

# Controllo di cottura alimentare in un forno industriale

Corrado Guarino Lo Bianco, Massimo Romano, Aurelio Piazzi, Elena Pinazzi

Nell'articolo viene presentata un'applicazione di visione artificiale utilizzata per il controllo della cottura di biscotti in un forno continuo industriale della Colussi SpA. L'articolo illustra una strategia di controllo che consente di ottenere una migliore qualità del prodotto e una maggiore efficienza del processo di cottura. La retroazione del sistema di controllo è ottenuta mediante un sistema di visione artificiale che determina lo stato di cottura analizzando le caratteristiche di colore dei biscotti.

## Keyword

*Processo di cottura, visione artificiale, modello incerto, forno continuo, controllo adattativo.*

I sistemi di visione artificiale stanno diventando di uso comune in ambito industriale. Sono molte le ragioni che giustificano la diffusione di una tale tecnologia. Molto spesso le caratteristiche essenziali di un prodotto sono legate alla sua forma e colore. Un esempio può essere quello della produzione industriale di piastrelle ceramiche di elevata qualità: tramite la visione è possibile scartare i pezzi non correttamente stampati o comunque fuori standard. In altre applicazioni risulta importante rilevare difetti nel materiale grezzo. Casi tipici possono essere quelli della lavorazione della carta o del vetro. Le attività di ispezione menzionate sono state gestite, storicamente, mediante la visione umana. L'introduzione della visione artificiale nell'espletamento di tali compiti è giustificata dall'esigenza di sostituire l'operatore umano in un compito noioso e di migliorare al tempo stesso la qualità del prodotto eliminando il fattore soggettivo, una caratteristica intrinseca legata all'ispezione umana.

A questo scopo la Commissione Europea ha attivato recentemente una serie di progetti denominati "European Take-up of essential Information Society Technologies-Integrated Machine Vision" (Eutist-Imv) aventi come scopo l'introduzione della visione artificiale nell'ambito dell'automazione industriale (si veda anche il sito internet [www.spt.fi/eutist/](http://www.spt.fi/eutist/)). In questo articolo verrà descritto uno di questi progetti denominato "quality COntrol of baKIng status of ovEn products" (Cookies). Il nome del progetto indica chiaramente quale sia

l'applicazione considerata. L'obiettivo è quello di implementare un controllore autonomo retroazionato che funga da supervisore per un processo industriale di cottura di biscotti. Il forno utilizzato è un forno continuo a nastro trasportatore composto da sette stadi. L'informazione principale usata dal controllore ad anello chiuso è il grado di cottura dei biscotti valutato mediante l'uso di un sistema di visione artificiale.

Il test di qualità dei prodotti da forno eseguito mediante visione artificiale è descritto in letteratura in molteplici lavori. Per esempio in [1] il segnale di luminanza rilevato da un sistema di visione è analizzato con un algoritmo di tipo fuzzy per valutare lo stato di cottura di biscotti prodotti industrialmente. Lo stesso problema è considerato anche in [3] dove il test di qualità è effettuato mediante una rete neurale artificiale. Nello stesso lavoro è evidenziata l'importanza dell'uso di immagini a colori.

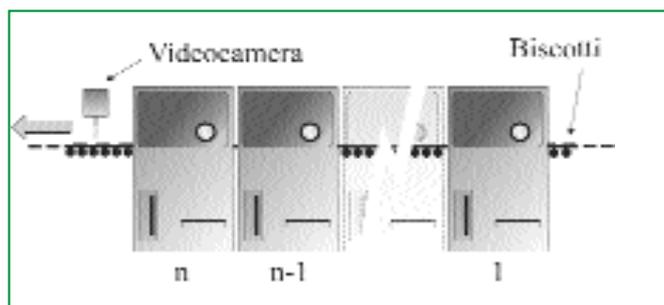
Lo scopo del progetto Cookies è più ampio, in quanto il sistema di visione è usato per agire sul forno al fine di controllare il processo di cottura. L'obiettivo finale è quello di migliorare la qualità della produzione e ridurre le perdite.

Il progetto Cookies è sviluppato da tre unità operative. L'unità Ate Oy è il partner industriale responsabile della realizzazione del sistema di acquisizione visiva mentre l'Università di Parma ha il compito di sviluppare il sistema di controllo in retroazione. L'utente finale del progetto è la Colussi SpA di Petrignano di Assisi: il sistema di controllo verrà usato per la regolazione di uno dei suoi forni continui.

In questo lavoro è descritta la strategia di controllo adattativa proposta per gestire il processo di cottura, sulla base di un supervisore ibrido il cui scopo è quello di selezionare la strategia di controllo più appropriata per il forno.

Nel paragrafo successivo è descritto l'impianto e vengono forniti cenni sulla struttura del controllore. Si descriveranno poi il sistema di visione e i dettagli della strategia di controllo adottata. Saranno mostrati e commentati alcuni risultati simulativi nonché i risultati di alcune prove sperimentali.

C. Guarino Lo Bianco (Dottore di Ricerca e Ricercatore Confermato), M. Romano (Dottorando), A. Piazzi (Dottore di Ricerca e Professore Straordinario), E. Pinazzi (Collaboratrice esterna) - Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione dell'Università di Parma - {guarino, romano, piazzi, pinazzi}@ce.unipr.it

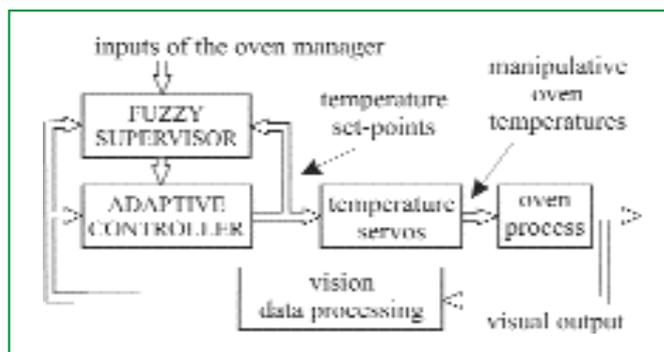


**Figura 1 - Rappresentazione schematica di un forno continuo composto da n sezioni**

### Il forno continuo e la struttura di controllo

Un forno continuo è composto da diverse stazioni di cottura, ciascuna azionata indipendentemente dalle altre. È possibile impostare il set-point del bruciatore di ogni stazione in modo da scaldare appropriatamente il flusso di aria usato per cuocere i biscotti. Il prodotto viaggia attraverso le stazioni tramite un nastro trasportatore (si osservi la figura 1). Diverse valvole meccaniche sono usate per dirigere i flussi di aria all'interno delle camere di cottura. L'estrazione dell'aria dal forno avviene mediante tiraggio naturale anche se, per gestire situazioni di emergenza, sono previste ventole per l'estrazione forzata. Tutte le impostazioni del forno sono normalmente fissate in modo manuale dal cosiddetto "oven manager", un tecnico esperto con molti anni di attività. Per tale ragione il fattore umano costituisce un aspetto rilevante nella gestione del processo di cottura.

Nell'arco di una giornata diversi "oven manager" si alternano nella sorveglianza del forno. Ciascuno di essi agisce differenzialmente sulle regolazioni, basando ogni decisione sulla propria esperienza personale. Come conseguenza, lo stesso prodotto può risultare cotto diversamente nella stessa giornata anche nel caso di condizioni operative perfettamente costanti. La supervisione del processo fatta esclusivamente da un operatore umano presenta anche un altro svantaggio. Il processo di cottura di un forno è particolarmente sensibile a fattori ambientali quali la temperatura dell'aria, la pressione atmosferica, l'umidità e il tipo di impasto. Teoricamente, ad ogni cambiamento di questi fattori l'oven manager dovrebbe far corrispondere un cambiamento delle impostazioni del forno al fine di mantenere costante la qualità del prodotto.



**Figura 2 - Schema di controllo per un forno continuo**

In realtà la sorveglianza del forno non viene svolta con continuità, cosicché qualsiasi cambio di condizioni ambientali può essere causa di grosse perdite di prodotto. Lo scopo del controllore retroazionato proposto in questo lavoro è quello risolvere i problemi menzionati garantendo qualità costanti e minimizzando le perdite produttive.

Lo schema generale di controllo è riportato nella figura 2. Un sistema di visione artificiale valuta lo stato del processo di cottura in base al colore dei biscotti. Il suo segnale di uscita, indicato nel seguito con il termine di "Baking Status" (*BS*), rappresenta lo stato di cottura medio dei biscotti. La variabile *BS* è usata dal sistema di controllo per calcolare il set-point di temperatura del bruciatore dell'ultima sezione del forno.

A causa delle caratteristiche del processo, è richiesto uno schema di controllo di tipo adattativo, governato da un supervisore il cui compito è quello di selezionare la strategia di controllo più appropriata a seconda delle condizioni operative. La videocamera usata per acquisire lo stato di cottura dei biscotti è allocata all'uscita dell'ultimo stadio del forno (si osservi la figura 1). Si ponga convenzionalmente  $BS \in \mathbb{R}$ : quando il grado di cottura dei biscotti è ottimale allora  $BS = 0$ , mentre  $BS > 0$  e  $BS < 0$  indicano rispettivamente che i biscotti sono eccessivamente o insufficientemente cotti. Lo scopo del controllore è quello di garantire, attraverso la regolazione dell'ultima sezione del forno, che la variabile *BS* sia quanto più possibile prossima a zero.



**Figura 3**  
a) Biscotti con gradi di cottura differenti;  
b) Biscotti danneggiati

### Stima del grado di cottura

Il componente principale del sistema di visione è una telecamera a scansione lineare dotata di un appropriato gruppo ottico. La telecamera è posta al di sopra del nastro trasportatore. Il suo range visivo copre completamente la sezione trasversale del nastro trasportatore cosicché può ispezionare simultaneamente un'intera riga di biscotti. I biscotti vengono illuminati da una speciale sorgente luminosa allo scopo di minimizzare l'influenza della luce esterna sul sistema di visione. I dati acquisiti sono analizzati per mezzo di una scheda Dsp (Digital Signal Processing) che valuta il grado di cottura dei biscotti. I risultati dell'elaborazione sono scaricati verso un Personal Computer (Pc) per mezzo di una connessione seriale veloce (Rs-485). Il sistema di visione a colori è stato completamente sviluppato e realizzato dalla ditta finlandese Ate Oy. L'uso di una telecamera a colori è giustificato dalle stesse ragioni riportate in [3]. Grazie all'uso del colore risulta infatti possibile rivelare anche minimi cambiamenti dello stato di cottura dei biscotti, caratteristica essenziale al fine di poter impiegare l'informazione in un anello di controllo. Il sistema di visione è in grado di ispezionare tutti i biscotti presenti sul nastro trasportatore cosicché può rivelare ogni possibile difetto di ciascun biscotto: cottura non uniforme, forma sballata, rotture (si veda per esempio la fi-

gura 3). Tali informazioni potranno essere impiegate in futuro per comandare un sistema di scarto automatico del prodotto. Il valore di  $BS$  usato per il controllo è ottenuto mediando i valori di  $BS$  dei singoli biscotti all'interno di una fissata finestra temporale. L'operazione di media è resa necessaria dalla non uniformità di cottura dei biscotti. È noto infatti che il grado di cottura dei biscotti, misurato lungo una sezione trasversale del nastro trasportatore, non è costante: i biscotti posti lateralmente sono più cotti degli altri in quanto più vicini alle pareti calde del forno. Questo tipo di variabilità è un fenomeno tipico nei forni a gas. Un'altra ragione che giustifica l'uso di una media temporale sul  $BS$  è quella legata alla necessità di filtrare il "rumore di misura" del sistema di visione.

### La strategia di controllo

Da un punto di vista controllistico, la cottura di biscotti è un processo di tipo non lineare influenzato da molteplici fattori: alcuni di essi dipendono da azioni umane (la temperatura dei bruciatori, la posizione delle valvole del forno, la velocità del nastro trasportatore) mentre altri dipendono dalle condizioni ambientali (temperatura esterna, pressione atmosferica, umidità). I fattori che intervengono nel processo di cottura verranno quantificati nel seguito per mezzo di valori reali collezionati in un vettore

$$\mathbf{h} \in \mathcal{H} = [h_1^-, h_1^+] \times \dots \times [h_p^-, h_p^+] \subset \mathbb{R}^p$$

dove  $p$  indica il numero dei fattori che influenzano il processo. Il comportamento del sistema è incerto in quanto dipende da  $\mathbf{h}$ . È ragionevole supporre che il processo di cottura sia stabile: assegnata la temperatura del bruciatore  $T$  e i valori dei fattori ambientali  $\mathbf{h}$ , lo stato di cottura  $BS$  converge sempre verso un valore finito. È perciò possibile rappresentare il comportamento statico di  $BS$  per mezzo della seguente "funzione di cottura"

$$f: \mathcal{T} \times \mathcal{H} \rightarrow \mathbb{R}$$

$$(T, \mathbf{h}) \rightarrow f(T, \mathbf{h})$$

dove

$$\mathcal{T} := [T^-, T^+] \subset \mathbb{R}$$

è l'intervallo di temperature ammesse nell'ultima sezione del forno. Le seguenti caratteristiche della "funzione di cottura"  $f(T; \mathbf{h})$  possono essere assunte in base a semplici ragionamenti di carattere fisico.

#### Assunzione 1

La funzione  $f(T; \mathbf{h})$  è continua con le sue derivate prime, cioè

$$f \in C^1(\mathcal{T} \times \mathcal{H}).$$

Inoltre, per ogni  $\mathbf{h} \in \mathcal{H}$  assegnato, la funzione è monotonicamente crescente rispetto alla temperatura dei bruciatori  $T$ .

$$\frac{\partial f}{\partial T} > 0 \quad \forall T \in \mathcal{T} \quad (1)$$

Un esempio di funzione  $f(T; \mathbf{h})$  è mostrata nella figura 4 per mezzo di una famiglia di funzioni non lineari dipendenti da  $\mathbf{h}$ . La funzione  $f(T; \mathbf{h})$  è normalmente incognita: per poter identificare  $f(T; \mathbf{h})$  sarebbe necessario cuocere in modo errato e quindi scartare dei grossi quantitativi di prodotto, cosa non accettabile per evidenti motivi di carattere economico. Perciò il controllo del forno dovrà convergere robustamente verso la condizione  $BS = 0$  indipendentemente dalla conoscenza della funzione  $f(T; \mathbf{h})$ . Il controllore proposto mira ad emulare il comportamento dell'operatore umano. Se la variabile  $BS$  è diversa da zero, ovvero se la cottura non è ottimale, la temperatura dell'ultimo bruciatore è modificata opportunamente. Dopo ogni intervento, il controllore attende il termine del transitorio di cottura: nuovi cambi della temperatura del bruciatore sono consentiti solo dopo che è stata raggiunta (o quasi) una nuova condizione di equilibrio. Lo scopo è quello di conseguire la condizione  $BS = 0$  passando attraverso una sequenza di stati stazionari. Due possibili strategie sono proposte nel seguito per ottenere la condizione  $BS = 0$  valutando, attraverso un algoritmo ricorsivo, il corretto set-point della temperatura di bruciatore. Tale set-point ottimo è, teoricamente, la soluzione dell'equazione  $f(T; \mathbf{h}) = 0$  valutata per ogni valore di  $\mathbf{h} \in \mathcal{H}$  e, conseguentemente, dipende dal parametro  $\mathbf{h}$ . Nel seguito il valore ottimo del set-point sarà indicato come  $T^*(\mathbf{h})$ .

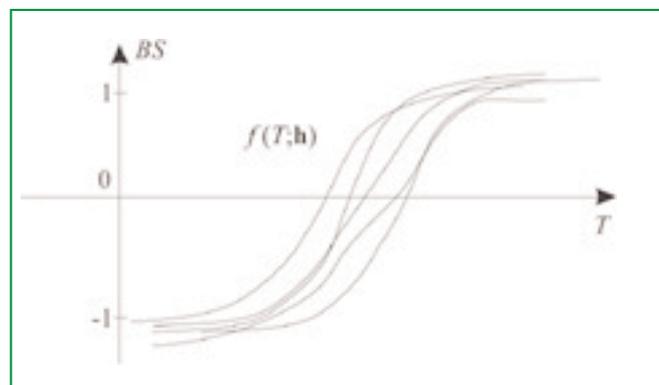


Figura 4 - Funzione statica indicante la cottura dei biscotti espressa in funzione della temperatura

#### Strategia 1 - Interpolazione con un singolo punto

Assegnata una temperatura di bruciatore iniziale  $T_i$  e il corrispondente valore di  $BS$  acquisito in condizioni stazionarie, il successivo valore di set-point  $T_{i+1}$  è valutato per mezzo della seguente equazione

$$T_{i+1} = T_i - \frac{BS_i}{\tilde{K}} \quad (2)$$

dove  $\tilde{K}$  è ottenuto dalla pendenza della funzione di cottura misurata nell'intorno dei punti dove  $BS = 0$ . Più precisamente,  $\tilde{K}$  è valutata durante il normale processo di cottura calcolando la media delle pendenze relative a diversi valori di  $\mathbf{h}$ . La convergenza dell'algoritmo verso la temperatura  $T^*$  per la quale si ha  $BS = 0$  è mostrata nella figura 5.

**Strategia 2 - Interpolazione a due punti**

Gli ultimi due valori di set-point  $T_i, T_{i-1}$  e i corrispondenti gradi di cottura ( $BS_i, BS_{i-1}$ ) sono utilizzati per il calcolo del successivo set-point del bruciatore  $T_{i+1}$  usando l'equazione

$$T_{i+1} = T_i - \frac{T_{i-1} - T_i}{BS_{i-1} - BS_i} BS_i \quad (3)$$

La convergenza verso  $T^*$  di questa seconda strategia è ancora mostrata nella figura 5.

Vi sono diverse ragioni per introdurre due differenti strategie di ricerca. La prima strategia aggancia robustamente il valore ottimo di set-point (nel seguito sarà dimostrato che una appropriata selezione di  $\bar{K}$  garantisce, con certezza, la convergenza verso  $T^*$ ) ma la velocità di convergenza può essere molto bassa. La seconda strategia abbassa i tempi di convergenza ma presenta diversi inconvenienti. Per esempio l'algoritmo può divergere, se  $T_i$  e  $T_{i-1}$  sono troppo lontane dal valore ottimo  $T^*$ .

Inoltre, l'equazione (3) non può essere usata se  $T_i = T_{i-1}$  (ciò accade, per esempio, dopo che l'algoritmo ha raggiunto  $T^*$ ) o quando un solo punto è disponibile (ciò accade alla prima

Infine, la funzione  $f(T; \mathbf{h})$  deve soddisfare l'Assunzione 1. Per questa ragione è possibile asserire che la derivata parziale di  $f(T; \mathbf{h})$  rispetto a  $T$  è limitata sull'intero intervallo compatto  $\mathcal{T}$ . Pertanto, per ogni  $\mathbf{h} \in \mathcal{H}$ , è possibile definire

$$K(\mathbf{h}) := \max_{T \in \mathcal{T}} \left\{ \frac{\partial f}{\partial T} \right\} > 0 \quad (4)$$

La stretta monotonicità di  $f(T; \mathbf{h})$  rispetto a  $T$  permette di affermare anche l'unicità della soluzione  $T^*(\mathbf{h})$ .

**Proprietà 1**

Si consideri una funzione  $f(T; \mathbf{h})$  che soddisfi l'Assunzione 1, dove  $\mathbf{h}$  è un vettore che contiene tutti i parametri (supposti costanti) che influenzano il comportamento dell'impianto. Si assuma inoltre che l'equazione  $f(T^*(\mathbf{h}); \mathbf{h})$  ammetta una singola soluzione  $T^*(\mathbf{h})$  per ogni valore di  $\mathbf{h} \in \mathcal{H}$  e si scelga

$$\bar{K} := \max_{\mathbf{h} \in \mathcal{H}} K(\mathbf{h})$$

Allora la Strategia 1 converge con certezza verso  $T^*(\mathbf{h})$  per ogni assegnato valore di  $\mathbf{h} \in \mathcal{H}$ .

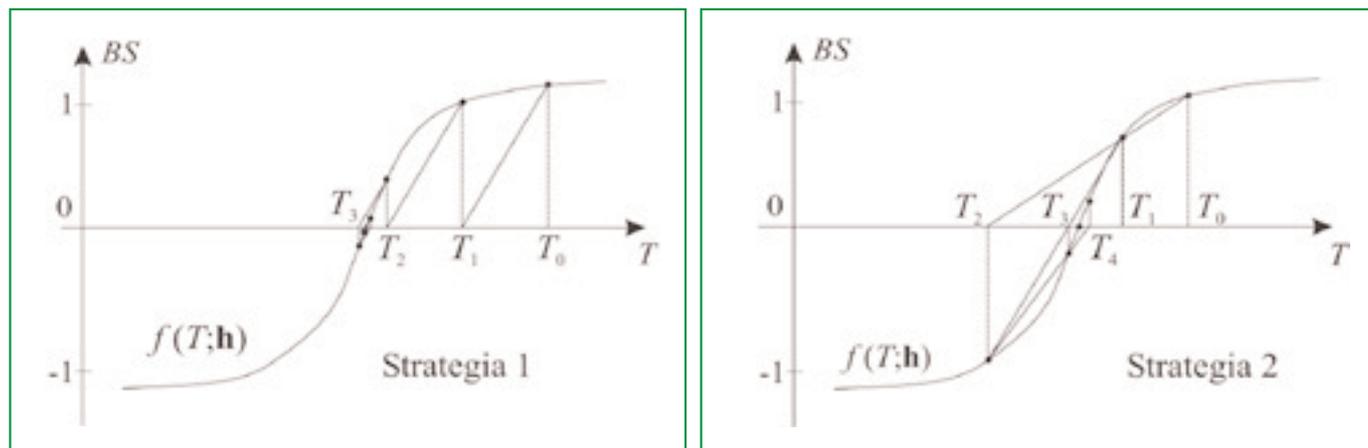


Figura 5 - La temperatura ottima di bruciatore ottenuta mediante le due strategie proposte

iterazione dell'algoritmo). Ad ogni iterazione un supervisore analizza i valori di set-point proposti dalle due strategie e decide quale sarà il successivo set-point del bruciatore.

A seconda delle condizioni operative verrà data preferenza alla Strategia 1, lenta ma robusta, oppure alla Strategia 2, veloce ma rischiosa. La robustezza della prima strategia è provata nel seguito verificando l'esistenza di un valore di  $\bar{K}(\mathbf{h})$  che garantisca con certezza la convergenza dell'algoritmo verso il valore ottimale di temperatura  $T^*(\mathbf{h})$ . Alcune ipotesi preliminari devono essere assunte. La funzione  $f(T; \mathbf{h})$  dipende da  $\mathbf{h}$ , che è un vettore di parametri lentamente variabili. Si supponrà che  $\mathbf{h}$  non cambi fino alla convergenza dell'algoritmo su  $T^*(\mathbf{h})$ .

Inoltre sarà assunto che una soluzione  $T^*(\mathbf{h})$  tale che  $f(T^*(\mathbf{h}); \mathbf{h})$  esista per ogni  $\mathbf{h} \in \mathcal{H}$ . Questa non è una condizione ovvia perché se le prime  $n - 1$  stazioni del forno non lavorano correttamente può succedere che  $f(T; \mathbf{h}) > 0$  o  $f(T; \mathbf{h}) < 0$  per tutti i  $T \in \mathcal{T}$ .

**Dimostrazione**

Come ipotizzato, si supponga che  $\mathbf{h}$  sia costante. La dimostrazione della proprietà non dipende dal valore assunto da  $\mathbf{h}$  e pertanto, nel seguito, tale termine sarà omissso.

Si scelga un valore di temperatura iniziale  $T_i < T^*$ : verrà dimostrato che la Strategia 1 converge da sinistra verso la temperatura ottima  $T^*$  a partire da  $T_i$ . Gli stessi ragionamenti consentono di affermare che una convergenza da destra viene ottenuta con certezza per ogni punto iniziale  $T_i > T^*$ . L'equazione di aggiornamento del set-point (2) può essere riscritta sostituendo a  $BS$  la  $f(T)$

$$T_{i+1} = T_i - \frac{f(T_i)}{\bar{K}} \quad (5)$$

Concordemente con l'Assunzione 1, la "funzione di cottura" è supposta monotonicamente crescente e, inoltre,  $f(T_i)$  se e solo se  $T_i = T^*$ .

Come conseguenza, per ogni  $T_i < T^*$  si ha che  $f(T_i) < 0$ . Sapendo che  $\tilde{K} > 0$ , si può concludere che per ogni  $T_i < T^*$  l'equazione di aggiornamento (5) genera un set-point di temperatura  $T_{i+1}$  tale che

$$T_{i+1} > T_i \quad (6)$$

Integrando  $\partial f / \partial T$  è possibile scrivere

$$\begin{aligned} f(T_{i+1}) &= f(T_i) + \int_{T_i}^{T_{i+1}} \frac{\partial f}{\partial T}(T) dT \\ &\leq f(T_i) + \int_{T_i}^{T_{i+1}} \tilde{K} dT \\ &= f(T_i) + \tilde{K}(T_{i+1} - T_i) \end{aligned}$$

Considerando l'equazione (5), la seguente disuguaglianza è verificata

$$f(T_{i+1}) \leq f(T_i) + \tilde{K}(T_{i+1} - T_i) = 0 \quad (7)$$

Combinando questa equazione con la (6) si può concludere che la Strategia 1 genera una successione di set-point di temperatura  $T_i$  monotonamente crescente, ma sempre alla sinistra di  $T^*$ . Un risultato ben noto di analisi matematica permette di affermare che tale successione converge con certezza verso un valore finito  $T_c$ . Pertanto la successione soddisfa la condizione di Cauchy

$$\lim_{i \rightarrow \infty} |T_{i+1} - T_i| = 0 \quad (8)$$

Considerando ancora la (5), si può scrivere

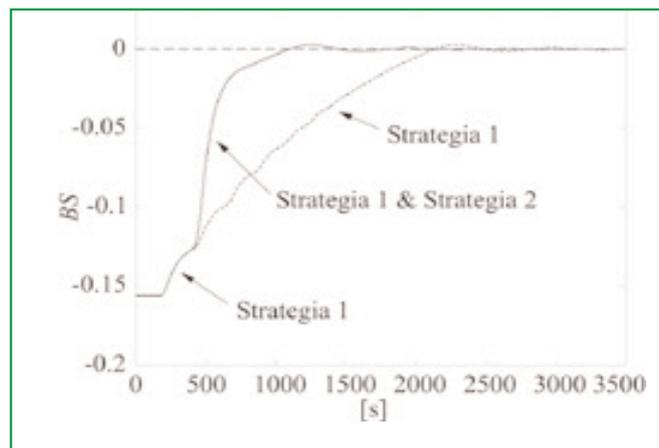
$$\lim_{i \rightarrow \infty} |T_{i+1} - T_i| = \lim_{i \rightarrow \infty} \frac{f(T_i)}{\tilde{K}} = \frac{f(T_c)}{\tilde{K}} \quad (9)$$

Comparando la (8) con la (9), si può concludere che  $f(T_c) = 0$  ed, evidentemente,  $T_c = T^*$  vista l'ipotesi di unicità della soluzione. L'algoritmo di controllo complessivo è basato su una combinazione delle due strategie di ricerca e può essere riassunto come segue

- Inizializza -  $\tilde{T}^*$  ( $\tilde{T}^*$ );  $T_{old} \leftarrow \tilde{T}^*$ ;
- Equilibrio ( $BS_{old}$ );
- Strategia 1 - ( $\tilde{T}^*$ );  $T_{new} \leftarrow \tilde{T}^*$ ;
- Equilibrio ( $BS_{new}$ );
- Ripeti;
- Aggiorna -  $\tilde{T}^*$  ( $\tilde{T}^*$ )
- $T_{old} \leftarrow T_{new}$ ;  $BS_{old} \leftarrow BS_{new}$ ;
- Equilibrio ( $BS_{new}$ );
- $T_{new} \leftarrow \tilde{T}^*$ ;
- Fino a Stop.

La procedura "Inizializza-  $\tilde{T}^*$ " valuta il set-point iniziale per la temperatura di bruciatore  $\tilde{T}^*$  sulla base del valore corrente

di  $h$ . A tal fine usa una funzione  $\tilde{T}^*(h)$  stimata durante le esecuzioni precedenti della routine. La procedura "Equilibrio" è usata ogni qual volta il set-point del forno viene cambiato e ha lo scopo di attendere il termine dei transitori di cottura. Infine, la procedura "Aggiorna-  $\tilde{T}^*$ " valuta il nuovo valore di  $\tilde{T}^*$  combinando appropriatamente le proposte di set-point delle due diverse strategie.



**Figura 6 - Confronto tra i tempi di transitorio: L'uso simultaneo di entrambe le Strategie 1 e 2 (linea continua) consente transitori più brevi di quelli che si ottengono facendo uso della sola Strategia 1 (linea tratteggiata)**

## Simulazioni

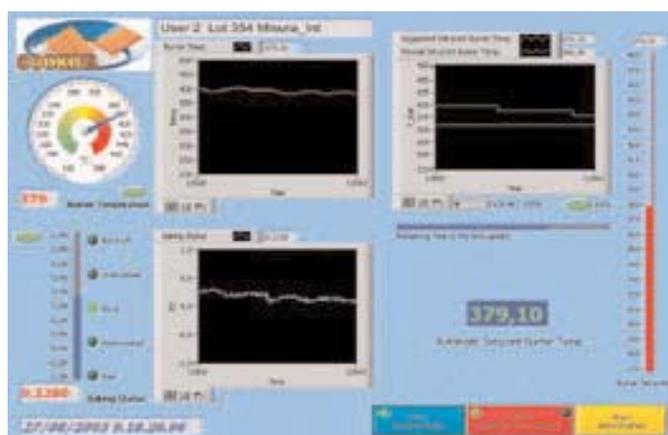
La strategia di controllo proposta è stata simulata per mezzo del programma Simulink. Il modello dinamico del forno usato per le simulazioni tiene in considerazione molti dei fattori che normalmente influenzano il processo di cottura. Per esempio, i transitori termici del forno sono accuratamente modellati così come diversi fenomeni non lineari tipici dei processi di cottura [2]. Il modello è tempo variante. La figura 6 mostra un tipico transitorio ed evidenzia i benefici derivanti dall'uso delle due

Nota 1 - Nella dimostrazione della Proprietà 1, il parametro  $h$  è stato supposto costante durante tutto il processo di valutazione di  $T^*$ . Ciò non è affatto limitativo poiché una parte dei parametri contenuti in  $h$  cambiano in modo estremamente lento (condizioni meteorologiche) mentre altri cambiano velocemente ma raramente (posizione delle valvole del forno): in entrambi i casi l'algoritmo di controllo ha a disposizione un tempo sufficiente per raggiungere la temperatura ottimale  $T^*$ .

Nota 2 - Selezionando  $\tilde{K}$  secondo le modalità previste nella Proprietà 1 e usando la Strategia 1, il valore ottimo di temperatura  $T^*$  è raggiunto con certezza ma la velocità di convergenza può risultare particolarmente bassa. Per questa ragione nell'implementazione reale  $\tilde{K}$  è ottenuto mediando i valori di

$$\frac{\partial f}{\partial T}(T^*)$$

collezionati in precedenti esecuzioni dell'algoritmo. Tale scelta è sufficientemente sicura e, in caso di comportamenti divergenti, può essere facilmente corretta incrementando il valore corrente di  $\tilde{K}$ .



**Figura 7 - Schermata del sistema di controllo e posizionamento del sistema di visione**

diverse strategie di convergenza. In una prima simulazione (linea tratteggiata) la condizione  $BS = 0$  è ottenuta usando esclusivamente la Strategia 1, mentre l'approccio combinato proposto nella sezione precedente è stato usato per la seconda simulazione (linea continua). Comparando le due risposte è possibile constatare come, all'inizio, i due transitori coincidano in quanto entrambi i controllori utilizzano la Strategia 1. Successivamente, l'algoritmo di supervisione impiega anche la Strategia 2 cosicché la condizione  $BS = 0$  è raggiunta più velocemente.

## Risultati sperimentali

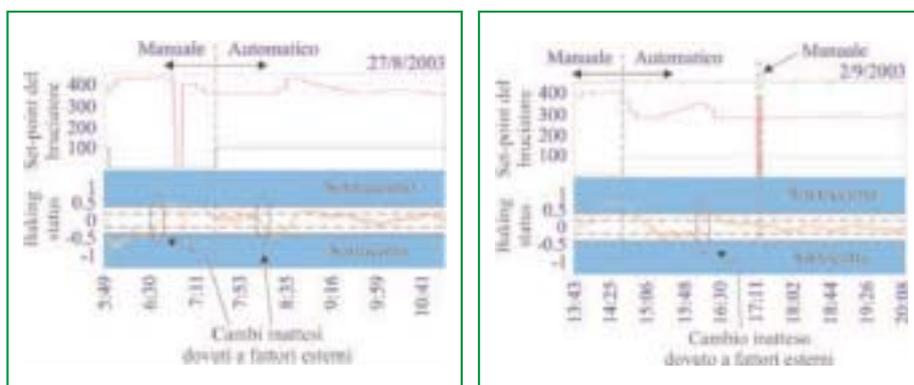
Un sistema di controllo sperimentale è stato installato presso la Colussi SpA nello stabilimento di Petrignano di Assisi. Il forno considerato è utilizzato per la cottura di biscotti della linea "Misura" ed è composto da una catena di sette stazioni indipendenti. Si tratta di un forno di vecchia generazione, scelto proprio per verificare la possibilità di utilizzare il sistema di controllo con vecchie linee produttive.

L'unico adattamento reso necessario è consistito nella sostituzione del bruciatore dell'ultima sezione del forno con uno comandabile tramite una linea seriale. Problemi legati alla dislocazione del forno all'interno dello stabilimento (si veda la figura 7) hanno impedito di posizionare il sistema di visione esattamente in corrispondenza della sua uscita. I biscotti raggiungono il sistema di visione 1'45" dopo essere usciti dal forno. Tale ritardo si è andato ad aggiungere agli altri legati al processo di cottura, allungando così i tempi di convergenza dell'algoritmo. Tuttavia, come verrà mostrato tra breve, tali tempi sono ugualmente molto interessanti e, in generale, migliori di quelli ottenuti tramite l'intervento umano. In figura 8 sono mostrati i risultati relativi a due sessioni di cottura. Sono ricavati direttamente dai file di log del sistema di controllo. I grafici mostrano il set-point di temperatura inviato al bruciatore congiuntamente al segnale che indica se il sistema sta funzionando in modo automatico o manuale, nonché

il grado di cottura dei biscotti ( $BS$ ) come viene misurato dal sistema di visione. Fino a quando  $BS$  si mantiene entro l'intervallo  $[-0,2, 0,2]$  il biscotto viene considerato perfettamente cotto (ad occhio non è possibile rilevare le differenze tra i gradi di cottura dei biscotti). Negli intervalli  $[-0,4, -0,2]$  e  $[0,2, 0,4]$  le differenze cominciano a vedersi, ma il biscotto

viene considerato ancora accettabile. Al di fuori di questi intervalli i biscotti vengono scartati. In tutte le prove svolte, le regolazioni manuali sono state effettuate esclusivamente dagli stessi oven manager che quotidianamente lavorano alla linea di produzione. Come si può rilevare dalla figura 8, l'avvio della linea viene sempre effettuato in modalità manuale. Nel grafico del 27/8/2003, dopo circa 1h30' il sistema è stato posto in modalità automatica. Vi sono stati due momenti in cui lo stato di cottura dei biscotti è cambiato repentinamente a causa di fattori esterni. Il primo si è verificato durante il funzionamento manuale.

Gli interventi di correzione sono stati piuttosto bruschi. Sono occorsi circa 40' per riuscire a tornare entro la banda di ottimalità e 20' di produzione sono stati scartati. Il secondo evento si è verificato durante la modalità automatica. Si nota chiaramente che gli interventi del sistema di controllo sono stati più gradualmente. Il  $BS$  è rimasto fuori dalla fascia di ottimalità per circa 20' e non si è reso necessario scartare biscotti. Passando al grafico del 2/9/2003, si osserva che il passaggio in modalità automatica è avvenuto dopo circa 1h in un momento in cui i biscotti venivano scartati in quanto sovraccotti. Grazie all'intervento del regolatore, il  $BS$  è stato riportato entro la fascia di accettabilità in 15' e mentre la fascia di ottimalità è stata raggiunta in 20'. Sempre dallo stesso grafico si può rilevare un improvviso cambio dello stato di cottura dei biscotti dovuto a cause imprecisate verificatosi verso le 16:09. Il sistema riporta il  $BS$  entro la fascia di cottura ottimale in 20'. Si noti che, nonostante nei due giorni considera-



**Figura 8 - Risultati sperimentali relativi al controllo del forno**

ti sia stato trattato lo stesso tipo di biscotto, le temperature ottime a regime sono risultate completamente diverse: nel primo esempio si è lavorato con temperature intorno ai 350 °C mentre nel secondo caso le temperature sono scese intorno ai 300 °C.

## Conclusioni

Nell'articolo è stata proposta una strategia di controllo per un forno continuo utilizzato per la cottura di biscotti. L'azione di controllo, basata sull'ispezione dei biscotti mediante visione artificiale, mira a fissare la temperatura di bruciatore in modo da ottenere un prodotto con elevate caratteristiche qualitative e a ridurre le perdite dovute agli scarti di produzione. Le simulazioni svolte sul modello del forno hanno permesso di valutare che il sistema di controllo è capace di stimare la temperatura ottima di bruciatore in due o tre tentativi al massimo. Tale dato è stato poi confermato dalle prove sperimentali condotte presso lo stabilimento della Colussi SpA. La rapidità di convergenza è una caratteristica essenziale al fine di poter ridurre al massimo le perdite di prodotto. Prove condotte in giorni differenti hanno mostrato che, in condizioni di funzionamento normale, il sistema è in grado di portare il *BS* entro la fascia di ottimalità in un tempo compreso tra i 15' e i 20'. Attraverso le simulazioni svolte con il programma Simulink si è visto che i tempi potrebbero venire ridotti ulteriormente a 12'-15' posizionando il sistema di visione in un punto più vicino all'uscita del forno. Le dinamiche proprie del processo di cottura fanno sì che tale tempo non possa essere abbassato ulteriormente agendo esclusivamente sulla temperatura dell'ultimo bruciatore. Il controllore si è dimostrato capace di gestire in modo robusto e autonomo le incertezze tipiche dei processi di cottura, non necessitando per la propria taratura della conoscenza del modello del forno.

## Bibliografia

- [1] Perrot, N., Bonazzi, C., Trystram, G. and Guely, F.: 1999, Estimation of the food product quality using fuzzy sets, *18th International Conference of the North American Fuzzy Information Processing Society, Nafips*, New York, NY, pp. 487-491
- [2] Trystram, G., Fahoul, D., Duquenoy, A. and Allache, M.: 1993, Dynamic modelling and simulation of the biscuit baking oven process, *Computers Chemical Engineering* 17(supp), 203-208
- [3] Yeh, J., Hamey, L., Westcott, T. and Sung, S.: 1995, Colour bake inspection system using hybrid artificial neural networks, *Proceedings of the Ieee International Conference on Neural Networks*, Vol. 1, Perth, Western Australia, pp. 37-42. ■

**Ringraziamenti** - Questo lavoro è stato finanziato da "European Take-up of essential Information Society Technologies - Integrated Machine Vision" (Eutist-Imv). Gli autori desiderano ringraziare Renzo Santi, Daniela Oliviero, Federico Ghirelli, Roberto Martini, e Otello Mazzoni della Colussi SpA nonché Guy Lemström della ditta Ate Oy per la loro preziosa collaborazione.