gli elementi del vettore  $c_u$  relativi ai polverini sono stati definiti con segno positivo, mentre il peso relativo alla farina è stato definito con segno negativo. In tal modo è stato assicurato il compromesso desiderato tra minimizzazione dei polverini e massimizzazione della farina. Nell'espressione (2), i termini  $lb_{du_{TOCS}}$ ,  $ub_{du_{TOCS}}$ ,  $lb_{u_{TOCS}}$  e  $ub_{u_{TOCS}}$  definiscono i vincoli relativi ai termini  $\Delta \hat{u}_{TOCS}(k)$  e  $\hat{u}_{TOCS}(k)$ .  $\hat{u}_{TOCS}(k)$  rappresenta il valore di steady-state per le MVs. I vincoli relativi alle MVs sono stati considerati come vincoli *hard*: essi non possono mai essere violati e, a tal proposito, sono state sviluppate opportune

strategie per assicurare sempre il loro soddisfacimento. I valori di steady-state relativi alle CVs ( $\hat{y}_{TOCS}(k)$ ) sono vincolati dai termini  $lb_{y_{TOCS}}$  e  $ub_{y_{TOCS}}$ . I vincoli relativi alle CVs sono stati considerati come vincoli *soft*: essi possono essere violati in condizioni critiche grazie all'introduzione del vettore di variabili slack  $\varepsilon_{y_{TOCS}}(k)$ .  $\varepsilon_{y_{TOCS}}(k)$  è stato introdotto nella (1) attraverso il vettore di pesi con segno positivo  $\rho_{y_{TOCS}}$  e nella (2) attraverso le matrici  $\gamma_{lby_{TOCS}}$  e  $\gamma_{uby_{TOCS}}$ . Nel caso di studio considerato, è stata assegnata una variabile slack per ogni vincolo relativo alle CVs nella formulazione del modulo *TOCS* [8].

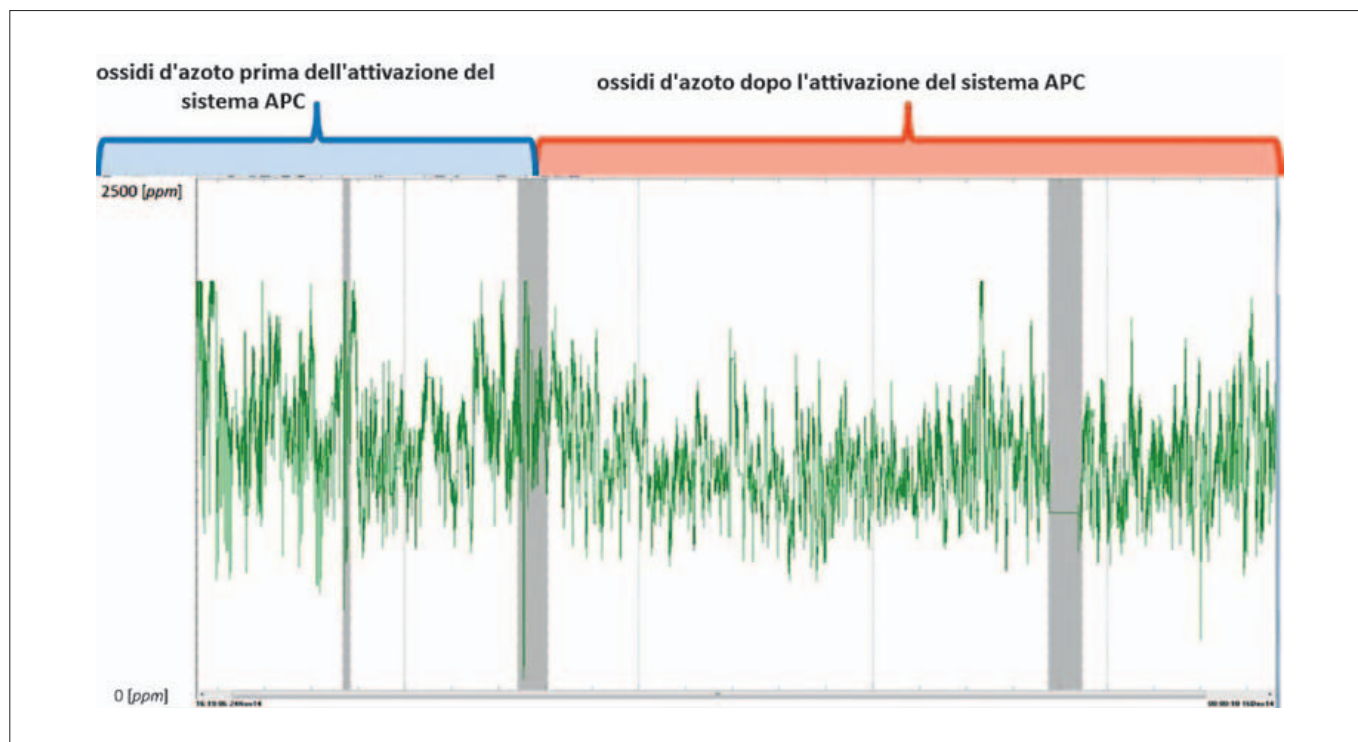
L'architettura di controllo sviluppata garantisce il soddisfacimento delle specifiche contrastanti riguardanti gli aspetti energetico-ambientali e quelli relativi alla produzione e alla qualità. Punti di equilibrio ottimi per il consumo specifico di combustibile possono essere inseguiti e raggiunti, tenendo conto di tutte le specifiche descritte in precedenza.

### Risultati reali

L'installazione del sistema APC 'i.Process | Cement' sul processo analizzato (processo a via secca, con precalcinatori) ha migliorato le prestazioni del sistema di controllo precedente.

Alcuni risultati di campo derivanti dall'installazione di 'i.Process | Cement' nel cementificio considerato (industria italiana) sono riportati

Figura 6 - Ossidi d'azoto prima e dopo l'attivazione del sistema APC 'i.Process | Cement'



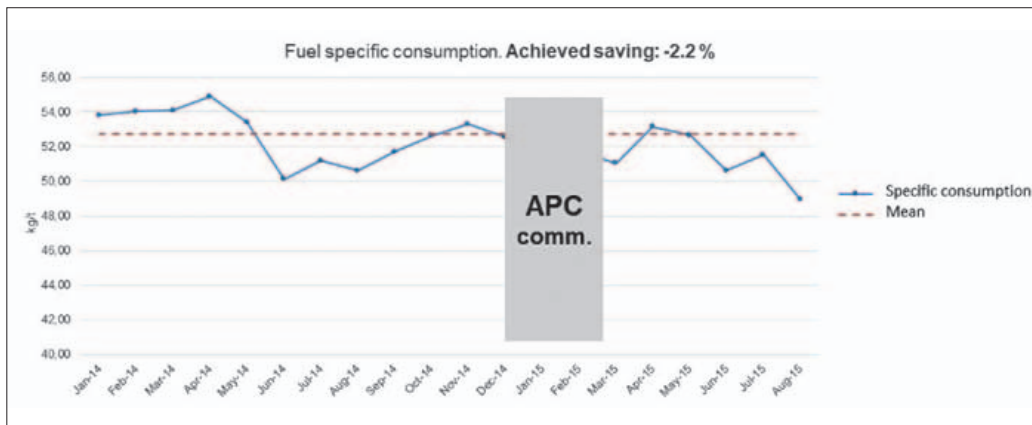


Figura 7 - Consumo specifico di polverino di carbone prima e dopo l'attivazione del sistema APC 'i.Process | Cement'

tati in ► **figura 6**. In particolare le prestazioni relative alla precedente conduzione manuale e quelle di 'i.Process | Cement' sono confrontate sulla base di un performance test della durata totale di tre settimane. In ► **figura 6**, la variabile presa in considerazione è la concentrazione di ossidi d'azoto ( $\text{NO}_x$ ). Dopo l'introduzione del sistema APC 'i.Process | Cement', è stata osservata una riduzione rilevante della deviazione standard (circa il 32 [%]) e del valor medio (circa il 15 [%]) degli ossidi di azoto ( $\text{NO}_x$ ) (► **figura 6**), consentendo quindi al processo di operare più vicino ai vincoli imposti.

In tal modo, il consumo specifico di polverino di carbone è stato ridotto: dopo circa otto mesi dal primo start-up del sistema APC 'i.Process | Cement', è stata ottenuta una **riduzione prossima al 2.2 [%]** (► **figura 7**). La riduzione del consumo specifico e, più in generale, l'aumento di efficienza energetica (che comprende anche una riduzione delle emissioni), hanno permesso il raggiungimento di titoli di efficienza energetica.

### Conclusione

Nel presente articolo è stato descritto un sistema per il controllo e l'ottimizzazione della fase di produzione del clinker nell'industria del cemento. Il controllore avanzato, denominato 'i.Process | Cement', è stato sviluppato dallo staff di i.Process mediante una collaborazione con il laboratorio LISA del Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione dell'Università Politecnica delle Marche.

Sono stati analizzati i risultati relativi all'installazione di 'i.Process | Cement' in un impianto italiano. Le **prestazioni del controllore** sono risultate soddisfacenti sia in termini di **efficienza energetica** sia in termini di **controllo di processo**.

Gli sviluppi futuri riguardano l'inclusione di nuove strategie di identificazione, modellazione e controllo all'interno dell'attuale pacchetto software. Un ulteriore significativo sviluppo futuro sarebbe quello di estendere il controllo del sistema APC 'i.Process | Cement' alle altre fasi di produzione del cemento.

### Referenze

- [1] P. A. Alsop, Cement Plant Operations Handbook, International Cement Review, 3rd Ed., 2001.
- [2] E. Boe, S. J. McGarel, T. Spaitis and T. Guiliani, "Predictive Control and Optimization Applications in a Modern Cement Plant," Cement Industry Technical Conference, pp. 1-10, 2005.
- [3] <http://www.iprocess.it>
- [4] J. Maciejowski, Predictive Control with Constraints. Harlow, UK: Prentice-Hall, 2002.
- [5] S. Arad, V. Arad and B. Bobora, "Advanced control schemes for cement fabrication processes," Robotics and Automation in Construction, vol. 23, pp. 381-404, 2008.
- [6] G. Martin, T. Lange and N. Frewin, "Next generation controllers for kiln/cooler and mill applications based on model predictive control and neural networks," IEEE/PCA 42nd Cement Industry Technical Conference, 2000.
- [7] S. M. Zanolli, C. Pepe and M. Rocchi, "Improving Performances of a Cement Rotary Kiln: A Model Predictive Control Solution," Journal of Automation and Control Engineering, vol. 4, no. 4, pp. 262-267, Agosto, 2016.
- [8] C. Pepe, "Model Predictive Control aimed at energy efficiency improvement in process industries," Ph.D. Thesis, Università Politecnica delle Marche, 2017. ■