

A cura di:

Alexander Horch,  
ABB Corporate  
ResearchJohn Cox,  
Eastman  
ChemicalsNunzio Bonavita,  
ABB Genova, Italy

## RICERCANDO L'AGO NEL PAGLIAIO

*I disturbi di processo e le conseguenti oscillazioni delle variabili critiche, hanno un effetto dirompente sulla qualità della produzione, i costi di esercizio e la redditività complessiva di qualsiasi sito produttivo. Esse costringono, infatti, gli operatori ad allontanare le condizioni di esercizio dell'impianto dalla posizione ottimale, per mantenere un adeguato margine di sicurezza a fronte di improvvisi sbalzi nei valori delle variabili di processo. Un team internazionale di ricerca e sviluppo ha messo a punto una soluzione innovativa per l'analisi dei disturbi che si manifestano a livello globale di impianto. Dopo un'approfondita fase di test in campo e l'inclusione dei commenti e dei suggerimenti dei primi utenti, un modulo software denominato Plant-wide Disturbance Analysis (PDA) è stato reso disponibile sul mercato come parte del prodotto OptimizeIT Loop Performance Manager. Il presente articolo descrive le caratteristiche salienti di questo software e alcuni tratti della sua applicazione presso l'impianto chimico della Eastman a Kingsport, Tennessee (USA).*

# Innovativa Soluzione per l'Individuazione DI DISTURBI PLANT-WIDE



# ECIAL report

*L'impianto Eastman di Kingsport, Tennessee dove il tool è stato applicato*



La continua ricerca della massima efficienza produttiva ha spinto i moderni impianti industriali ad utilizzare in maniera sistematica complessi schemi processistici ricchi di portate di ricircolo e integrazioni termiche.

Tali schemi garantiscono, infatti, un maggior rendimento energetico grazie alle tecniche di recupero di calore dalle reazioni di processo ma al contempo rendono più complesso il compito del controllo di processo. Nel caso dell'insorgere di un disturbo su un singolo elemento di un anello di controllo, questo potrà propagarsi tramite le portate di ricircolo anche in aree funzionalmente e topologicamente distanti fra loro, manifestandosi, spesso quasi simultaneamente, su una pluralità di loop di controllo. L'accresciuta interazione fra le diverse unità di processo permette peraltro anche la propagazione contro flusso (da aree "a valle" ad aree "a monte") rendendo particolarmente difficile l'individuazione dell'area o dell'elemento su cui è necessario intervenire per rimuovere la sorgente del problema.

In questi casi la ricerca della causa prima può diventare assolutamente non banale tanto da poter essere assimilata con la ricerca del classico ago in un pagliaio.

Disturbi di questo tipo possono quindi influenzare non solo una singola unità ma un intero impianto con conseguenti ripercussioni sulla redditività dello stesso. Per questo motivo essi sono indicati con l'espressione inglese "plant-wide disturbance", espressione che useremo anche nel proseguo di questo articolo.

Le considerazioni sopra riportate hanno spinto all'ideazione e allo sviluppo di uno strumento software per l'individuazione automatica di disturbi "plant-wide" e la determinazione delle più probabili cause. Obiettivo è quello di mettere in grado gli ingegneri di manutenzione di individuare rapidamente le cause dei disturbi in modo da poterle rimuovere attraverso le azioni più idonee sia a livello di strumentazione che a livello di sistema di controllo.

A tale scopo a partire dal 2004 è stata lanciata un'iniziativa che ha visto la collaborazione di diverse unità ABB (i centri di ricerca in Germania e Norvegia e l'unità responsabile per le Soluzioni di Controllo Avanzato di base a Genova) con l'Imperial College / UCL Centre for Process Systems Engineering (CPSE) di Londra. Presso tali Centri i ricercatori universitari si sono distinti negli ultimi anni per lo sviluppo e la validazione di innovativi algoritmi basati su advanced signal processing, spectral and nonlinear time series analysis per il loro impiego nel campo della diagnostica dei processi industriali.

Dopo una serie di test preliminari, un'implementazione prototipale della metodologia è stata valuta-

collocazione ideale delle funzionalità del PDA è stata di inserirlo come un nuovo modulo aggiuntivo nel prodotto per l'ottimizzazione dei loop di controllo di ABB denominato OptimizeT Loop Performance Manager (LPM). La versione di tale software contenente il modulo PDA è ora quindi commercialmente disponibile nel portafoglio di soluzioni avanzate di ABB. Dopo una breve descrizione della metodologia, verranno presentati i risultati sorprendentemente accurati dell'applicazione dello strumento effettuata direttamente da un cliente. L'impianto di Kingsport, Tennessee, della Eastman Chemical Company, ha infatti collaudato e verificato l'attendibilità dello strumento con risultati estremamente positivi.

mente e attualmente consiste di tre applicazioni software distinte:

- Una componente è dedicata all'ottimizzazione del **tuning** dei loop di controllo,
- Un secondo modulo (**Loop-auditing**) è utilizzato per monitorare le prestazioni dei loop in automatico e in continuo,
- Il terzo componente è il **Plant-wide Disturbance Analysis (PDA)** oggetto di questo articolo. Il software analizza simultaneamente una molteplicità di loops rilevando comportamenti comuni e identificando le probabili cause prime. La Figura 1 mostra una tipica schermata di LPM.



L'impianto Eastman di Kingsport, Tennessee dove il tool è stato applicato

ta da ABB in un'applicazione pilota su larga scala relativa a dati provenienti da una piattaforma per l'estrazione del greggio Norvegese. L'analisi dei disturbi si è basata su oltre 2000 tag di misurazione e su una mole di dati ad alta risoluzione generata in oltre un mese di attività.

L'analisi e il dibattito che ne è seguito hanno rivelato disturbi di significativa entità, confermati peraltro anche dalle indagini parallele compiute dagli esperti di processo e controllo sia di ABB che del cliente. Questi incoraggianti risultati hanno dimostrato che l'analisi intelligente dei dati di processo può, in larga misura, contribuire ad alleviare lo sforzo di individuazione, localizzazione e diagnosi dei problemi.

Si è giunti quindi al passo finale costituito dall'integrazione nella gamma di prodotti di ABB. La

### OptimizeT<sup>™</sup> - Loop Performance Manager

Il pacchetto software Loop Performance Manager (LPM) è stato progettato e sviluppato per essere un utile strumento di gestione dei loop di controllo per strumentisti, manutentori e ingegneri di controllo. La sua ambizione è quella di costituire un ponte fra le soluzioni sviluppate nel mondo accademico e le attuali necessità del mondo industriale [4].

La sua missione è assicurarsi che i loop di controllo e – in definitiva – l'intero processo produttivo, operino con le massime prestazioni.

Il pacchetto è stato strutturato modular-

### Il Modulo "Plant-wide Disturbance Analysis"

Nel seguito viene fornita una breve descrizione dei passi necessari per l'analisi dei disturbi plant-wide. Il lettore interessato può riferirsi a [6] per un survey sui principali temi di ricerca attualmente perseguiti. La Figura 2 riassume la procedura di analisi PDA nell'ambito del tool LPM [6].

#### 1. Importazione dei Dati

I dati possono essere acquisiti offline sia da fogli elettronici (tipo MS-Excel) o direttamente dai dati immagazzinati in LPM durante le procedure di acquisizione dati propri del modulo Loop Auditing.

#### 2. e 3. Pre-processamento e Filtraggio dei Dati

L'elaborazione preventiva dei dati è una funzio-

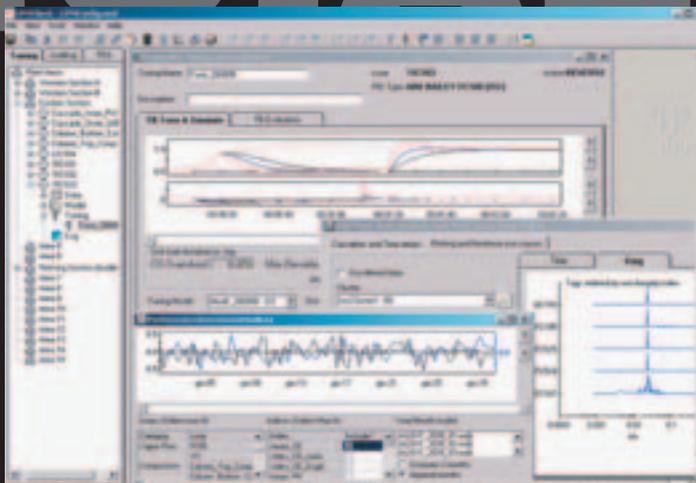


Figura 1: uno screen shot di LPM: un singolo ambiente per l'analisi dei disturbi, l'individuazione delle cause prime, il monitoraggio delle prestazioni e la sintonizzazione dei loop di controllo industriale.

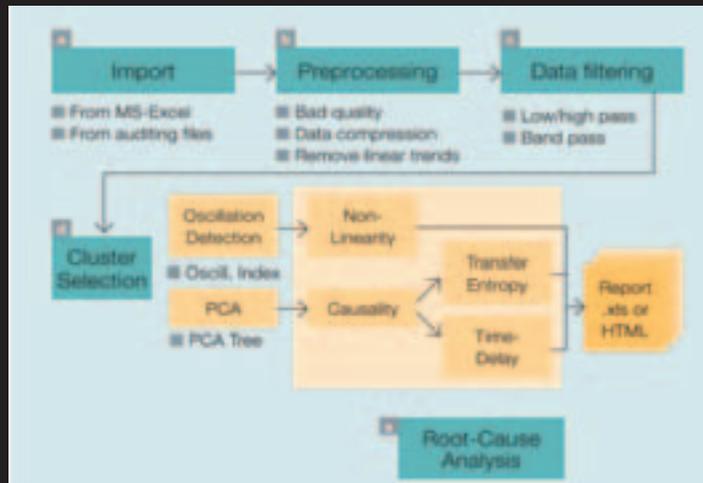


Figura 2: Il tipico diagramma di flusso dell'analisi PDA implementata all'interno del toolkit LPM.

nalità standard di semplice uso, particolarmente utile, quando occorre investigare diversi aspetti dei dati, ad esempio diversi intervalli di frequenza. È inoltre possibile ripulire con un semplice click del mouse i dati da elementi spuri, quali dati in bad qualità o outliers (anomalie statistiche) o anche rimuovere trends lineari. Lo strumento permette inoltre la visualizzazione di molteplici trend simultanei (i cosiddetti high-density plot) che facilita notevolmente l'analisi anche visiva degli stessi. Tale rappresentazione non è normalmente disponibile in prodotti per la storizzazione dei dati o sui terminali operatori dei sistemi di controllo.

#### 4. Identificazione e Caratterizzazione dei Cluster

Il primo passo nell'analisi è costituito dall'individuazione di gruppi di trend temporali (indicati col termine "clusters") che presentino comportamenti oscillatori e/o periodici simili. Il rilevamento oscillatorio è eseguito tramite l'applicazione di sofisticate metodologie di signal processing. In questo contesto i segnali non sono altro che i trend temporali delle misure da campo.

Tradizionalmente l'individuazione delle oscillazioni è basata sui cosiddetti metodi di *zero-crossing*, termine col quale si intende la valutazione del numero di attraversamenti dell'asse delle ascisse da parte del segnale depurato del suo valor medio. Un notevole limite all'efficacia di questo metodo è tuttavia rappresentato dal normale rumore statistico che contribuisce ad elevare il numero degli attraversamenti della ascissa con conseguente alterazione dei risultati. L'aspetto innovativo del metodo utilizzato in questo caso sta nel fatto che le oscillazioni vengono rivelate mediante la tecnica del *zero-crossing* applicata alla funzione di autocorrelazione del segnale, con un significativo miglioramento delle prestazioni rispetto alle metodologie che usano direttamente i trend temporali [1]. Non vi sono restrizioni sul numero di tags che si possono analizzare contemporaneamente. Test eseguiti in fase di rilascio del tool hanno impiegato alcune centinaia di tags che sono comunque rapidamente analizzate grazie ad un'efficiente implementazione software degli algoritmi di calcolo. Plot ad alta densità

come quello di Figura 4 sono in grado di mostrare in maniera sintetica ed efficace molteplici trend temporali. Una visualizzazione alternativa di queste informazioni si ricava dall'analisi spettrale. Questo metodo evidenzia le caratteristiche periodiche in maniera più chiara rispetto ai trend temporali. Gli spettri di frequenza hanno diversi vantaggi per quel che riguarda il rilevamento dei disturbi distribuiti. Il punto di forza del tool qui descritto è l'uso congiunto dei due approcci – uno legato al tempo e uno alla frequenza. Il metodo impiegato per la selezione dei cluster si basa sull'analisi dei principali componenti spettrali [2]. La costruzione di cluster spettrali è inoltre efficace ed affidabile anche per la catalogazione di trend con caratteristiche non periodiche, nel caso in cui le loro distribuzioni in frequenza siano simili. Il tool è arricchito da un innovativo metodo di presentazione dei cluster spettrali basato sui cosiddetti "alberi gerarchici" (descritti in [8]). Ulteriori rappresentazioni dei cluster sono a disposizione nel tool in modo da fornire un'immagine chiara e intuitiva della situazione.





**5. Individuazione della più Probabile Causa Ultima per ogni Cluster**

Una delle più comuni cause di disturbo riscontrabili nei processi chimici (si veda per esempio [7]) è rappresentata da valvole affette da malfunzionamenti con conseguenti comportamenti non-lineari quali bande morte o eccessivo attrito statico (fenomeno conosciuto col termine inglese stiction, contrazione di static friction). I cicli limite derivanti dalla presenza di valvole affette da stiction in anelli di controllo a feedback tendono a propagarsi in maniera incontrollata. Per questa ragione, la diagnosi di fenomeni non-lineari è uno dei primari obiettivi del tool. I metodi sviluppati per la diagnosi delle valvole di controllo malfunzionanti si possono applicare anche alla localizzazione dei guasti che hanno origine nelle non linearità del processo quali la formazione di schiumaggi (foaming) nelle colonne di distillazione o come i fenomeni di slugging nelle pipelines. Formalmente un trend temporale *nonlineare* [3] è un segnale che non può essere descritto come l'uscita di un sistema lineare pilotato da rumore bianco. Esso è caratterizzato da una coerenza di fase e, nel caso sia oscillatorio, dalla presenza di armoniche. Un esempio banale di segnale fortemente non-lineare è costituito da un'onda quadra. La presenza di Accumuli di liquido in serbatoi e/o separatori rende i normali processi industriali tendenzialmente dei filtri passa-basso, che tendono a smorzare tutti gli effetti ad alta frequenza. Questo significa che una misura vicina ad una sorgente di non linearità avrà una componente non-lineare molto più accentuata rispetto ad una misura presa a maggior distanza dalla fonte. In altre parole la forma d'onda quadra tenderà ad essere vieppiù addolcita all'allontanarsi dalla sua sorgente. L'individuazione dei candidati ad essere le cause prime di disturbi fortemente non-lineari, si basa

proprio su questo principio. Il modo più naturale per individuare una non-linearità è attraverso l'ispezione visiva dei trend temporali e/o degli spettri in frequenza. Tuttavia questa è una procedura manuale con ampi margini di inaffidabilità, arbitrio e possibilità di errore. Il nuovo approccio si basa invece su una misura obiettiva dell'entità della non-linearità, con la consapevolezza che questa è correlabile alla distanza dalla sorgente della non-linearità stessa. In questo modo l'oscillazione primaria è distinguibile dalle oscillazioni secondarie che si propagano lungo il processo. L'indice di valutazione ha quindi un elevato valo-



re per oscillazioni periodiche ma non-sinusoidali che sono tipiche dell'uscita di loop di controllo con cicli limite causati da fenomeni non-lineari. Alla base della valutazione della non-linearità vi è il confronto fra la predicibilità di ogni campione temporale e un insieme di trend temporali ricostruiti in modo da avere lo stesso spettro in frequenza ma fasi casuali. Un trend non-lineare avrà un'alta predicibilità confrontato con i trends ricostruiti, mentre questa differenza sarà minore per un trend lineare [3].

L'efficacia della metodologia descritta risulterà più chiara esaminando gli esempi sotto riportati. Chiare direttive operative e/o interventi di manutenzione mirati evitano onerose perdite di tempo ed errori nella ricerca delle cause prime. Inoltre, se applicata a problemi su larga scala, la metodologia consente di identificare problemi che sarebbe quasi impossibile rilevare manualmente per via dell'eccessiva distanza tra la causa e il suo effetto.

Una metodologia informatica di tipo data-driven come quella qui illustrata è un valido strumento di supporto. Pur non arrivando a soppiantare le conoscenze e l'esperienza dell'uomo, è in grado di alleggerire sensibilmente il lavoro di ricerca e mappatura dei problemi dell'impianto e l'individuazione delle relative cause. Altri due approcci all'analisi delle cause ultime sono basati sul concetto di entropia di trasferimento e di metodi di stima del tempo di ritardo [5].

**Entropia di Trasferimento**

Questo metodo statistico valuta la predicibilità di una variabile a partire da una seconda variabile basata su una funzione di densità di probabilità (probabilità density functions o PDF). La misura di causalità usata per quantificare la forza della relazione causale fra la variabile influenzante X e

la variabile Y è derivata dal concetto di entropia di trasferimento  $T(X|Y)$ , a sua volta derivata dal concetto di entropia, cioè dalla misura dell'incertezza di una variabile aleatoria espressa come somma di un logaritmo ponderato della funzione di densità di probabilità. L'entropia di trasferimento si ricava dalle funzioni densità correlate di due variabili, per ottenere così una misura della dipendenza di una variabile dall'altra. La misura di causalità  $t(X,Y)$  si calcola raffrontando l'influenza di X su Y con l'influenza di Y su X:

$$t(X,Y) = T(X|Y) - T(Y|X)$$

In questo modo alti valori di  $t(X,Y)$  indicano una forte asimmetria nelle relazioni di dipendenza che depone a favore di una chiara relazione causale fra X e Y.

#### Analisi dei Tempi di Ritardo

Il secondo metodo implementato nel modulo PDA per l'analisi di causalità è basato sulla funzione di Cross-Correlazione (CCF), in grado di determinare relazioni causali fra più misure a partire dall'analisi dei tempi di ritardo fra loro. Il concetto sottostante a tale metodologia è che quando un disturbo si propaga attraverso l'impianto, esso può essere osservato in varie località con un tempo di ritardo associato. Ovviamente dal confronto fra i tempi di ritardo è possibile determinare il candidato più probabile ad essere la causa prima del disturbo a causa del minor tempo di trasporto associato. Il CCF misura la similitudine fra segnali diversi a diversi istanti ed è quindi un adeguato mezzo per inferire il tempo di ritardo. Infatti il CCF di due serie temporali ritardate fra loro assume il valore massimo proprio in corrispondenza del tempo di ritardo caratteristico.

La differenza fra i due metodi sopra esposti è che la matrice di causalità basata sull'entropia di trasferimento è normalmente più sensibile, essendo in grado di determinare una relazione causale anche in assenza di un tempo di ritardo misurabile, grazie alla sua capacità di rivelare effetti quali lo smorzamento dei trend temporali che si verificano al propagarsi del disturbo attraverso mezzi continui.

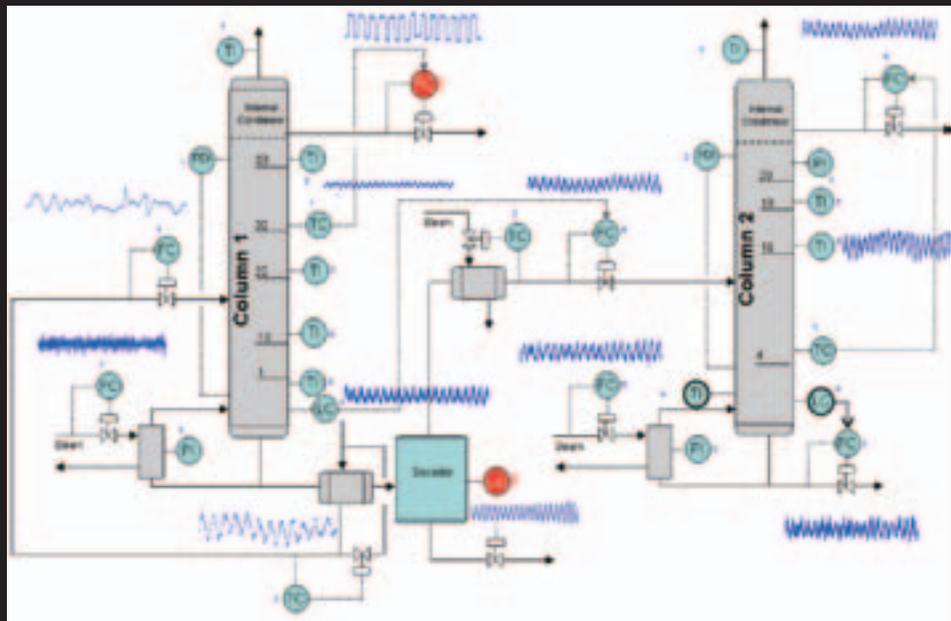


Figura 3: Schema di processo semplificato relativo al primo esempio industriale

## Un Primo Esempio Industriale

Consideriamo la sezione di processo mostrata in Figura 3, relativa ad una unità costituita essenzialmente da due colonne di distillazione. Come si può vedere, la maggior parte delle misure presenta una periodicità ciclica di 68 minuti (si veda Figura 4). Gli esperti di processo hanno avanzato alcune teorie per spiegare que-

sta continua oscillazione, ognuna delle quali proponeva una diversa causa prima.

L'applicazione dell'analisi PDA al cluster con oscillazioni da 68 minuti ha messo in luce l'esistenza di un problema non lineare a livello del loop di controllo LC2, che causava le oscillazioni in tutti gli altri tag del cluster.

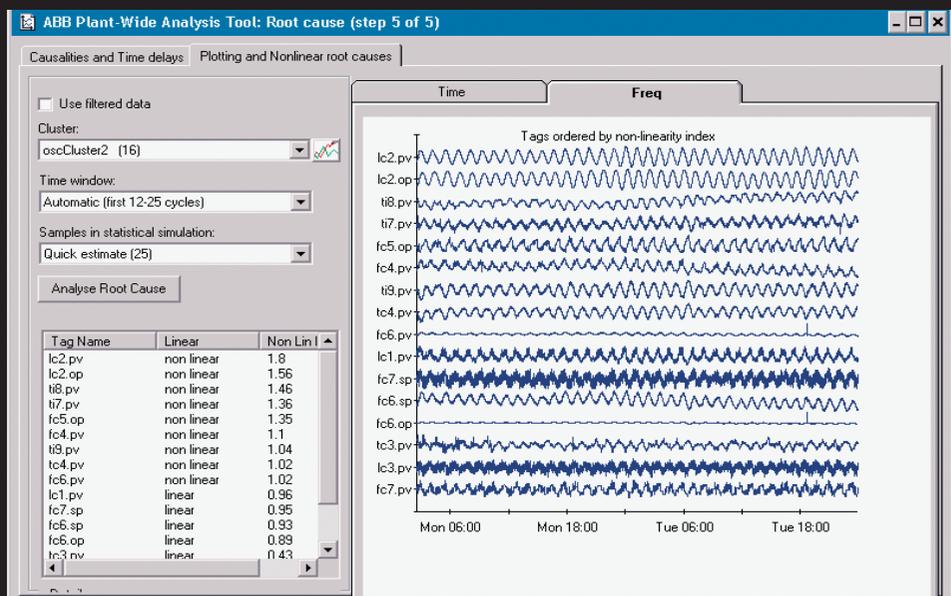


Figura 4: Visualizzazione dei trend delle variabili incluse nel cluster oscillatorio con periodo di circa 68 minuti. I dati sono ordinati per indice di nonlinearietà. Notare come il loop LC2 sia correttamente indicato come la causa prima.

Effettivamente tale ipotesi è stata verificata sperimentalmente. Il controllo del loop LC2 è stato sintonizzato in maniera molto più aggressiva (fino a 4-5 volte). Come conseguenza le oscillazioni di LC2 si sono spostate su periodi molto più brevi mentre le oscillazioni sui loop a valle sono scomparse. Questo ha fornito l'evidenza che il disturbo si originasse all'interno del loop LC2, probabilmente per un problema nell'attuatore. Tale ipotesi è stata poi confermata dall'impiego dei potenti algoritmi di analisi di LPM Auditing sul loop in questione.

Una plausibile spiegazione del fenomeno è la seguente. Quando il decanter è completamente pieno di liquido, questo fa sì che la portata attraverso la valvola LC2 vari influenzando la misura di livello LC1, che a sua volta regola (attraverso la struttura a cascata master-slave) la portata FC4 in ingresso alla Colonna 2. Il tutto porta infine all'oscillazione periodica e sostenuta di diverse variabili della Colonna 2, compresa la porta di distillato FC6.

Il data set mostrava inoltre un ciclo secondario, caratterizzato da un'oscillazione con frequenza più elevata che riguardava un cluster di 5 misure. L'analisi effettuata tramite PDA ha immediatamente individuato un problema di stiction sul loop FC2, che è stato prontamente verificato in campo.

Sulla base di queste informazioni circostanziate, il reparto di manutenzione può intervenire rapidamente eliminando i due problemi alle valvole LC2 e FC2 e incrementando le prestazioni globali del processo.

## Secondo Esempio Industriale

Il secondo esempio si riferisce a una serie di disturbi rilevati sul sistema di produzione vapore, mostrato in Figura 5. Come si può notare la pressione nel collettore di vapore oscilla con un periodo di circa 220 secondi. Tale frequenza può essere chiaramente riscontrata in ognuno dei quattro vaporizzatori (A, B, C, D) utilizzati per la generazione del vapore e che

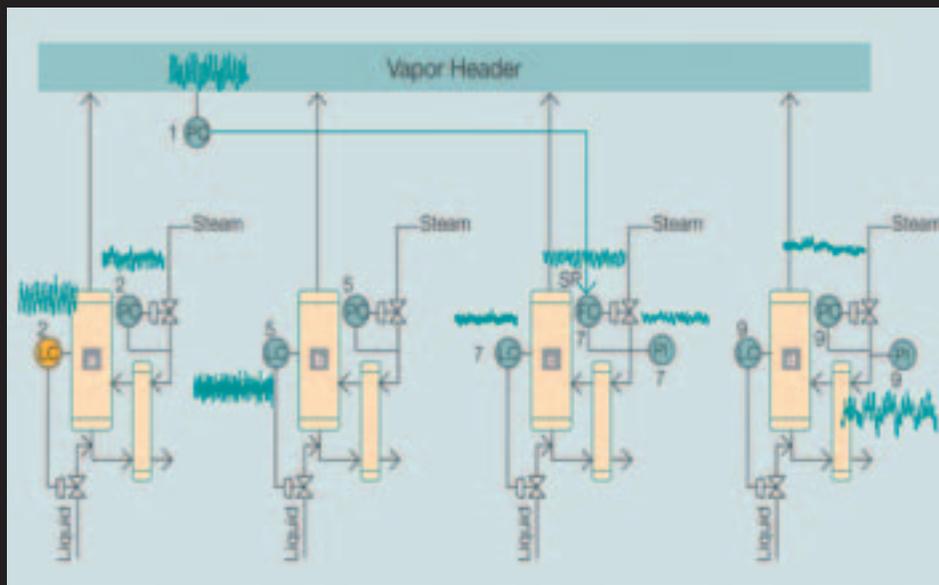


Figura 5: Trend oscillatori distribuiti lungo il sistema di vaporizzatori. La causa prima identificata è evidenziata in rosso.

contribuiscono a mantenere la pressione. Dallo schema di controllo si evidenzia che il Vaporizzatore C è impiegato per il controllo della pressione nel collettore: la scelta naturale dello staff di manutenzione è stata quindi di ricercare il responsabile del disturbo investigando il comportamento del Vaporizzatore C. Tuttavia, l'applicazione di LPM-PDA a questo problema, dopo aver identificato correttamente un cluster composto da tutte le variabili interessate, ha individuato, mediante l'a-

nalisi non-lineare, nel loop di controllo di livello LC2 l'origine del cluster stesso (vedi Figura 6). Gli esperimenti condotti dagli esperti di processo hanno effettivamente confermato che tale loop costituiva la causa prima del problema, contrariamente a quanto intuitivamente ritenuto in un primo momento. La successiva applicazione di LPM Auditing al loop LC2 ha prodotto la seguente diagnosi che è stata puntualmente verificata sperimentalmente:

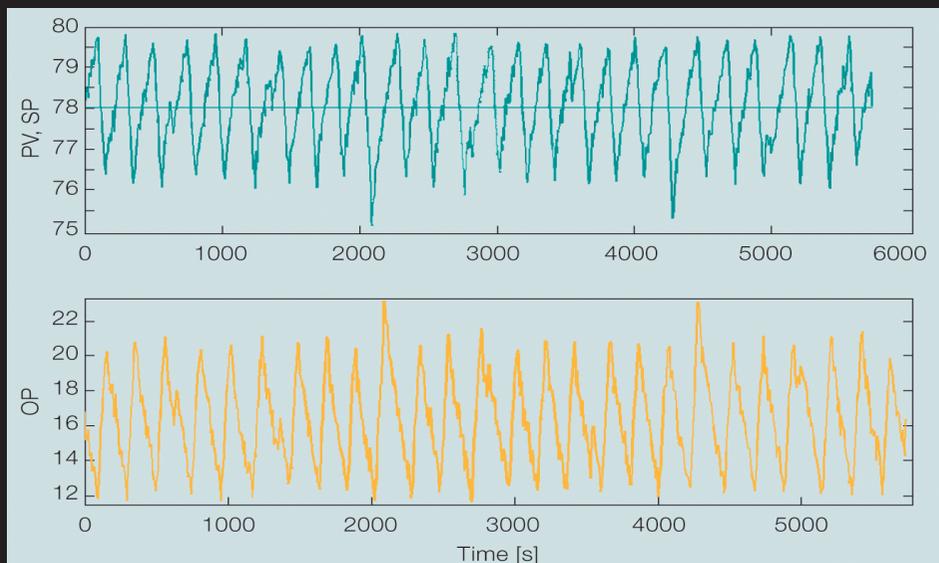


Figura 6: Dati relativi al loop di controllo di livello LC2 nel Vaporizzatore A: Top: setpoint e variabile di processo [0-100%]; Bottom: variabile manipolata (apertura valvola) [0-100%]. I dati evidenziano la presenza di fenomeni di stiction



**- LC2: Overall loop assessment:**

-----  
**The control loop performance is not acceptable.**

**- LC2: Detailed information:**

-----  
**THE CONTROL LOOP IS OSCILLATING.**

*The control valve exhibits stiction that results in loop oscillations. Put controller in manual to verify. The oscillation accounts for a significant part of the overall variation. Removing the oscillation will have lead to great improvement.*

*The oscillation amplitude is quite regular. This is untypical for a pure (linear) tuning problem.*

**THE FINAL CONTROL ELEMENT**

**INTRODUCES VARIABILITY TO THE OUTPUT.**

**The control valve suffers from increased static friction (stiction). A malfunctioning valve increases loop variability. Put loop in manual or maintain valve.**

Quanto sopra viene quindi a costituire un'ulteriore conferma dell'efficacia dell'applicazione congiunta dei vari moduli del pacchetto LPM.

## Conclusioni

L'analisi dei disturbi Plant-wide può ritenersi ormai avviata a lasciare il mondo della ricerca accademica per entrare nel dominio delle applicazioni commercialmente disponibili e per la normale pratica industriale.

I casi applicativi mostrati hanno confermato che questa innovativa e sofisticata tecnologia può offrire un enorme aiuto agli esperti di processo e agli ingegneri di manutenzione nella loro quotidiana battaglia contro gli ostici problemi di processo che limitano l'efficacia produttiva. Identificare in modo affidabile le cause prime di disturbi che si propagano inte-

ressando molteplici variabili di processo, è un'operazione spesso complessa e non sempre gestibile dal personale di impianto in assenza di adeguati supporti tecnologici. L'impiego di appropriati tools permette una drammatica riduzione dei tempi necessari alla localizzazione e quindi all'eliminazione di tali problemi.

L'esclusiva combinazione dei due approcci "top-down" (tipica di LPM-PDA) e "bottom-up" (LPM Auditing) pone il tool proposto in questa memoria in una posizione di assoluta leadership tecnologica ed esecutiva rispetto a quanto disponibile sul mercato.

Ulteriori risultati incoraggianti sono stati recentemente ottenuti applicando la metodologia PDA a nuovi campi, come la gestione avanzata degli allarmi o la supervisione e diagnostica delle reti elettriche.

## References

- [1] Thornhill, N.F., Huang, B., and Zhang, H., 2003, Detection of multiple oscillations in control loops, *Journal of Process Control*, 13, 91-100.
- [2] Thornhill, N.F., Shah, S.L., Huang, B., and Vishnubhotla, A., 2002, Spectral principal component analysis of dynamic process data, *Control Engineering Practice*, 10, 833-846
- [3] Kantz, H., and Schreiber, T., 1997, *Nonlinear time series analysis*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- [4] Bonavita, N., Bovero, J.C., and Martini, R., 2004, Control loops: performance and diagnostics, in: 48th ANIPLA Conference, Milano, Italy, September 2004
- [5] Bauer, M., (2005) "Data-driven Methods for Process Analysis", PhD Thesis, University of London
- [6] Thornhill, N.F., and Horch, A., (2006) "Advances and new directions in plant-wide controller performance assessment", *Proc. Of ADCHEM 2006*, Gramado, Brazil, April, 2-5, 2006
- [7] Horch, A. (2006), "Benchmarking control loops with oscillations and stiction". In: *Process Control Performance Assessment*. (Ordys, A., Uduehi, D and Johnson, M.A, Eds), Springer, Guildford, UK.
- [8] Thornhill, N.F., Melbø, H., and Wiik, J., 2006, Multi-dimensional visualization and clustering of historical process data, *Industrial Engineering and Chemistry Research*, 45, 5971-5985.