

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI UDINE



DOTTORATO DI RICERCA IN
TECNOLOGIE CHIMICHE ED ENERGETICHE



SEDE CONSORZIATA:
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE
XXV CICLO

Dott. Michele SIMONATO

**SISTEMI DI GESTIONE
ENERGETICAMENTE EFFICIENTE
DEI FORNI COMBINATI AD USO
PROFESSIONALE**



COMMISSIONE

Chiar.mo Prof. Gianpaolo RUOCCO	REVISORE
Chiar.mo Prof. Piercarlo ROMAGNONI	REVISORE
Chiar.mo Prof. Carlo NONINO	COMMISSARIO
Chiar.mo Prof. Andrea LAZZARETTO	COMMISSARIO
Chiar.mo Prof. Martino MARINI	COMMISSARIO
Chiar.mo Prof. Carlo POLONI	SUPERVISORE
Dr. Riccardo FURLANETTO	Co-SUPERVISORE

Chiar.mo Prof. Alfredo SOLDATI	COORDINATORE DEL DOTTORATO
--------------------------------	----------------------------

Author's e-mail: msimonato@units.it
Dipartimento di Ingegneria e Architettura
Università degli Studi di Trieste
Via Alfonso Valerio, 10
33170 Trieste, Italia
web: www.units.it

Senza energia, la nostra società non potrebbe sopravvivere o prosperare e, per tale motivo, veniamo quotidianamente a patti con il problema dell'approvvigionamento energetico e dell'impatto che esso ha sui cambiamenti climatici globali.

Migliorare l'efficienza energetica è un provato e conveniente approccio a tale problema, oltre che un modo per conseguire notevoli risparmi economici. Non desta stupore quindi che, con il perdurare di una crisi economica globale e l'affermarsi delle conseguenze dell'attività umana sul clima, l'Unione Europea (analogamente ad altri attori della scena politica mondiale) abbia avviato numerosi programmi allo scopo di garantire la massima diffusione possibile di tecnologie d'efficienza energetica in ogni settore dell'attività umana. Esempio di tale impegno è il fatto che in futuro le autorità pubbliche verranno incoraggiate a considerare l'efficienza energetica in tutti i loro acquisti, mentre per quanto concerne i privati, verranno forniti tutti gli strumenti necessari a garantire un uso consapevole dell'energia.

Questo scenario avrà ripercussioni anche nell'ambito della ristorazione, riconosciuto da molti analisti come settore a elevato consumo energetico per via delle potenze installate (su un forno possono essere presenti varie decine di kW di potenza installata). È pertanto comprensibile l'interesse dimostrato da parte di Electrolux Professional SpA per lo sviluppo di nuove soluzioni di risparmio energetico, concretizzatosi nel finanziamento di due borse di studio per altrettanti dottorati di ricerca in Tecnologie Chimiche ed Energetiche. Nella fattispecie, il presente lavoro si è focalizzato sullo sviluppo di una strategia di funzionamento, dei forni professionali per la cottura di alimenti, definita eco-cooking. Essa trae spunto dalla convinzione, ovviamente personale, che un utilizzo intelligente di qualsiasi apparecchiatura possa portare ad un risparmio energetico.

Michele Simonato
Udine, 2012

Without energy, our society couldn't survive or grow and, for that reason, we deal every day with the problem of increasing energy demand and related climate change.

Energy efficiency improvement is a good and tested method for managing this challenge and, furthermore, a way to save money. Many global organizations, like UE, are promoting the reduction of energy consumption. This could be achieved, for example, leading customers to buy only new efficient appliances, instead of cheaper inefficient ones. As a consequence, all the designers are called to find for the best available solutions for making low consumption appliances. This is the reason why Electrolux Professional Spa has financed two doctorate thesis works, with the aim of finding out new ways to improve the efficiency of its professional ovens: herein the results of this investment are here presented. More precisely, the present work relates to the development of a strategy of use, called Eco-cooking. This solution is meant for reducing the actual working consumption of the appliances, without the need of any mechanical re-design. The starting point for the entire development is a model, which describes the energy evolution of the system food+oven, during the entire cooking process. This way it has been possible finding the amount of energy really used for cooking and defining phases of the process that do not influence the cooking quality. We developed logical to manage this phases, reducing the waste of energy not functional to the cooking. We also investigated the possibility to forecast the cooking consumption, using this information to assess the working efficiency of the oven. As a result we applied in the name of Electrolux Professional Spa for 4 European Patent Applications concerning a forecasting method for the daily consumption, a control failure detecting function, an energy saving organizer for catering service and a new integrated washing system.

Michele Simonato
Udine, 2012

Indice

I	Introduzione	7
1	La ristorazione professionale	10
2	Caratteristiche e funzionamento	12
2.1	Progettazione	13
2.1.1	Caratteristiche meccaniche	13
2.1.2	Efficacia di termostatazione della cavità	14
2.1.3	Gestione dell'umidità in cavità	16
2.1.4	Tipologia di UI	19
2.1.5	Presenza di funzioni accessorie	20
2.2	Controllo elettronico	20
2.3	Processi di cotture a fasi	23
II	Modello concettuale della cottura	34
3	Base teorica del modello	35
4	Sperimentazione	40
III	Applicazioni del modello	50
5	Controllo di basso livello	52
6	Daily Energy Consumption Evaluator	56
7	Live Control Failure Detector	59
7.1	Localizzazione dei guasti	60
7.2	Individuazione del non corretto utilizzo	63
8	Minimal Cooking Energy Path Finder	65
9	Il lavaggio integrato	72
9.1	Teoria della detergenza	75
9.2	Sviluppo del detergente enzimatico	77
9.3	Sviluppo del controllo	78
9.4	La soluzione completa	82

IV	Conclusioni	84
V	Allegati	89
9.5	Misure sperimentali	90

Parte I
Introduzione

Lo sviluppo sociale ed economico in atto in Italia e in Europa porta sempre più persone a consumare i pasti fuori casa e di conseguenza, da alcuni decenni, la ristorazione è un settore produttivo in costante espansione. Come risposta alle importanti crisi che hanno scosso duramente il mondo della produzione alimentare negli anni novanta (la cosiddetta mucca pazza, la produzione di diossine e cibi transgenici), la ristorazione collettiva è stata inglobata nel cambiamento attuato in seguito alla vasta riforma di settore avviata dall'Unione Europea. Tale riforma promuove la necessità di assicurare la somministrazione di cibi sani e di buona qualità e si traduce nel sempre maggiore utilizzo di prodotti di origine controllata, certificati e, dove possibile, di prodotti biologici.

Una nuova sfida aspetta oggi la ristorazione collettiva: quella dello sviluppo ambientale sostenibile e dell'eco-efficienza. In pratica si tratta di far dialogare due comparti tradizionalmente distanti quali lo sviluppo economico ed industriale, diretto al profitto, e la tutela dell'ambiente e delle risorse naturali, talvolta molto stringente.

Al fine di creare sinergie tra tutela dell'ambiente e crescita economica il "Piano d'Azione per le Tecnologie Ambientali" dell'Unione Europea è orientato a sfruttare tutto il potenziale dell'innovazione tecnologica e dei processi per ridurre gli impatti ambientali. Come qualsiasi attività produttiva, la ristorazione collettiva è quindi chiamata ad aggiornare ed eventualmente a rivedere il processo produttivo per arrivare a un concetto di sostenibilità del pasto, "in grado di soddisfare i bisogni delle generazioni attuali senza compromettere la possibilità che le generazioni future riescano a soddisfare i propri [1].

Questa necessità è ulteriormente rafforzata quando la ristorazione collettiva è gestita da enti pubblici (ad es. ristorazione scolastica, ospedaliera, militare), fortemente incoraggiati dalla Comunità Europea ad acquistare prodotti e servizi "verdi", a minor impatto ambientale (Libro verde su "Gli appalti pubblici dell'Unione Europea - spunti di riflessione per il futuro" comunicazione adottata dalla commissione il 27 novembre 1996, "Il diritto comunitario degli appalti pubblici e le possibilità di integrare considerazioni di carattere ambientale negli appalti pubblici", comunicazione interpretativa della Commissione, 4 luglio 2002) [2].

Studi di settore evidenziano l'elevato fabbisogno energetico delle attività di ristorazione per cui, in un tipico ristorante il 35% dell'energia viene consumata per la cottura degli alimenti e il 6% per la refrigerazione delle derrate alimentari[3]. Appare quindi evidente come ogni intervento volto a incrementare l'efficienza delle apparecchiature di processo del cibo si ripercuote sensibilmente sui consumi operativi e, in ultima analisi, sui costi di gestione dell'attività.

Proprio per tale motivo, i vertici di Electrolux Professional SpA, azienda leader nell'ambito della fornitura di apparecchiature per la ristorazione, hanno deciso di varare il progetto Green Spirit, con lo scopo di sviluppare e offrire prodotti a ridotto impatto ambientale e con bassi costi di esercizio. In tal modo è sta-

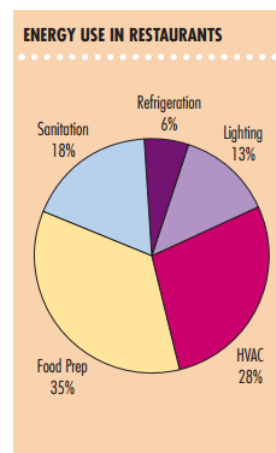


Figura 1: Tipica distribuzione dei consumi energetici in un ristorante.

to possibile dare una risposta alla sempre maggiore domanda di attrezzature energeticamente efficienti ed a basso costo d'esercizio. Fra le varie iniziative intraprese vi è il finanziamento di due dottorati di ricerca, fra cui quello condotto dallo scrivente, in Tecnologie Chimiche ed Energetiche, allo scopo di ricercare e sviluppare nuove soluzioni per la riduzione dei consumi ed il miglioramento delle performance dei forni professionali per la cottura di alimenti . Nelle prossime pagine verrà esposto il risultato di tre anni di attività di ricerca e sviluppo mirate a ridurre i consumi delle macchine attualmente in produzione, preservando le performance (qualità di cottura) e lasciando invariata l'architettura meccanica (le sole modifiche accettabili sono state quelle relative al *firmware*). La prima parte della Tesi è dedicata a illustrare il modo in cui sono realizzati e utilizzati i forni in ambito professionale, mentre nella seconda parte viene presentato un modello dell'evoluzione energetica del sistema forno+cibo durante un generico processo di cottura e la sua applicazione come soluzioni eco-cooking. Nella terza parte vengono presentate varie applicazioni del modello che nel loro insieme prendono il nome di "strategia Eco-cooking". La quarta parte infine è dedicata all'analisi dei risultati conseguiti.

Capitolo 1

La ristorazione professionale

Un servizio di ristorazione è un luogo dove il cibo è preparato per la vendita, servito ai clienti o spedito altrove. Questo è per esempio il caso di una mensa in cui il principale scopo è trasformare gli alimenti crudi in cibo cotto e quindi servirlo ai consumatori. Questa operazione può essere compiuta in differenti modi e secondo differenti organizzazioni come quelle dei ristoranti tradizionali, delle grandi mense centralizzate o dei punti vendita di alimenti take-away. Al momento non esiste una definizione univoca per i servizi di ristorazione ma certamente ciò che accomuna tutte queste tipologie è la presenza di una cucina, ossia un ambiente attrezzato per la manipolazione degli alimenti. Diversi sono i fatti che rendono una cucina professionale un ambiente più complesso rispetto alla controparte residenziale.

Anzitutto, all'interno delle cucine il cibo non solo viene conservato e preparato nella sua forma finale ma anche preparato in forma intermedia e quindi conservato per la sua finitura a ridosso del servizio, secondo un diagramma di flusso molto articolato. Tale flessibilità è permessa dall'uso combinato di varie attrezzature per la cottura e la conservazione del cibo. Il risultato è che viene svincolato il tempo di preparazione del piatto dal tempo di servizio e si capirà in seguito come tale aspetto sia di cruciale importanza per un uso efficiente e funzionale del forno.

Secondariamente, i forni professionali per la cottura di alimenti sono utilizzati in modo molto flessibile e con un'ampia variabilità delle modalità di funzionamento, potendo condurre la maggior parte delle tipologie di cotture (grigliatura, gratinatura, lievitazione, ecc.) oltre che operazioni secondarie quale la rigenerazione¹

Le attrezzature progettate e realizzate da Electrolux Professional SpA sono pensate per essere utilizzate nell'ambito della ristorazione professionale, dove i volumi di pasti gestiti sono dell'ordine delle decine o centinaia al giorno. Per poter far fronte ad un tale volume di produzione, non solo le attrezzature devono essere adatte allo scopo ma anche il modo in cui esse vengono utilizzate deve essere corretto. Questo vale sia nel caso in cui il risultato desiderato sia la capacità di

¹La rigenerazione è il processo di riscaldamento di un piatto già pronto per il consumo e conservato in ambienti climatizzati a temperatura inferiore a quella ambientale.

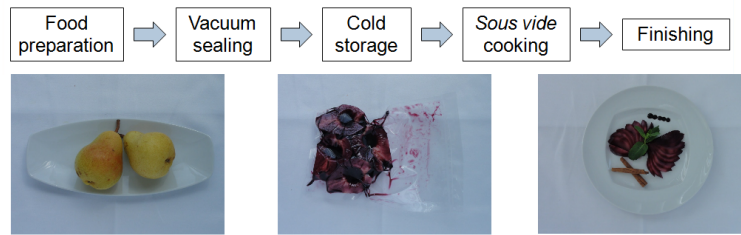


Figura 1.1: Esempio di flow chart utilizzata per la cottura sotto vuoto in un forno professionale per la cottura di alimenti . In questo caso sono visibili delle pere ad inizio preparazione, una volta poste sottovuoto con il vino e conservate in frigo e pronte per il servizio dopo la cottura sotto vuoto, in ambiente a $100^{\circ}C$ al 100% di umidità.

servire pasti qualitativamente accettabili, sia nel caso in cui a tale obiettivo si aggiunga la necessità di ridurre i consumi d'esercizio².

²Cui corrisponde ovviamente una riduzione dei relativi costi

Capitolo 2

Caratteristiche e funzionamento dei forni professionali per la cottura di alimenti .

In questa parte della Tesi vengono presentati i forni professionali per la cottura di alimenti realizzati da Electrolux Professional SpA dal punto di vista della progettazione meccanica, del controllo e dell'utilizzo. Prima di addentrarci nei dettagli tecnici è opportuno fare una rapida panoramica sui principali criteri di classificazione di tali apparecchiature.

Anzitutto i forni si possono suddividere in funzione del tipo di alimentazione, ossia in forni elettrici, a metano e a GPL. Inoltre vi sono due possibili configurazioni in cui disporre le teglie¹ all'interno della cavità, quella cross-wise e quella length-wise; la prima prevede che la teglia sia introdotta all'interno del forno impugnandola sul lato lungo mentre la seconda prevede che la teglia sia impugnata sul lato corto.

E' quindi possibile fare una distinzione anche in considerazione del numero di teglie che è possibile inserire nella cavità (6, 10, 20) e della loro forma (1 o 2 a seconda della lunghezza del lato corto). Secondo tale codifica quindi un forno EL 10 1/1 è un forno elettrico con capacità di carico pari a 10 teglie con lato corto standard mentre un forno GAS 20 2/1 è un forno a gas, con capacità di carico di 20 teglie col lato corto doppio. Per l'attività sperimentale è stato scelto un forno elettrico 10 1/1 livello touch² poichè essa è considerata la macchina standard; tutti i risultati ottenuti vanno ad essa riferiti ma possono essere facilmente estesi alle macchine dell'intera gamma.

¹Le teglie utilizzate in ambito professionale sono realizzate secondo lo standard Gastro-norm, il quale prevede una data forma piana, caratterizzata dalla misura del lato lungo e corto, con differenti profondità. Oltre a ciò sono previste anche teglie in cui la dimensione del lato corto sia raddoppiata.

²Ossia dotato di pannello di interfaccia costituita da un touch screen

2.1 Progettazione

Un forno professionale per la cottura di alimenti è un'apparecchiatura piuttosto complessa il cui funzionamento può essere considerato basato sui seguenti fattori: caratteristiche meccaniche, efficacia della termostatazione e gestione dell'umidità in cavità, tipologia dell'UI e presenza di funzioni accessorie.

2.1.1 Caratteristiche meccaniche

I forni professionali per la cottura di alimenti devono essere in grado di far fronte a condizioni di lavoro estremamente dure; l'approccio talvolta sbrigativo dei cuochi, le quantità di cibo caricato e l'elevato numero di ore di lavoro rendono necessaria una progettazione robusta.

All'interno di una cucina professionale ogni azione è orientata al conseguimento della maggiore produttività possibile, e molto spesso per tale motivo le apparecchiature sono utilizzate in modo estremamente intenso. Sempre per tale motivo il numero di arresti tecnici dovuti a guasti delle apparecchiature deve essere mantenuto il più limitato possibile; nel mondo del business to business ad ogni arresto è inevitabilmente correlato un danno economico che, nel caso di un forno professionale per la cottura di alimenti, può essere dovuto non solo al calo di produttività ma anche alla perdita di cibo. Ad esempio, un arresto notturno del forno che avvenga durante la cottura a bassa temperatura di qualche decina di chilogrammi di carne, può portare alla perdita immediata di alcune centinaia di euro. Quest'ultimo esempio dovrebbe essere sufficiente ad evidenziare quanto una progettazione "robusta" sia fondamentale nell'ambito delle apparecchiature per la ristorazione: un forno professionale per la cottura di alimenti non deve solo cucinare bene ma deve anche essere in grado di funzionare in condizioni estreme, per lunghi periodi di tempo, senza richiedere alcun intervento tecnico. Molteplici sono le criticità che possono presentarsi all'interno di una cucina professionale durante la quotidiana operatività. La prima criticità si manifesta ancor prima che il forno venga utilizzato e si tratta del trasporto, che molto spesso avviene su lunghe o lunghissime distanze (Stati Uniti, Asia, ecc.). Le operazioni di carico e scarico dai container o dai cassoni dei camion sono fasi ad alto rischio di danneggiamento, considerata la massa di un tipico forno professionale, che è notevolmente superiore rispetto alla controparte residenziale, e considerato che gli operatori non sempre prestano le corrette attenzioni. Anche l'installazione può presentare delle insidie riconducibili soprattutto al tipo di acqua a disposizione: può capitare che acque estremamente dure e ricche di cloruri vengano utilizzate senz'alcun pretrattamento, col risultato di mettere in crisi i componenti del forno. Una volta installato, il forno deve resistere all'uso dei cuochi che molto spesso hanno un approccio "sbrigativo": le porte vengono sbattute e le maniglie vengono operate usando le teglie stesse. Inoltre le cavità ancora calde, in seguito all'ultima cottura (anche abbondantemente al di sopra dei 250°C), vengono raffreddate bruscamente spruzzando acqua fredda di rete, causando notevoli stress termici alla struttura. Durante le ore di lavoro poi, all'interno di una cucina si raggiungono temperature e tassi di umidità notevolmente elevati³ che possono facilmente mettere in crisi le schede elettroniche montate a bordo delle apparecchiature. Non ultimo, anche il semplice fatto

³Temperatura ambiente pari a 40°C ed umidità relativa al 90%.

che le quantità di cibo caricato in cavità per la cottura sia considerevolmente maggiore a quanto avviene in ambito domestico⁴, comporta elevati stress per la struttura del forno. Infine, l'orientamento alla produttività emerge anche analizzando come vengono organizzate le pulizie delle cucine a fine giornata lavorativa: in alcune Nazioni non è raro che vengano utilizzate delle idropultrici per lavare pavimenti, pareti ed anche apparecchiature, con l'ovvio risultato di introdurre l'ennesima criticità da considerare durante la progettazione.

La maggior parte delle problematiche sinora evidenziate trova soluzione nella progettazione di un forno particolarmente "solido", quindi, per esempio, con una cavità in appoggio su dei profili lamierati di supporto (e non sospesa alla facciata come avviene in ambito residenziale), con delle cerniere robuste per supportare la porta (che presenta un peso considerevole), con delle guarnizioni di tenuta a garantire il necessario grado di impermeabilizzazione del forno. Oltre a questi esempi di accorgimenti che riguardano la struttura del forno, particolare attenzione viene riservata anche al raffreddamento dei componenti elettronici. Come noto l'utilizzo ad elevate temperature comporta un calo della vita utile di tutti i componenti basati sui semiconduttori se non addirittura un arresto quando le temperature superano gli 80°C ⁵. Considerate le condizioni critiche in cui i forni possono trovarsi a operare, assumono una fondamentale importanza il numero, il posizionamento e la potenza delle ventole di raffreddamento.

Infine, la progettazione di un forno professionale per la cottura di alimenti non può prescindere dagli aspetti di serviceability, ossia dal fatto che durante la vita operativa vi saranno sicuramente dei guasti e degli interventi tecnici. Il forno deve essere pensato in modo tale da garantire ai tecnici un accesso semplice ai componenti più probabilmente soggetti a sostituzione e, per tale motivo, la disposizione degli stessi all'interno dei vani tecnici non può seguire i soli criteri funzionali⁶.

2.1.2 Efficacia di termostatazione della cavità

Essendo questa la principale caratteristica funzionale di ogni forno, ha importanza cruciale per la bontà delle performance e si può caratterizzare monitorando l'uniformità di distribuzione delle temperature oltre che la variazione delle stesse attorno ai valori di set.

La prima funzione di ogni forno, a prescindere dal fatto che si tratti di un forno domestico o professionale, è termostatare un volume definito cavità. Tale termostatazione deve soddisfare essenzialmente due requisiti; l'uniformità spaziale delle temperature e la precisione delle stesse in confronto al valore di set. I forni professionali per la cottura di alimenti presentano solitamente una singola sorgente di calore in cavità, abbinata a una ventola, per ottenere la convezione forzata, controllata in funzione del segnale di uno o più sensori posizionati all'interno della cavità.

Si consideri inanzitutto la funzione di controllo della sorgente di calore che, come in molte analoghe applicazioni tecniche, utilizza un controllo PID: la caratteristica cruciale per l'ottenimento di una buona precisione della temperatura è

⁴Un carico tipico può superare le varie decine di chili.

⁵Tale è la temperatura alla quale vengono sezionate le schede elettroniche di controllo del forno per evitare danni irreparabili.

⁶I componenti elettronici per esempio non possono essere posizionati considerando come unico requisito l'individuazione di una zona facilmente raffreddabile.

il posizionamento della sonda all'interno della cavità e la gestione del segnale da essa generato. Nei forni oggetto dello studio tale sonda è posizionata lateralmente rispetto alla ventola e il pacco resistenze e lo scambio radiativo con quest'ultime è evitato mediante uno schermo protettivo metallico. Grazie a tale accorgimento è inoltre possibile evitare uno scambio di calore eccessivo, e fuorviante, con l'aria appena riscaldata dalle resistenze. Oltre a questo accorgimento meccanico viene anche effettuato un intervento di controllo utilizzando un off set⁷ che permette la stima della temperatura al centro della cavità, in funzione di quella misurata a lato della ventola. Mediante questi accorgimenti il forno è in grado di controllare la temperatura al centro cella in modalità convezione, con oscillazioni di $7^{\circ}C$ attorno al valore di set⁸.

In modalità STEAM il controllo è più preciso e uniforme poichè il vapore è un mezzo caratterizzato da una notevole costanza di temperatura e da una buona distribuzione spaziale⁹. Logicamente l'ampiezza dell'oscillazione è anche funzione del range di temperatura cui lavora il forno ed i valori riportati si riferiscono a temperature standard di utilizzo¹⁰.

Per quanto concerne il requisito di uniformità; in ambito residenziale tale risultato viene raggiunto posizionando all'interno della cavità varie sorgenti di calore¹¹ e, nei modelli di punta, attivando una limitata circolazione forzata di aria mediante una ventolina posta sulla parete frontale, di fronte alla porta. In ambito professionale, utilizzando una singola sorgente di calore, è necessario ottenere la desiderata uniformità di temperatura agendo sulla circolazione forzata dell'aria all'interno della cavità. Le azioni progettuali che vengono intraprese sono essenzialmente di due tipi, quelle volte a rendere massimo il flusso d'aria ricircolato e quelle volte a direzionare tale flusso.

In merito alla prima è necessario agire sul design della ventola ed a tal proposito sono stati condotti in passato numerosi studi di ottimizzazione delle geometrie. In merito al direzionare il flusso, giocano un ruolo cruciale lo scudo che separa il "vano ventola" dal "vano cottura" ed i supporti delle teglie. Un deflettore o scudo esplicita una doppia azione di direzionamento dei flussi; realizza un'efficace coinvolgimento dell'aria alla bocca di aspirazione della ventola mediante un foro sagomato centrale, e guida i flussi radiali in uscita dalla ventola mediante l'opportuna conformazione geometrica del suo perimetro. I supporti teglia possono rappresentare un semplice disturbo alla circolazione uniforme, nel qual caso si cerca di minimizzarne l'ingombro ricorrendo per esempio a strutture a "filo", oppure possono dare un valido contributo al direzionamento dei flussi. In figura 2.3 è visibile come, prevedendo delle opportune aperture sui supporti teglia, è possibile guidare efficacemente il flusso d'aria all'interno della cavità, ottenendo quindi un netto miglioramento della uniformità di distribuzione dei flussi, quindi delle temperature e, in ultima analisi, della cottura.

⁷Tale off set è un parametro di default che varia in funzione del modello di forno.

⁸Ovviamente tale valore è funzione del range di funzionamento del forno.

⁹La temperatura a centro cella presenta oscillazioni di $3^{\circ}C$ attorno al valore di set.

¹⁰Comprese fra i $100^{\circ}C$ ed i $280^{\circ}C$.

¹¹Praticamente ogni forno ha sempre almeno una resistenza inferiore ed una superiore mentre nei modelli ventilati vi è anche un elemento frontale concentrico alla ventola di ricircolazione.

2.1.3 Gestione dell'umidità in cavità

La capacità di un forno di gestire l'umidità all'interno di una cavità, generandola quando in difetto o smaltendola quando in eccesso, incide fortemente sulla qualità di cottura.

Differentemente da quanto avviene nell'ambito domestico in cui viene controllata la sola temperatura¹², in ambito professionale durante la cottura viene gestita anche l'umidità o, più correttamente, viene controllata la presenza di vapore¹³. Le possibilità che si hanno controllando l'umidità in termini di libertà di cottura, sono così importanti da aver spinto i vertici di Electrolux Professional SpA a creare una struttura di ricerca dedicata (Cooking Science and Steam Development Competence Center) nel cui contesto hanno trovato collocazione molte delle attività svolte durante il dottorato.

Il vapore, ed il controllo di umidità, assume una notevole importanza nell'ambito della cottura per via dei seguenti aspetti:

Uniformità: Il vapore, sottostando alla teoria cinetica dei gas, tende a distribuirsi uniformemente sino ad occupare l'intera cavità. Inoltre, essendo generato grazie ad una transizione di fase isoterma, presenta una temperatura estremamente controllabile col risultato che, quando viene utilizzato come mezzo di termostatazione, anche la temperatura di cavità presenta un'ottimo controllo, con minime oscillazioni attorno al valore di set¹⁴.

Trasferimento d'energia: Uno dei motivi principali per l'utilizzo del vapore è che esso garantisce il maggior trasferimento di energia possibile durante la cottura. Tale risultato è dovuto al fatto che il vapore non trasporta solo una quota di calore sensibile (come l'aria circolante in modalità convezione forzata) ma anche una quota di calore latente di evaporazione. Quest'ultima componente, oltre a essere notevolmente superiore a quella sensibile, viene ceduta al carico mediante la condensazione. E' tale fenomeno che permette un trasferimento di energia notevolmente superiore rispetto a quello ottenibile mediante semplice convezione forzata¹⁵.

Qualità di cottura: Il controllo fino dell'umidità in cavità è fondamentale per la buona riuscita di ogni cottura; la texture dell'alimento, la sua colorazione ed il suo gusto sono fortemente influenzate dall'umidità durante la cottura. Per esempio, la reazione di Maillard decorre con risultati ottimali se condotta a valori di umidità intermedia¹⁶.

Per quanto concerne gli aspetti energetici della cottura, la cottura a vapore ha un ruolo primario poiché comporta notevoli consumi, come evidenziato da studi condotti presso il laboratorio di cottura dei Electrolux Professional [4] e conseguentemente, una sua gestione efficiente rappresenta un obiettivo primario nella

¹²Sul mercato stanno comparando i primi forni in grado di effettuare cotture a vapore ma senza anelli chiusi di controllo.

¹³Come si vedrà in seguito, a seconda della modalità e del regime di funzionamento del forno (COMBI o STEAM con umidità di set variabile fra 0 % e 100%), tale vapore può essere del tipo saturo umido, secco o surriscaldato)

¹⁴Un forno domestico a convezione ventilato può presentare oscillazioni fino a $\pm 20^{\circ}C$ attorno al valore di set.

¹⁵In tale modalità, l'unico modo per incrementare il trasferimento energetico è dato dall'aumento del flusso d'aria che lambisce il cibo.

¹⁶Tale reazione è responsabile della formazione dei composti bruni che danno le caratteristiche organolettiche del pane brunito o della carne grigliata.

definizione di qualunque strategia di Ecocooking.

L'effettivo controllo del vapore è ottenibile solo quando è possibile introdurre o estrarre vapore dalla cavità, sulla base di una misurazione dell'umidità, effettuata nella cavità stessa. Tale risultato può essere operativamente ottenuto in diversi modi. Anzitutto la generazione di vapore può essere condotta utilizzando due soluzioni, quella IN-CAVITY e quella OUT-CAVITY.

In figura 2.4 è rappresentato uno schema del sistema IN-CAVITY dove il vapore è generato direttamente in cavità. Un ugello (o un analogo sistema) viene utilizzato per spruzzare un getto di acqua fredda di rete direttamente all'imbocco della ventola. L'acqua viene quindi meccanicamente atomizzata ed in tale forma lambisce le resistenze poste concentricamente alla ventola. Così facendo essa evapora ottenendo quindi la desiderata generazione di vapore. Si noti l'elemento scatolato presente allo scarico, contraddistinto dalla presenza di un ugello spruzzante acqua. Esso è l'air-break, un elemento deputato al controllo e all'abbattimento del vapore in uscita dal forno. Tale effetto è ottenuto nebulizzando acqua di rete nel flusso di vapore in uscita, ottenendone la condensazione. L'attivazione di tale ugello è pilotata in funzione della temperatura dei fumi di scarico; al di sopra di una determinata soglia¹⁷ viene comandata l'attivazione e mantenuta sino a quando la temperatura dei fumi non torna al di sotto di tale soglia.

Questo tipo di sistema è particolarmente economico ma non permette una completa saturazione della cavità e soffre di un calo di prestazioni nel caso di cotture con vapore surriscaldato (temperature superiori ai 100°C).

Più performante è il sistema OUT-CAVITY in cui il vapore viene generato in un volume esterno alla cavità (boiler) e da qui immesso nella stessa (si veda figura 2.5). Costruttivamente, un boiler è uno scatolato coibentato, contenente degli elementi riscaldanti, un ingresso per l'acqua di rete (ingresso di refill), uno scarico che permette l'evacuazione del liquido contenuto ed un foro d'uscita in diretto contatto con la cavità. Quest'ultima è schermata da dei setti al fine di evitare l'ingresso accidentale di gocce d'acqua in cavità¹⁸.

In figura 2.6 è visibile un boiler ad alimentazione elettrica: sono chiaramente visibili i rami delle resistenze che durante l'utilizzo sono immerse in acqua. Sono inoltre visibili, installate sul piano inclinato sopra di esse le due sonde di livello¹⁹ che vengono utilizzate per pilotare il refill del boiler. In figura 2.7 è invece visibile un boiler gas (metano o GPL) in cui l'elemento riscaldante è costituito dal condotto di scarico dei fumi di combustione. Trovandosi immerso nell'acqua, ne causa la rapida evaporazione e tale effetto è accentuato sfruttando una superficie di scambio corrugata. Il controllo di livello, come pure lo scarico e la comunicazione con la cavità, avvengono essenzialmente secondo la stessa logica per entrambi i tipi di boiler.

La generazione del vapore è pilotata dal controllo del forno e avviene secondo una logica on-off in cui è possibile decidere se gestire l'intera o la metà della potenza disponibile. Sulle modalità secondo cui tali attivazioni sono gestite si tornerà in seguito.

¹⁷Impostata in fabbrica e differente da modello a modello.

¹⁸Date le notevoli potenze in gioco, il fenomeno di ebollizione è significativamente violento, con notevole proiezione di acqua ancora in fase liquida.

¹⁹Quella di lavoro che interviene durante il funzionamento ordinario e quella di sicurezza che interviene nelle situazioni anomali.

Così come è previsto un modo per generare vapore, la quasi totalità dei forni professionali per la cottura di alimenti prevede anche modalità per l'evacuazione del vapore. A tale scopo, nei forni prodotti da Electrolux Professional Spa è presente una valvola di aspirazione, posizionata a controllare l'apertura di un condotto che pone in comunicazione l'esterno del forno con la cavità, in prossimità di una zona di depressione generata dalla ventola. Si ipotizzi che il boiler sia in funzione e che in cavità si raggiunga un tasso di umidità superiore a quello di set, in tal caso il sistema di controllo interverrà aprendo la valvola di aspirazione e arrestando il boiler. Il forno, essendo un sistema aperto, aspirerà aria fresca dall'esterno a causa della depressione presso la bocca di aspirazione della ventola, mentre parte del vapore verrà evacuata dallo scarico presente sul fondo cella (da lì andrà all'airbreak e quindi all'esterno del forno). Si realizza quindi una diluizione dell'aria all'interno della cavità con aria fresca cui è correlato un calo dell'umidità; tale diluizione perdura sino a quando il valore di umidità rientra nel range di set e il sistema chiude quindi la valvola di aspirazione.

Visto come il forno può generare ed evacuare umidità, è il momento di analizzare come il sistema di controllo effettua misure di umidità all'interno della cavità e come di conseguenza può pilotare le attivazioni del boiler. Prima di proseguire con la trattazione è doveroso fare un accenno al fatto che non tutti i forni prodotti da Electrolux Professional sono dotati di controllo ad anello chiuso dell'umidità in cavità²⁰. Nei forni più economici, l'umidificazione avviene attivando il sistema di generazione vapore (di tipo esclusivamente IN-CAVITY) secondo un certo numero di cicli di lavoro. L'utente non ha quindi modo di selezionare realmente un livello di umidità in cavità, ma solamente un livello di generazione di vapore. Ovviamente i risultati di cottura ottenibili con questo tipo di apparecchiature non sono confrontabili con quelli tipici dei sistemi dotati di controllo ad anello chiuso, ma tale differenza è giustificata dal minor prezzo.

Il sistema di controllo più semplice attualmente impiegato è del tipo by-pass ed in figura 2.8 ne è riportato uno schema funzionale. Un condotto pone in contatto la cavità con l'air-break, affacciandosi sulla zona posteriore della ventola di convezione. In tale regione si ha una sovrappressione che impedisce in condizioni normali l'ingresso di aria nel condotto. Come già illustrato, il vapore tende a uscire dalla cavità, in virtù della leggera sovrappressione che esso esercita, uscendo dallo scarico presente sul fondo cella. All'aumentare del contenuto di vapore in cavità, tale fenomeno inizia ad interessare il condotto di by-pass poiché il vapore esercita una pressione sufficiente a vincere la sovrappressione esercitata dalla ventola. Al raggiungimento della condizione di saturazione in cavità, il condotto di by-pass risulta invaso dal vapore cosicché una termocoppia opportunamente posizionata può rilevare la temperatura di $100^{\circ}C$. Quest'informazione può essere utilizzata quindi per interrompere la generazione di vapore poiché le condizioni di cottura in cavità sono state raggiunte ed ogni altra immissione risulta superflua.

Il sistema di by-pass, benchè presenti un costo contenuto (l'unico elemento degno di nota è la termocoppia posizionata nel condotto), non permette una lettura dell'umidità ed è utilizzabile solo per limitare il consumo di acqua durante il

²⁰In molti mercati emergenti i forni a convezione senza controllo di umidità sono ancora percepiti dagli acquirenti come il miglior compromesso fra costo e performance.

funzionamento con la cavità a $100^{\circ}C$ e il 100% di umidità. Per questo motivo viene attualmente utilizzato sui forni più economici.

Il miglior sistema attualmente disponibile per la misura di umidità montato sui forni realizzati da Electrolux Professional SpA è quello basato su una sonda lambda²¹ ed è schematizzato in figura 2.9. Il modulo funzionale della sonda lambda è un sensore ceramico in grado di condurre ossigeno mediante diffusione attraverso le vacanze del reticolo cristallino. Quando questo elemento viene posto all'interfaccia fra due regioni a differente concentrazione di ossigeno, si viene a formare una pila a concentrazione e quindi il segnale generato è una tensione. Tale segnale viene poi opportunamente amplificato mediante un circuito elettronico.

L'aria umida è equiparabile a una miscela di vapore acqueo e aria secca in proporzione variabile. Il rapporto stechiometrico dell'aria secca che prevede la presenza del 21% di ossigeno gassoso permane a prescindere dalla percentuale di vapore presente in miscela quindi un eventuale calo di ossigeno va imputato al calo di aria secca in miscela ed all'incremento del vapore. Per tale motivo una lettura effettuata con la sonda lambda può essere indirettamente correlata alla presenza di vapore nella cavità.

Notevole attenzione richiede l'assegnazione di significato alla lettura effettuata, variando quest'ultimo a seconda che si effettui la misura al di sotto o al di sopra dei $100^{\circ}C$.

Nel caso in cui ci si trovi al di sotto dei $100^{\circ}C$, il segnale misurato darà indicazione dell'umidità relativa presente in cavità. Si consideri il diagramma di Carrier riportato in figura 2.10: come visibile, la massima quantità di vapore acqueo presente in cavità è limitata dal valore di saturazione oltre il quale si ha condensazione. Il valore letto dalla sonda lambda va quindi interpretato come la percentuale di umidità rispetto alla massima ammissibile per quella data temperatura di set in cavità. Per questo motivo, non è possibile al di sotto dei $100^{\circ}C$ avere una cavità completamente occupata da vapore²².

Al di sopra dei $100^{\circ}C$ è possibile invece occupare il 100% del volume della cavità con vapore e quindi il segnale letto dalla sonda lambda va interpretato come percentuale volumetrica di cavità occupata da vapore. Il sistema di controllo effettua quindi due differenti interpolazioni dei valori di tensione letti con la sonda lambda per fornire un valore percentuale di umidità, relativa al di sotto dei $100^{\circ}C$ e volumetrica al di sopra.

va comunque detto che l'utilizzatore finale del forno non ha percezione di tale differenza e riconosce un significato univoco al valore percentuale di umidità che viene visualizzato a schermo.

2.1.4 Tipologia di UI

Fra le varie caratteristiche che concorrono a determinare il successo di un forno vi è indubbiamente la semplicità d'uso, ossia la facilità con cui l'utente può accedere alla molteplicità di funzionalità del forno. La UI²³ rappresenta l'interfaccia fra il forno e l'utente e tramite essa vengono visualizzate informazioni relative al funzionamento del forno (Temperatura di set, umidità, ecc.) e messaggi di

²¹L'utilizzo di tale sistema è attualmente coperto da brevetto internazionale.

²²Ovviamente questo vale poiché la cavità, durante il funzionamento, si trova sempre a pressione prossima a quella ambiente

²³User Interface.

errore, o vengono impartiti comandi al forno. Le possibili UI sono quella analogica e quella basata su touch screen e la scelta cade sull'una o sull'altra, in funzione dello scenario in cui verrà utilizzato il forno.

Una UI di tipo analogico, in cui manopole e pulsanti fisici vengono utilizzati per gestire il forno, mentre i dati vengono visualizzati mediante schermi led a sette segmenti, presenta numerose caratteristiche che la rendono adatta ad un uso in contesti rurali o in via di sviluppo. Anzitutto una simile interfaccia è indubbiamente di immediata comprensione nell'ordinaria operatività; temperature e tempi sono variabili ruotando delle manopole sino al raggiungimento del desiderato valore, visualizzata su un piccolo schermo a sette segmenti. Questo tipo di interazione è estremamente intuitiva ed alla portata anche di operatori scarsamente scolarizzati. Oltre a ciò, una UI analogica si presenta estremamente resistente nei confronti di un utilizzo "spartano". Non ultimo il costo di una simile soluzione è indubbiamente contenuto a causa del basso contenuto tecnologico/elettronico. Un aspetto negativo è invece rappresentato dal limitato numero di input utilizzabili che costringe a utilizzare complesse combinazioni di tasti differenti per accedere alle funzioni più complesse. Tale limitazione riguarda anche gli output che devono essere visualizzati sotto forma di complessi codici alfanumerici.

Diversamente, una UI basata su un touch screen permette lo sviluppo di un'infinita combinazione di input e output e per tale motivo rappresenta la migliore soluzione attualmente disponibile. Questa maggiore libertà rende possibile lo sviluppo di funzioni molto avanzate quale per esempio il menù automatico presente sui forni livello touch, realizzati da Electrolux Professional SpA.

2.1.5 Presenza di funzioni accessorie

L'utilizzabilità di un forno può essere incrementata prevedendo delle funzioni accessorie quale per esempio la possibilità di effettuare un lavaggio automatico della cavità (su questo aspetto si tornerà approfonditamente nella parte dedicata alle applicazioni del modello energetico di cottura). Tali funzioni non sono direttamente correlate alla cottura in sé, ma permettono nella maggior parte dei casi una gestione semplificata del forno. Un esempio è il modulo di abbattimento fumi che può essere montato allo scarico del forno²⁴. Utilizzando un ugello per spruzzare acqua all'interno del flusso di fumi caldi, basandosi sul superamento di una temperatura di soglia, è possibile ridurre la quantità di vapore che il forno scarica in cucina, con il risultato di ridurre il carico di lavoro per gli impianti di aspirazione. Un'ulteriore esempio è la possibilità di installare una doccetta manuale; in tal modo è possibile risciacquare brevemente la cavità fra una cottura e l'altra e raffreddare la stessa più rapidamente di quanto non sarebbe possibile mediante la semplice apertura della valvola d'aspirazione. Tutte queste funzioni aumentano il valore della macchina e sono pertanto presenti sui forni top di gamma.

2.2 Controllo elettronico

Dal punto di vista hardware, il controllo dei forni professionali per la cottura di alimenti progettati da Electrolux Professional si basa su due schede elettroniche,

²⁴Già presentato con il nome di Air-break.

la power e la user. Durante l'utilizzo del forno, la user raccoglie le informazioni sul tipo di processo da condurre (tipologia di cottura, durata, ecc.) e le passa alla power che si occupa di leggere i segnali dei sensori, gestire le potenze e, più in generale, realizzare all'interno della cavità le condizioni termodinamiche necessarie alla cottura.

Dal punto di vista del controllo il forno è una macchina a stati in cui sono previste tre differenti logiche di controllo dei carichi; il funzionamento convettivo CONV, quello combinato COMBI e quello a vapore STEAM:

CONV: In questa modalità è prevista la sola termostatazione della cavità controllando il relativo gruppo resistenze. L'umidità è controllabile solamente secondo una logica di soglia. E' possibile indicare il massimo valore di umidità in cavità ammissibile ed il sistema provvederà ad aprire la valvola di aspirazione ogni qual volta si verifica un superamento. L'attivazione delle potenze è quindi funzione della temperatura misurata in cavità.

COMBI: In questa modalità la termostatazione della cavità è sempre realizzata mediante l'attivazione del relativo gruppo resistenze ma è anche possibile controllare il livello di umidità mediante l'attivazione delle resistenze boiler. L'attivazione delle potenze è quindi funzione della temperatura misurata in cavità (resistenze cella) e dell'umidità letta in cavità (resistenze boiler). Ovviamente, per non sforare il valore massimo di potenza consentita, nel caso di attivazione contemporanea della cavità e del boiler²⁵ la potenza globale viene suddivisa fra i due carichi.

STEAM: In questa modalità la termostatazione della cavità è realizzata mediante l'attivazione delle resistenze nel boiler e la conseguente immissione di vapore in cavità, mentre, per quanto concerne l'umidità, si lavora sempre in condizioni di saturazione. L'attivazione del boiler avviene in funzione della temperatura misurata in cavità.

La figura 2.12 riporta in modo schematico le tre modalità di funzionamento del forno e i relativi campi d'utilizzo.

Oltre a poter operare secondo tre differenti logiche, il sistema di controllo può anche gestire altre funzioni secondarie per potenza in gioco ed effetto complessivo sulla cottura, ma spesso utilizzate dagli chef per cotture in cui è necessario ottenere finiture molto particolari o è necessario monitorare il processo di cottura con un approfondimento superiore allo standard. Le funzioni secondarie più significative sono:

Controllo della velocità di rotazione della ventola: La velocità di rotazione della ventola può essere dimezzata o variata con continuità all'interno di un range a discrezione dello chef. La ventola può inoltre essere utilizzata in modalità pulsata attivandola secondo un duty cycle. Un esempio di cottura in cui tali possibilità di controllo risultano decisive è la pasticceria; un flusso eccessivo all'interno della cavità finirebbe col trascinare i pasticcini e per tale motivo risulta fondamentale limitare la velocità di rotazione della ventola.

²⁵Per maggiore chiarezza espositiva si farà d'ora in poi riferimento all'attivazione della cavità e del boiler sott'intendendo i pacchi resistenza collocati in cavità e all'interno del boiler.

Atomizzazione di acqua in cavità: Questa funzione consiste nell'introdurre piccole quantità di acqua all'interno della bocca di aspirazione della ventola ottenendo la proiezione di particelle di acqua sul cibo. Tale funzione viene utilizzata dagli chef per esempio nelle cotture di panificazione dove, creando un film bagnato sulla superficie del cibo, permette di ottenere a fine cottura una superficie ottimamente crostificata [6]. Tale funzione è anche utilmente utilizzata dal sistema di controllo per accelerare le fasi di raffreddamento della cavità fra una cottura e l'altra.

Monitoraggio dell'inattivazione batterica: Durante le cotture che utilizzano lo spillone multipunto²⁶ è possibile monitorare il livello di inattivazione batterica per determinare a fine cottura se l'alimento può essere considerato sicuro dal punto di vista microbiologico. Questa funzione trova largo impiego poichè si presta molto bene ad essere integrata nei sistemi di gestione HACCP.

sinora si è visto come un forno professionale per la cottura di alimenti sia un'apparecchiatura notevolmente più complessa rispetto a qualunque controparte residenziale. Sarebbe tuttavia limitato pensare che le uniche differenze riguardano parametri di prestazione quali la capacità di carico o la potenza installata. Proprio come l'uso di un'auto sportiva richiede uno stile di guida differente da quello di un'utilitaria, anche i forni professionali per la cottura di alimenti richiedono un tipo di utilizzo differente rispetto a quanto siamo abituati a fare fra le mura di casa.

In ambito domestico, la maggior parte degli utenti pone gli alimenti, composti in un contenitore per cottura²⁷ secondo quanto indicato in ricetta, all'interno della cavità²⁸ ed avvia la termostatazione della stessa alla temperatura e per il tempo indicato nella ricetta. Tale modo di procedere è piuttosto banale e può portare a risultati non ottimali per i seguenti motivi:

- Partendo la cottura con la cavità ancora fredda, il cibo viene esposto alla temperatura di set per un tempo effettivamente inferiore a quanto richiesto dalla ricetta.
- L'utilizzo di una sola temperatura di set è limitante poichè forza l'utente a scegliere una temperatura il più delle volte di compromesso che va più o meno bene durante tutti i differenti momenti della cottura²⁹.
- Non monitorando la temperatura dell'alimento durante la cottura³⁰ è impossibile regolare la temperatura della cavità in funzione della risposta dell'alimento stesso.

In ambito professionale si da risposta a ciascuno di questi punti; in effetti tutte le cotture sono precedute dal preriscaldamento della cavità (o in alcuni casi dal suo raffreddamento se la cottura lo richiede) ed il sistema di controllo del forno

²⁶Si tratta di uno spillone analogo a quello utilizzato in ambito domestico ma caratterizzato da essere installato all'interno della cavità a dal possedere sei differenti punti di misura.

²⁷Teglie e stampi dolciari per esempio.

²⁸Che quindi è fredda ad inizio cottura.

²⁹In molti casi, per una cottura ottimale, è necessario esporre il cibo a temperature differenti durante il processo. Si pensi per esempio a tutte quelle cotture di carni in cui è necessario prima effettuare una sigillatura ad alte temperature e quindi una cottura a basse temperature.

³⁰Utilizzando uno spillone per esempio.

è in grado di gestire innumerevoli fasi di cottura, variando i parametri di set all'interno di ciascuna di esse, in funzione di come risponde l'alimento. Come già accennato, questa maggiore libertà di controllo, richiede necessariamente una differente gestione del forno e del processo di cottura. Non è quindi possibile definire un processo di cottura in forno mediante una singola coppia tempo temperatura ma è necessario descrivere l'evoluzione temporale di molteplici variabili di set, quale per esempio la temperatura o l'umidità della cavità. Tali variabili possono inoltre essere fatte variare durante la cottura anche in funzione di grandezze misurate in itinere quali per esempio la temperatura al cuore dell'alimento. Per un efficace utilizzo di tutte le funzionalità di un forno professionale si utilizza quindi una gestione a fasi delle cotture.

2.3 Processi di cotture a fasi

Ciascuna ricetta³¹ viene gestita dal forno come una successione di singole fasi, per ognuna delle quali è data la logica secondo cui devono variare le variabili di set e le condizioni di terminazione. Vi sono pertanto differenti tipi di fasi che possono essere combinate:

Fasi di precottura: si tratta di fasi durante le quali il controllo riscalda o raffredda il forno fino ad ottenere le corrette variabili di set della prima fase di cottura in cavità. In alcuni casi la temperatura di preriscaldamento è superiore a quella della prima fase di cottura per compensare la perdita di calore che inevitabilmente si realizza in seguito all'apertura della porta e l'inserimento del cibo.

Fasi di mantenimento dei parametri di set: durante queste fasi si ha il mantenimento di fissati valori di set per tutta la durata della fase.

Fasi di stima del carico inserito in cavità: durante queste fasi viene fatta la stima della quantità e della morfologia del carico inserito in cavità. Tale risultato è, per esempio, reso possibile osservando la rapidità con cui evolve la temperatura al cuore in funzione della temperatura di cavità.

Fasi di mantenimento di un dato profilo: durante queste fasi, la temperatura di set della cavità viene reimpostata con continuità sulla base della temperatura al cuore. Può per esempio essere richiesto che la temperatura in cavità si mantenga sempre superiore di un certo delta rispetto a quella al cuore. In tal modo le due temperature aumenteranno con continuità, mantenendo una differenza costante, sino al termine della cottura.

Fasi di manipolazione degli alimenti: durante queste fasi la cottura viene momentaneamente interrotta per permettere all'operatore di intervenire sul cibo, per esempio aggiungendo ingredienti alla preparazione.

Mentre le condizioni di fine fase possono riguardare il trascorrere di un determinato tempo, il raggiungimento di una data temperatura al cuore, il raggiungimento di un richiesto livello di sicurezza microbiologica³², ecc.

³¹D'ora in poi si utilizzerà questo termine per indicare un processo di cottura condotto con forni professionali per la cottura di alimenti .

³²In questo caso la stima viene fatta monitorando l'evoluzione temporale del fattore di riduzione logaritmica della carica batterica.

Nei forni dotati d'interfaccia touch, l'utente può utilizzare tali fasi operando in due modalità, quella manuale e quella automatica. Nella prima modalità il forno è totalmente controllabile dall'utente che può quindi programmare processi di cottura complessi a piacere; è possibile mettere in sequenza più fasi diverse fra loro per ottenere il risultato di cottura desiderato. Tale modalità d'utilizzo prevede che l'utente abbia non solo una notevole competenza nell'ambito della cottura di alimenti ma anche una notevole consapevolezza del ruolo giocato dal tasso di umidità in cavità e della logica di funzionamento delle fasi. Considerato che senza tali requisiti non è possibile sfruttare la macchina al massimo delle possibilità, Electrolux Professional organizza presso la sua Chef Academy frequenti momenti formativi per chef di tutto il mondo. Ovviamente tale forma di training avanzato è rivolto solo a personale con un'adeguata formazione di base oltre che una notevole esperienza operativa. Il menù automatico è stato quindi concepito per permettere anche a chi non possiede tali requisiti di sfruttare tutte le potenzialità del forno. Un team multidisciplinare composto da chef ed ingegneri elettronici ha codificato un vasto gruppo di ricette sfruttando le fasi precedentemente presentate, prevedendo nella maggior parte dei casi anche una limitata possibilità d'intervento da parte dell'utente. Nel caso della cottura di polli arrosto per esempio è possibile selezionare un livello di imbrunitura ed uno di cottura il che si traduce in settaggio della temperatura di cavità e della temperatura al cuore di fine cottura. Tali ricette sono quindi state organizzate suddividendole per aree tematiche (carni macinate, carni rosse, carni bianche, primi, ecc.) ottenendo un menù di selezione che in un massimo di tre passi successivi permette di avviare la cottura desiderata, ottenendo un risultato ottimale anche senza una formazione specifica. Un esempio di cottura automatica organizzata in più fasi è rappresentata in figura 2.13 dove sono riportate le temperature dei sei punti di misura sullo spillone, la temperatura e l'umidità in cavità.

Come chiaramente visibile, le singole fasi di cottura sono 3 cui va aggiunta la fase di preheating. Quest'ultimo è configurato per portare la cavità ad una temperatura di 20 gradi superiore a quella di set della prima fase di cottura. Le temperature delle tre successive fasi di cottura è pari a $180^{\circ}C$, $210^{\circ}C$ e $240^{\circ}C$ (linea rossa).

Un caso di cottura più complesso selezionabile navigando nel menù automatico è visibile in figura 2.14 [5], in cui la temperatura di set della cavità e quella misurata al cuore dell'alimento relative ad una cottura in bassa temperatura sono riportate in funzione del tempo. Come si nota, non solo la temperatura di set cavità cambia con costanza in funzione della temperatura al cuore, ma anche la logica con cui tale cambiamento avviene è funzione della stessa temperatura. Sono chiaramente distinguibili una fase di precottura, e quattro fasi di cottura, nominate in figura come scottatura, raffreddamento rapido, maturazione e mantenimento.

Per quanto sinora esposto, un forno professionale per la cottura di alimenti non presenta solamente differenze costruttive e funzionali rispetto alle controparti residenziali ma richiede anche un differente approccio da parte dell'utente, cui si richiede la capacità di codificare le ricette come successioni di funzioni, al fine di mantenere in ultima analisi il cibo alla giusta temperatura ed umidità, durante tutto il processo. L'adozione di particolari soluzioni quale per esempio il menù automatico possono aiutare utenti meno esperti a gestire il forno in modo

professionale e rappresentano un notevole valore aggiunto.

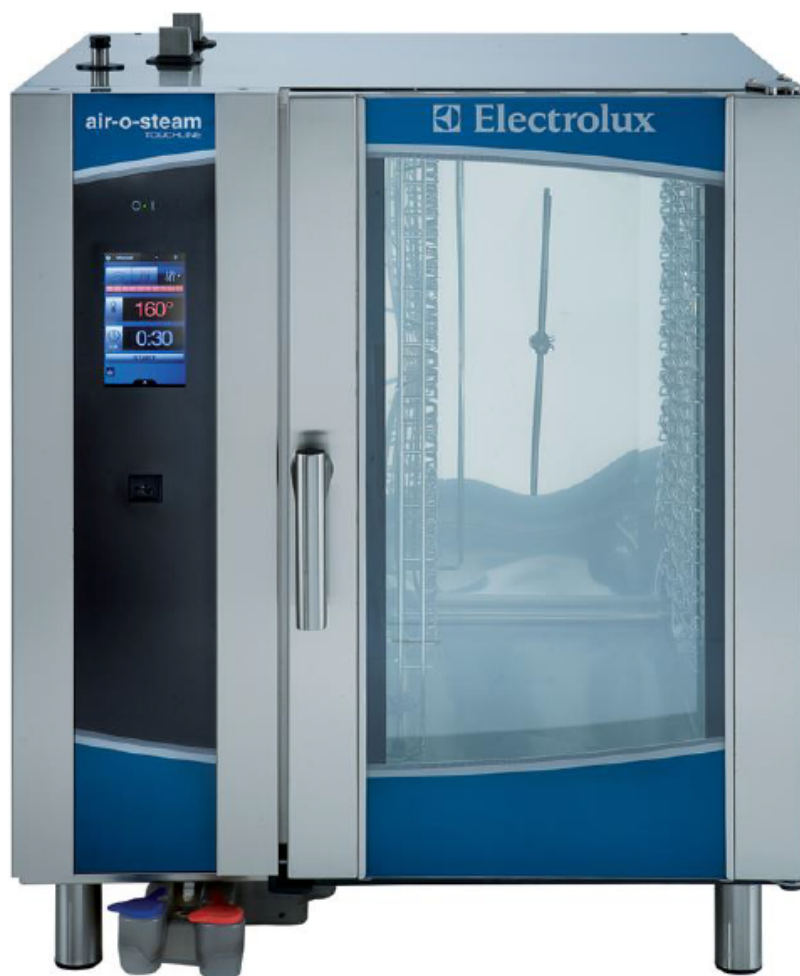


Figura 2.1: Immagine del forno utilizzato durante la sperimentazione (Forno 10 1/1 elettrico livello touch).



Figura 2.2: Teglie realizzate secondo lo standard gastronorm. A sinistra è visibile la teglia di lunghezza standard mentre a destra è visibile la teglia di lunghezza doppia.

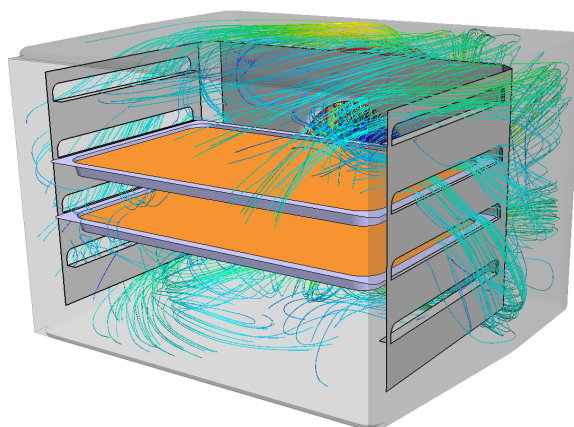


Figura 2.3: Esempio di studio sull'uniformità di cottura ottenuta mediante ottimizzazione delle geometrie dei supporti su un forno professionale per la cottura di alimenti .

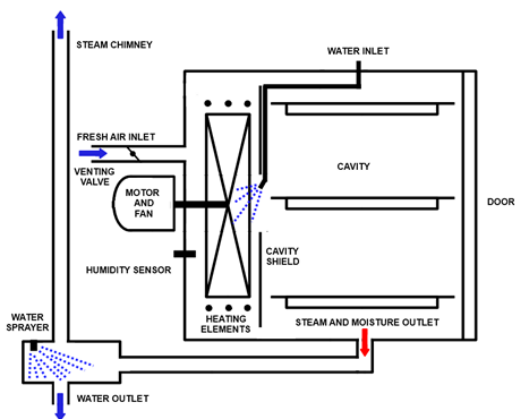


Figura 2.4: Rappresentazione schematica di un sistema di generazione di vapore IN-CAVITY.

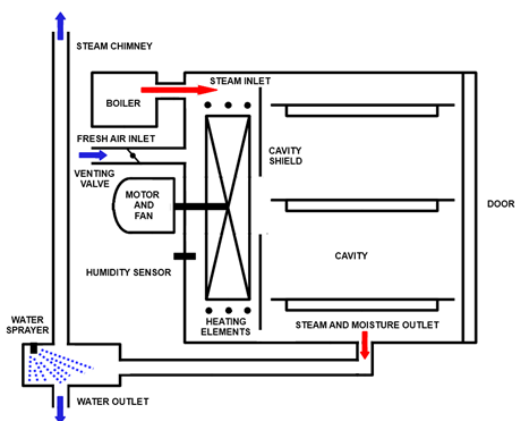


Figura 2.5: Rappresentazione schematica di un sistema di generazione di vapore OUT-CAVITY.

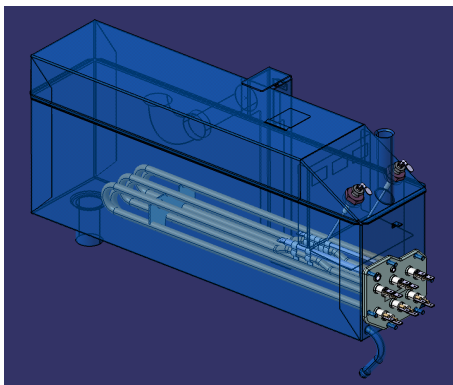


Figura 2.6: Modello 3D di un boiler elettrico.

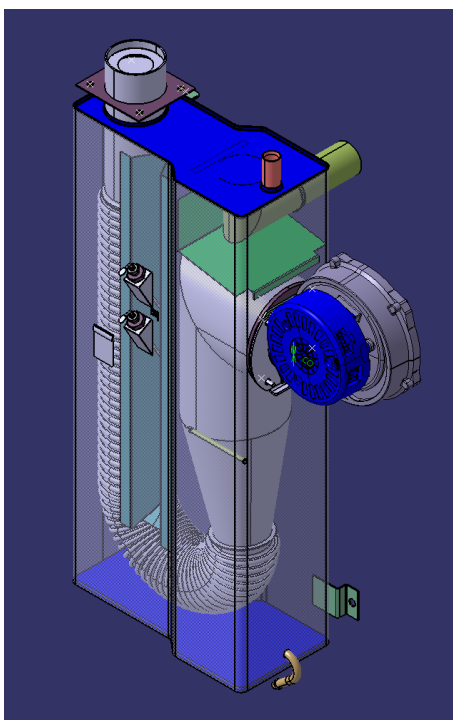


Figura 2.7: Modello 3D di un boiler gas (GPL o Metano).

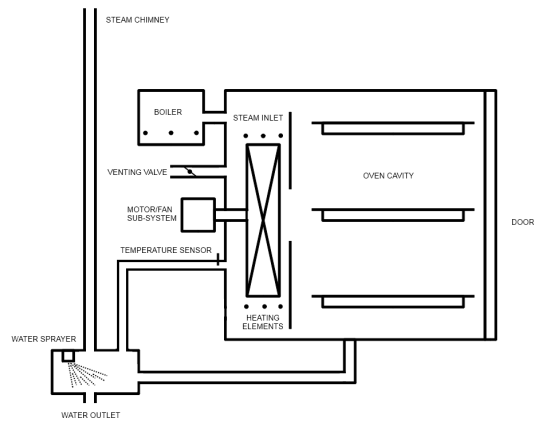


Figura 2.8: Sistema di monitoraggio dell'umidità secondo il metodo del by-pass.

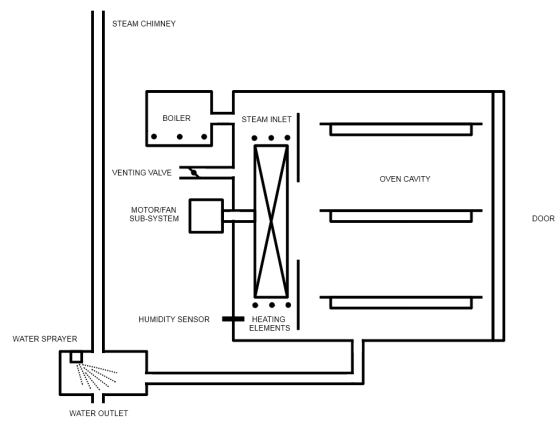


Figura 2.9: Sistema di monitoraggio dell'umidità secondo il metodo della sonda lambda.

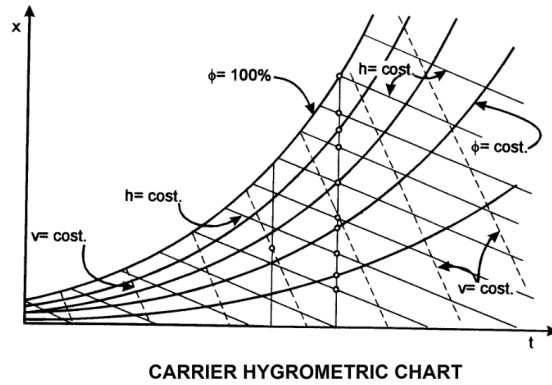


Figura 2.10: Diagramma di Carrier dell'aria umida.



Figura 2.11: Esempio di forni utilizzando una UI analogica (sx) e touch (dx)



STEAM MODE
 $T_{cavity} \leq 100^{\circ}\text{C}$
 Humidity active control



COMBI MODE
 $T_{cavity} \leq 270^{\circ}\text{C}$
 Humidity active control



CONVECTION MODE
 $T_{cavity} \leq 300^{\circ}\text{C}$
 Humidity passive control (threshold)

Figura 2.12: Schema riassuntivo dei tre modi possibili di funzionamento del forno.

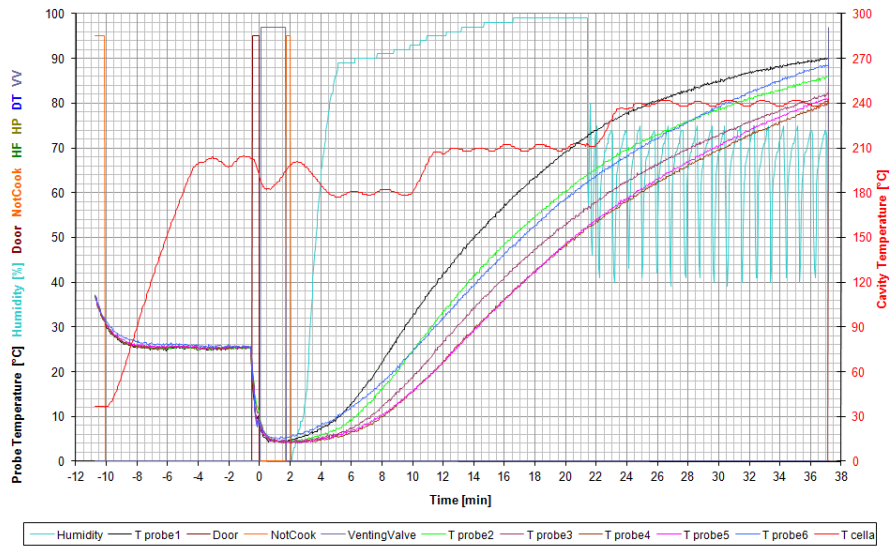


Figura 2.13: Evoluzione temporale di differenti variabili monitorate durante una cottura selezionata fra quelle presenti nel menù automatico.

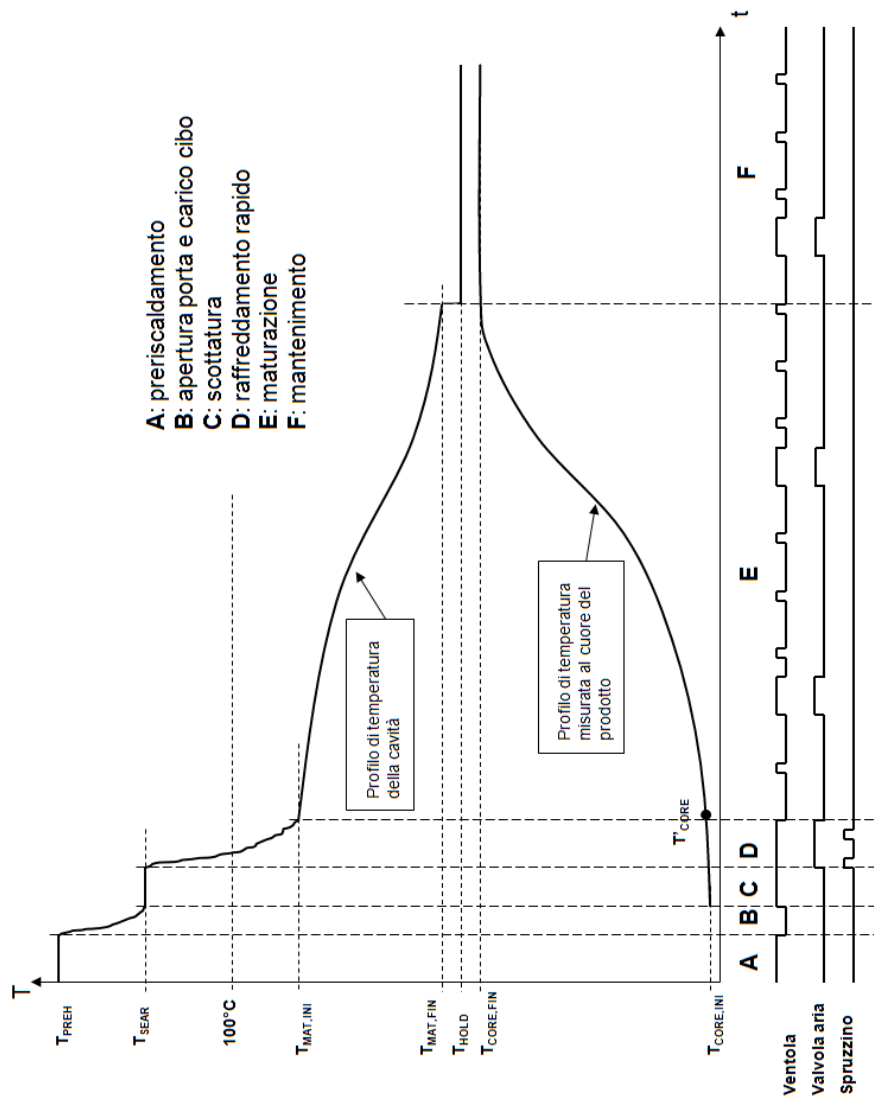


Figura 2.14: Esempio di cottura in cui il valore di set della temperatura di cavità varia con continuità in funzione della temperatura al cuore dell'alimento.

Parte II

Modello concettuale della cottura

Capitolo 3

Base teorica del modello

Per poter individuare soluzioni di riduzione dei consumi di un generico forno professionale per la cottura di alimenti è fondamentale la descrizione di come viene spesa l'energia durante un processo di cottura e, per tale motivo, la prima attività svolta è stata sviluppare un modello descrivente l'evoluzione energetica del sistema forno+cibo. Mentre parte delle attività di ricerca condotte nel laboratorio cottura di EECLtrolux Professional hanno lo scopo di indicizzare i flussi energetici, determinando in modo quantitativo come l'energia fornita si suddivide durante la cottura (una quota va al cibo, una alla struttura, ecc.)[4], il modello di seguito presentato ha lo scopo di dare una descrizione macroscopica di come evolve il sistema forno-cibo durante una generica cottura, integrandosi il più efficacemente possibile con la logica di utilizzo del forno.

Definiamo anzitutto una base su cui costruire il modello; è conoscenza comune che ogni processo di cottura prevede che il cibo venga esposto a temperature superiori a quelle ambientali, mantenendo tale condizione per un determinato periodo di tempo. Qualunque apparecchiatura per la cottura di alimenti dovrà quindi in estrema sintesi riscaldare del cibo ed a tal fine, molteplici sono le possibili soluzioni tecniche. Vi sono apparecchiature che riscaldano il cibo per diretto contatto con l'elemento riscaldante (è questo il caso delle piastre o delle griglie) ed altre che riscaldano l'ambiente (sia il gas ciscostante che le pareti confinanti) in cui viene posto il cibo (è questo il caso dei forni a convezione). In altri casi il cibo è esposto a radiazione termica o elettromagnetica. Per un risultato ottimale, nei primi due casi le soluzioni tecniche prevedono che la superficie di contatto o l'ambiente di cottura si porti stabilmente alla temperatura di utilizzo; ne deriva quindi che per ogni generica cottura non solo il cibo deve essere riscaldato ma anche parte dell'apparecchiatura, e quindi a tal fine dell'energia viene necessariamente spesa. Da un punto di vista energetico, ha quindi senso suddividere ogni cottura quantomeno in due momenti separati, quello di preparazione dell'apparecchiatura alla cottura e quello di cottura vero e proprio. Tuttavia, referendosi alla cottura in forno, per cogliere l'evoluzione energetica del sistema forno+cibo nella sua globalità, è necessario considerare le tre seguenti fasi:

PRECOTTURA: Il forno viene acceso ed il controllo porta la cavità alla temperatura ed alla umidità di set per la data cottura.

COTTURA: Durante questa fase il cibo viene introdotto in cavità ed avviene la cottura. Il controllo mantiene la temperatura e l'umidità di set in cavità.

SCARICO: Al termine della cottura il cibo viene estratto dalla cavità ed il forno viene spento. Da questo momento in poi inizia il raffreddamento incontrollato del forno che ritorna alla temperatura ambiente.

Sfruttando questa suddivisione in tre fasi è possibile caratterizzare l'evoluzione energetica del forno, definito come sistema termodinamico chiuso, il cui confine coincide con l'involucro esterno.

Durante la cottura la cavità del forno si trova ad una temperatura superiore a quella ambientale e quindi è sicuramente in condizione di squilibrio termodinamico rispetto allo stesso. La fase di precottura ha lo scopo di portare il forno in tale condizione e quindi dell'energia deve essere ceduta all'apparecchiatura. Logicamente, non potendo considerare adiabatica la cavità, anche la struttura del forno subirà un riscaldamento potendo quindi affermare che durante la fase di precottura è il forno nella sua globalità a portarsi in condizione di squilibrio termodinamico con l'ambiente circostante (comportandosi come un corpo unico di determinata capacità termica). L'energia fornita al sistema durante tale fase non viene direttamente ceduta al cibo; tuttavia, essendo necessaria a portare il forno nelle condizioni operative, è comunque funzionale alla cottura.

Durante la fase di cottura è necessario fornire dell'energia al sistema; parte di essa viene spesa per mantenere la condizione di disequilibrio con l'ambiente circostante mentre la rimanente viene trasferita al cibo. L'energia fornita durante questa fase è quindi direttamente correlata alla cottura.

Una volta che la cottura è giunta a termine, il cibo viene estratto dalla cavità ed il forno viene spento; a questo punto esso è libero di raffreddarsi per tornare in equilibrio con l'ambiente circostante. Durante questa fase dell'energia deve essere ceduta all'ambiente circostante e tale quota rappresenta totalmente uno spreco non essendo in alcun modo funzionale ad alcuna cottura.

Quanto sinora esposto è rappresentato schematicamente in figura 3.1; la variazione di livello energetico del forno rispetto all'ambiente circostante è riportata in funzione del tempo ed i flussi energetici sono rappresentati sotto forma di frecce. Le frecce gialle rappresentano delle quote di energia che sono fornite al sistema e che sono indirettamente correlate alla cottura mentre la freccia verde rappresenta la quota direttamente correlata alla cottura. La freccia rossa invece rappresenta la quota che viene ceduta dal forno all'ambiente circostante durante la fase di scarico.

Come visto, durante la cottura dell'energia viene fornita col risultato che la temperatura del forno globalmente aumenta ed il cibo viene cotto; in tale fenomeno va quindi ricercato il significato fisico dell'espressione livello energetico così come si è utilizzata nel presente lavoro di ricerca. Operativamente si è scelto di utilizzare la temperatura di set di cavità (e quindi di cottura) come indicatore del livello energetico del forno: in tal modo all'aumentare della temperatura di cottura aumenta il livello energetico ed aumenta contestualmente la spesa energetica che è necessario affrontare per la cottura. Ovviamente aumenta anche la quota di energia che viene ceduta dal forno durante la fase di scarico. Ovviamente assumere tale temperatura come unico indicatore rappresenta un'approssimazione poichè altri sono i fattori che concorrono ad incrementare la spesa energetica di una cottura. Il principale di essi è l'umidità in cavità ma per le finalità del presente lavoro non si è ritenuto necessario scendere a tale

livello di dettaglio.

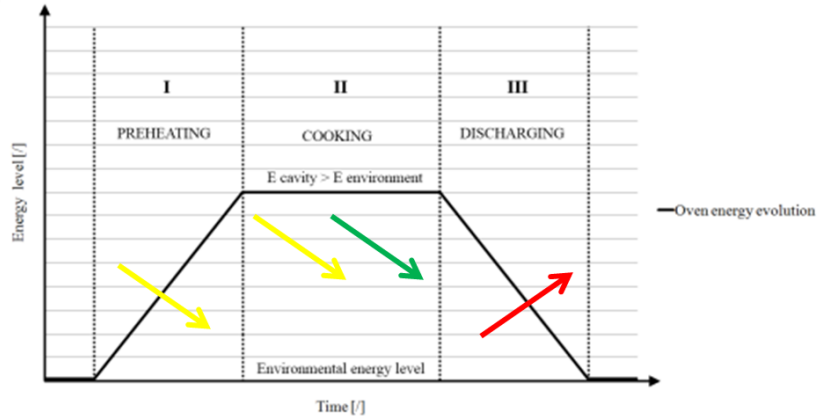


Figura 3.1: Grafico rappresentante qualitativamente l'evoluzione energetica del sistema forno più cibo durante una singola generica cottura.

Quanto sinora esposto vale per il caso di una singola cottura ma l'approccio a fasi può essere proficuamente esteso anche al caso di una successione di cotture. A tal proposito si consideri la figura 3.2 in cui sono rappresentate due cotture successive; chiaramente le prime due fasi saranno sempre e comunque una precottura ed una cottura ma a seguire non vi sarà più una fase di scarico ma una nuova precottura. Durante tale fase il livello energetico del forno potrà aumentare o diminuire a seconda della temperatura della nuova cottura avvenendo quindi dei possibili riscaldamenti o raffreddamenti della cavità; in questa duplice possibilità va ricercata la ragione per cui si parla di precottura piuttosto che preriscaldamento. Come si vedrà nella parte dedicata alle applicazioni di questo modello, tale fenomeno può essere sfruttato per ridurre i consumi d'esercizio del forno. Ovviamente, quest'alternanza di precotture e cotture continua sino a quando tutte le cotture sono state effettuate e si ha necessariamente un'ultima fase di scarico.

Sfruttando la schematizzazione in fasi appena esposta è possibile non solo descrivere la cottura in termini di flussi energetici coinvolti ma anche definire degli ambiti di sviluppo esenti dal rischio di inficiare le performances del forno. In ambito professionale, ciò che viene richiesto sono forni in grado prima di ogni altra cosa di cucinare bene. Quindi le performance di cottura rappresentano il requisito più importante ed ogni intervento di progettazione non può in alcun modo comprometterle. Nel caso in cui si voglia agire sul sistema di controllo del forno, vale quindi il criterio generale secondo cui ogni intervento che riguardi la fase di cottura è rischioso. Interventi riguardanti invece la fase di precottura sono sicuri poichè il cibo non è presente in cavità. In altre parole il cibo non ha coscienza del come si sono raggiunte le condizioni di cottura in cavità ma solo del loro valore ad inizio (e durante il) processo di cottura.

Quanto sinora esposto rappresenta lo spunto teorico su cui si è sviluppato tutto il lavoro di ricerca presentato ma, per essere utilizzato, è stato prima necessario

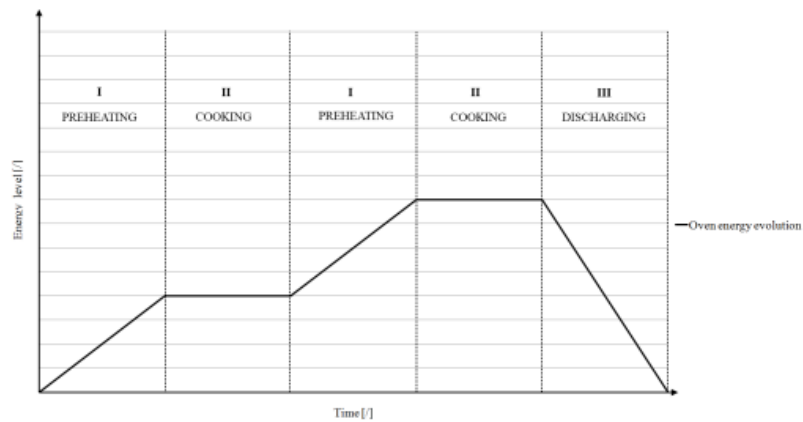


Figura 3.2: Grafico rappresentante qualitativamente l'evoluzione energetica del sistema forno più cibo per una successione di due generiche cotture.

declinarlo in un contesto sperimentale/applicativo, individuando una grandezza fisica in grado di esprimere non solo il livello energetico cui è necessario portare il forno ma anche il costo del mantenimento a tale livello durante tutta la fase di cottura.

La soluzione è stata individuata in una misura di consumo elettrico¹ poiché tale grandezza è quella che meglio di altre traduce operativamente un costo energetico sostenuto per raggiungere e mantenere un determinato livello energetico. Consideriamo inizialmente una cottura TEST, effettuata a forno vuoto, per cui la cavità deve essere mantenuta per 10 minuti a 180°C ; durante la fase di precottura il sistema di controllo riscalda la cavità, poi la mantiene in set per 10 minuti e quindi viene spento. Misurando i consumi potremmo definire una quota necessaria alla precottura ed una quota necessaria alla cottura ossia al mantenimento del forno in condizioni di set. E' ragionevole attendersi che il consumo totale sia ripetibile e che quindi sia possibile associare alla cottura TEST un consumo caratteristico: in modo analogo a ogni possibile cottura sarà associabile un consumo caratteristico. A tale consumo si è dato il nome di Energy Cooking Level (ECL) per le evidenti analogie con il livello energetico di cui si è sinora discusso. Nella fattispecie come ad ogni set di cavità è associabile un livello energetico, ad ogni cottura è associabile un ECL. Inoltre, all'aumentare del disequilibrio fra forno ed ambiente corrisponde un incremento del livello energetico come pure un aumento del ECL.

La principale differenza fra livello energetico e ECL risiede invece nel fatto che mentre il primo da solamente un informazione sulla difficoltà di raggiungimento ma nessuna riguardo la spesa per il mantenimento delle condizioni di set in cavità (il forno tende come ogni corpo a ritornare in equilibrio con l'ambiente circostante), il secondo colma questa lacuna, prestandosi maggiormente a descrivere i consumi operativi, influenzati non solo da quanto sia lontana la condizione in cavità da quella ambientale, ma anche dal tempo di mantenimento

¹Si ricordi che durante tutta la sperimentazione si è utilizzato un forno elettrico.

di tale differenza. Sfruttando un'ipotesi di ripetibilità², si è passati quindi dal voler associare ad ogni set di cavità un valore di livello energetico riferito all'ambiente circostante, all'associare un consumo di performance ad ogni ricetta. L'associazione fra il consumo di cottura ed il livello energetico è semplice nel caso in cui si consideri una cottura effettuata a vuoto mentre lo studio si complica considerando anche la presenza del cibo durante la fase di cottura. Dallo studio del database sperimentale del laboratorio cottura di EECLtrolux Professional è emerso che la maggior parte del consumo è imputabile al raggiungimento ed al mantenimento delle condizioni di cottura mentre una parte minore è funzione della quantità di cibo presente in cavità. Per il sistema di controllo del forno la presenza di cibo può essere considerata analoga ad un disturbo il cui effetto è rendere più gravoso il mantenimento delle condizioni di set durante la cottura. E' facilmente comprensibile che mantenere una cavità contenente 20 kg di verdure surgelate a 100°C per 14 minuti sia più impegnativo rispetto alla semplice termostatazione della cavità vuota. Il maggiore sforzo si traduce in un incremento dei consumi, funzione (non sempre lineare) della quantità e tipologia del cibo.

E' stato quindi naturale considerare il consumo di cottura suddiviso in due componenti, indicate come portante e modulante, laddove la prima ne determina il valore di massima mentre la seconda corregge tale valore, incrementandolo.

Considerato che per come sono stati definiti, il consumo portante è funzione del solo tipo di cottura e forno mentre il consumo modulante è funzione dalla sola tipologia e quantità di cibo. Per dare fondamento al modello è stato indagata sperimentalmente non solo l'esistenza di un consumo energetico di cottura ripetibile ma anche la possibilità di predirne il valore.

²Per un dato modello di forno, se lo stesso processo di cottura viene ripetuto più volte, ci si attende che il consumo sia ripetibile con una certa tolleranza.

Capitolo 4

Sperimentazione

L'ipotesi più forte alla base del modello esposto è quella di ripetibilità dei consumi: senza di essa i ragionamenti fatti non possono trovare applicazione e, per tale motivo, il primo obiettivo della sperimentazione è stato verificarne la sussistenza.

La verifica ha riguardato la ripetibilità dei consumi di una ricetta campione scelta fra quelle appartenenti al menù automatico, indicata come ricetta TEST, effettuata in assenza di carico. L'analisi di ripetibilità è stato condotta con un forno scarico per evitare di introdurre sin dall'inizio la variabilità del cibo: in sede di pianificazione dell'attività sperimentale non era chiaro quanto questa potesse pesare sulla ripetibilità dei consumi. Infine, fra le varie disponibili, si è scelta una ricetta che prevede l'attivazione sia dei carichi in cavità che di quelli nel boiler. In tal modo è stato possibile caratterizzare tutti gli elementi che concorrono maggiormente a determinare il consumo di cottura.

Selezionata la ricetta è stato necessario decidere la modalità secondo cui condurre il test e quindi principalmente come organizzare la ripetizione della ricetta di TEST. Il test è stato quindi organizzato cercando di garantire la massima sovrapposibilità possibile fra le cotture effettuate a vuoto e quelle a carico. E' stato ipotizzato uno scenario in cui uno chef ripete in sequenza la cottura TEST frapponendo fra le varie cotture le fasi di precottura, oltre che il carico e lo scarico del cibo: la durata di queste due operazioni è stata inizialmente considerata pari a 2 minuti. La sequenza di sperimentazione scelta per il test di ripetibilità è la seguente:

- Selezione ed avvio della cottura¹.
- Apertura porta per due minuti per simulare l'inserimento del cibo.
- Chiusura della porta e conseguente avvio della fase di cottura.
- Apertura della porta per due minuti al termine della cottura per simulare l'estrazione del cibo.

Durante i vari test, questa sequenza è stata ripetuta sino al raggiungimento di una stabilità del consumo, ossia sino a quando la deviazione standard delle

¹Il sistema di controllo avvia la precottura avvisando l'utente quando essa è terminata ed è possibile inserire il cibo.

ultime 3 cotture è inferiore al 5%. Per questo primo test è stato misurato il solo consumo elettrico dell'apparecchiatura per ciascuna cottura e tale grandezza è stata riportata su un grafico in funzione del numero ordinale di esecuzione della cottura.

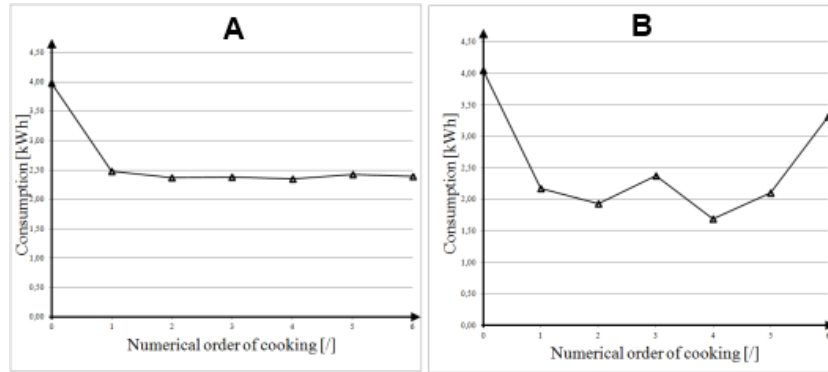


Figura 4.1: Possibili distribuzioni di dati ottenibili mediante il test di ripetibilità.

Sono state individuate due tipologie di distribuzioni dei dati, coerenti con quelle evidenziate in figura 4.1, dipendenti dal successo o dal fallimento nella verifica di ripetibilità. Come chiaramente visibile, il set di dati B non rispetta il limite imposto alla deviazione standard e quindi non permetterebbe alcun ulteriore implementazione del modello energetico della cotturacosì come è stato pensato. fortunatamente, considerate le caratteristiche funzionali dei forni professionali per la cottura di alimenti , una simile situazione non si verifica durante l'ordinario funzionamento ma solamente in presenza di guasti. Sulla base di tale considerazione è stata sviluppata una funzionalità su cui si tornerà in seguito, nella parte dedicata alla applicazioni del modello.

Il set di dati A invece rappresenta un caso in cui la ripetibilità risulta verificata. In figura 4.2 è visibile un grafico ottenuto a partire da dati sperimentali relativi alla ricetta di TEST, in cui è chiaramente verificata la ripetibilità dei consumi. I dati di consumo sono distribuiti su un livello e per tale motivo questo grafico ha preso il nome di “grafico degli Energy Cooking Levels”.

La prima cosa che si nota nel grafico è la differenza fra il primo consumo ed i successivi: essa è dovuta alla massa del forno che, come già spiegato, deve portarsi a regime. Durante la prima cottura non solo viene ceduta energia per portare la cavità nelle condizioni di set, ma parte di essa viene assorbita dalla struttura del forno per conduzione di calore attraverso i confini della cella. Tale passaggio di calore è transitorio e perdura sino a quando la massa del forno raggiunge una condizione stazionaria; in questo caso tale fenomeno si esaurisce con la prima cottura.

La durata dei singoli test di ripetibilità effettuati con la ricetta di TEST ha obbligato a ripetere il test per più giorni successivi²: in tale modo è stato possibile non solo osservare che i ECL si dispongono a formare una banda ma anche

²In una singola giornata è possibile eseguire una singola serie di circa 20 cotture al termine della quale, una notte è necessaria a riportare il forno in condizione di equilibrio con l'ambiente circostante.

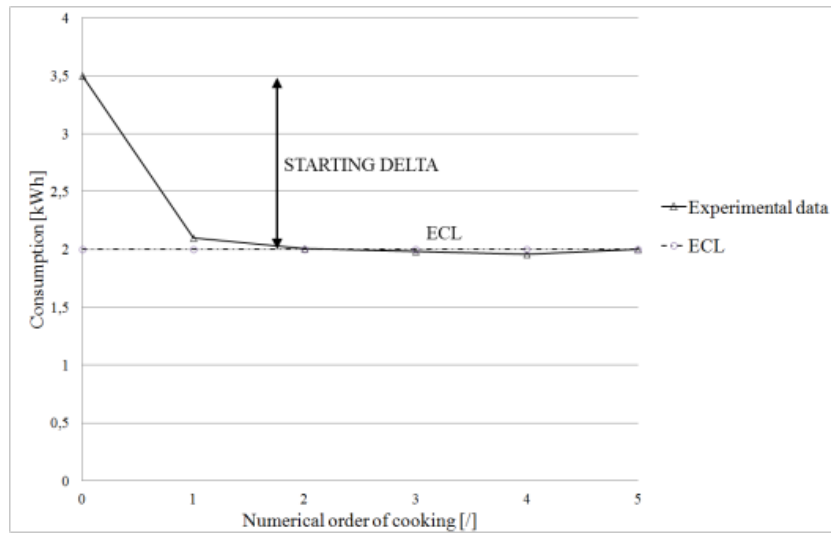


Figura 4.2: Grafico del livello energetico di cottura per la ricetta test.

che il rapporto percentuale fra il primo ed il secondo consumo si ripete. La distribuzione a banda deve essere interpretata non solo come effetto della ovvia incertezza di misura ma anche del variare delle condizioni al contorno fra giorni successivi. Quello che risulta confrontando ECL ottenuti con la medesima cottura di TEST, in giorni successivi, è un posizionamento parallelo delle n curve, approssimabile quindi come una singola curva, composta da un plateau ed un calo iniziale fisso, che si sposta verticalmente in funzione delle condizioni al contorno.

In un grafico di questo tipo dunque, la distribuzione complessiva dei dati può essere completamente descritta conoscendo il valore del primo consumo ed il posizionamento reciproco fra esso ed i successivi: è chiaro quindi come la comprensione di questo grafico possa portare anche alla previsione dei consumi per una data cottura ed un dato forno. Tale aspetto verrà ulteriormente sviluppato nella parte dedicata alle applicazioni del modello.

La ricerca è quindi proseguita analizzando anzitutto come muta il ECL in funzione delle caratteristiche del forno e del processo di cottura e successivamente indagando la possibilità di stimare il posizionamento del ECL.

Considerata l'analogia fra i livelli energetici cui deve portarsi il forno per cucinare e gli ECL come appena definiti, è ragionevole attendersi che a ricette differenti corrisponderanno ECL differenti. In figura 4.3 è visibile il risultato di tre differenti ricette appartenenti al menù automatico, caratterizzate dal funzionamento secondo modalità differenti (CONV, COMBI o STEAM): le tre cotture si posizionano su tre ECL nettamente differenti e paralleli. I consumi di cottura, rappresentati su un grafico dei ECL, si comportano esattamente come un livello energetico che aumenta all'aumentare della temperatura di cavità, con un significato più generale, all'aumentare dell'entità del disequilibrio termodinamico fra il forno e l'ambiente circostante.

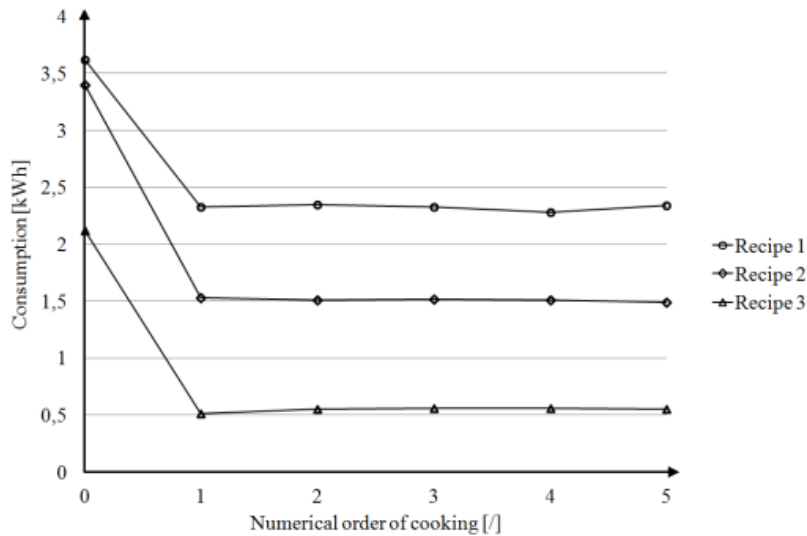


Figura 4.3: Variazione degli ECL al cambiare delle ricette.

Il calo di consumi che si verifica successivamente alla prima cottura è un'espressione della massa termica e dell'inerzia che il forno dimostra portandosi in condizione di funzionamento a regime. La struttura del forno (e quindi la massa) può essere considerata compresa fra il volume delimitato dalla cavità e quello esterno all'involucro del forno, che essenzialmente è l'ambiente circostante. Durante la cottura sia la cavità che l'ambiente esterno possono essere considerati a temperatura costante per cui la massa del forno viene a trovarsi immersa in un gradiente di temperatura: la temperatura del forno aumenta quindi sino a raggiungere una condizione di equilibrio dinamico. Questa fase transitoria comporta una spesa energetica che si ritrova nel primo valore di consumo di ogni serie. Una volta che la massa del forno è andata a regime non è più necessaria alcuna spesa energetica in surplus e quindi i consumi successivi sono necessariamente inferiori al primo.

Due fattori possono condizionare questo calo di consumo, il gradiente termico fra la cavità e l'ambiente esterno, e le proprietà termodinamiche della struttura del forno. In figura 4.4 è riportato il caso più semplice ossia quello relativo all'influenza che ha la massa termica. Su due forni aventi analoghe prestazioni ma differente massa è stata compiuto un test di ripetibilità impiegando la stessa ricetta campione. La ricetta campione è stata individuata fra quelle a bassa temperatura per evitare la sovrapposizione con l'effetto del gradiente termico. Anzitutto il livello ECL è il medesimo per entrambi i test e questo è un risultato in linea con l'aver utilizzato apparecchiature analoghe. Quello che si nota è l'incremento del consumo di prima cottura, ad indicare come una massa maggiore comporta una spesa maggiore per raggiungere una condizione di equilibrio.

Per evidenziare l'influenza che ha un elevato gradiente termico ha sul posizionamento del ECL è necessario definire il punto d'inizio ECL, ossia la prima

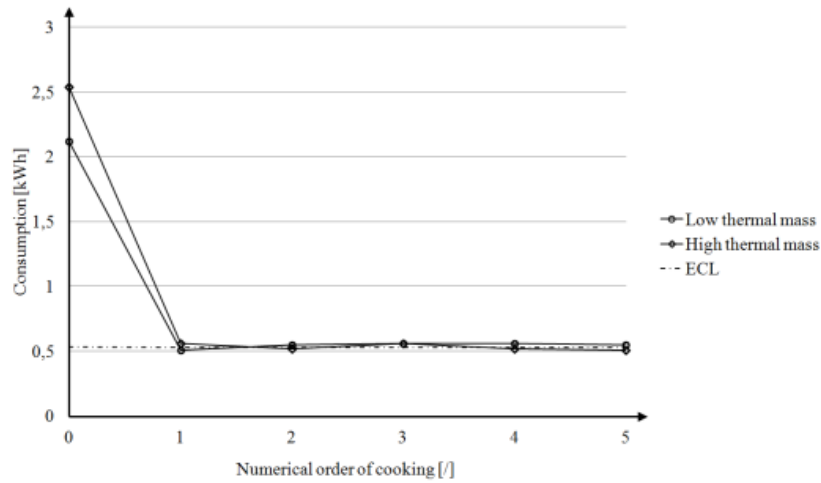


Figura 4.4: Influenza della massa termica sul profilo degli ECL.

misura di consumo appartenente al ECL. Il grafico 4.5 riporta il risultato del test di ripetibilità condotto con due ricette aventi differente livello energetico. Ciò che si nota è che all'aumentare del livello energetico cui deve portarsi la cavità, aumenta la durata del transitorio per la struttura del forno; la prima cottura non è più sufficiente alla struttura del forno per raggiungere una condizione di equilibrio termodinamico.

L'utilizzo sempre più diffuso di materiali coibentanti a ridotta diffusività termica può portare allo spostamento del punto d'inizio ECL in maniera analoga a quanto avviene per il gradiente termico. Tali rivestimenti della cavità hanno proprio il compito di ritardare il passaggio dell'onda termica proveniente dalla cavità, e quindi in ultima analisi, il raggiungimento della condizione di equilibrio per il forno.

Ovviamente l'effetto del gradiente termico può presentarsi associato all'effetto della massa termica, dando luogo contemporaneamente a incrementi del primo consumo rispetto al ECL e spostamento dell'inizio ECL dalla seconda alla n -esima cottura.

Prima di dedicarsi alla determinazione predittiva del posizionamento del ECL si è indagata la sua dipendenza dalla tempistica di apertura porta. Il test di ripetibilità utilizzando la ricetta di TEST è stato eseguito variando la tempistica di apertura porta, sia in fase di carico che di scarico, ogni 5 cotture. I tre valori di tempo selezionati sono stati 1, 2 e 3 minuti. In figura 4.6 è visibile il risultato della sperimentazione.

Escludendo la prima misura che non può per definizione appartenere al ECL, la durata di apertura della porta è stata pari a 2 minuti per la prima cinquina di misure, pari a 1 minuti per la seconda cinquina e pari a 3 minuti per la terza ed ultima cinquina. Ciò che si osserva è la correlazione diretta fra tempistica di apertura porta e posizionamento del ECL: all'aumentare della prima corrisponde un aumento del ECL e viceversa. Questo suggerisce anzitutto che un'ottimizzazione della tempistica di apertura della porta può portare a signi-

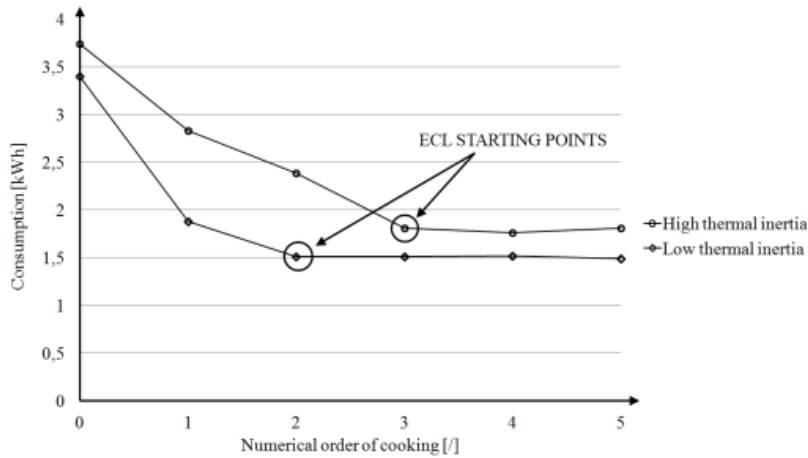


Figura 4.5: Influenza del gradiente termico sul profilo del ECL.

ficativi risparmi d'esercizio e che l'influenza di tale fenomeno non può essere trascurata nel momento nel caso si volesse sviluppare un modello predittivo dei consumi. Difatti, dai dati sperimentali emerge come il passaggio da 2 a un minuto comporta la riduzione dei consumi del 13% mentre il passaggio da 2 a 3 minuti comporta un aumento dei consumi del 4%.

Lo svuotamento dell'aeriforme contenuto in una cavità, con la sua sostituzione con altro a differente temperatura e composizione, è un fenomeno eminentemente convettivo libero, quindi non lineare perché retto da forze spingenti fluidodinamiche e termiche. Si pensi alla scrittura delle Equazioni di Navier-Stokes col termine di buoyancy. In presenza di un numero di Rayleigh adeguatamente alto, si è poi in presenza di moto turbolento, che rende ancora più complessa l'analisi, anche solo in termini medi. Inoltre, va considerato il non istantaneo arresto della generazione di vapore da parte del boiler. Al momento dell'apertura porta si ha la fuoriuscita istantanea del vapore presente in cavità ed il sezionamento delle resistenze nel boiler. Tuttavia, per come è realizzato il boiler, non è possibile avere una interruzione istantanea del flusso di vapore sicché esso continua ad uscire dalla porta originando un transitorio di perdita energetica sotto forma di calore latente. Se la porta viene chiusa abbastanza rapidamente è possibile interrompere tale transitorio conseguendo notevoli risparmi energetici. Differentemente, se la chiusura della porta avviene in seguito al termine di tale transitorio, sarà possibile limitare la sola perdita di calore sensibile dovuta allo scambio di calore fra la struttura del forno e l'ambiente circostante. Chiaramente gli interventi su scambi di calore latente sono più incisivi che non quelli sugli scambi di calore sensibile e questo spiega la non linearità della relazione fra il tempo di apertura porta ed i consumi: al disotto di un tempo caratteristico vengono limitati flussi di calore latente (maggiore efficacia) mentre al di sopra dello stesso vengono limitati flussi di calore sensibile (bassa efficacia).

Quando detto avviene ovviamente con la ricetta di TEST poiché il sistema di controllo utilizza sia le resistenze in cavità che quelle nel boiler: con cotture convettive la relazione torna ad essere lineare all'interno del campo di tempisti-

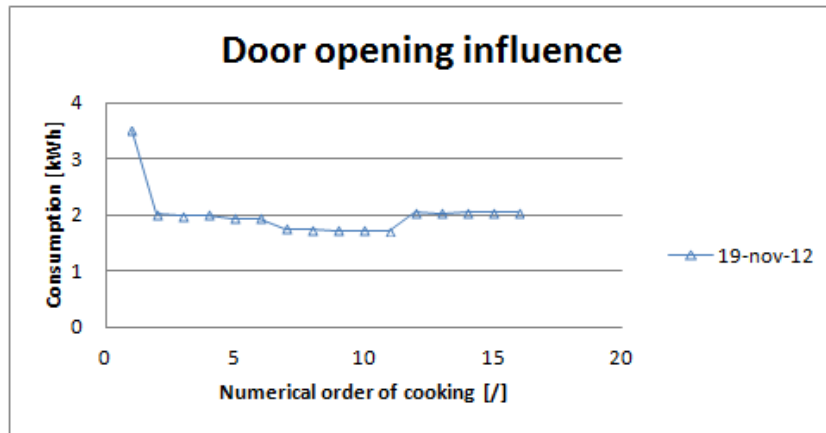


Figura 4.6: Influenza della tempistica di apertura porta sul profilo del ECL.

che d'interesse pratico³. Come si vedrà nel proseguio, l'indagine di predittività del posizionamento degli ECL è stata svolta sotto l'ipotesi che tale tempistica sia fissa, con lo scopo di semplificare il problema.

Verificata l'esistenza degli ECL si è quindi indagata la prevedibilità della componente portante (ossia quella misurabile a forno scarico). Considerato che per la ricetta di TEST il calo di consumo fra la prima e la seconda cottura era già noto con buona ripetibilità⁴, si è trattato essenzialmente di individuare una relazione fra le condizioni ambientali e la posizione del primo consumo.

Il test di ripetibilità è stato eseguito 15 volte⁵ monitorando, oltre ai consumi delle singole cotture, i parametri ambientali relativi a temperatura del boiler e della cavità ad inizio test, temperatura ambiente e dell'acqua di refill durante tutta la prova. Queste variabili sono state individuate fra le tante possibili (umidità ambientale, temperature dell'involucro esterno del forno, ecc.) poiché durante una prima fase di screening sperimentale sono risultate come le più significative per la sperimentazione.

Ai fini della valutazione il solo primo consumo è stato determinante ed i consumi successivi sono stati misurati solo per accertarsi di essere in condizione di ripetibilità (come già spiegato, malfunzionamenti possono manifestarsi impendendo l'identificazione degli ECL). Si è cercato quindi di correlare le variabili di input (temperatura di boiler e cavità ad inizio test e temperatura dell'acqua di alimentazione) alla variabile di output (Consumo energetico), secondo il metodo di Pearson [10].

La matrice di correlazione risultante dall'analisi è riportata in figura 4.7. Per una popolazione di 15 misure ed un valore di confidenza $p=0,05$, il valore di significatività è fissato a $r_s = 0,51$ e come si vede chiaramente, l'unico parametro significativamente correlato ai consumi è la temperatura del boiler a inizio test:

³Il forno, segue ovviamente un andamento esponenziale di raffreddamento ma se osservato su tempistiche brevi può essere approssimato come lineare.

⁴Il secondo consumo è pari al 57,9% del primo consumo, con una deviazione standard pari a 5,9% su un campione di 12 test

⁵Complessivamente sono state effettuate più di 300 cotture durante l'intera fase sperimentale.

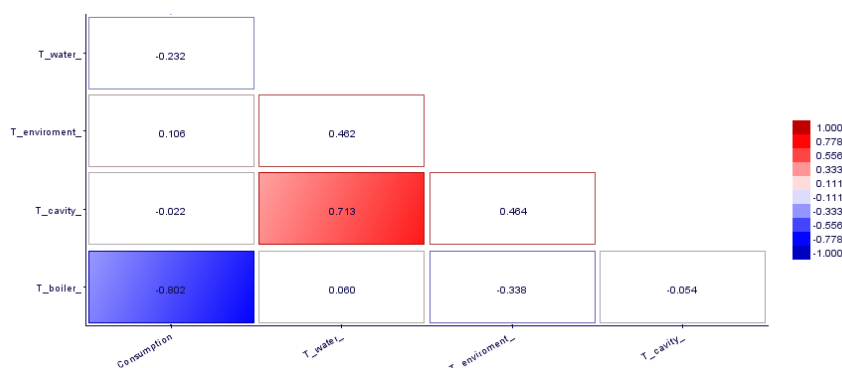


Figura 4.7: Analisi di correlazione secondo il metodo di Pearson per la stima del primo consumo.

all'aumentare della temperatura del boiler corrisponde un calo dei consumi. Il boiler è essenzialmente uno scatolato coibentato che contiene dell'acqua e per tale motivo costituisce un sistema ad elevata inerzia termica. Durante la sperimentazione il forno rimaneva tipicamente in funzione fino a tardo pomeriggio col risultato che frequentemente l'intera nottata non era sufficiente a permetterne il completo raffreddamento ed il giorno successivo i test di ripetibilità iniziavano con il boiler ad una temperatura superiore a quella ambiente. Considerate le potenze in gioco e la rapidità con cui evolve il fenomeno, la generazione di vapore all'interno del boiler può essere considerata suddivisa in due fasi, una prima durante la quale la temperatura dell'acqua aumenta repentinamente ed una seconda durante la quale si ha il fenomeno violento d'evaporazione tipico dell'ebollizione. Logicamente maggiore è la temperatura di partenza dell'acqua del boiler e più rapidamente si giungerà alla generazione di vapore. Sperimentalmente si è osservato come un delta di pochi gradi può risultare in vari secondi di attivazione delle resistenze boiler risparmiati e, considerate le potenze in gioco (14kW), questo risulta in un sensibile risparmio energetico.

In figura 4.8 è visibile la regressione lineare ottenuta graficando i consumi di prima cottura Vs la temperatura del boiler ad inizio test di ripetibilità⁶. È evidente il trend per cui all'aumentare della prima corrisponde un calo della seconda e viceversa. L'analisi di correlazione ha quindi permesso di individuare un buon indicatore predittivo per la ricetta di test.

Una successiva analisi delle componenti principali è stata utilizzata per capire quanta parte della variabilità del problema è spiegabile mediante la temperatura del boiler. In figura 4.9 è visibile come le componenti principali siano cinque, sulle cui prime tre cade la maggior parte della variabilità (oltre il 90%). Limitandosi a due sole componenti principali è comunque ancora possibile spiegare la maggior parte della variabilità (80%).

⁶Coefficiente di determinazione $r^2 = 0,6434$.

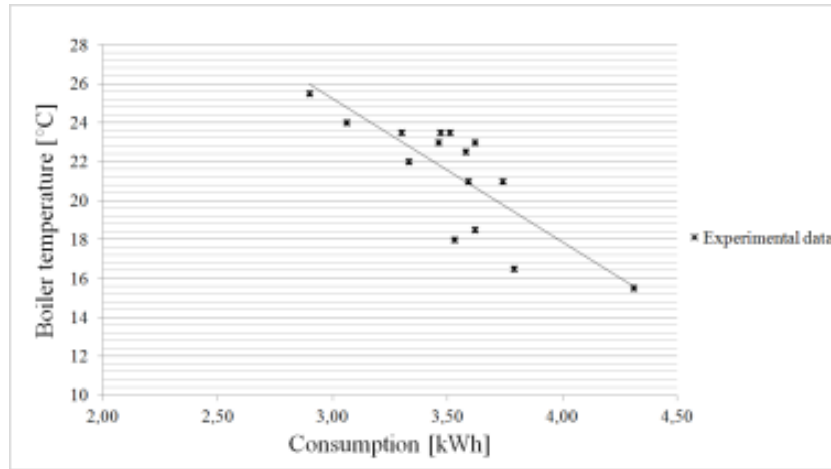


Figura 4.8: Regressione lineare fra i consumi di inizio test di ripetibilità e la temperatura iniziale del boiler.

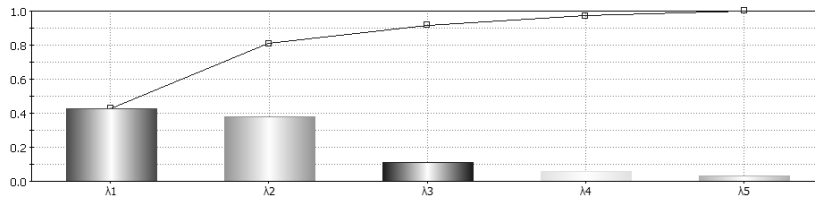


Figura 4.9: Distribuzione della variabilità del problema sulle componenti principali.

La figura 4.10 è il biplot delle variabili di test rappresentate nel campo delle due prime componenti principali. Come evidente, la temperatura del boiler si sviluppa principalmente lungo la seconda componente principale mentre le temperature ambientale, dell'acqua di refill e della cavità ad inizio test, si sviluppano principalmente lungo la prima componente principale. Inoltre, i vettori rappresentanti queste ultime sono praticamente perpendicolari al vettore temperatura boiler e per tale motivo ne sono indipendenti. In merito allo sviluppo lungo la terza componente principale, esso non è rappresentato graficamente ma risulta trascurabile per tutte le variabili di input. Quindi possiamo concludere che la temperatura boiler spiega il 40% della variabilità del problema mentre le condizioni ambientali spiegano un'ulteriore 40%: queste due componenti sono essenzialmente indipendenti e spiegano ciascuna una grande parte della variabilità; il problema risulta quindi ben definito e lo sviluppo di un futuro modello predittivo probabile.

Al termine di questa fase sperimentale si è quindi dimostrato come associare un livello energetico, espresso in termini di consumi di cottura, ad una ricetta è possibile, quanto meno per quanto concerne la componente portante. Per una cottura in particolare, definita ricetta di test, è stato inoltre possibile de-

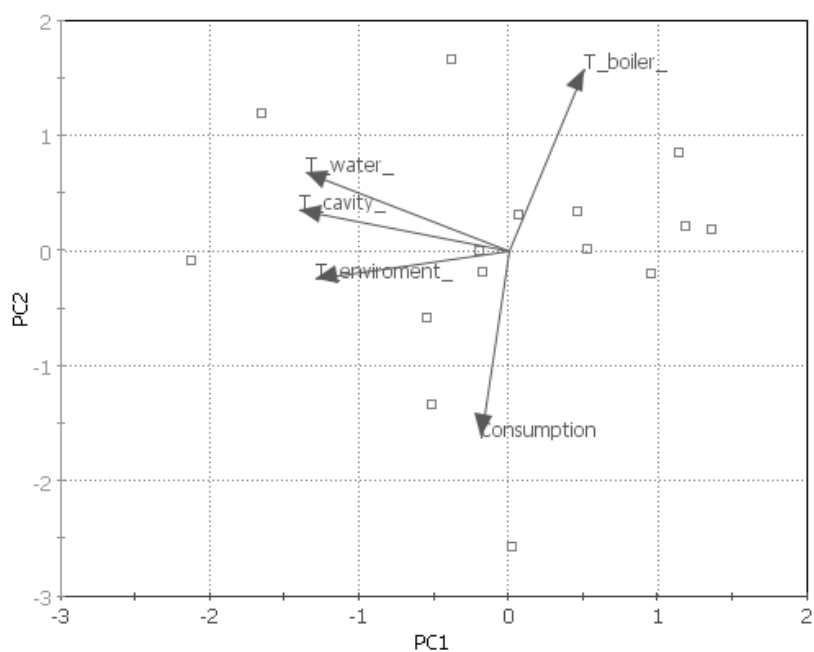


Figura 4.10: Biplot delle variabili di test rappresentate nel campo delle due prime componenti principali.

terminare in via predittiva il posizionamento del livello energetico di cottura (componente portante), sul grafico degli ECL. Il metodo utilizzato si presta inoltre all'estensione all'intera gamma di ricette presenti nel menù automatico dei forni realizzati da EECLtrolux Professional.

Lo studio della componente modulante del livello energetico di cottura, benchè iniziato con buoni risultati, non è stato portato a termine poichè in concomitanza è iniziato lo sviluppo delle applicazioni presentate nella terza parte di questa tesi, per cui non è risultato funzionale.

Parte III

Applicazioni del modello

Il modello energetico della cottura esposto è stato applicato in diverse soluzioni, tutte accomunate dall'essere parte di una più generale strategia di Eco-Cooking. Con questo termine si intende un nuovo approccio all'utilizzo del forno. Mediante lo sviluppo di diverse funzioni, è possibile far divenire il forno manager di se stesso, capace di guidare l'utente ad un utilizzo energeticamente efficiente, riconoscendo quando quest'ultimo lo utilizza in modo inefficiente ed indicandogli come modificare il proprio metodo di lavoro. E' inoltre possibile introdurre funzioni di autodiagnosi, alla ricerca di quei guasti che in modo più o meno evidente possono determinare l'incremento incontrollato dei consumi d'esercizio, guidando i tecnici del servizio assistenza ad un rapido e sicuro intervento. Non ultimo, un forno che implementi funzioni di Eco-Cooking avrà sempre traccia della propria efficienza di funzionamento, permettendo di identificare come un generico fattore, sia esso gestionale o relativo ad un malfunzionamento, influenza i costi d'esercizio. A tutto vantaggio dell'utilizzatore finale.

Capitolo 5

Controllo di basso livello

Prima di sviluppare il modello energetico della cottura e tutte le applicazioni che ne sono direttamente derivate, è stata condotta una lunga attività di studio e caratterizzazione del funzionamento del forno standard, allo scopo di capire con completezza le interazioni fra lo stato termodinamico della cavità ed il sistema di controllo. Tale attività è stata inoltre condotta di pari passo con la caratterizzazione energetica dei consumi di funzionamento di un forno standard [4] e i primi risultati ottenuti hanno dimostrato come la modalità di funzionamento a vapore è quella a più alto consumo energetico. Ci si è quindi posto l'obiettivo di migliorare l'efficienza delle cotture in modalità STEAM, senza ovviamente compromettere la qualità di cottura. La prima sperimentazione ha quindi riguardato la caratterizzazione di una generica cottura "a vapore", eseguendo anche un'apertura porta della durata di un minuto a seguito del termine precottura, monitorando le grandezze fisiche descriventi lo stato termodinamico della cavità, le attivazioni dei carichi e dell'elettrovalvola di reintegro acqua boiler¹. Il risultato è rappresentato in figura 5.1 e tre caratteristiche degne di nota sono indicate con le lettere A, B, e C².

Esse sono di notevole interesse per la riduzione dei consumi di funzionamento per i seguenti motivi:

- A:** In un gran numero di casi, al raggiungimento delle condizioni di set e successivamente all'apertura della porta del forno, si verifica l'intervento dell'elettrovalvola di refill, con sensibile riduzione della temperatura del boiler. Questo comporta che il ripristino dell'umidità di set all'interno della cavità sia più lungo rispetto al caso in cui tale refill non avviene. Considerato che la qualità di un forno è tanto maggiore quanto più rapido riesce a essere il sistema di controllo nel ripristinare le condizioni di set in cavità, si può affermare che posticipare forzatamente il refill dopo la chiusura della porta può portare a un miglioramento delle performaces di cottura del forno.
- B:** Quando il refill del boiler avviene a resistenze del boiler disattivate si ha un istantaneo blocco dell'ebollizione cui corrisponde un sensibile calo dell'umidità in cavità. Tale variazione viene letta dalla sonda lambda con il risultato che si ha l'attivazione delle resistenze boiler. Si ha in altre

¹D'ora in poi più brevemente valvola di refill.

²Per ulteriori chiarimenti sul come sono ottenuti e interpretati i diagrammi delle attivazioni si rimanda alle appendici.

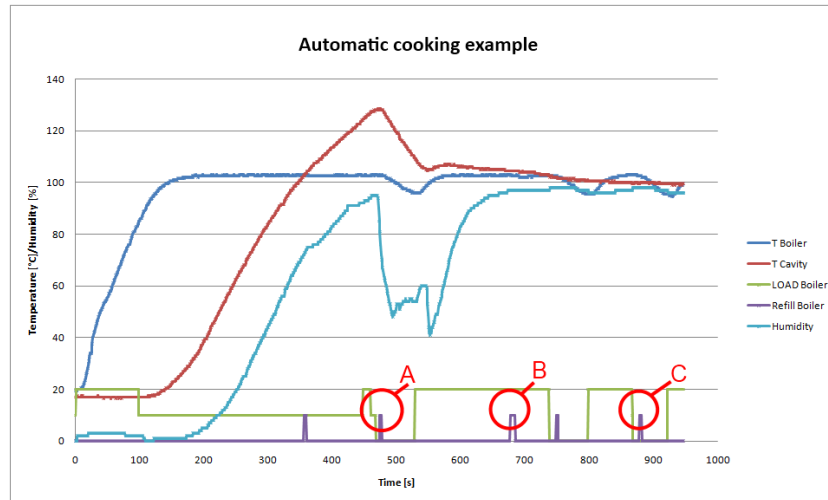


Figura 5.1: Caratterizzazione di una generica cottura “a vapore”.

parole un fenomeno per cui il refill attiva indirettamente il carico boiler introducendo inoltre una considerevole oscillazione dell’umidità in cavità. Differentemente, quando il refill avviene a resistenze del boiler attivate, non si ha alcun feedback in cavità e il suo intervento, viene per così dire mascherato. Ne risulta che un intervento mascherato è raccomandabile per mantenere più regolari possibili le condizioni di set in cavità, incrementando quindi le performace di cottura del forno.

- C:** Per quanto spiegato al punto precedente, quando il refill interviene a fine cottura, attiva in modo indiretto le resistenze boiler, ma tale tardiva attivazione non ha un ruolo significativo per il buon fine della cottura. Basterebbe evitare i refill tardivi e le cotture potrebbero andare a termine senza cali eccessivi dell’umidità in cavità. La determinazione di un tempo a termine entro il quale inibire ogni refill potrebbe portare a notevoli risparmi energetici pur mantenendo inalterate le performace di cottura.

I tre interventi appena trattati permettono un risparmio energetico e il miglioramento delle performance senza richiedere alcuna pesante modifica della logica di termostatazione del forno: in modalità STEAM il forno continuerebbe a termostatare attivando il boiler, in modalità COMBI termostaterebbe attivando le resistenze in cella e regolerebbe l’umidità pilotando il boiler, mentre in modalità CONV termostaterebbe controllando le sole resistenze in cavità. Ma anche queste tre logiche possono essere riviste in un’ottica d’incremento dell’efficienza, agendo sulle sole fasi di preheating per non impattare sulle performance di cottura del forno. A tal proposito si osservi la figura 5.2 in cui è rappresentato una cottura in modalità STEAM della durata di 7 minuti.

In tal caso tutta la fase di precottura è stata portata avanti dal sistema di controllo mantenendo attivato il boiler sino al raggiungimento in cavità delle condizioni di cottura, ossia una temperatura di poco inferiore ai 100°C ed un’u-

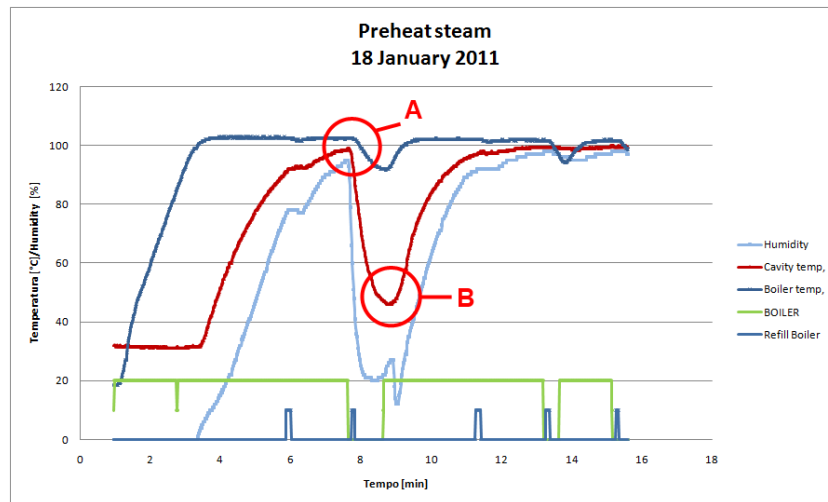


Figura 5.2: Caratterizzazione di una cottura in modalità STEAM.

midità pari a circa il 95%. Analizzando i risultati dell'attività sperimentale è emerso che:

- Dovendo preriscaldare immettendo vapore all'interno della cavità ed essendo quest'ultima un volume aperto, durante una buona parte della precottura si ha l'evacuazione di vapore e, quindi, una notevole perdita energetica.
- L'apertura porta comporta ovviamente un calo del tenore di umidità ma soprattutto un notevole calo di temperatura in cavità. Tale calo è quindi responsabile del tempo necessario al sistema per riportarsi alle condizioni di set, successivamente all'inserimento del cibo e alla chiusura della porta.

Si è quindi deciso di sviluppare una soluzione in grado di limitare l'evacuazione di vapore durante la precottura ed eventualmente di migliorare le performace di cottura, riducendo l'impatto dell'apertura porta. La precottura condotta interamente a vapore è stata sostituita con una di tipo misto, in cui la cavità viene prima preriscaldata in modalità CONV ad una temperatura superiore a quella di set e, quindi, viene saturata in modalità STEAM sino al raggiungimento di un umidità del 100%. Si noti come il delta di temperatura che viene imposto nella fase convettiva ha lo scopo di far fronte al naturale raffreddamento che si ha nella successiva fase STEAM. Il risultato è rappresentato in figura 5.3.

Come si nota dalla figura, mediante questa strategia il valore di umidità a inizio cottura è rimasto inalterato, mentre la temperatura di cavità è aumentata, col risultato che anche il calo di temperatura conseguente all'apertura della porta è minore. In tal modo il tempo necessario al controllo per ripristinare le condizioni di set di cottura è notevolmente inferiore e, conseguentemente, la qualità di cottura non può far altro che aumentare³. Il fatto che l'umidità in

³La temperatura della cavità cala a $80^{\circ}C$ in concomitanza dell'apertura porta mentre con la logia standard tale calo arriva a meno di $50^{\circ}C$.

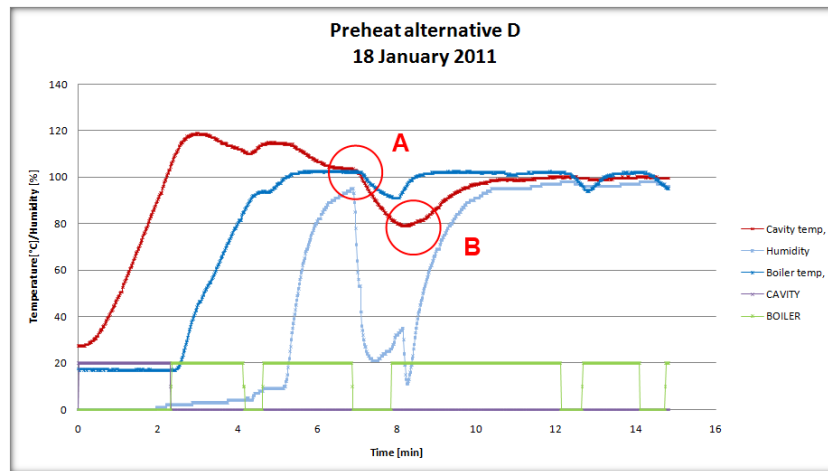


Figura 5.3: Caratterizzazione di una modalità alternativa di precottura per la modalità STEAM.

cavità sia la stessa del caso a logica standard è molto importante da un punto di vista qualitativo, poiché il personale della Chef Accademy Electrolux hanno più volte indicato questo parametro come fondamentale per la qualità finale della cottura, a prescindere dalla rapidità con cui il sistema può umidificare sino al valore di set, una volta chiusa la porta del forno.

Dal punto di vista dei consumi, ciò che ci si attendeva era un calo dell'energia elettrica consumata, per via della riduzione del tempo di preriscaldamento in modalità STEAM e, conseguentemente, un calo dei consumi di acqua. I risultati sperimentali hanno confermato tali aspettative come evidenziato in tabella 5 dove è riportato il consumo elettrico e il tempo complessivo durante il quale il refill è stato attivo (logicamente la portata dell'elettrovalvola correla linearmente tale tempo al consumo d'acqua).

LOGICA	CONSUMO ELETTRICO [kWh]	TEMPO DI REFILL [s]
STANDARD	3,46	36
ALTERNATIVA	3,35	26

Tabella 5.1: Confronto prestazionale fra le due differenti strategie di preheating.

La logica di controllo del forno è stata quindi analizzata, individuando vari accorgimenti mediante i quali è possibile non solo ridurre i consumi di acqua ed energia elettrica, ma anche incrementare le performance di cottura del forno standard oggetto di questo studio. I risultati conseguiti sono tuttavia ragionevolmente estendibili a tutta la gamma di forni elettrici attualmente prodotti da Electrolux Professional Spa.

Capitolo 6

Daily Energy Consumption Evaluator

Nell'ambito dell'automotive è ormai consuetudine dare la possibilità all'utente di visualizzare il consumo medio ed istantaneo della propria autovettura. In letteratura è possibile trovare vari lavori in cui viene dimostrato come la conoscenza di tali informazioni porti l'utente a modificare le proprie abitudini d'utilizzo, più o meno consciamente, col risultato di ridurre i consumi [22]. Tale è il motivo per cui alcune case automobilistiche hanno deciso di non limitarsi a visualizzare i soli dati di consumo, ma di comunicare anche se lo stile di guida istantaneo è più o meno virtuoso, favorendo ulteriormente tale propensione alla guida "efficiente".

Ci si è quindi chiesto, se un simile approccio fosse applicabile anche ai forni professionali per la cottura di alimenti e si è deciso di individuare un metodo di stima dei consumi d'esercizio, in grado di dare un'informazione significativa, riferita alla tipica lunghezza temporale che, nel caso della ristorazione, è la giornata lavorativa.

Analizzando l'attività svolta per la validazione del modello energetico di cottura, ci si è resi conto che la procedura di determinazione degli ECL fornisce di per sé una possibile soluzione al problema. Si consideri il caso di un forno installato presso un grosso centro commerciale, il cui utilizzo consiste esclusivamente nella cottura di polli arrosto dall'orario di apertura a quello di chiusura; in tal caso, l'estensione del ECL sino a coprire le n cotture fornirà la risposta al problema. Basterà difatti sommare $n-1$ consumi appartenenti al plateau ed un consumo di avvio per aver l'informazione cercata. Più nel dettaglio, quest'ultima potrà essere costituita da una componente predittiva ed una correttiva, variabile durante la giornata secondo la seguente logica:

Componente predittiva: Questa componente viene determinata a partire dalla conoscenza del tipo di cottura, della quantità di cibo processato per singolo carico e del numero di cotture da effettuare. Essenzialmente il sistema deve stimare il posizionamento del ECL secondo quanto esposto nella parte dedicata al modello energetico della cottura ed effettuare la sommatoria dei consumi delle n cotture.

Componente correttiva: Durante la giornata possono verificarsi variazioni

rispetto alle condizioni standard, che possono portare all'innalzamento o all'abbassamento del ECL. In tal caso la stima iniziale deve essere corretta iterativamente e il valore di consumo a fine giornata, sarà dato dalla somma dei consumi relativi alle cotture già compiute e i consumi ri-stimati, relativi alle cotture ancora da condurre.

Si noti come il valore di consumo predittivo, essendo determinato in condizioni standard, può essere considerato come risultato ottimale cui l'operatore può fare riferimento. Qualunque variazione che faccia discostare dalle condizioni standard porterà ad una variazione del consumo globale a fine giornata. Alcune delle possibili variazioni non dipendono dall'uso che l'utente fa del forno; è questo il caso della temperatura ambiente che durante la giornata lavorativa va inevitabilmente aumentando, causando una lieve riduzione dei consumi. Altre variazioni sono invece direttamente correlate al modo in cui il forno viene gestito ed un notevole esempio, è la tempistica di apertura della porta fra cotture successive.

A tal proposito sono state condotte delle prove sperimentali in cui il tempo di apertura della porta veniva fatto variare fra due valori differenti andando ad osservare la variazione di posizionamento del ECL. Il risultato di uno di questi test è visibile in figura 6.1.

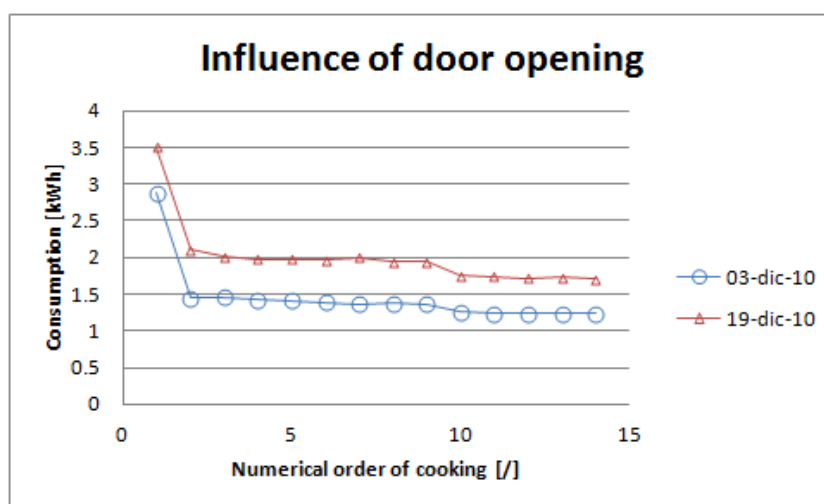


Figura 6.1: Influenza della tempistica di apertura porta sul posizionamento del LEC.

Le due serie di prove sono relative alla medesima cottura, sono state effettuate in due giornate differenti e per ciascuna di esse, la tempistica di apertura porta è pari a 1 e 3 minuti. Come si può chiaramente osservare, a partire dalla decima cottura si è passati dall'apertura porta lunga a quella corta, con un evidente calo del ECL (circa 0,2 kWh per ciascuna cottura).

Il differente tempo di apertura porta non è l'unico fattore che può influenzare il consumo e su cui si può ottimizzare l'attività lavorativa dell'operatore. Si pensi ad esempio alla temperatura di stoccaggio del cibo pronto per la cottura o alla quantità che è possibile inserire per ciascun carico. Data la complessità

del sistema di controllo del forno non sempre vi è una corrispondenza lineare fra la quantità di cibo inserita ed il consumo di cottura: esistono casi particolari¹ in cui variazioni minori della quantità di cibo non risultano in cambiamenti dei consumi.

Due sono i tipici utilizzi di una simile soluzione, uno di analisi ed uno di intervento:

Analisi: In questo caso si vuole indagare come l'organizzazione del lavoro può influenzare i costi d'esercizio. Sarà sufficiente monitorare lo scostamento a fine giornata fra consumi previsti e misurati, rapportando quindi tale dato ai cambiamenti apportati all'organizzazione del lavoro.

Intervento: Più interessante è il caso in cui l'evolvere della previsione di consumo a fine giornata viene interpretato per adottare in tempo reale le opportune correzioni. In un certo senso è possibile prevenire l'incremento di consumi diversamente da quanto avviene in ambito automotive, in cui ci si limita a fotografare la situazione presente.

Comunque lo si voglia utilizzare, appare chiaro che il DECE è uno strumento che rende facilmente attuabile una gestione delle attrezzature energeticamente efficiente, in tutti quegli scenari in cui si realizza una produzione estremamente specialistica ed in grossi volumi, quali per esempio le rosticcerie dei grandi supermercati.

Per tutelare il contenuto di questa ricerca Electrolux Professional ha depositato una domanda di brevetto europeo (European patent Application No. 11194059.9).

¹E che quindi richiederebbero una trattazione dedicata.

Capitolo 7

Live Control Failure Detector

Quello della ristorazione collettiva è un ambito in cui non solo le performance delle apparecchiature devono essere al top, ma anche la loro manutenibilità deve essere resa la più veloce ed efficace possibile. Ogni arresto di un forno per un malfunzionamento viene risolto con l'intervento in situ di personale addestrato della struttura Technical Service, ed ogni ora spesa per la riparazione si traduce inevitabilmente in una perdita economica per il cliente. Oltre a ciò va considerato che anche un mal utilizzo dell'apparecchiatura può determinare una riduzione del numero di clienti che, insoddisfatti dalla qualità del pasto, possono decidere di non frequentare più il punto di ristorazione.

Durante lo sviluppo del modello energetico di cottura ci si è quindi chiesto se fosse possibile trovare una risposta a queste due esigenze; ridurre i tempi di intervento in caso di guasto e garantire il corretto utilizzo del forno. In merito alla prima si è quindi cercato un modo per guidare il tecnico durante l'intervento, fornendo informazioni critiche per la corretta e rapida individuazione del guasto, mentre riguardo la seconda esigenza, si è scelto di definire un ambiente software, integrato nella UI, in grado di comunicare all'utente quando l'utilizzo del forno non è corretto, e come porvi rimedio.

La successiva analisi di fattibilità ha permesso di individuare nel consumo energetico il miglior indicatore possibile, in grado di localizzare eventuali guasti, oltre che di evidenziare un non corretto uso del forno. Questo è valido poiché entrambe queste due situazioni portano inevitabilmente ad anomalie nei consumi d'esercizio, secondo modalità che verranno di seguito presentate.

Durante la sperimentazione si è visto come tali consumi possano essere stimati con una precisione più che sufficiente allo scopo, mediante il monitoraggio delle attivazioni dei carichi di potenza (resistenze cella e boiler) e l'assunzione di una potenza di base sempre attiva a forno acceso, imputabile al funzionamento degli ausiliari (schermo touch, sistema di raffreddamento elettronica, ecc.). Vari test sono stati condotti confrontando i consumi misurati mediante uno strumento di certificazione con i consumi stimati, ottenendo buoni risultati (lo scarto fra le due misure è sempre stato pari a qualche punto percentuale sulla tipiche tempistiche di cottura). In figura 7.1 è riportato un esempio dei test di confronto condotti in cui è chiaro come i consumi stimati cadono in un intorno sufficientemente ristretto¹ dei consumi misurati.

¹Gli scostamenti dal comportamento ideale che si manifestano in presenza di guasti dei driver sono significativamente maggiori.

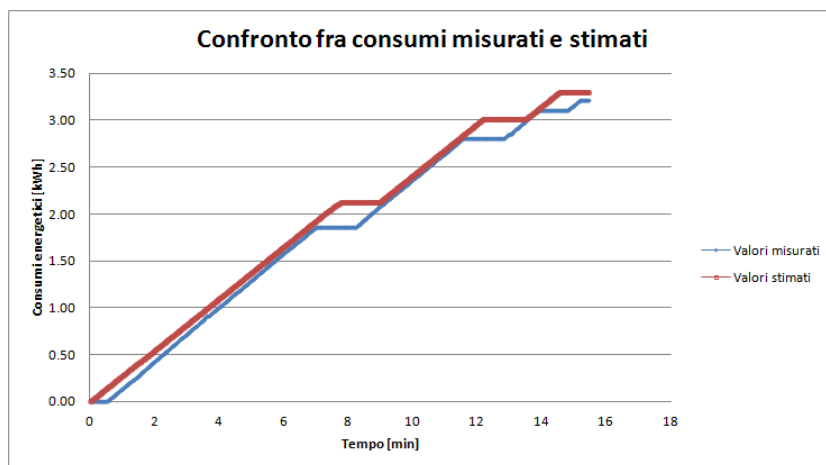


Figura 7.1: Confronto fra consumi stimati e consumi misurati per una cottura campione.

7.1 Localizzazione dei guasti

Essendo i consumi determinati dalla somma di un consumo “basale” e di quello relativo ai “carichi di potenza”, è possibile affermare che ogni consumo anomalo sarà imputabile ad un malfunzionamento di uno di questi. Nel caso in cui il consumo anomalo sia imputabile alla quota basale, il malfunzionamento sarà ragionevolmente sufficientemente evidente da non richiedere una lunga indagine. Per esempio, guasti della ventola di ricircolazione interna alla cavità o della retro illuminazione dello schermo touch sono facilmente individuabili.

Più complesso è il caso in cui a non funzionare siano i driver della cottura. Con questo termine ci si riferisce a quegli elementi che realmente determinano, direttamente o indirettamente, il profilo di utilizzo dei carichi e, quindi, nella maggior parte dei casi ai sensori di cui è dotato il forno. Si consideri per esempio il caso di una cottura in modalità COMBI in cui la cella è termostata attivando le resistenze in cavità e l’umidità è controllata attivando le resistenze all’interno del boiler. In questo caso le prime saranno attivate sulla base del valore di temperatura letto dalla termocoppia presente in cavità, mentre le seconde saranno attivate in funzione del valore di umidità letto dalla sonda lambda, presente anch’essa in cavità. Letture sbagliate porteranno ad attivazioni sbagliate e quindi a consumi sbagliati. La complessità di individuazione di simili guasti è dovuta al fatto che non sempre ad essi è correlato un degrado inaccettabile delle performance; il forno può continuare a funzionare dando dei risultati di cottura non ottimali, ma accettabili e dei consumi fuori controllo, ma di difficile riscontro per l’utente. Conoscendo invece i consumi che è ragionevole attendersi per le singole cotture, sarebbe possibile riconoscere l’instaurarsi di queste insidiose situazioni e guidare quindi il tecnico alla rapida sostituzione dell’elemento guasto.

La soluzione proposta prevede quindi l’identificazione di un guasto dei driver di processo sulla base delle seguenti informazioni:

Driver della cottura: Questa è ovviamente l’informazione più importante

perchè la soluzione sia adottabile. I principali driver sono la temperatura di cavità, la temperatura del/dei punti di misura sullo spillone e la sonda lambda. Tutti e tre sono utilizzati da parte del controllo per monitorare l'evoluzione della cottura ed il rispetto delle condizioni di set in cavità. Ogni cambiamento del segnale da essi inviato alla scheda elettronica di controllo può tradursi direttamente nell'attivazione dei carichi. La conoscenza della modalità di funzionamento del forno permette automaticamente la conoscenza del driver. Durante la cottura è inoltre necessario effettuare il log dei segnali trasmessi dal driver, in modo tale da poterlo in seguito analizzare, alla ricerca di un eventuale comportamento anomalo.

Consumo effettivo: Il consumo effettivo è l'informazione univoca che indica il regime di funzionamento del forno (regolare o irregolare). Esso può essere misurato con un apposito hardware o stimato sulla base delle attivazioni dei carichi, secondo la modalità precedentemente esposta.

Consumo atteso: Questo è il valore cui fare riferimento per determinare se si verifica un funzionamento anomalo. Per poter applicare questo metodo è necessario conoscere i consumi per tutto l'inviluppo d'utilizzo del forno. Tale database può essere determinato adottando il metodo dei livelli energetici di cottura, applicando le opportune approssimazioni e generalizzazioni².

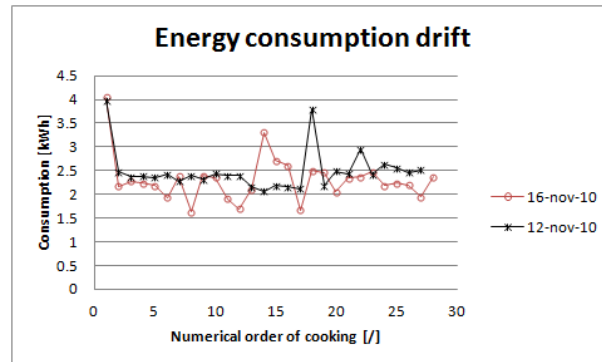


Figura 7.2: Deriva dei consumi nel caso di un malfunzionamento della sonda lambda.

Si consideri il caso sperimentale rappresentato in figura 7.2, in cui è stata ricreata una situazione anomala, installando su un forno una sonda lambda difettata, sostituita presso un'utenza e conducendo ripetutamente una cottura campione in modalità COMBI.

La deriva dei consumi appare evidente e tale variabilità non può che condurre alla conclusione che un difetto di controllo è presente. Nella fattispecie, in questo caso due sono i driver della cottura (e quindi dell'attivazione dei carichi),

²Data l'infinità di combinazioni ricetta/cibo realizzabili con un forno professionale per la cottura di alimenti, non ha senso estendere all'infinito l'indagine secondo il metodo degli ECL. E' pertanto necessario effettuare alcune semplificazioni, come raggruppare in categorie le possibili combinazioni, determinando per tali categorie dei livelli medi di consumo.

la sonda di temperatura e la sonda lambda in cavità. Graficando i profili di temperatura e di umidità registrati durante il test, si è notato come i valori di umidità, benchè appartenenti ad un range fisicamente sensato (tutti i valori letti erano compresi fra 0% e 100%), non erano attendibili per una cottura con generazione di vapore ed umidità di set pari al 100%. Il confronto fra il profilo di umidità misurato e quello ragionevolmente atteso³ ha quindi confermato il malfunzionamento della sonda lambda. Il risultato è stata una attivazione del carico Boiler scorrelata dalle condizioni fisiche in cavità, con consumi oscillanti. L'attività sperimentale appena esposta ha permesso l'impostazione di una logica di individuazione del guasto basata sui seguenti punti:

Esecuzione della cottura: l'utente imposta i parametri della cottura o ne seleziona una fra quelle presenti all'interno del menù automatico. In tal modo il sistema può stimare il consumo atteso e i profili di lettura dei driver più verosimili.

Monitoraggio dei consumi: il sistema monitora il consumo di cottura mediante hardware apposito, o mediante stima basata per esempio sul profilo di attivazione dei carichi.

Analisi differenziale dei consumi: i consumi effettivi vengono confrontati con i consumi attesi e, in caso di differenze sostanziali, il sistema procede con l'analisi dei driver.

Analisi dei driver: I driver del processo (noti sin dalla prima fase) vengono indagati. I profili di segnale da essi generati vengono confrontati con quelli attesi e, nel caso in cui venga individuata una divergenza, viene generato un messaggio d'errore relativo al sensore.

Si noti come l'analisi del comportamento del driver, si basa su un confronto fra pattern di dati sperimentali e non solo sulla verifica di appartenenza ad un range di valori fisicamente possibili. In questo modo ci si sposta dal valutare cosa il sensore può leggere a cosa il sensore dovrebbe leggere, e in questo aspetto va ricercata la maggiore potenza di monitoraggio del metodo presentato, rispetto ad altri diffusamente impiegati in ambito professionale. Quanto sinora esposto evidenzia come sia possibile individuare degli errori di lettura, imputabili al singolo sensore, che hanno ripercussioni sulle attivazioni dei carichi. Ma il termine driver può essere inteso anche in senso più ampio, includendo anche dispositivi che possono condizionare con il loro malfunzionamento direttamente le condizioni fisiche in cavità.

Si pensi per esempio alla valvola di aspirazione, la cui apertura comporta un calo del tenore di umidità in cavità. Un suo malfunzionamento potrebbe portare in determinate condizioni all'attivazione del carico boiler, con un incremento dei consumi. In tal caso, la logica di controllo non cambierebbe ma semplicemente si dovrebbe indagare anche la coerenza del profilo di attivazione della valvola di aspirazione.

³In tutte le cotture coinvolgenti generazione di vapore si ha un andamento sigmoide con un asintoto orizzontale pari al valore di set, nella stragrande maggioranza dei casi raggiunto entro il termine della cottura

7.2 Individuazione del non corretto utilizzo

Una interessante applicazione del metodo appena esposto è l'individuazione del non corretto utilizzo dello spillone multipunto, in dotazione al forno da parte dell'utente. Si pensi ad esempio al semplice caso in cui una cottura viene condotta mantenendo le condizioni di set in cavità sino al raggiungimento di una prefissata temperatura al cuore del cibo. In questo caso, un erroneo posizionamento dello spillone altererà inevitabilmente la tempistica globale di cottura. Uno spillone infilato non completamente nel cibo, darà sempre una temperatura indicata superiore a quella effettiva al cuore del pezzo, col risultato che la cottura durerà meno e i consumi saranno ovviamente inferiori.

Nel caso di processi più complessi, in cui il sistema effettua una stima del tipo di carico (quantità e pezzatura) per poi impostare di conseguenza le condizioni di cottura, l'effetto di un erroneo posizionamento può essere ancora più evidente. Oltre al non raggiungimento del cuore dovuto a un insufficiente profondità di infilamento, un caso tipico di mal posizionamento è rappresentato in figura 7.3; lo spillone è posizionato troppo in prossimità della superficie esterna del pezzo di cibo, col risultato che il pattern delle temperature misurate risulta compromesso, non solo in termini quantitativi ma anche qualitativi. Il confronto fra pattern di dati diventa quindi un'ulteriore utile strumento per l'individuazione di mal posizionamenti (oltre al raggiungimento della temperatura al cuore troppo rapidamente). Come già spiegato, queste situazioni di malposizionamento risultano piuttosto insidiose poiché raramente comportano il fallimento critico della cottura, col risultato che il cuoco sarà portato a imputare alla scarsa performance del forno il cattivo risultato. Uno studio dei profili di temperatura dei punti di misura dello spillone, condotto sulla base dei consumi divergenti rilevati, può permettere l'individuazione dell'utilizzo non corretto. L'informazione relativa al mal posizionamento dello spillone può quindi essere visualizzata a schermo, permettendo al cuoco di migliorare il proprio risultato, "sotto la guida intelligente del forno".

Data la rilevanza di quanto scoperto si è deciso di procedere al deposito di una domanda di brevetto europeo (European patent Application No. 11194063.1), in cui è coperta sia la funzionalità di localizzazione dei guasti che quella di identificazione del non corretto utilizzo.

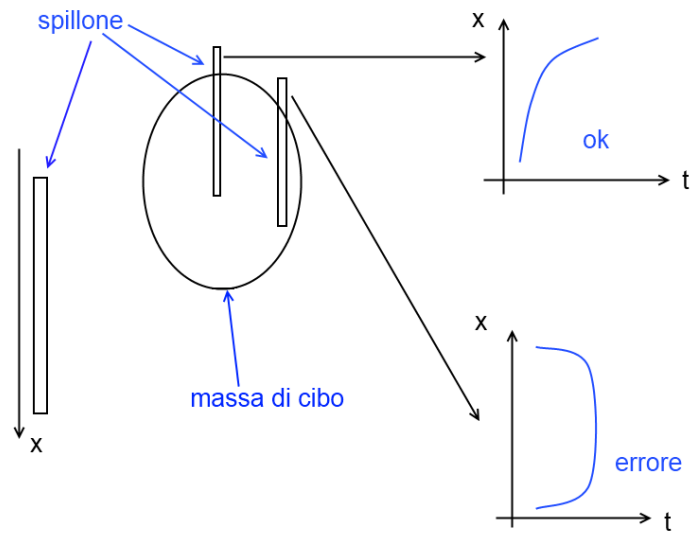


Figura 7.3: Rappresentazione schematica di un tipico errore di posizionamento dello spillone.

Capitolo 8

Minimal Cooking Energy Path Finder

Una delle idee alla base della ricerca compiuta è che, per qualunque apparecchiatura, è possibile individuare un “modo corretto d’uso” mediante il quale ridurre i consumi operativi. Considerato che i forni professionali per la cottura di alimenti realizzati da Electrolux Professional Spa presentano innumerevoli soluzioni tecniche atte a rendere più semplice l’esperienza d’uso dell’utente, è parso naturale ipotizzare un ambiente software in cui l’utente venga guidato all’utilizzo consapevole ed energeticamente efficiente del forno. Come precedentemente esposto, durante una tipica giornata lavorativa, un forno professionale per la cottura di alimenti viene utilizzato per effettuare differenti cotture in successione. Le pietanze non vengono inoltre necessariamente preparate a ridosso del consumo, potendo utilizzare un abbattitore per la conservazione e un forno per la rigenerazione al momento del servizio. Ecco quindi che la pianificazione delle preparazioni non deve più necessariamente seguire l’ordine di servizio, ma può quindi essere organizzata secondo criteri differenti, quali per esempio la minimizzazione dei consumi globali d’esercizio.

Il problema cui è stata cercata risposta è quindi il seguente; data una serie di cotture da effettuare durante l’intera giornata lavorativa, è possibile individuare un ordine di esecuzione tale da rendere minimo il consumo globale d’esercizio? tale ordine può venir comunicato all’utente da parte del forno a inizio giornata lavorativa?

Nel capitolo Modello energetico di cottura si è visto come a ogni cottura sia possibile associare un determinato livello energetico di consumo, tanto più elevato quanto maggiore è il disequilibrio che si realizza durante la cottura fra la cavità e l’ambiente circostante. Abbiamo inoltre osservato come per raggiungere un determinato livello energetico, dell’energia deve essere assorbita dal sistema forno+cibo, o deve essere da esso ceduta all’ambiente circostante. In merito a tale aspetto si faccia riferimento alla figura 8.1 in cui è rappresentata l’evoluzione di un sistema forno+cibo durante una singola cottura.

La figura è analoga a quella già presentata nella parte dedicata alla modellizzazione dei processi di cottura, ma in questo caso le frecce rappresentanti i flussi energetici assumono maggiore importanza. Difatti, nel caso in cui alla prima cottura ne segua una seconda e poi una terza, il forno si porterà in successione

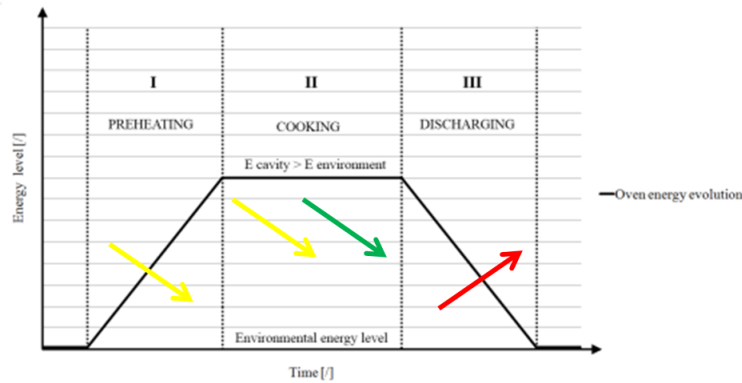


Figura 8.1: Evoluzione energetica del sistema forno+cibo durante una singola cottura.

su diversi livelli energetici di cottura ed in tale situazione, non si potrà più dire che a ogni fase di cottura segue una fase di scarico, poichè essa sarà unica per l'intera sequenza. Rimarrà altresì vero che ogni cottura è preceduta da una fase di precottura e tale fase sarà tanto più breve ed energeticamente poco dispendiosa, quanto più vicini sono gli ECL associati alle cotture che si susseguono. Nella fattispecie si verranno potenzialmente a creare due situazioni distinte:

Innalzamento del ECL: in questo caso la cottura precedente si trovava su un ECL inferiore ed è necessario fornire al sistema forno+cibo dell'energia. Tale energia continua a essere energia indirettamente correlata al processo di cottura e per tale motivo utile.

Abbassamento del ECL: in questo caso la cottura precedente si trovava su un ECL superiore ed è necessario che il sistema forno+cibo smaltisca energia. Tale energia, se non diversamente utilizzata, rappresenta uno spreco esattamente come avveniva per la quota smaltita durante la fase di scarico.

Sulla base di questo schema, è possibile ipotizzare i criteri su cui basare una prima logica di sequenziamento ottimale di n cotture: la minimizzazione degli scarti fra ECL successivi e del ECL dell'ultima cottura appartenente alla serie. Per quanto concerne il primo requisito, se si considera che ogni abbassamento di ECL rappresenta uno spreco, è evidente come ogni sequenza che minimizzi per frequenza ed intensità le riduzioni di LEC porterà ad un risparmio complessivo. Lo scopo del secondo requisito appare sufficientemente chiaro; l'ultima cottura è l'unica cui effettivamente segue una fase di scarico, per tanto l'unico modo per contenere i consumi inutili ad essa legati, è assicurarsi che il forno si trovi a fine sequenza al minor ECL possibile¹.

Noti i criteri con cui individuare un sequenziamento ottimale, è stato possibile impostare delle basi per l'attività di sviluppo. Anzitutto date n cotture vi saranno $n!$ possibili sequenze fra cui quella ottimale. Inoltre, a ciascuna cottura è associato un ECL quindi ogni possibile sequenza presenta $n-1$ variazioni

¹Nel caso più semplice in cui la sola temperatura di cavità sia esemplificativa del ECL questo equivale a chiedere che venga lasciata per ultima la cottura a più bassa temperatura

di livello energetico fra ECL successivi. Trattandosi di fatto di uno studio di fattibilità, si è deciso di moderare il livello di complessità, limitando l'indagine alle sole cotture monofase. Tale restrizione si è resa molto utile al momento di scegliere dei parametri operativi, indicativi della posizione del ECL.

Con un numero praticamente illimitato di possibili ricette effettuabili con un forno professionale, non è pensabile determinare la totalità degli equivalenti ECL. Purtroppo conoscere il posizionamento di questi ultimi è fondamentale per individuare le fasi di abbassamento degli ECL (sono quelle da minimizzare). Per tale motivo è stato necessario determinare dei criteri approssimati per la stima dei posizionamenti reciproci fra ECL successivi². Ovviamente tale approccio, benchè permetta di trovare una soluzione realistica al problema di partenza, comporta l'introduzione di una certa imprecisione; si passa dal cercare la singola soluzione ottimale ad una delle soluzioni prossime a quella ottimale.

Per garantire una agevole traduzione in algoritmo di controllo del forno della soluzione indagata, si è scelto di applicare le seguenti tre semplici regole di ordinamento:

PRIMA REGOLA: le n cotture previste vengono divise in cotture utilizzando vapore (COMBI e STEAM) e cotture esclusivamente convettive (CONV).

SECONDA REGOLA: I due gruppi vanno ordinati in funzione della temperatura di cottura decrescente.

TERZA REGOLA: Il gruppo di cotture esclusivamente convettive deve precedere il gruppo di cotture utilizzando il vapore.

La prima e la terza regola traducono in pratica quanto scoperto indagando l'esistenza degli ECL; i consumi delle cotture coinvolgenti la generazione di vapore presentano consumi che decrescono significativamente all'aumentare della temperatura di partenza del boiler. Le cotture convettive, riscaldando la massa del forno, possono essere anche utilizzate per preriscaldare il boiler secondo un approccio "passivo". Il grafico 8.2 presenta i dati sperimentali relativi a tre test di riscaldamento passivo del boiler. La prova è stata condotta semplicemente monitorando l'evoluzione temporale della temperatura del boiler³ durante tre differenti cotture a vuoto convettive. Considerato che alcuni gradi possono essere sufficienti per garantire una riduzione dei consumi, appare evidente la significatività del fenomeno di riscaldamento passivo.

Per quanto concerne la seconda regola, si è fatta l'ipotesi forte che all'interno del singolo gruppo (cotture a vapore e convettive) il fattore più significativo al fine di determinare gli ECL sia la temperatura; si è quindi ipotizzato una sostanziale equivalenza fra l'ordinazione secondo ECL decrescente e quella secondo temperatura di set decrescente. Come già accennato, l'ultima cottura di una serie deve essere necessariamente quella a minor ECL per ridurre al minimo la quota di energia ceduta dal sistema all'ambiente. Per tale motivo, individuata fra le n cotture quella a ECL minore, a essa viene necessariamente assegnata l'ultima posizione. Per verificare la validità di questo set di regole d'ordinamento è stata ovviamente condotta una campagna sperimentale. Sono state selezionate le seguenti 8 differenti cotture monofase, comprendenti modalità COMBI,

²Associati alle rispettive cotture successive.

³Partendo dalla condizione di equilibrio con l'ambiente circostante

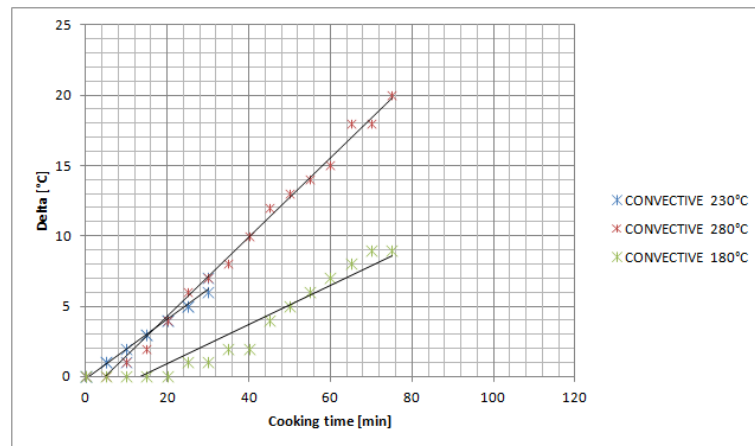


Figura 8.2: Test di riscaldamento passivo del boiler.

CONV e STEAM, e temperature e livelli di umidità variabili in un ampio range operativo:

COTTURA 1	CONV 225°C	10 minuti
COTTURA 2	STEAM, 100 % Ur	10 minuti
COTTURA 3	CONV, 150°C	10 minuti
COTTURA 4	CONV, 250°C	10 minuti
COTTURA 5	COMBI, 125°C, 100 % Ur	10 minuti
COTTURA 6	CONV, 200°C	10 minuti
COTTURA 7	CONV, 175°C	10 minuti
COTTURA 8	COMBI, 150°C, 100 % Ur	10 minuti

Tabella 8.1: Cotture selezionate per l'indagine

Tali cotture (riportate in tabella 8) sono state quindi ordinate secondo le tre regole presentate per ottenere la sequenza ottimale e secondo il metodo latin square per ottenere 8 sequenze non ottimali. Abbiamo quindi eseguito le serie misurando il tempo complessivo e i consumi di esecuzione. Le 8 cotture sono state eseguite in serie come riportato nelle sequenze, facendo seguire ad ogni termine precottura ed ogni termine cottura un minuto di apertura porta. Il risultato del test è visibile in figura 8.3 dove il consumo complessivo di esecuzione della sequenza è confrontato con il corrispettivo tempo di esecuzione complessivo.

Come chiaramente visibile, la sequenza ottimale ha sempre evidenziato non solo un minor consumo globale d'esercizio, ma anche una minor tempistica di esecuzione. Entrambi questi risultati sono in linea con quanto atteso e derivano dall'effettiva minimizzazione dei salti fra ECL successivi.

In seguito a questo risultato si è deciso di validare una delle ipotesi sperimentali, ossia la sostanziale invariabilità della quantità d'energia che è necessario cedere all'ambiente circostante ogni qual volta il forno deve passare ad un ECL inferio-

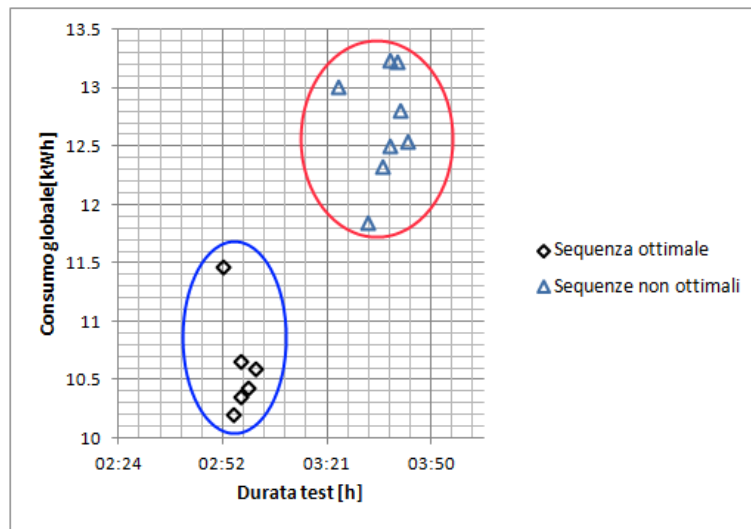


Figura 8.3: Test di sequenziamento ottimale.

re. Tale quantità prescinde dalla strategia di trasferimento, assumendo valori analoghi nel caso in cui il forno venga raffreddato con un getto d'acqua in cavità⁴ o, come avviene di default sui forni professionali per la cottura di alimenti commercializzati da Electrolux Professional Spa, semplicemente aspirando aria fresca ed evacuando aria calda. La verifica è stata condotta ripetendo le sequenze non ottimali, variando la procedura precedentemente utilizzata, ossia aprendo la porta del forno ad ogni intervento della modalità di raffreddamento. Il risultato del test è visibile in figura 8.4 dove nuovamente il consumo complessivo di esecuzione della sequenza è confrontato con il corrispettivo tempo di esecuzione complessivo.

Anzitutto si osserva come i consumi globali di esercizio relativi alle sequenze non ottimali con apertura porta sono essenzialmente analoghi; il lieve calo è imputabile al minor tempo di utilizzo degli ausiliari durante l'esecuzione del test. In effetti, aprendo la porta si riduce la durata delle fasi di precottura (di raffreddamento) fra cotture successive, col risultato che viene analogamente ridotto il tempo di utilizzo della ventola di raffreddamento, dell'elettronica di controllo, ecc.⁵.

Oltre al consumo è interessante notare come le tempistiche ottenute aprendo la porta siano comunque superiori a quelle relative alle sequenze ottimali, che sono state registrate conducendo le precotture di raffreddamento a porta chiusa. Ovviamente, se si fossero ripetute anche le sequenze ottimali con l'apertura porta in raffreddamento, si sarebbero potuto ridurre ulteriormente i tempi complessivi di esecuzione. Inoltre, il funzionamento della ventola di raffreddamento a porta aperta genera un notevole inquinamento acustico, pertanto, adottando

⁴I forni professionali per la cottura di alimenti sono solitamente dotati di una doccetta utilizzata per ridurre la temperatura della cavità spruzzando acqua sulle pareti o per veloci risciacqui a seguito di cotture leggere.

⁵La potenza istantanea degli ausiliari si aggira su valori di 500 – 750 watt, funzione del modello di forno.

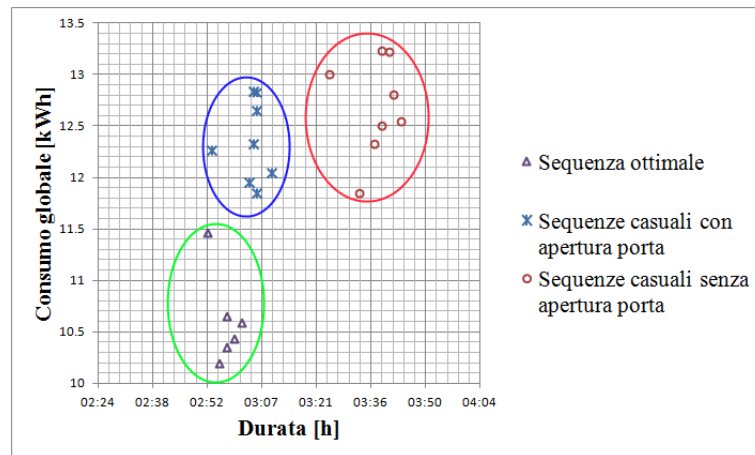


Figura 8.4: Test di sequenziamento ottimale con apertura porta in fase di raffreddamento.

una logica di ordinamento ottimale non solo è possibile ridurre i consumi e le tempistiche di preparazione dei pasti, ma tale risultato è addirittura conseguibile aumentando il comfort per gli operatori.

Infine, è importante notare come la riduzione dei consumi e delle tempistiche non viene raggiunta a discapito della qualità di cottura, poichè viene maturata lavorando sulle fasi di precottura e scarico, ossia quando non è presente cibo all'interno della cavità, lasciando quindi del tutto inalterate le fasi di cottura.

Data la rilevanza di quanto scoperto si è deciso di procedere al deposito di una domanda di brevetto europeo (European patent Application No. 11194078.9) in cui il campo di applicabilità della soluzione è stato ulteriormente espanso.

Anzitutto è stato esposto come questa soluzione potrebbe essere implementata all'interno della User Interface del forno, e come potrebbe trovare utilizzo in uno scenario tipico. Lo chef a inizio giornata di lavoro seleziona le cotture da effettuare durante la giornata, le comunica al sistema di controllo del forno, inserendole a schermo, ricevendo in risposta la sequenza ottimale secondo cui ordinarle.

Oltre a ciò è stata prevista la possibilità di inserire dei vincoli alla libertà di sequenziamento da parte del sistema. Vi sono per esempio cotture che non possono essere precedute da altre; è questo il caso per esempio delle cotture di pasticceria che non possono seguire le grigliature, benchè secondo le tre regole presentate, questa sarebbe la precedenza assegnata. L'elevata quantità di residui che una grigliatura lascia all'interno della cavità altererebbe irrimediabilmente il gusto delle torte cotte in seguito e, per tale motivo, è bene introdurre una regola di priorità secondo cui grigliature non possono precedere cotture di pasticceria. Un'alternativa ipotizzata è l'inserimento all'interno della sequenza di cicli di lavaggio; in tal caso il sistema potrebbe suggerire allo chef di far comunque precedere le grigliature alle cotture di pasticceria, ma inserendo un lavaggio intermedio. Dal punto di vista energetico, il controllo è in grado di gestire un

processo di lavaggio in modo del tutto analogo ad una generica cottura. Infine è stata ipotizzata la possibilità di suggerire all'utente la sostituzione di una o più cotture, inserite a schermo, con delle altre, qualitativamente analoghe ma in grado di garantire un passaggio più graduale (e quindi vantaggioso) dalla prima all'ultima cottura. Quest'ultima funzionalità è resa possibile grazie al fatto che attualmente i forni professionali per la cottura di alimenti realizzati da Electrolux Professional presentano un menù automatico di cottura, in cui le possibili cotture sono già organizzate in gruppi coerenti dal punto di vista organolettico e sensoriale. Il sistema di controllo dovrebbe quindi solo controllare se, indicata una certa cottura da parte dello chef, esiste una cottura appartenente allo stesso gruppo (primi, carni rosse, ecc.) che meglio si colloca all'interno della sequenza.

Capitolo 9

Il lavaggio integrato

A conclusione di questa parte della tesi, viene presentata una soluzione completa per il lavaggio, impiegata sul forno progettato per il nuovo brand Grand Cuisine¹. Il suo sviluppo ha rappresentato un ottimo esercizio in cui è stato possibile applicare sinergicamente i criteri alla base del modello energetico della cottura e le potenzialità di una nuova classe di detergenti, la cui azione è principalmente basata sull'impiego di enzimi.

Ad alcuni mesi dall'inizio del dottorato, è stato chiesto ad Electrolux Professional Spa di sviluppare una nuova gamma di apparecchiature per la cottura di alimenti (forno, abbattitore, piano wook, piano bruciatori, piano induzione, piano griglia e macchina sottovuoto), aventi caratteristiche professionali ma utilizzabili in un contesto residenziale. Questo requisito, benchè apparentemente di facile formulazione, ha comportato un notevole sforzo di sviluppo durato più di due anni e parzialmente conclusosi² il 17 settembre 2012, con la presentazione ufficiale della gamma GC. Il progetto ha coinvolto la quasi totalità dei moduli che costituiscono un forno professionale e lo scrivente è stato a capo dello sviluppo del controllo di lavaggio e del detergente dedicato.

I sistemi di lavaggio presenti sui forni sviluppati da Electrolux Professional sono di tipo aperto, costituiti da un circuito idraulico in cui è possibile veicolare acqua di rete o soluzioni di lavaggio³, prelevata mediante una pompa da un serbatoio esterno dedicato. Il circuito idraulico è collegato ad un braccetto cavo calettato in cavità, che, presentando dei fori opportunamente disposti, viene posto in rotazione durante il passaggio del liquido. Il risultato è che il fluido di lavoro, passando per tale braccetto, viene uniformemente disperso su tutte le superfici della cavità. Sul fondo di quest'ultima è presente un foro attraverso il quale i liquidi utilizzati durante il lavaggio possono defluire allo scarico. Tale caratteristica rende il sistema "aperto".

¹D'ora in poi semplicemente GC.

²Si può affermare che l'attività di progettazione è terminata dando però inizio alla fase di stabilizzazione del prodotto, durante la quale vi saranno interventi progettuali volti ad aumentare la qualità del prodotto, renderne più efficiente la realizzazione, ecc.

³In ambito professionale vengono utilizzati dei detergenti per la pulizia e dei brillintanti per la finitura delle superfici a fine lavaggio.



Figura 9.1: Il forno Grand Cuisine installato presso un'utenza.

Il lavaggio viene condotto caricando il detergente (o brillantante) nel circuito idraulico e spruzzandolo attraverso il braccetto in cavità, mediante l'introduzione di acqua di rete in pressione, sempre nel circuito idraulico. Di fatto l'acqua "spinge all'esterno il detergente (o brillantante) che trova dinnanzi a sé". Una volta spruzzato il detergente, la cavità viene termostata per il tempo necessario a garantire una buona azione chimica e quindi, veicolando abbondante acqua nuovamente attraverso il circuito idraulico ed il braccetto, la cavità viene risciacquata.

Questo sistema presenta buone prestazioni se utilizzato con detersivi professionali che presentano un'efficacia notevolmente superiore a qualunque prodotto domestico attualmente utilizzato. Si tratta in effetti di composti altamente basici (pH compreso fra 13 e 13.9 mentre i prodotti domestici non vanno oltre 10-11), molto spesso ad elevata concentrazione di idrossido di sodio o analoghi forti alcalinizzanti e pertanto capaci di una azione efficace anche se utilizzati in piccola quantità e per tempi contenuti.

Sin dalla prima analisi di fattibilità è stato chiaro come il sistema di lavaggio installato sul forno GC non avrebbe potuto utilizzare tali detersivi in quanto presentano rischi d'utilizzo incompatibili con l'impiego residenziale. Inoltre, alcune specie chimiche come l'idrossido di sodio, non sono compatibili con i materiali impiegati nel forno (come il frame della porta che è realizzato in fusione di alluminio). Ciò non di meno, il tipo di sporco da trattare sarebbe stato "professionale" e quindi decisamente più impegnativo rispetto a qualunque variante sia oggi possibile trovare in un contesto residenziale. A tal proposito si osservi la figura 9.3 in cui è ritratto il risultato di una tipica cottura eseguibile con il forno GC.

Si può quindi affermare che l'obiettivo è stato pulire uno sporco maggiore con un detergente di efficacia minore e, per questo motivo, un requisito fonda-

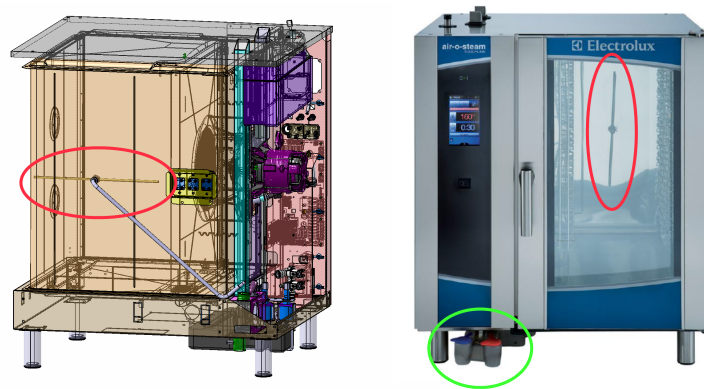


Figura 9.2: Il sistema di lavaggio attualmente installato sui forni prodotti da Electrolux Professional. In rosso è evidenziato il braccetto rotante posizionato sullo schienale del forno utilizzato per spruzzare uniformemente all'interno della cavità acqua, detergente o brillantante. In verde sono evidenziati i serbatoi esterni al forno in cui sono conservati il brillantante ed il detergente

mentale per il nuovo sistema di lavaggio è stato sin da subito la possibilità di utilizzare al massimo il potenziale del detergente. Questo ha portato a scegliere un sistema di lavaggio chiuso con ricircolo, in modo da poter utilizzare più volte la stessa soluzione di lavoro, sino appunto alla sua completa perdita di efficacia. Inoltre, è stato richiesto di mantenere l'utilizzo della funzione di lavaggio la più semplice possibile, limitando l'intervento dell'utente al semplice porre il detergente all'interno della cavità ed avviare il lavaggio, selezionando la funzione dal menù a schermo. Per poter soddisfare tale requisito è stato impossibile separare la funzione detergente da quella brillantante. Diretta conseguenza di tale condizione è stata lo sviluppo di un'unica formulazione chimica, in grado di assolvere entrambe le funzioni.

E' stato quindi progettato il sistema di lavaggio chiuso rappresentato schematicamente in figura 9.4.

Come chiaramente visibile sotto la cavità è presente un serbatoio di ricircolo, in cui alternativamente viene caricata soluzione detergente o acqua di rete. Una pompa di ricircolo preleva quest'ultima dalla vaschetta e la porta in cima alla cavità, facendola quindi cadere di fronte alla ventola convettiva. Se quest'ultima non è attivata, il fluido cade direttamente in fondo alla cavità e da lì, attraverso un foro protetto con filtro, torna nuovamente al serbatoio di ricircolo (figura a SX). Diversamente, quando la ventola è attiva, essa aspira centralmente il fluido di lavoro che cade dal cielo della cella e lo spruzza radialmente. I flussi d'aria in cavità sono poi sufficienti a far sì che il detergente lambisca tutte le superfici interne alla cavità (figura DX). Le resistenze elettriche circondanti la ventola, che sono utilizzate per termostatare la cavità, possono essere utilizzate per riscaldare il fluido di lavoro; è sufficiente che esse siano attivate durante la ricircolazione del detergente perché quest'ultimo, lambendone la superficie, si riscaldi. Il modo in cui controllare tali resistenze durante la ricircolazione del detergente è la base



Figura 9.3: Residui presenti all'interno della cavità del forno GC in seguito ad una cottura di carne grigliata.

su cui si fonda tutta la logica di controllo, oltre che il principale fattore in grado di determinare l'efficacia di lavaggio del sistema.

9.1 Teoria della detergenza

Con il termine detergenza si intende l'azione di rimozione dello sporco depositatosi su una superficie mediante due tipi di azioni sinergiche, quella meccanica e quella chimica.

Entrando maggiormente nel dettaglio, è possibile individuare i seguenti fattori che concorrono a determinare l'efficacia di un lavaggio(riportati schematicamente in figura 9.5):

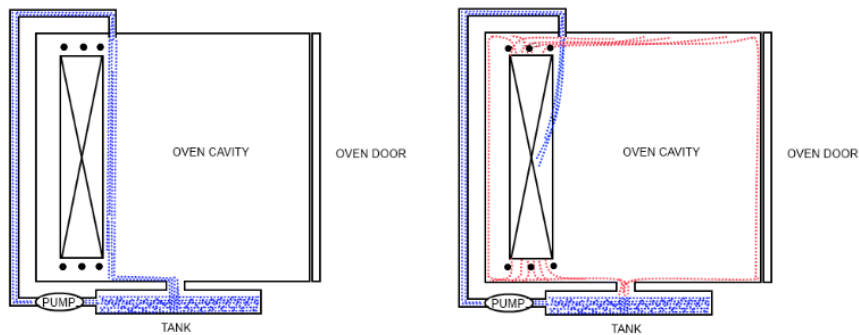


Figura 9.4: Il sistema di lavaggio forno GC con ricircolo in funzione e ventola spenta (SX) e con ventola accesa (DX).

Temperatura: La temperatura alla quale avviene il lavaggio gioca un ruolo cruciale nel favorire l'azione delle specie chimiche presenti all'interno dei detergenti. Come regola generale, al suo aumentare aumenta anche l'efficacia dell'azione chimica in termini di dinamica, ma vi sono dei casi in cui esiste un valore massimo che non è possibile superare. L'esempio più significativo è quello relativo alla presenza di enzimi nella formulazione chimica del detergente; in tal caso vi sono temperature al di sopra delle quali essi deteriorano⁴ e per tanto sarà necessario porre un limite alla temperatura massima di lavaggio. Volendo spingersi oltre la regola generale, è utile considerare come la curva d'efficacia delle specie chimiche in funzione della temperatura può assumere forme anche differenti da quella lineare (una forma molto comune è la distribuzione gaussiana). E' quindi opportuno selezionare la temperatura di massima efficacia per il determinato detergente piuttosto che la massima raggiungibile dal sistema di lavaggio.

Azione meccanica: L'azione meccanica è molto importante per ogni tipo di detergente, oltre che per ogni tipo di sistema di lavaggio, ed in questo caso la regola generale vuole che ovviamente si garantisca la maggior azione meccanica possibile. Tuttavia l'azione meccanica può assumere, specie in un sistema chiuso, un ulteriore significato, altrettanto importante, ossia quello di garantire la miglior dispersione possibile del detergente. Difatti, ciò che si osserva nell'ambito della pulizia professionale è che molto spesso non si hanno difetti di azione chimica del detergente, quanto difficoltà a raggiungere ogni superficie interna alla cavità.

Concentrazione: Ovviamente, all'aumentare della concentrazione del detergente aumenta l'efficacia del lavaggio, poichè molto semplicemente vi sarà più principio attivo in contatto con lo sporco da rimuovere. La regola generale in questo caso è che ogni aumento della concentrazione porta ad un aumento dell'efficacia di lavaggio. Ciò nonostante, va considerato che fenomeni corrosivi e di degrado dei componenti meccanici del sistema di lavaggio possono porre dei limiti tecnici a un aumento indiscriminato.

Tempo: Come per la concentrazione, anche il tempo segue la regola generale secondo cui ogni suo aumento comporta un miglioramento dell'azione di lavaggio, tuttavia vi sono dei limiti anche in questo caso. Non si ha alcun effetto utile prolungando il lavaggio quando il detergente ha esaurito il suo potenziale di azione chimica. Inoltre, vi sono dei limiti di tempo legati alla facilità di gestione del forno⁵.

Per ottenere una buona efficacia di pulizia è necessario che ciascuno di questi quattro fattori giochi il suo ruolo ma, un eventuale carenza di uno di essi, può essere gestito incrementando il contributo degli altri tre. Se per esempio si ha un difetto di tempo poichè il ciclo deve assolutamente svolgersi entro un'ora, allora sarà possibile ottenere un risultato soddisfacente incrementando per esempio l'azione meccanica e la concentrazione.

⁴Gli enzimi, essendo proteine sono soggetti a denaturazione termica.

⁵Un lavaggio della durata di 6 ore sarebbe difficilmente gestibile da parte dell'utente finale che è interessato alla maggior produttività possibile.

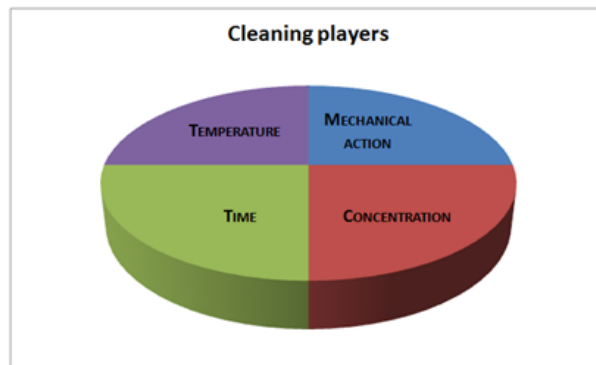


Figura 9.5: Fattori che concorrono a determinare un'efficace azione di lavaggio.

9.2 Sviluppo del detergente enzimatico

I detergenti enzimatici rappresentano quanto di più efficaci si possa utilizzare in ambito domestico e, per tale motivo, sono stati scelti per essere utilizzati nel forno GC, dove lo sporco da rimuovere è il più impegnativo possibile e non sono utilizzabili detergenti professionali.

Gli enzimi sono già presenti in piccole quantità in molti detergenti per lavastoviglie domestiche, ma sono poche le aziende che realizzano detergenti, la cui efficacia è in gran parte dovuta alla presenza di enzimi estremamente ingegnerizzati. All'interno di un generico detergente è possibile trovare principalmente i seguenti componenti chimici:

Alcalinizzanti: Vengono inseriti in formulazione allo scopo di disgregare la materia organica che costituisce lo sporco e sono particolarmente efficaci nei confronti della frazione carbonizzata della stessa. Il principio alcalinizzante più comune è sicuramente l'idrossido di sodio.

Tensioattivi: Vengono inseriti in formulazione allo scopo di mantenere lo sporco in sospensione, aumentare il contatto fra detergente e sporco e favorirne la separazione dalle superfici.

Enzimi: Sono proteine che scindono la materia organica aumentando l'efficienza del processo di pulizia. Prendono il nome dal tipo di specie che scindono, quindi per esempio gli enzimi lipasi scindono i lipidi, ecc. La loro efficacia ha un andamento gaussiano in funzione della temperatura con un limite superiore di utilizzo. Anche il pH della soluzione in cui sono contenuti non può eccedere un valore massimo (circa 11,5) pena l'inattivazione enzimatica.

Sequestranti: I sequestranti vengono inclusi nella formulazione dei detergenti allo scopo di sequestrare la "frazione dura dell'acqua", legandosi ad essa (impegnandola quindi in un legame chimico), evitando quindi la riduzione dell'efficacia dei tensioattivi.

Benchè differiscano in termini di composizione chimica dai più diffusi detergenti alcalini, il modo d'uso non è molto differente; anche per essi è bene ottenere una

buona distribuzione del detergente sullo sporco, dando il giusto tempo perchè la rimozione chimica dello sporco abbia luogo e mantenendo possibilmente la soluzione alla temperatura di massima attività degli enzimi. Volendo dare degli ordini di grandezza, questo vuol dire, in un contesto domestico, mantenere il detergente in contatto con lo sporco a $50-55^{\circ}C$ per almeno un quarto d'ora. Un particolarità che rende non banale l'uso di questo tipo di detergenti è che la soluzione, se portata a temperature superiori ai $60^{\circ}C$, perde efficacia per l'inattivazione degli enzimi.

Lo sviluppo del detergente enzimatico utilizzato nel forno GC ha richiesto un notevole sforzo e circa due anni e mezzo di sperimentazione. Il punto più critico è stato l'individuazione dei corretti tensioattivi, in grado di garantire la massima interazione sporco/detergente e soprattutto, un' incisivo effetto di separazione dello sporco dalle superfici. Durante lo sviluppo è stato inoltre necessario garantire la compatibilità chimica del detergente con tutti gli elementi meccanici che formano il sistema di lavaggio e, a tale scopo, sono state compilate varie tabelle di compatibilità chimica, sulla base della letteratura disponibile⁶. Per quanto concerne il problema di conferire la funzione brillantante alla formulazione chimica, è stato necessario incrementare la quantità di sequestranti presenti nella stessa.

Il risultato finale è un detergente che non solo è unico per quantità e qualità di enzimi contenuti, ma presenta anche una marcata propensione all'azione alcalina. E' stato inoltre possibile evitare la presenza di polifosfati nella formulazione, dato che il loro utilizzo è vietato in alcune nazioni e limitato nella maggior parte delle altre a causa del loro impatto ambientale. Con esso è quindi possibile adottare una duplice strategia, una a bassa temperatura per trarre il massimo vantaggio possibile dall'azione enzimatica, e una ad alta temperatura per garantire una buona azione alcalina nei confronti di quella frazione di sporco che non è aggredibile dagli enzimi. Si noti che un detergente puramente alcalino a uso residenziale non riuscirà mai a rimuovere lo sporco tipicamente presente sulle superfici della cavità di un forno GC; una azione enzimatica iniziale è fondamentale per garantire l'efficacia della successiva azione alcalina e, in definitiva, del lavaggio completo.

9.3 Sviluppo del controllo

Fissata l'architettura dell'impianto di lavaggio nella configurazione precedentemente esposta, è stato necessario decidere come utilizzarlo per sfruttare nel miglior modo possibile il detergente enzimatico. La principale problematica cui trovare soluzione ha riguardato l'uso delle resistenze in abbinamento alla ricircolazione della soluzione di lavoro, per ottenerne il riscaldamento.

Sin dai primi test, è emerso come la semplice termostatazione alla temperatura di massima attività enzimatica e la contemporanea ricircolazione della soluzione di lavaggio, non poteva essere la strategia migliore. La spiegazione di tali fallimenti può essere ricercata nel grafico 9.6.

Come si nota, la temperatura superficiale delle resistenze durante le attivazioni supera abbondantemente la massima temperatura d'esercizio del detergente enzimatico ($60^{\circ}C$), col risultato che, durante la ricircolazione, si ha

⁶Sono stati utilizzati test di corrosione, datasheet dei fornitori e test interni Electrolux Professional Spa.

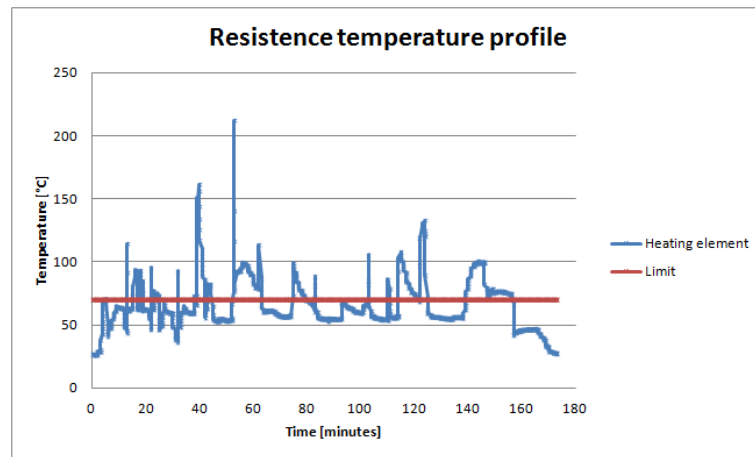


Figura 9.6: Andamento delle temperature superficiali delle resistenze in cavità durante una termostatazione a 60°C di set.

una sistematica denaturazione degli enzimi ed una conseguente perdita di efficacia del detergente. Una possibile soluzione è stata individuata effettuando la ricircolazione esclusivamente a resistenze spente e tale risultato è ottenibile termostatando la cavità a una temperatura sufficientemente inferiore rispetto a quella massima d'utilizzo del detergente. In tal modo viene sfruttato il fatto che, quando in un forno professionale viene impostata una temperatura di termostatazione sufficientemente bassa, per via delle potenze in gioco, le attivazioni delle resistenze risultano diradate nel tempo e di breve durata. Questo è spiegabile osservando che, per una data cavità, maggiore è la potenza installata e più rapidamente gli elementi riscaldanti incrementeranno la temperatura di cavità, quindi per raggiungere basse temperature basteranno brevi attivazioni. Inoltre per bassi valori di temperatura di set, il gradiente fra cavità ed ambiente circostante è piccolo, quindi l'inerzia del sistema fa sì che la frequenza di attivazione delle resistenze sia bassa. Ipotizzando che la cavità raggiunga la temperatura di set dopo 2 minuti di attivazione delle resistenze e che a quel punto le resistenze si attivino ogni 6 minuti per la termostatazione, avviando la ricircolazione ogni 5 minuti e facendola durare 1 minuto si avrà la certezza che essa non avvenga mai in concomitanza all'attivazione delle resistenze. Questa è stata la base di partenza su cui è stato creato l'algoritmo di lavaggio dedicato ai detergenti enzimatici⁷.

A tal proposito si osservi la figura 9.7. In questo caso la temperatura di set è stata posta pari a 45°C e come si vede chiaramente, fra la prima e la seconda attivazione (ciascuna della durata di qualche minuto) intercorrono 40 minuti. Ad una decina di minuti dal termine della seconda attivazione, la temperatura della resistenza è abbondantemente entro il limite massimo ammissibile per i detergenti enzimatici ed è stata attivata la ricircolazione. Si vede come la temperatura della resistenza cala repentinamente (e conseguentemente quella della cavità non rappresentata in questo grafico); si ha quindi la riattivazione delle resistenze che, avvenendo a ricircolazione avviata, non danno picchi nocivi. Il

⁷Il controllo sviluppato va bene più in generale per qualunque detergente contenga enzimi.

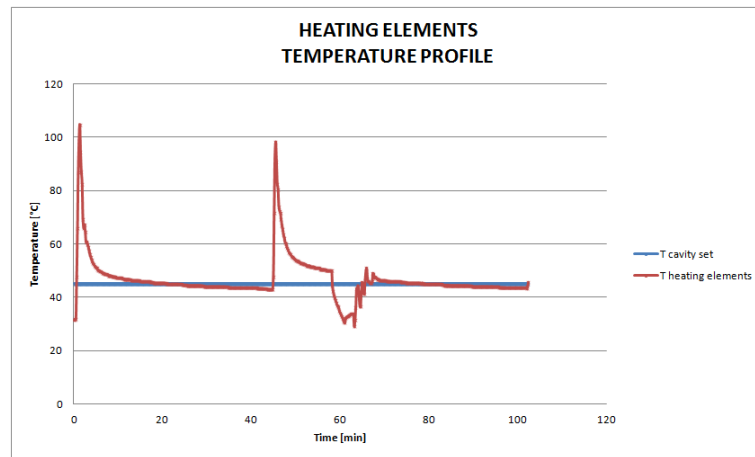


Figura 9.7: Andamento delle temperature superficiali delle resistenze in cavità durante una termostatazione a 45°C di set, con attivazione del ricircolo.

risultato è un riscaldamento graduale del fluido di lavoro che si mantiene sempre al disotto della massima temperatura ammissibile.

Individuata quindi una soluzione qualitativa, è stato necessario individuare la temperatura di set della cavità che indirettamente permettesse il riscaldamento ottimale della soluzione di lavoro⁸. A tale scopo sono stati messi appunto due test sperimentali, per caratterizzare l'efficacia enzimatica della soluzione detergente durante il proseguo del lavaggio, al variare della temperatura di set cavità⁹. Scendendo maggiormente nel dettaglio, tale efficacia è generalmente attribuibile alla quantità di enzimi presenti e alla loro "vitalità"; un'elevato numero di enzimi molto attivi porterà inevitabilmente alla massima azione di detergenza.

Il primo test sviluppato è il cosiddetto "test della gelatina" ed ha lo scopo di determinare quanto efficace sia l'azione della proteasi, a prescindere dal numero di enzimi presenti in soluzione. Ciò che interessa in questo test, è la velocità con cui gli enzimi presenti nel detergente processano un fissata quantità di materia organica e non importa se tale risultato è conseguito da un elevato numero di enzimi poco attivi o da un ridotto numero di enzimi molto attivi.

In figura 9.8 è visibile un test condotto su una soluzione di detergente inalterato (ossia mai utilizzato prima). La materia organica è costituita da 25ml di gelatina caricata con colorante a uso alimentare, contenuta in una provetta calibrata. Al suo interno vengono versati 25ml di soluzione detergente e tale momento viene preso come T0 della prova. A partire da tale istante ha inizio l'azione degli enzimi, visibile poichè scattando delle istantanee ad intervalli prefissati (T0+2h, T0+4h, T0+8h), la quantità di gelatina non processata cala e la frazione liquida contenuta nella provetta aumenta. Il risultato del test eseguito sulla soluzione detergente nuova è stato quindi utilizzato quale riferimento nei successivi test sul detergente in opera. Varie prove di ricircolo sono state effettuate impostando temperature di set cavità differenti e, durante il loro svolgimento, sono

⁸Tale temperatura verrà nel proseguo indicata come $T_{enzimatica}$

⁹D'ora in poi indicata più brevemente come temperatura enzimatica di ricircolo.

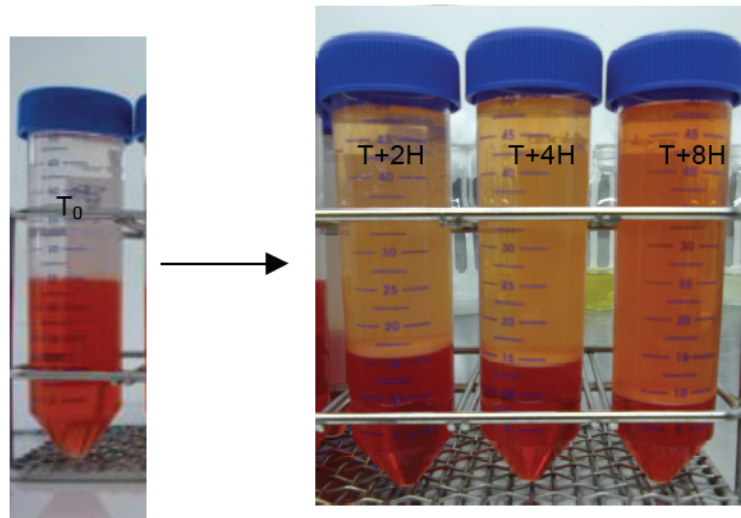


Figura 9.8: Immagine di riferimento per l'esecuzione del test della gelatina.

stati prelevati campioni di detergente e la loro efficacia confrontata con il riferimento: in tale modo è stato possibile in prima approssimazione stimare il calo di performance dovuto all'inattivazione enzimatica e individuare quindi l'ordine di grandezza della $T_{enzimatica}$. La semplicità del test ha inoltre reso possibile contenere costi e tempi di questa fase della sperimentazione.

Individuata la $T_{enzimatica}$ di massima, si è proceduto con il secondo test, ossia l'analisi di attività enzimatica condotta mediante spettrofotometria. Questo test è più complesso (e quindi lungo) rispetto a quello della gelatina, ma permette il conteggio preciso degli enzimi ancora attivi all'interno di un campione di liquido. E' quindi stato utilizzato per individuare non solo con maggiore precisione la $T_{enzimatica}$, ma anche per determinare come evolve l'inevitabile degrado degli enzimi durante un lavaggio. A tale scopo si è scelto di effettuare prelievi a intervalli prestabiliti durante il ricircolo termostato di detergente. Il risultato per quattro differenti test è rappresentato in figura 9.9. Come si nota, il valore dell'attività ha un brusco calo al primo intervallo per poi presentare un graduale calo linearmente correlato alla durata temporale del ricircolo¹⁰. Le informazioni date da questo test sono state utilizzate non solo per determinare la $T_{enzimatica}$, ma anche per determinare la tempistica massima di esposizione del detergente agli elementi riscaldanti (tempistica di ricircolo), superata la quale, l'azione enzimatica risulta irrimediabilmente compromessa. Nel caso dei test di figura 9.9 l'efficacia dell'azione enzimatica risulta irrimediabilmente compromessa fra il terzo ed il quarto campionamento¹¹.

Come già spiegato, il detergente sviluppato, oltre ad uno spiccato effetto enzimatico, ha anche un carattere alcalino e per tanto il controllo del lavaggio è

¹⁰L'unica eccezione a tale regola è rappresentata dal primo punto della serie C ma in tal caso vi è stato verosimilmente un errore di misura.

¹¹Un valore inferiore a 2 indica un'azione non più sufficiente.

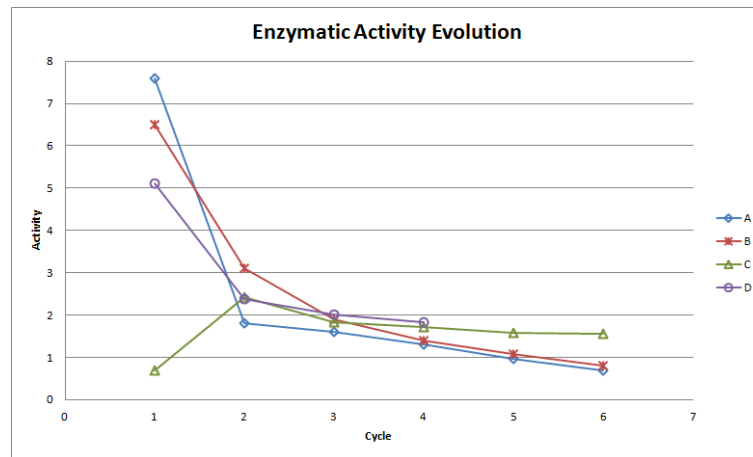


Figura 9.9: Variazione dell'attività enzimatica in funzione del numero di ricircolazioni sulle resistenze calde.

stato sviluppato per sfruttare anche questa seconda caratteristica. In seguito ad aver individuato la $T_{enzimatica}$ ed il numero di cicli di ricircolo massimo, si è indagata la $T_{alcalina}$, ossia la temperatura di set della cavità alla quale effettuare il ricircolo, massimizzando l'azione alcalina. Questa parte dell'indagine è risultata meno complessa rispetto alla prima in quanto, non dovendo garantire l'inalterazione degli enzimi, non si è posto il problema dell'attivazione dei carichi. Inoltre, le massime temperature di esercizio dei componenti sono inferiori a quella di massima attività alcalina e si è quindi trattato di individuare la massima temperatura di set della cavità, tale da non riscaldare la soluzione di lavoro al di sopra dei limiti tecnici. Stilata quindi una lista dei componenti che vengono in contatto con la soluzione di lavoro, è stato individuato nella pompa di ricircolo l'elemento limitante. Si è quindi monitorata la temperatura della soluzione di lavoro durante il ricircolo a differenti temperature di set della cavità. Quella che ha portato la soluzione alla massima temperatura di lavoro ammissibile dalla pompa di ricircolo è stata presa come $T_{alcalina}$.

9.4 La soluzione completa

Individuata la formulazione chimica ed i parametri per massimizzare l'azione enzimatica e quella alcalina, è stato possibile "comporre il ciclo di lavaggio". Il ciclo finale prevede delle fasi di azione enzimatica, delle fasi di azione alcalina e delle fasi di risciacquo. Le fasi di azione enzimatica sono costituite da ricircolazioni a resistenze spente e successive termostatazioni alla temperatura $T_{enzimatica}$, mentre le fasi di azione alcalina sono costituite da ricircolazioni e successive termostatazioni, entrambe alla $T_{alcalina}$. Il numero di fasi enzimatiche è limitato secondo quanto scoperto mediante l'analisi spettrofotometrica, mentre il numero delle fasi alcaline è limitato in funzione della completa rimozione del residuo. La fase del risciacquo prevede il ricircolo di acqua di rete all'interno della cavità, seguito da una breve saturazione (di vapore) della cavità,

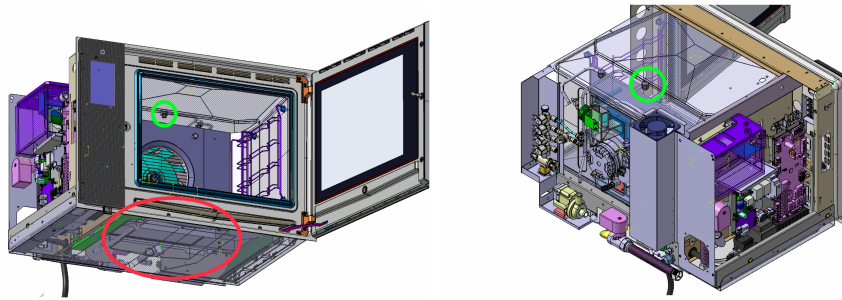


Figura 9.10: Il sistema di lavaggio installato sul forno Grand Cousine. In rosso è evidenziato il serbatoio per la ricircolazione del liquido di lavaggio, posizionato sotto la cella del forno. In verde è evidenziato il punto d'ingresso del liquido di lavaggio all'interno della cavità, esattamente d'innanzi allo scudo ed alla ventola.

al fine di rimuovere i residui di detergente mediante condensazione e dilavamento. Una rapida termostatazione ad alta temperatura e valvola di aspirazione aperta permette di asciugare la cavità e, quindi, concludere il lavaggio. Considerato che il lavaggio, per come è implementato, è del tutto analogo ad un processo di cottura in cui il sistema di controllo guida l'evoluzione termodinamica della cavità, introducendo quando richiesto soluzione detergente o acqua di rete in cavità, allora sarà possibile applicare il metodo degli ECL. La soluzione di lavaggio sviluppata per il forno GC, se confrontata con le soluzioni implementate nei forni professionali, presenta indubbiamente consumi inferiori. Questo è essenzialmente imputabile al ECL indubbiamente inferiore, spiegabile osservando che:

Temperatura di termostatazione: Durante il lavaggio, la cività del forno viene mantenuta ad una temperatura significativamente inferiore rispetto a quella dei lavaggi convenzionali.

Utilizzo della valvola di aspirazione: Durante la maggior parte del lavaggio la valvola di aspirazione è chiusa e quindi sono impedito perdite energetiche sotto forma di flussi di massa uscenti dalla cavità.

Utilizzo vapore: La soluzione sviluppata prevede l'utilizzo del vapore per un breve periodo e solo per la rimozione dei residui di detergente mediante condensazione e dilavamento. Per questo motivo, durante tale fase non si realizza la fuoriuscita di vapore dalla cavità (si ha la completa condensazione sulle pareti) e si ha quindi, un consistente risparmio energetico.

L'attività di ricerca ha dunque portato allo sviluppo di una soluzione per il lavaggio del forno GC che presenta maggiore efficacia e minori consumi rispetto a quelle attualmente disponibili sul mercato. Per tale motivo si è deciso di procedere al deposito di una domanda di brevetto europeo (European Patent Application No.12184652.1).

Parte IV

Conclusioni

Ad inizio dottorato ci si è posti l'obiettivo di ridurre i consumi di funzionamento dei forni professionali per la cottura di alimenti realizzati da Electrolux Professional Spa. Si è anche scelto di raggiungere tale scopo agendo unicamente sulle logiche di controllo e sulle strategie di utilizzo, evitando qualunque intervento di riprogettazione meccanica. L'attività di ricerca e sviluppo è stata condotta quasi interamente presso gli uffici ed i laboratori di Electrolux Professional Spa a Vallenoncello e si è svolta con continuità durante tutti i tre anni di dottorato.

Per poter identificare i possibili ambiti d'intervento, è stato anzitutto necessario comprendere come l'energia viene spesa da un forno, tuttavia, non è bastato caratterizzarne il comportamento termodinamico, ma si è anche studiato il modo in cui l'utente appropria ed utilizza un forno professionale per la cottura di alimenti. In tale modo è stato possibile intervenire in due ambiti differenti (il controllo di potenza e le modalità d'utilizzo), ma entrambi estremamente importanti per la determinazione dei consumi d'esercizio, coinvolgendo nella logica di risparmio energetico non solo l'apparecchiatura in se, ma anche l'utilizzatore finale.

Dovendo scegliere un apparecchiatura su cui condurre la sperimentazione è stato selezionato un forno elettrico 10 l/1: tale macchina viene considerata dal team R&D uno standard per la sua elevata diffusione ed è stato pertanto naturale far ricadere su di essa la scelta. Per le misurazioni sperimentali si è ricorso alla strumentazione presente presso il laboratorio cottura di Electrolux Professional Spa, all'interno del quale vengono normalmente condotte attività di sviluppo sperimentale, indagini funzionali e caratterizzazione di tutte le apparecchiature di cottura prodotte.

Data la complessità del sistema di controllo e l'elevata capacità d'interazione dello stesso col carico, la presenza di cibo nella cavità influenza pesantemente il comportamento di un forno professionale per la cottura di alimenti e, quindi, ne condiziona anche i consumi d'esercizio. Compreso quindi che era preferibile studiare il sistema forno + cibo, l'attività di ricerca ha avuto inizio con l'analisi dei flussi energetici coinvolti in una generica cottura. E' stato definito un modello in grado di spiegare come l'energia fornita al forno viene utilizzata, evidenziando quanto la sua spesa sia correlata al processo di cottura. In effetti, ciò che si osserva è che non tutta l'energia spesa viene ceduta al cibo, bensì una quota viene ceduta al forno, allo scopo di portarlo in condizione di funzionamento, ed un'ulteriore quota viene ceduta all'ambiente, per la naturale tendenza che ha il sistema a riportarsi in equilibrio con l'ambiente circostante. Sulla base di tale considerazione si è quindi introdotto il concetto di ECL (Energy Cooking Level).

A inizio cottura non vi è alcuno scambio energetico fra il forno e l'ambiente circostante, né sotto forma di lavoro né sotto forma di calore e, quindi, si può affermare che essi si trovano al medesimo livello energetico. Non appena la cottura ha inizio, la temperatura della cavità, e di conseguenza del forno, aumenta¹² venendosi a formare un gradiente fra quest'ultima e l'ambiente circostante. Si instaura un regime di scambio in cui energia, quasi esclusivamente sotto forma di calore, viene ceduta dal forno all'ambiente circostante; questi due non possono più dirsi allo stesso livello energetico, bensì il forno sarà ad un livello energetico superiore rispetto a quello dell'ambiente circostante, in quanto è esso a cedere

¹²Contestualmente anche la quantità di vapore presente nella cavità può aumentare.

energia. A fine cottura, il forno viene spento e continua a cedere energia, sino a ritornare alla condizione iniziale di equilibrio termodinamico con l'ambiente circostante. Quindi, durante la cottura, il forno si è sostanzialmente portato su un livello energetico superiore rispetto a quello dell'ambiente circostante, mantenendosi in tale condizione per tutta la durata del processo. Logicamente ogni cottura è singolare per temperatura, tempistica, ecc. e si è supposto quindi che un forno deve portarsi su differenti ECL. Inoltre, in ambito professionale la cottura non viene mai iniziata a forno freddo, quindi si è deciso di suddividere la generica cottura in tre fasi; quella di precottura, durante la quale il forno viene portato al giusto ECL, quella di cottura, in cui il cibo viene posto nel forno e quella di scarico, in cui il forno necessariamente ritorna all'equilibrio con l'ambiente circostante. Questa suddivisione ha permesso non solo di individuare con maggiore chiarezza le quote di energia realmente funzionali alla cottura, ma anche di individuare gli ambiti d'intervento migliori per effettuare la riduzione dei consumi, senza inficiare la qualità di cottura; ecco spiegata quindi l'idea alla base degli ECL e dell'approccio alla riduzione dei consumi sviluppato durante il dottorato.

La prima parte della sperimentazione è stata dedicata a validare l'esistenza degli ECL così come sono stati definiti, giungendo a confermare la bontà della schematizzazione suggerita. Nel caso delle ricette utilizzate durante i test, sono stati individuati anche gli indicatori necessari a effettuare un previsionale dei consumi.

La modellizzazione del processo di cottura secondo gli ECL è stata sfruttata per sviluppare una nuova strategia di funzionamento e gestione del forno, detta eco-cooking; il forno diventa consapevole della propria efficienza di funzionamento, potendo guidare l'utente stesso ad un corretto utilizzo, nell'ottica di una riduzione dei consumi d'esercizio. Sono state sviluppate quattro differenti soluzioni di eco-cooking, per ciascuna delle quali è stata depositata una domanda di brevetto europeo.

Una prima applicazione riguarda la possibilità di stimare il consumo energetico a fine giornata, a partire dalla conoscenza delle condizioni ambientali e della tipologia di carico, nel caso in cui il forno venga utilizzato per l'esecuzione ripetuta della medesima ricetta. In questo caso il metodo di determinazione degli ECL viene applicato direttamente.

Una seconda applicazione riguarda la possibilità di individuare eventuali malfunzionamenti del forno sulla base del monitoraggio dei consumi di funzionamento. Nota la ricetta ed i driver del processo, in caso di consumi anomali è possibile individuare l'origine del malfunzionamento. Mediante la stessa logica d'indagine è possibile identificare anche un erroneo utilizzo del forno da parte dell'utente, proponendo le opportune condizioni e riportando quindi i consumi di funzionamento a valori nella norma.

La terza applicazione riguarda la gestione del forno e permette all'utente finale di ordinare in maniera ottimale un set di cotture da effettuare giornalmente. Questa applicazione risulta estremamente utile nell'ambito del catering e della ristorazione di massa in cui è prassi organizzare la giornata lavorativa esplicitando l'ordine con cui le varie ricette devono essere preparate. In tali contesti vengono inoltre ampiamente utilizzati gli abbattitori per conservare il cibo a bassa temperatura, rigenerandolo quindi a ridosso del momento del servizio. In questo modo è possibile avere la massima libertà organizzativa e proprio questo aspetto viene sfruttato per ordinare le ricette seguendo l'unico criterio del

risparmio energetico. Noti gli ECL associati alle cotture pianificate, sono date delle regole di precedenza, che permettono di individuare la sequenza a minor consumo complessivo, rendendola quindi disponibile all'utente.

La quarta ed ultima applicazione riguarda una nuova strategia di lavaggio che, sfruttando detergenti enzimatici, presenta un minor ECL rispetto a quello delle soluzioni convenzionali, garantendo quindi un minor consumo. Per mettere appunto questa applicazione è stato necessario sviluppare anche il detergente, e la soluzione completa è stata quindi impiegata nel sistema di lavaggio del forno, appartenente alla nuova gamma Grand Cuisine di Electrolux Professional.

L'attività sperimentale svolta per dare corpo a queste quattro soluzioni è stata estremamente utile, anche al fine di definire nuove strategie per il controllo efficiente del forno, intervenendo sulle modalità di ottenimento della desiderata temperatura ed umidità in cavità, nella modalità di funzionamento STEAM.

Al termine dei tre anni di ricerca è stato quindi raggiunto l'obiettivo di ridurre i consumi dei forni professionali per la cottura di alimenti realizzati da Electrolux Professional Spa, senza intervenire sulla progettazione meccanica.

Concludendo, durante la ricerca si è reso necessario effettuare una continua selezione delle tematiche di ricerca, accantonandone molte che, pur dando risultati estremamente interessanti, non erano correlate all'attività principale. Fra queste, la più promettente è stata la costruzione di mappe di funzionamento per il forno. L'idea alla base di questa attività è che il cibo possa essere suddiviso in gruppi aventi analoghe proprietà termodinamiche; la verdure sono generalmente delle matrici ricche di acqua poco legata, le carni sono matrici ricche di acqua molto legata, gli impasti lievitanti sono sorgenti di fasi gassose, ecc.

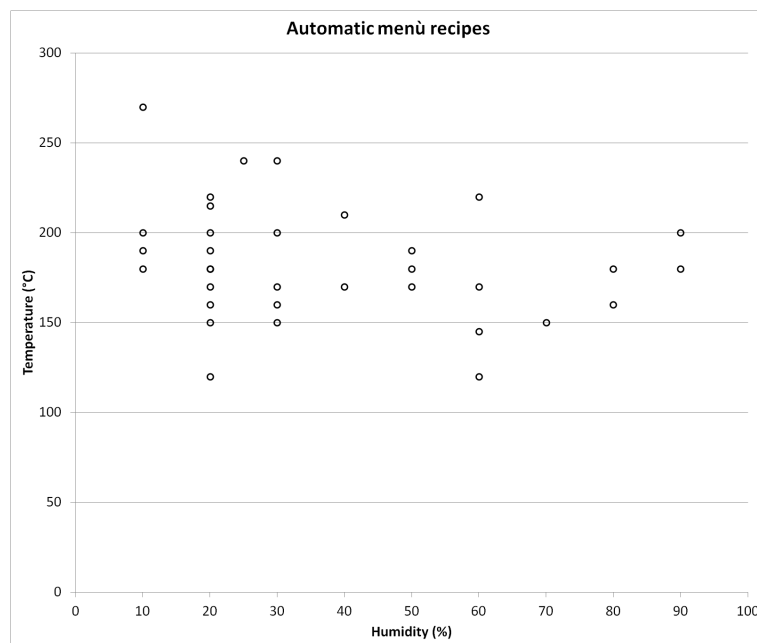


Figura 9.11: Rappresentazione delle cotture selezionabili dal menù automatico nel piano temperatura umidità di set.

Ne deriva il fatto che prodotti analoghi dovranno disporsi a formare cluster su piani opportunamente costruiti, quali per esempio quello energia di cottura Vs calo peso o calo peso Vs tempo di cottura. Non solo l'uso di queste mappe permette di evidenziare delle "classi di alimenti", presentanti omogenee caratteristiche di cottura, ma permette anche di evidenziare il campo di utilizzo del forno.

In figura 9.11 è visibile il "campo di esistenza del forno", riferito alle cotture presenti nel menù automatico; come facilmente osservabile, le condizioni di cavità a bassa temperatura ed umidità non hanno interesse pratico. La conoscenza di tali mappe permetterebbe per esempio di definire i campi in cui ottimizzare il funzionamento del controllo, oltre che caratterizzare in modo estremamente dettagliato i consumi di cottura.

Parte V
Allegati

9.5 Misurazione ed elaborazione dei dati sperimentali

L'attività sperimentale di ricerca ha richiesto essenzialmente la misura di due tipi di grandezze, temperature e potenze elettriche, per le quali ci si è avvalsi di strumentazione presente nel laboratorio cottura di Electrolux Professional Spa. Durante la progettazione di una nuova apparecchiatura è prassi avvalersi, per la caratterizzazione funzionale e termodinamica, di grafici analoghi a quello riportato in figura 9.12, detti comunemente diagrammi delle attivazioni. Grazie ad essi, è possibile visualizzare su uno stesso piano ed una stessa time line, l'evolvere di grandezze fisiche misurate dal sistema di controllo, mediante i sensori montati sul forno, l'evolvere di grandezze fisiche, misurate mediante strumenti di acquisizione esterni e le attivazioni di carichi significativi, quali per esempio le resistenze presenti in cavità e nel boiler o l'apertura della valvola di aspirazione per la riduzione dell'umidità in cavità.

Per la loro costruzione vengono utilizzati dei sistemi di acquisizione esterni al forno che assolvono essenzialmente a due funzioni; acquisiscono le comunicazioni fra scheda user e scheda power ed acquisiscono i segnali di sensori di temperatura (termocoppie tipo k).

Quando il forno è in funzione, vi è una costante comunicazione fra la scheda user e quella power e le informazioni scambiate riguardano lo stato della macchina, in termini di temperature misurate, stato dei carichi non lineari, quali per esempio le resistenze attivate mediante relè elettromeccanici, ecc. Più precisamente tale comunicazione avviene con una frequenza pari a 1Hz, fortunatamente sufficientemente alta per cogliere tutti i fenomeni fisici che sono rilevanti, per caratterizzare il funzionamento del forno. Per sincronizzare i dati acquisiti riferendoli a un'unica time line si utilizza un evento puntuale quale l'apertura porta.

Nel caso della figura 9.12 è riportata una cottura a vapore in cui la temperatura di set è $100^{\circ}C$ e l'umidità di set è 100%. Le grandezze termodinamiche riportate sono quelle che usualmente vengono utilizzate per definire il ciclo di cottura, ossia la temperatura e l'umidità presente in cella. A queste si aggiunge l'andamento della temperatura del boiler, in quanto è un ottimo indicatore della capacità di risposta dello stesso (più alta è, più rapida sarà la generazione di vapore). I carichi non lineari d'interesse riportati sono le resistenze in cavità, quelle nel boiler e l'elettrovalvola di refill del boiler. I primi due carichi presentano due livelli di potenza, ottenuti associando due valori fittizi, uno alla mezza potenza e uno alla piena potenza. Con un simile grafico è estremamente facile correlare le attivazioni dei carichi alla variazione delle condizioni termodinamiche della cavità.

Per quanto concerne la precisione delle misure effettuate durante la sperimentazione, la potenza elettrica è stata misurata mediante un power meter collegato alla linea di alimentazione, in grado di garantire un errore massimo di stima dei consumi pari a 0,01 kWh nel range di funzionamento del forno utilizzato, mentre la frequenza di campionamento è stata fissata a 1Hz.

Tale strumento è stato utilizzato per monitorare l'evoluzione temporale delle potenze assorbite e dei consumi di funzionamento (ricavati per integrazione delle prime). Tali informazioni sono state poi integrate ai grafici delle attivazioni, allineando i picchi di potenza assorbita con le attivazioni dei relativi elementi di

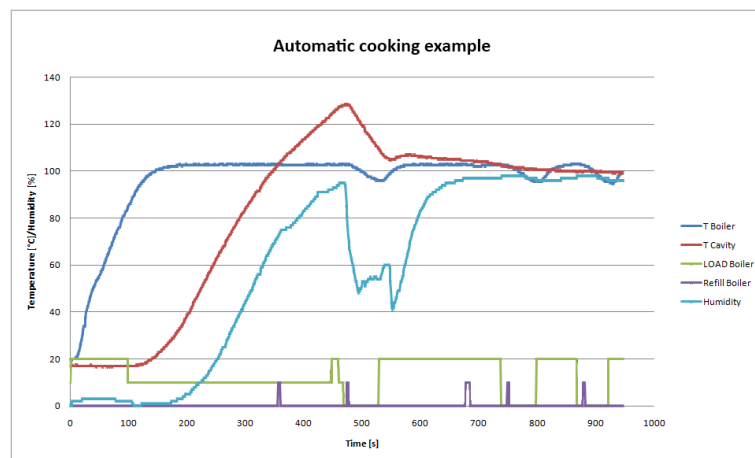


Figura 9.12: Esempio di diagramma delle attivazioni.

potenza¹³. Le temperature sono state acquisite mediante termocoppie di tipo k, collegate ad un sistema di acquisizione NI, avendo un errore massimo pari a $0,6^{\circ}C$, nel campo di lavoro, calcolato secondo la vigente normativa tecnica [8].

¹³E' sufficiente far coincidere l'istante in cui si registra il primo incremento sensibile di potenza, sicuramente imputabile all'attivazione delle resistenze boiler o cella, con il primo istante in cui il controllo del forno registra l'attivazione di tali resistenze.

Elenco delle tabelle

5.1	Confronto prestazionale fra le due differenti strategie di preheating.	55
8.1	Cotture selezionate per l'indagine	68

Elenco delle figure

1	Tipica distribuzione dei consumi energetici in un ristorante. . . .	8
1.1	Esempio di flow chart utilizzata per la cottura sotto vuoto in un forno professionale per la cottura di alimenti . In questo caso sono visibili delle pere ad inizio preparazione, una volta poste sottovuoto con il vino e conservate in frigo e pronte per il servizio dopo la cottura sotto vuoto, in ambiente a $100^{\circ}C$ al 100% di umidità.	11
2.1	Immagine del forno utilizzato durante la sperimentazione (Forno 10 1/1 elettrico livello touch).	26
2.2	Teglie realizzate secondo lo standard gastronorm. A sinistra è visibile la teglia di lunghezza standard mentre a destra è visibile la teglia di lunghezza doppia.	27
2.3	Esempio di studio sull'uniformità di cottura ottenuta mediante ottimizzazione delle geometrie dei supporti su un forno professionale per la cottura di alimenti	27
2.4	Rappresentazione schematica di un sistema di generazione di vapore IN-CAVITY.	28
2.5	Rappresentazione schematica di un sistema di generazione di vapore OUT-CAVITY.	28
2.6	Modello 3D di un boiler elettrico.	29
2.7	Modello 3D di un boiler gas (GPL o Metano).	29
2.8	Sistema di monitoraggio dell'umidità secondo il metodo del by-pass.	30
2.9	Sistema di monitoraggio dell'umidità secondo il metodo della sonda lambda.	30
2.10	Diagramma di Carrier dell'aria umida.	31
2.11	Esempio di forni utilizzanti una UI analogica (sx) e touch (dx)	31
2.12	Schema riassuntivo dei tre modi possibili di funzionamento del forno.	31
2.13	Evoluzione temporale di differenti variabili monitorate durante una cottura selezionata fra quelle presenti nel menù automatico.	32
2.14	Esempio di cottura in cui il valore di set della temperatura di cavità varia con continuità in funzione della temperatura al cuore dell'alimento.	33
3.1	Grafico rappresentante qualitativamente l'evoluzione energetica del sistema forno più cibo durante una singola generica cottura.	37

3.2	Grafico rappresentante qualitativamente l'evoluzione energetica del sistema forno più cibo per una successione di due generiche cotture.	38
4.1	Possibili distribuzioni di dati ottenibili mediante il test di ripetibilità.	41
4.2	Grafico del livello energetico di cottura per la ricetta test.	42
4.3	Variazione degli ECL al cambiare delle ricette.	43
4.4	Influenza della massa termica sul profilo degli ECL.	44
4.5	Influenza del gradiente termico sul profilo del ECL.	45
4.6	Influenza della tempistica di apertura porta sul profilo del ECL.	46
4.7	Analisi di correlazione secondo il metodo di Pearson per la stima del primo consumo.	47
4.8	Regressione lineare fra i consumi di inizio test di ripetibilità e la temperatura iniziale del boiler.	48
4.9	Distribuzione della variabilità del problema sulle componenti principali.	48
4.10	Biplot delle variabili di test rappresentate nel campo delle due prime componenti principali.	49
5.1	Caratterizzazione di una generica cottura "a vapore".	53
5.2	Caratterizzazione di una cottura in modalità STEAM.	54
5.3	Caratterizzazione di una modalità alternativa di precottura per la modalità STEAM.	55
6.1	Influenza della tempistica di apertura porta sul posizionamento del LEC.	57
7.1	Confronto fra consumi stimati e consumi misurati per una cottura campione.	60
7.2	Deriva dei consumi nel caso di un malfunzionamento della sonda lambda.	61
7.3	Rappresentazione schematica di un tipico errore di posizionamento dello spillone.	64
8.1	Evoluzione energetica del sistema forno+cibo durante una singola cottura.	66
8.2	Test di riscaldamento passivo del boiler.	68
8.3	Test di sequenziamento ottimale.	69
8.4	Test di sequenziamento ottimale con apertura porta in fase di raffreddamento.	70
9.1	Il forno Grand Cuisine installato presso un'utenza.	73
9.2	Il sistema di lavaggio attualmente installato sui forni prodotti da Electrolux Professional. In rosso è evidenziato il braccetto rotante posizionato sullo schienale del forno utilizzato per spruzzare uniformemente all'interno della cavità acqua, detergente o brillantante. In verde sono evidenziati i serbatoi esterni al forno in cui sono conservati il brillantante ed il detergente	74
9.3	Residui presenti all'interno della cavità del forno GC in seguito ad una cottura di carne grigliata.	75

9.4	Il sistema di lavaggio forno GC con ricircolo in funzione e ventola spenta (SX) e con ventola accesa (DX).	75
9.5	Fattori che concorrono a determinare un'efficace azione di lavaggio.	77
9.6	Andamento delle temperature superficiali delle resistenze in cavità durante una termostatazione a $60^{\circ}C$ di set.	79
9.7	Andamento delle temperature superficiali delle resistenze in cavità durante una termostatazione a $45^{\circ}C$ di set, con attivazione del ricircolo.	80
9.8	Immagine di riferimento per l'esecuzione del test della gelatina.	81
9.9	Variazione dell'attività enzimatica in funzione del numero di ricircolazioni sulle resistenze calde.	82
9.10	Il sistema di lavaggio installato sul forno Grand Cousine. In rosso è evidenziato il serbatoio per la ricircolazione del liquido di lavaggio, posizionato sotto la cella del forno. In verde è evidenziato il punto d'ingresso del liquido di lavaggio all'interno della cavità, esattamente d'innanzi allo scudo ed alla ventola.	83
9.11	Rappresentazione delle cotture selezionabili dal menù automatico nel piano temperatura umidità di set.	87
9.12	Esempio di diagramma delle attivazioni.	91

Bibliografia

- [1] Gro Harlem Brundtland (as chairman) (1987), *Development and international economic co-operation:Environment*, Report of the world commission on environment and development.
- [2] Divisione ambiente di Sotral SpA (2005), *I quaderni di Risteco; Eco-Efficienza nella Ristorazione Moderna*, Litograf Arti Grafiche S.A.S., Venaria Reale (Torino).
- [3] PG&E (2010), *Energy Management Solutions for restaurants*, www.pge.com
- [4] Cescot, Paolo & Micheli, Diego & Furlanetto, Riccardo (11-14 settembre 2012), *Caratterizzazione dei forni combinati ad uso professionale-Parte 1: riferimenti normativi e tecniche di misura*, 67° Congresso Nazionale ATI, Trieste
- [5] R. Furlanetto (2007) , *Algoritmi di previsione e di controllo per processi di cottura, raffreddamento e congelamento*, tesi di dottorato in Tecnologie Chimiche ed Energetiche XIX Ciclo, Università degli studi di Udine.
- [6] Cauvain, Stanley & Young, Linda (2008), *Bakery food manufacture and quality, water control and effect*, Black Well Publishing.
- [7] Schweitzer, A. Philips (2006), *Foundamentals of metallic corrosion: Atmospheric and media corrosion of metals*, P. E. CRC Press.
- [8] IEC 60584-2 (1989), *Thermocouples. Part 2: Tollerances*
- [9] Simonato, Michele & Poloni, Carlo & Furlanetto, Riccardo (11-14 settembre 2012), *Caratterizzazione dei forni combinati ad uso professionale-Parte 2: Controllo del processo di preparazione dei cibi*, 67° Congresso Nazionale ATI, Trieste
- [10] D'amico, Arnaldo & Di Natale, Corrado & Martinelli, Eugenio (2006), *Introduzione alla analisi dei dati sperimentali*, Aracne Editore.
- [11] Alan K. Meier, James E. Hill (1997), *Energy test procedure for appliances*, Energy and Buildings, 26, 23-33.
- [12] Andrew Webb (2005), *Pattern Recognition second edition*, John Wiley & Sons, LTD.

-
- [13] Robert L. Mason, Richard F. Gunst, James L. Hess (2003), *Statistical Design and Analysis of Experiment second edition*, John Wiley & Sons, LTD.
- [14] ASHRAE (2009), *Handbook-Fundamentals (SI)*, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- [15] ASTM (2010), *Standard test method for Enhanced Performance of Combination Oven in Various Modes, Designation F2861*.
- [16] Bas Flipsen, Nil Fit Ad Nihilum (2001), *Design for Energy Efficiency as a Basis for Innovations in Kitchen Appliances*, Energy efficiency in household appliances and lighting, Springer, 182-191.
- [17] B.M. Shaughnessy, M. Newborough (2000) , *Energy performance of a low-emissivity electrically heated oven* ,Applied Thermal Engineering, 20, 813-830.
- [18] Comité Européen de Normalisation Electrotechnique (CENELEC May 1998), *Electric ovens for household use - methods for measuring the energy consumption, prEN 50304*.
- [19] Damien C.A. Muller a, François M.A. Marechal a, Thomas Wolewinski b, Pieter J. Roux b (2007) , *An energy management method for the food industry* ,Applied Thermal Engineering, 27, 2677-2686.
- [20] DIN 18873-1/A1 , *Methods for measuring of the energy use from equipment for commercial kitchens - part 1: Convection steamers*.
- [21] European Commission DG ENER, (2011) , *Preparatory Study for Ecodesign Requirements of EuPs - Lot 22: Domestic and commercial ovens*, Task 8 report.
- [22] G. Wood, M. Newborough (2003) , *Dynamic energy-consumption indicators for domestic appliance: environment, behavior and design* ,Energy and Buildings, 35 821-841.
- [23] M. Pensek, N. Holek, H. Gjerer, I. Golobi (2005) , *Energy consumption analysis of domestic oven*, Journal of Mechanical Engineering, 51, 405-410.
- [24] T.M.I Mahlia, H. H. Masjuky, I. A. Choudhury (2002) , *Theory of energy efficiency standards and labels*, Energy Conversion and Management, 43 (2002) 743-761.