

# Controllo di temperatura di reattori batch

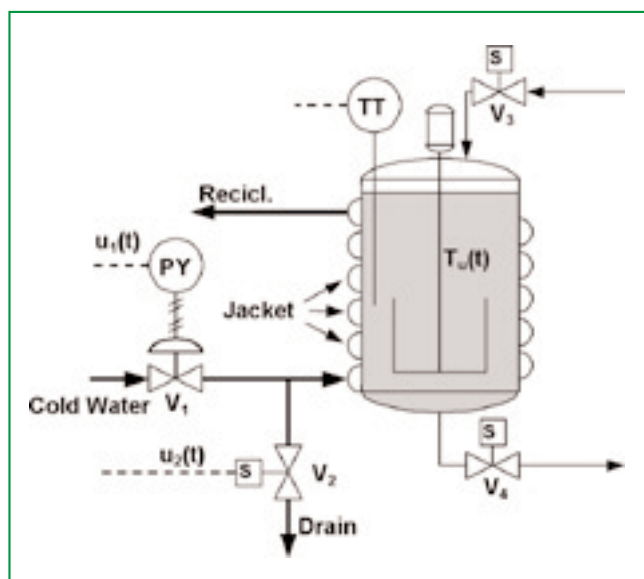


Figura 1 - Il reattore e il sistema di misura/attuazione

Paolo Valigi, Mario Luca Fravolini, Antonio Ficola, Monica Forlucci, Claudio Sandali, Ernesto Bove

Il problema del controllo di temperatura di reattori batch è strettamente vincolato dalle caratteristiche del sistema di attuazione che ne regola gli scambi termici con l'esterno. In molti casi di pratico interesse è consentito solo sottrarre calore, con prestazioni insoddisfacenti in caso di sovracorrezione. La strategia proposta alterna fasi di iniezione di refrigerante a fasi di svuotamento forzato del serpentino di raffreddamento. La strategia di controllo è stata validata sperimentalmente su alcuni reattori industriali con risultati molto incoraggianti.

La maggior parte della produzione di prodotti chimici e farmaceutici, viene effettuata nell'industria per mezzo di processi controllati di tipo batch e feed-batch. Il controllo di un reattore chimico rappresenta in genere un problema complesso per molteplici motivi. Tra i problemi più significativi si ricordano le non linearità significative dei processi chimici, la natura distribuita del sistema da controllare, e la difficoltà di derivare un modello matematico accurato del processo. Altro problema di notevole interesse pratico è dato dalla difficoltà di effettuare le misure in tempo reale della composizione delle variabili di processo più importanti le quali risulterebbero assai utili per il controllo in retroazione del reattore.

Nella pratica, nella maggior parte delle applicazioni, la variabile di processo che si sceglie di controllare è la temperatura [1]; il controllo della temperatura della reazione permette, infatti, di controllare in maniera indiretta la reazione chimica all'interno del reattore. In genere, per ogni tipo prodotto, viene definito un profilo di temperatura specifico il quale prevede sia cicli di riscaldamento sia di raffreddamento del reattore. La capacità di garantire l'inseguimento accurato di un profilo di temperatura influenza direttamente la qualità del prodotto finito. In genere, la temperatura di un reattore viene controllata per mezzo dello scambio termico tra il reattore stesso e il fluido a temperatura controllata che viene

fatto circolare in un serpentino che "avvolge" il reattore. Nel 90% delle applicazioni industriali [1] si utilizza un sistema di raffreddamento/riscaldamento basato su due fluidi a temperature differenti. Tipicamente il sistema di regolazione impiega acqua fredda in fase di raffreddamento e acqua calda, oppure vapore in fase di riscaldamento.

Per quanto riguarda le strategie di controllo impiegate per il controllo di reattore la più diffusa è senza dubbio basata su controllori di tipo Pid. Data la non-linearità intrinseca dei processi in studio, tali schemi sono stati in seguito migliorati da strategie di tipo Pid self-tuning che tendono ad adattare i parametri del regolatore in funzione del punto di lavoro [2, 3] aumentandone anche il livello di robustezza nei riguardi di incertezze. Altra tecnica di controllo robusto impiegata in questo conteso è quella che fa uso di controllori a struttura variabile di tipo sliding [4, 5]. Più recentemente sono state applicate con risultati interessanti anche tecniche di controllo predittive basate su modello [6].

In molti reattori industriali, la possibilità di seguire accuratamente profili con temperatura desiderata è vincolata strettamente dalle caratteristiche tecniche del sistema di attuazione a due fluidi; in particolare, è piuttosto importante la capacità di effettuare con rapidità la commutazione tra la configurazione in riscaldamento e quella in raffreddamento. In alcuni

Prof. P. Valigi, ing. M. L. Fravolini, ing. A. Ficola, ing. M. Forlucci, Dipartimento di Ingegneria Elettronica e dell'Informazione, Università di Perugia. Dott. C. Sandali, Ciba Specialty Chemicals, Pontecchio Marconi (BO). Ing. E. Bove, Automazioni e Sistemi Srl (MI).

impianti, per esempio durante la fase di raffreddamento per mezzo di acqua fredda, potrebbe non essere possibile iniettare nelle serpentine del vapore per motivi strutturali. Questa limitazione diminuisce chiaramente l'efficacia di un sistema di controllo in retroazione nell'inseguimento di un riferimento desiderato. In pratica, dal punto di vista della legge di controllo, la diminuzione delle prestazioni è dovuta al fatto che per lunghi periodi di tempo è possibile attuare azioni di controllo esclusivamente con segno positivo o negativo. Sino ad oggi il problema relativo all'inseguimento di rampe di temperatura di reattori chimici con il vincolo di poter utilizzare sforzi di controllo con un solo segno è stato poco esplorato anche se, dal punto di vista applicativo, riveste una grande importanza.

Tale indagine è stato l'argomento centrale di un progetto di ricerca applicata sviluppato in collaborazione tra l'Università degli Studi di Perugia, la Ciba Specialty Chemicals di Pontecchio Marconi (BO) e la Automazioni e Sistemi Srl (MI). In molti reattori di tale stabilimento il problema dell'inseguimento di rampe di temperatura con sistema di attuazione soggetto ai vincoli sopra detti è di notevole interesse. Altra specifica di progetto piuttosto stringente è quella di fornire leggi di controllo che richiedano l'utilizzo della sola strumentazione esistente e che comportino il minimo di modifiche strutturali sul sistema di attuazione esistente. Date queste limitazioni la scelta della strategia di controllo più adatta è assai delicata. Tale scelta è stata effettuata solo in seguito a una dettagliata analisi numerica mediante un modello accurato del circuito di raffreddamento di un tipico reattore dell'impianto. Nello studio effettuato è stato studiato in dettaglio il problema dell'inseguimento di profili di raffreddamento arbitrari. Questo articolo riporta un'analisi delle diverse condizioni operative in cui opera il reattore durante il raffreddamento; ne viene quindi descritto il modello matematico. Presenta, inoltre, la legge di controllo esistente, e nel paragrafo *La nuova strategia di controllo* descrive e giustifica la legge di controllo proposta. Infine, vengono rispettivamente riportati i risultati di prove sperimentali e discusse le conclusioni.

## Modello matematico del reattore

Lo schema del reattore analizzato in questo lavoro è riportato in Figura 1. L'ingresso  $u_1(t)$  comanda l'immissione di refrigerante (acqua) attraverso la valvola V1. La valvola V2 è uti-

lizzata per svuotare il serpentino per scopi di manutenzione ed è di tipo on/off, comandata dal segnale  $u_2(t)$ . Le valvole V3 e V4 sono impiegate per riempire e svuotare il reattore. Come primo passo per l'analisi del sistema è stato sviluppato un modello matematico del reattore. Il serpentino è stato diviso in elementi, ciascuno dei quali ha temperatura uniforme e contiene acqua o vapore a seconda delle sue condizioni termodinamiche; ciascun elemento scambia entalpia e massa con i due adiacenti e scambia calore con la parete del reattore, che a sua volta è a contatto con i reagenti. Il modello è stato utilizzato come base per il progetto del sistema di controllo.

## Analisi termodinamica del reattore

Si assume senza perdita di generalità che la temperatura iniziale  $T_u(t)$  dei reagenti all'interno del reattore possa essere superiore alla temperatura di ebollizione del fluido refrigerante (in questo studio si utilizza acqua a 20 °C) che viene fatta circolare nel serpentino di raffreddamento.

Sotto tali ipotesi è possibile che una parte significativa del fluido evapori; tale cambiamento di fase ha un effetto termodinamico importante sugli scambi di calore e quindi deve essere tenuto in considerazione nella fase di analisi e progetto del sistema di controllo. Per razionalizzare l'analisi che regola lo scambio termico tra serpentino e reattore durante il raffreddamento, è conveniente suddividere tale processo in fasi, come illustrato in Figura 2. Il significato delle fasi è riportato di seguito.

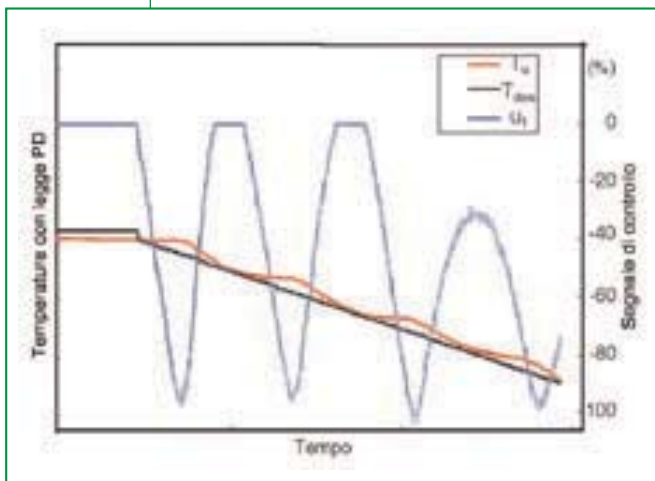
- La valvola V1 che regola l'immissione di fluido di raffreddamento (acqua) è aperta, l'acqua fluisce nel serpentino, ma non c'è ebollizione in alcuna sezione del serpentino stesso; la velocità di raffreddamento del reattore è controllabile.
- La valvola V1 è chiusa, non c'è flusso, la temperatura del fluido di raffreddamento all'interno del serpentino sale velocemente; la velocità di raffreddamento è minima.
- L'acqua raggiunge la temperatura di ebollizione in alcune zone del serpentino; tale



Figura 2 - Schema delle fasi termodinamiche

condizione si ottiene spontaneamente; durante l'ebollizione l'acqua sottrae una quantità significativa di calore al reattore; la velocità di raffreddamento è superiore a quella della fase b); se la temperatura  $T_u(t)$  scende al di sotto del valore desiderato  $T_{des}(t)$ , il sistema non è controllabile, perché non è possibile fornire calore al reattore.

d) Partendo dalla fase c), nel caso in cui la valvola V1 si mantenga chiusa per un periodo sufficientemente lungo, tutta l'acqua all'interno delle serpentine tende ad evaporare; quando il serpentino si è vuotato, lo scambio termico con il refrigerante si annulla e la temperatura del reattore  $T_u(t)$  si mantiene all'incirca costante.



**Figura 3 - Temperature  $T_u(t)$ ,  $T_{des}(t)$  e segnale di controllo  $u_1(t)$ , con legge di controllo PD**

e) Partendo dalla fase c), quando la valvola viene aperta, l'acqua comincia a fluire; perciò ci saranno alcune sezioni del serpentino in cui è presente per la maggior parte acqua, in altre acqua in ebollizione; quando la temperatura del reattore è sufficientemente bassa il sistema ritorna nella condizione a); la fase e) può essere ottenuta anche a partire dalla fase a) per piccole aperture della valvola di ammissione del refrigerante, quando si desidera una piccola velocità di raffreddamento.

In conseguenza, dopo una fase di raffreddamento veloce a), non è possibile ottenere un raffreddamento lento b) per un tempo arbitrario, in quanto si verificherebbe la transizione spontanea da b) a c).

Questo comportamento limita chiaramente la tipologia dei profili di temperatura  $T_{des}(t)$  che possono essere inseguiti dal reattore. Per rimuovere questo vincolo, viene implementata un'ulteriore modalità di funzionamento f), i cui dettagli saranno illustrati nel paragrafo *La nuova strategia di controllo*.

### Limiti di strategie di controllo PD

Attualmente la strategia di controllo per la regolazione della temperatura dei reattori Ciba è basata su una legge di controllo di tipo PD la quale regola l'apertura della valvola V1 di immissione del fluido di raffreddamento in funzione dell'errore

$$e(t) = T_{des}(t) - T_u(t) \quad (1)$$

definito come differenza tra la temperatura desiderata  $T_{des}(t)$  e quella misurata all'interno del reattore  $T_u(t)$ . Tale variabile è la sola, impiegabile per la regolazione, che viene misurata dalla strumentazione d'impianto. La legge di controllo è quindi del tipo:

$$u_{PD}(t) = K_p e(t) + K_d \dot{e}(t) \quad (2)$$

Poiché nella fase di raffreddamento è possibile iniettare solo liquido refrigerante nel serpentino, il segnale di comando  $u_{PD}(t)$  è soggetto al vincolo di dover essere sempre dello stesso segno. La legge di controllo che viene in realtà implementata è quindi:

$$\begin{cases} u_1(t) = u_{PD}(t) & u_{PD}(t) < 0 \\ u_1(t) = 0 & u_{PD}(t) \geq 0 \end{cases} \quad (3)$$

Le prestazioni ottenute con tale legge di controllo non sono in genere soddisfacenti; in Figura 3 viene riportato un andamento tipico misurato della temperatura interna di un reattore campione durante una rampa di raffreddamento  $T_{des}(t)$  a pendenza costante. Nella Figura è mostrato anche il segnale di comando  $u_1(t)$  dell'apertura della valvola V1 (0% equivale a valvola V1 chiusa e 100% totalmente aperta).

La strategia di controllo (2-3) tende a iniettare una quantità significativa di fluido refrigerante per recuperare errori  $e(t) < 0$ ; in seguito, la valvola si mantiene chiusa per un periodo abbastanza lungo. In questo caso, a causa dell'elevata temperatura all'interno del reattore, l'acqua nel serpentino tende ad evaporare; quando la maggior parte della massa d'acqua è evaporata lo scambio termico diminuisce d'efficacia e la temperatura del reattore tende a stabilizzarsi. Quando  $u_1(t)$  diventa di nuovo negativa inizia un nuovo ciclo di iniezione di fluido seguito dall'evaporazione. In Figura 4 è riportato l'andamento dell'errore nel piano delle fasi  $[e(t), \dot{e}(t)]$  in cui è evidenziata anche la regione non controllata ( $u_1(t) = 0\%$ ). Risulta evidente che con tale legge di controllo il sistema non è controllabile in una porzione assai estesa del piano

delle fasi. Una comprensione più dettagliata dei regimi di funzionamento del reattore è stata derivata grazie a un'analisi simulativa della dinamica di scambio termico per mezzo del modello utilizzato per il progetto. In Figura 5 viene riportato l'andamento tipico delle temperature degli elementi del serpentino (suddiviso in dieci elementi) e la corrispondente quantità di acqua al suo interno durante una rampa di raffreddamento controllata. Come evidente, solo tre elementi su dieci non lavorano in regime di ebollizione; degli altri alcuni contengono acqua in ebollizione, altri sono vuoti; ciò comporta che esistono dei lunghi intervalli di tempo in cui il processo di scambio di termico è dominato dal fenomeno dell'ebollizione. In questi periodi il livello d'acqua nel serpentino diminuisce lentamente in maniera spontanea rendendo impossibile la regolazione della temperatura del reattore. Si osservi che, in condizioni di valvola di regolazione chiusa, man mano che il livello diminuisce, diminuisce anche l'efficacia dello scambio termico, per effetto della diminuzione della superficie di scambio termico.

**La nuova strategia di controllo**

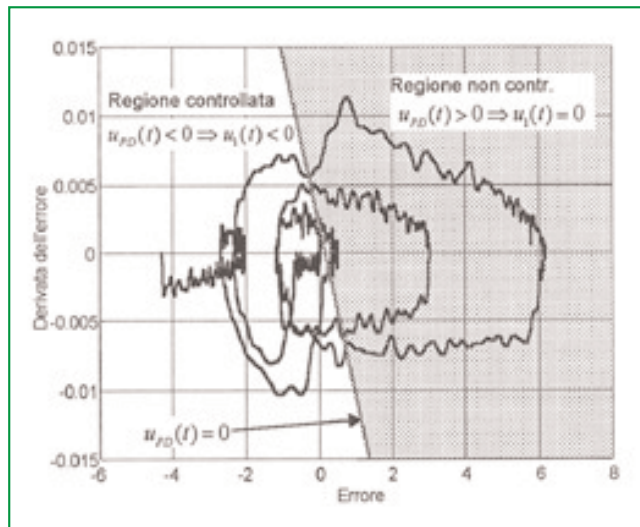
Sulla base dell'analisi fatta nel paragrafo precedente è emerso che le problematiche più importanti che devono essere affrontate nel progetto della nuova legge di controllo sono essenzialmente due:

- ridurre gli effetti della diminuzione di temperatura spontanea del reattore causata dall'evaporazione non controllabile del fluido refrigerante presente nel serpentino, estendendo la regione del piano (e, è) in cui l'azione di controllo è attiva;
- utilizzare la strumentazione già esistente sull'impianto.

Un modo per ridurre gli effetti dell'evaporazione spontanea è quello di regolare il livello  $V_i(t)$  del fluido refrigerante quando la valvola di ammissione è chiusa; per ottenere tale azione viene abilitato lo svuotamento forzato del serpentino. Ciò corrisponde a introdurre una ulteriore fase allo schema di Figura 2.

f) Abilitazione dello scarico controllato del serpentino mediante la valvola on/off V2.

Un aspetto importante di tale approccio è quello che la sua implementazione richiede delle modifiche molto contenute dell'impianto esistente, in quanto lo svuotamento può essere regolato dalla valvola di drenaggio V2. La legge di controllo proposta prevede la commutazione tra due segnali di immissione e svuotamento:



**Figura 4 - Traiettorie [e(t), è(t)] con legge PD; la regione non controllabile è evidenziata**

- il primo comando  $u_1(t)$  è usato per pilotare l'apertura della valvola V1 di immissione del fluido di raffreddamento;
- il secondo comando  $u_2(t)$  pilota l'apertura della valvola V2 di svuotamento del serpentino.

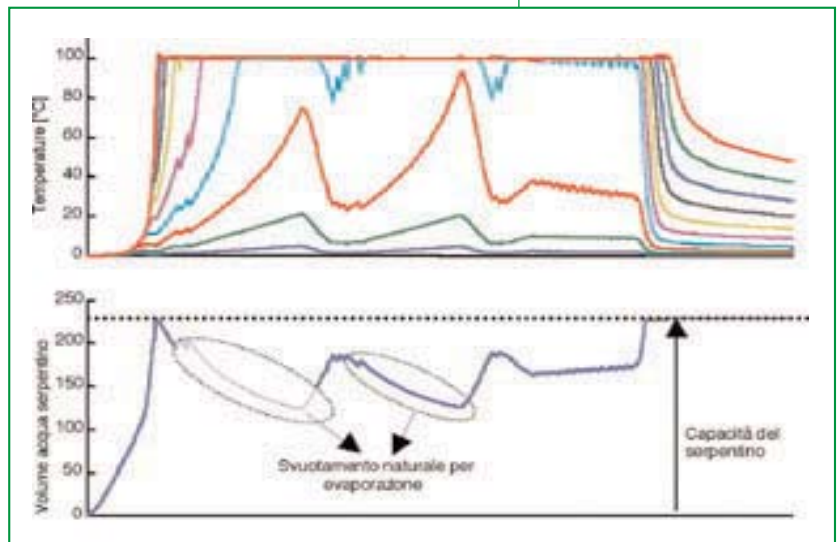
I segnali di comando sono generati secondo la seguente logica:

$$\begin{cases} u_1 = u_{10}(t); u_2 = 0 & \text{if } [(u_{10}(t) < 0) \text{ and } (u_{20}(t) < 0)] \\ u_1 = 0; u_2 = u_{20}(t) & \text{if } (u_{20}(t) > 0), \forall u_{10}(t) \\ u_1 = 0; u_2 = 0 & \text{if } [(u_{10}(t) \geq 0) \text{ and } (u_{20}(t) \leq 0)] \end{cases} \quad (4)$$

dove  $u_{10}(t)$  e  $u_{20}(t)$  sono i segnali generati dai controllori.

- La prima regola della 4) significa che il refrigerante viene iniettato solo se è efficace ( $u_{10}(t) > 0$ ) e non è richiesto lo svuotamento ( $u_{20}(t) < 0$ ).

**Figura 5 - Temperature simulate lungo il serpentino (diviso in dieci elementi) con legge di controllo PD**



- La seconda legge abilita il drenaggio ( $u_{20}(t) > 0$ ) e disabilita l'iniezione di refrigerante; il drenaggio è l'azione dominante, perché l'iniezione è disabilitata qualunque sia il segno di  $u_{10}(t) > 0$ ;
- La terza definisce la regione non controllata, dato che né  $u_{10}(t) > 0$  né  $u_{20}(t) < 0$  possono essere attuati dalle valvole.

Si osservi che l'azione simultanea di  $u_1(t)$  and  $u_2(t)$  non è consentita. Più in dettaglio, la legge di controllo  $u_{10}(t)$  si compone di un termine PD e di un termine feedforward:

$$u_{10}(t) = u_{PD1} e(t) + u_{ff1}(t) \quad (5)$$

dove:

$$u_{PD1}(t) = K_{p1}e(t) + K_{d1}\dot{e}(t) \quad (6)$$

Il termine feedforward  $u_{ff1}(t)$  aggiunge un contributo proporzionale alla pendenza della traiettoria desiderata  $T_{des}(t)$ :

$$u_{ff1}(t) = K_{dff1} K_{d1} \dot{T}_{des}(t+t_0) \quad (7)$$

L'anticipo  $t_0$  serve per compensare il ritardo finito che si manifesta a causa del trasporto

di fluido refrigerante fra V1 e il reattore, quando il serpentino è vuoto. Il termine  $u_{ff1}(t)$  agisce prima del cambiamento di pendenza di  $T_{des}(t)$ , e perciò ha un effetto positivo sulla riduzione dell'errore di inseguimento della temperatura specialmente in corrispondenza delle variazioni. La legge di controllo  $u_{20}(t)$  ha una struttura PD:

$$u_{20}(t) = K_{p2}e(t) + K_{d2}\dot{e}(t) \quad (8)$$

Infatti, il drenaggio deve essere attivo solo in caso di errore positivo, causato da un eccesso di azione di raffreddamento. Pertanto non è necessario nessun termine di compensazione in avanti, in quanto già introdotto dalla (5) Nella pratica, la legge di controllo (8) non può essere implementata a causa del fatto che la valvola V2 che controlla lo svuotamento forzato del serpentino è di tipo on-off. Tale problema è stato superato applicando una mo-

dulazione Pwm (Pulse Width Modulation) che converte il segnale  $u_{20}(t)$  nel segnale binario  $u_{20pwm}(t)$ . Le regioni in cui operano le due leggi controllo (5-8) e le rispettive linee di commutazione sono mostrate in Figura 6. Come si può osservare chiaramente esiste solo una porzione ridotta del piano in cui il controllo non è attivo ( $u_1(t) = u_2(t) = 0$ ); tale porzione è significativamente minore di quella associata alla preesistente legge di controllo (2-3) (si confronti con Figura 4).

La possibilità di controllare il sistema in una porzione più estesa del piano delle fasi ha una chiara influenza positiva sulle prestazioni del sistema di controllo complessivo. Da notare che la superficie di commutazione  $u_{10}(t)=0$  è una retta con pendenza fissa data da  $-k_{p1}/k_{d1}$  e ordinata all'origine  $c(t) = -u_{ff1}(t)/k_{d1}$  dipendente dal tempo, generata dal contributo feedforward  $u_{ff1}(t)$ .

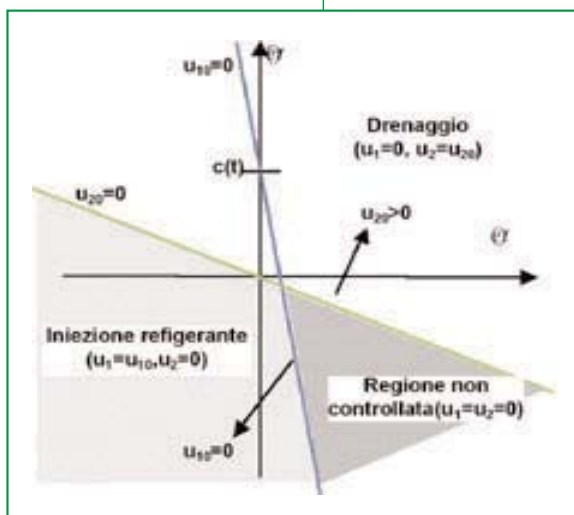
L'efficacia della nuova legge di controllo è stata valutata inizialmente per via simulativa. In Figura 7 sono riportate le temperature del serpentino e la corrispondente quantità di refrigerante, ottenute per lo stesso profilo di temperatura  $T_{des}(t)$  di Figura 5.

Come si può osservare le fasi in cui il fluido nel serpentino diminuisce hanno un transitorio significativamente minore di quello in Figura 5. In effetti, in questo caso, lo svuotamento non avviene per evaporazione spontanea ma è controllato; il livello di refrigerante nel serpentino oscilla intorno a un valore costante; ciò testimonia un miglioramento evidente riguardo la capacità del sistema di controllo di rispondere prontamente a cambiamenti di pendenza del segnale di riferimento. Le oscillazioni dipendono dall'alternanza di fasi di riempimento e svuotamento, richieste dal fatto che la valvola di scarico è di tipo on-off, che introduce una quantizzazione significativa nel segnale di controllo.

## Risultati sperimentali

La verifica sperimentale della strategia di controllo è stata effettuata su alcuni reattori dello stabilimento Ciba Specialty Chemicals di Pontecchio Marconi (BO).

La legge di controllo è stata implementata in linguaggio C usando la tecnologia Com. La messa a punto dei parametri della legge di controllo (4) è stata effettuata per via numerica simulando il modello dinamico del reattore. Per i primi esperimenti è stato scelto un reattore (R424) le cui prestazioni con l'attuale legge di controllo (3) sono particolarmente



**Figura 6 - Regioni di lavoro per la legge di controllo proposta e regione non controllata; le rette di commutazione corrispondono alle rette  $u_{10}(t)=0$**

te modeste. In Figura 8 è riportato l'andamento misurato della temperatura interna al reattore  $T_u(t)$  in risposta a un profilo di raffreddamento desiderato  $T_{des}(t)$ , mentre in Figura 9 è mostrato l'andamento del corrispondente segnale d'errore  $e(t)=T_d(t)-T(t)$ . Come si può osservare il segnale  $e(t)$  si mantiene quasi sempre in regione negativa; questo fatto è una conseguenza diretta della legge di controllo (4), che privilegia lo svuotamento rispetto all'immissione di acqua. Infatti, nel caso in cui si abbia un errore positivo, ovvero  $T_{des}(t) > T_u(t)$ , sarebbe necessaria l'immissione di calore nel sistema e come spiegato ciò non può essere fatto.

Al contrario, fintanto che l'errore si mantiene negativo il sistema si trova nella regione controllabile e quindi l'errore di temperatura può essere mantenuto ad un livello accettabile. Questo fatto può essere messo in evidenza se si rappresenta il piano delle fasi ( $e, \dot{e}$ ) come mostrato in Figura 10, dove sono riportate anche le linee di commutazioni tra le

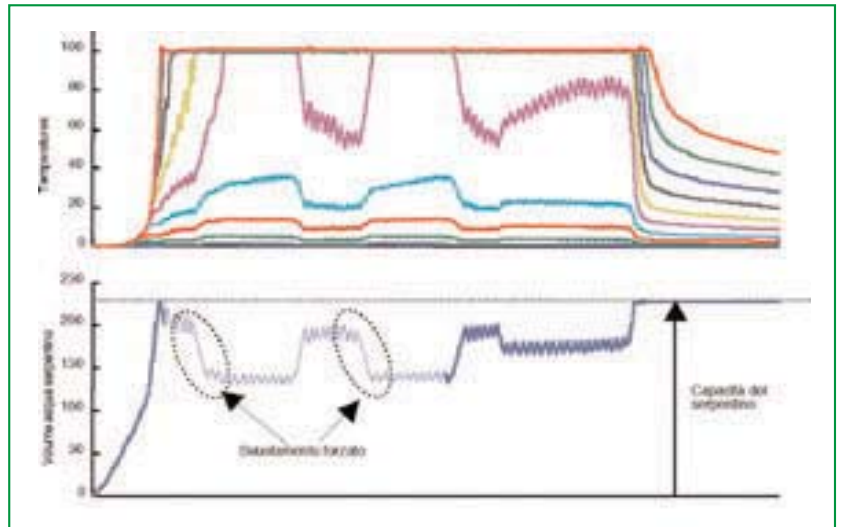


Figura 7 - Reattore controllato con svuotamento forzato

leggi controllo. È ben evidente che la nuova strategia forza la traiettoria nella regione controllata per la maggior parte del tempo. In Figura 11 sono mostrati i due segnali di controllo  $u_{10}(t)$  e  $u_{20pwm}(t)$ .

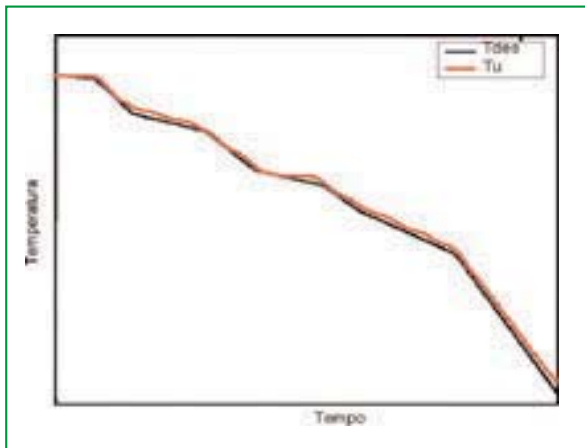


Figura 8 - Andamento della temperatura del reattore R424

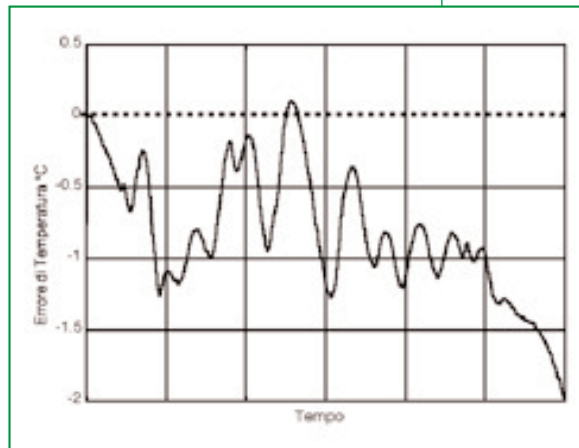


Figura 9 - Segnale di errore  $e(t)=T_d(t)-T(t)$

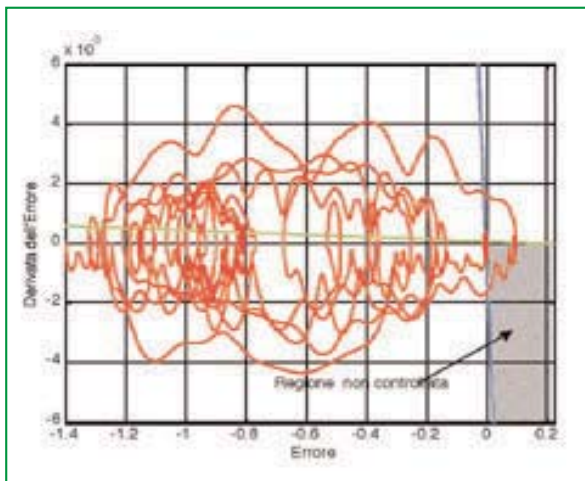


Figura 10 - Andamento di  $e(t)$  ed  $\dot{e}(t)$  e regione non controllata ( $u_{1ff}=0$ )

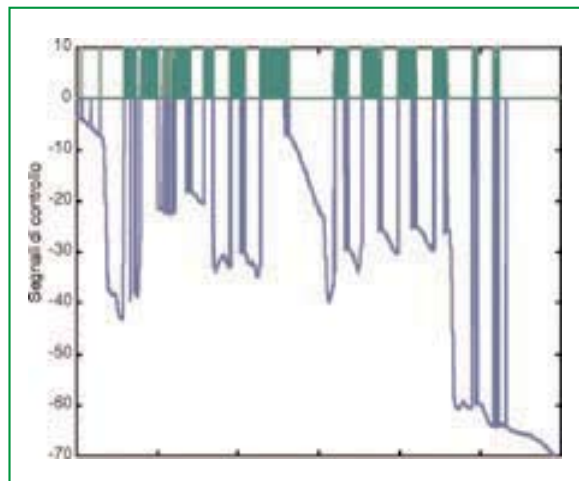


Figura 11 - Andamento dei segnali di controllo  $u_1(t)$  e  $10 \cdot u_{20pwm}(t)$

Come atteso la strategia di controllo procede alternando periodi di iniezione di fluido a periodi di svuotamento forzato. Il chattering nel segnale  $u_{20pwm}(t)$  è generato dalla modulazione Pwm; il chattering in  $u_{10}(t)$  è originato dalla commutazione tra le due leggi di controllo in corrispondenza della retta  $u_{20}(t)=0$ .

*Analisi della robustezza*

La robustezza della legge di controllo è stata verificata in due fasi. Nel primo studio la legge di controllo è stata sperimentata ripetutamente sullo stesso reattore (R424) per lo stesso profilo di raffreddamento. Le prestazioni medie estratte da dati provenienti da 32 batch sono riportate in Tabella 1. Le prestazioni sono migliorate significativamente; in particolare è stata ottenuta un miglioramento del 53,27% dell'errore medio e del 77,65% per la sua deviazione standard rispetto al controllo preesistente. Il consumo di refrigerante (quan-

Tale verifica dimostra la ragionevole possibilità di applicare con successo la nuova strategia di controllo ad altri reattori dell'impianto.

**Conclusioni**

Nel presente lavoro è stata proposta una nuova strategia per il controllo di profili di raffreddamento per reattori chimici. Tale approccio è stato derivato a seguito di una accurata analisi numerica che simula la termodinamica di raffreddamento del reattore. La strategia proposta alterna fasi di iniezione di refrigerante a fasi di svuotamento forzato del serpentino di raffreddamento; ciò ha consentito di estendere in modo significativo la regione in cui il sistema di controllo è efficace ed ha ridotto sensibilmente gli effetti indesiderati dovuti all'ebollizione del fluido di raffreddamento. Altro vantaggio importante è dato dal fatto che la strategia si basa solo sulla misura della temperatura interna del reattore e sulla possibilità di pilotare la valvola di iniezione e svuotamento del serpentino, senza richiedere modifiche impiantistiche. I risultati di numerose prove sperimentali hanno fornito risultati molto incoraggianti, in effetti, è stato riscontrata una riduzione del 53,27% dell'errore medio di inseguimento rispetto alla legge di controllo preesistente con consumo di refrigerante comparabile.

**Tabella 1 - Confronto delle prestazioni tra la legge di controllo preesistente e quella proposta**

Legge di controllo reattore R424	Errore medio	Deviazione standard	Valore massimo di abs (errore)	Consumo di refrigerante
Attuale (su 5 batch)	2.0255	2.6164	6.1688	6.6246e4
Proposta (su 32 batch)	-0.9570	0.5847	-1.7013	6.2679e4

**Tabella 2 - Prestazioni della legge di controllo proposta su reattore R580**

Reattore R580	Errore medio	Deviazione standard	Valore massimo di abs (errore)	Consumo di refrigerante
(su 13 batch)	-1.3538	0.5185	- 2.3474	4.2030e+004

tificato dall'integrale dell'apertura della valvola  $u_1(t)$  è comparabile per le due strategie di controllo. Vale la pena di mettere ancora in evidenza che i miglioramenti sono stati ottenuti con delle modifiche minime sull'impianto. Un secondo studio è stato effettuato per verificare la possibilità di estendere la legge di controllo ad altri reattori dell'impianto. Per ognuno di questi reattori i coefficienti delle leggi di controllo sono stati determinati per via simulativa, particolarizzando i parametri del modello termodinamico per ogni reattore in studio. Gli indici estratti dai dati sperimentali presi a titolo di esempio dal reattore R580 sono riportati in Tabella 2. Anche in questo caso le prestazioni ottenute sono pienamente compatibili con gli standard di produzione.

**Bibliografia**

[1] Z. Loulech, M. Cabassud, M. V. le Lann (1999), *A new strategy for temperature control of batch reactors: experimental application*, Chemical Engineering Journal, 75, 11-20.  
 [2] F. Cameron, D.E. Seborg (1983), *A self tuning controller with a Pid structure*, Int. J. Contr., 38, 401-417.  
 [3] T. Moelbak (1999), *Advanced control of superheater steam temperatures: an evaluation based on practical applications*, Control Eng. Practice, 7, 1151-1158.  
 [4] N. Sakamoto, M. Masubuchi, S. Kawata (1998), *Variable structure control using the idea of fictitious set points temperature tracking control of a batch reactor process*, Control Eng. Practice, 6, 1151-1158.  
 [5] W.C. Su, C.C. Tsai (2001), *Discrete time Vss temperature control for a plastic extrusion process with water cooling systems*, Ieee Trans. Ctr. Sys. Tech, 9, 618-623.  
 [6] E. Katende, A. Jutan (2000), *Experimental evaluation of predictive temperature control for batch reactor system*, Ieee Trans. Ctr. Sys. Tech., 8, 2-13.