ANALISI ELETTROMAGNETICA E TERMICA DI UN FORNO A RADIOFREQUENZA

Franco Moglie

Dipartimento di Elettronica ed Automatica, Università di Ancona
via Brecce Bianche 12, 60131, Ancona
franco.moglie@unian.it

Abstract

This contribute analyzes an industrial oven with combined RF (27.12 MHz) and combustion heating. The cooking matter is placed in the central part of the oven, where two parallel metal plates act like the armors of a condenser. The electromagnetic analysis and the thermal analysis are alternately called to simulate the whole cooking, tacking in account all variable parameters during the process. In the oven, the food grows changing its geometry, its dielectric constant and its thermal characteristics. The electromagnetic simulation of the entire industrial oven is provided using the results of a combined analysis in a little experimental oven.

INTRODUZIONE

Questo lavoro analizza un forno a riscaldamento combinato per l'industria alimentare, con un generatore di radiofrequenza a 27.12 MHz e il classico riscaldamento termico per convezione ed irraggiamento, utilizzato per la cottura di impasti lievitati. In questo caso la forma dell'impasto da cuocere varia durante il trattamento e dipende dalla temperatura, così come le caratteristiche dielettriche del materiale. E' stato messo a punto un programma elettromagnetico basato sulla tecnica FDTD che interagisce con un programma termico commerciale scambiando i dati di ingresso e di uscita durante la simulazione. Oltre alla temperatura dell'impasto, necessaria per valutare le costanti dielettriche, il programma elettromagnetico necessita anche della conoscenza dello stato di lievitazione dell'impasto durante la cottura e quindi delle sue dimensioni geometriche. Le caratteristiche dielettriche sono ricavate dalla temperatura dell'impasto per mezzo di funzioni interpolanti.

ANALISI

E' stato simulato un forno a radiofrequenza di dimensione $0.4 \times 0.4 \times 0.2$ m^3 con una armatura del condensatore corrispondente alla base di appoggio e l'altra armatura in posizione orizzontale a metà del forno. Al centro dello stesso è posto l'impasto da cucinare in uno stampo a forma di parallelepipedo di dimensione $100 \times 50 \times 30$ mm^3 aperto nella parte superiore che consente la lievitazione verso l'alto.
La simulazione è svolta nel dominio del tempo utilizzando il campionamento temporale necessario al programma termico. La potenza elettromagnetica è calcolata per ogni passo del programma termico ed è necessario ripetere l'esecuzione del programma FDTD con valori geometrici e dielettrici diversi in quanto variano le dimensioni e le

costanti dielettriche dell'impasto con il tempo. Anche l'FDTD utilizza una tecnica di soluzione nel dominio del tempo, ma una simulazione copre un intervallo temporale dell'ordine del ns rendendo del tutto lecita l'ipotesi che durante una simulazione FDTD la temperatura e le dimensioni dell'impasto rimangono costanti.
E' stato utilizzato l'algoritmo classico dell'FDTD, ottimizzandone la velocità di esecuzione in quanto esso deve essere eseguito più volte nella simulazione combinata con il programma termico. La velocità non dipende né dalle costanti dielettriche né dalla geometria dell'impasto, ma dipende dalla dimensione del forno: in questo caso è circa 3 minuti di tempo di calcolo per ogni esecuzione del programma FDTD su un normale PC. Restando invariata la dimensione della singola cella il tempo di calcolo dipende linearmente dal volume del forno. Questo non rende troppo pesante l'intera simulazione della cottura in quanto il programma FDTD è richiamato alcune decine di volte.
Nel programma FDTD è stato parametrizzata la geometria dell'impasto rendendo agevole lo scambio di dati con il programma termico e la geometria del forno per simulare nuovi prototipi. Sono state inoltre scritte due funzioni che, a partire dai dati delle misure sperimentali, legano la temperatura dell'impasto alle sue costanti dielettriche necessarie al programma FDTD. Per lo scambio dati tra il programma termico ed il programma elettromagnetico sono stati scritti due moduli appositi, in particolare l'FDTD utilizza in ingresso la temperatura e la geometria dell'impasto fornite dal programma termico, mentre gli fornisce la distribuzione di potenza elettromagnetica sull'impasto.

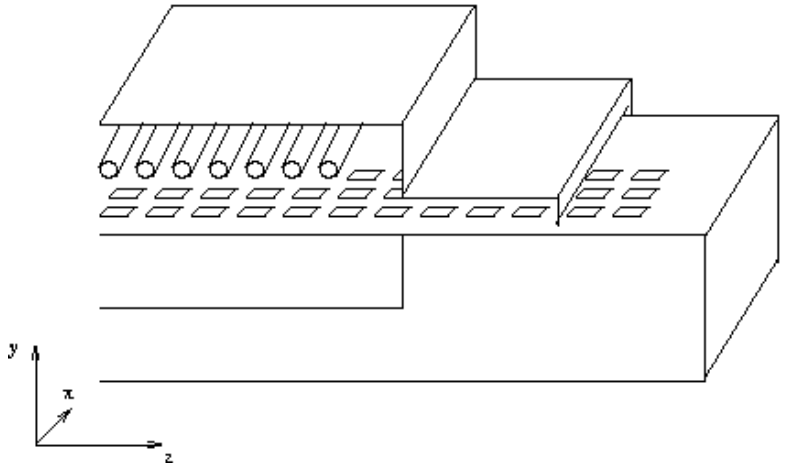

Figura 1. Geometria del forno utilizzata per il calcolo elettromagnetico. E' rappresentato solo un quarto dello stesso utilizzato per risparmiare risorse di calcolo applicando tutte le simmetrie quando possibile. I plumcake ed i tubi non sono in scala. I tubi sono uniti tra loro nella parte laterale e costituiscono un'armatura del condensatore. Il nastro trasportatore è di materiale plastico ed è stato considerato trasparente alla radiofrequenza.

Dopo aver ottenuto l'andamento della geometria e della temperatura dell'impasto durante la cottura è possibile procedere alla simulazione dell'intero forno a nastro rappresentato in Figura 1. In questo caso le dimensioni del dominio di calcolo sono $9 \times 1.8 \times 0.9$ m^3 includendo la camera di cottura e tutta la parte d'ingresso degli impasti nella stessa, per mezzo di un nastro trasportatore. Rispetto alla configurazione sperimentale è stata tralasciata la parte inferiore del forno e le appendici laterali e superiori in quanto si trovano in zone in cui il campo elettromagnetico è trascurabile e non interferiscono con il campo all'interno della camera di cottura. Il forno presenta due

piani di simmetria che sono stati utilizzati nelle simulazioni del forno a vuoto e con una serie di impasti tutti uguali, mentre nella simulazione più realistica di un processo di cottura è possibile utilizzare solo una simmetria. I tempi di calcolo per la simulazione di questo forno sono di circa un giorno prendendo il lato delle celle elementari cubiche di 10 mm, rendendo di fatto impossibile una interazione con il programma termico.

RISULTATI

Dapprima sono state fatte delle simulazioni sul forno grande inserendo i plumcake alla temperatura di 30° C e considerandoli tutti della stessa geometria, questo equivale a fermare il nastro trasportatore ed accendere il forno una volta che gli impasti ricoprono completamente lo stesso. Questa simulazione non ha applicazioni pratiche ma è stata ripetuta per diversi tipi di configurazione dei tubi che collegati insiemi formano una lamina del condensatore per potere ottimizzare la loro posizione. Essi devono essere sufficientemente lontani dalle aperture in modo da accoppiare il minor campo possibile con la parte finale del forno che elettromagneticamente è una guida d'onda sotto taglio. Avvicinando od allontanando i tubi tra loro oppure variandone il diametro, ma facendone rimanere costante la dimensione globale, non si sono ottenute grosse variazioni della potenza dissipata e della distribuzione del campo elettromagnetico. Invece se si variano le dimensioni della lamina e quindi si avvicinano i tubi all'apertura, la potenza assorbita dall'impasto varia drasticamente rendendo del tutto inefficiente il riscaldamento a radiofrequenza.
Sono riportati risultati per tre configurazioni dei tubi che potrebbero essere adottate, una con diametro di 30 mm ed una distanza tra gli assi di 100 mm, una con diametro di 20 mm ed una distanza tra gli assi di 150 mm ed infine una con diametro 20 mm e distanza tra gli assi di 80 mm che è stata poi presa come configurazione finale. I valori della potenza assorbita dal cake al variare della posizione sono riportati in Figura 2, sono riportati diversi grafici che si riferiscono alle varie configurazioni dei tubi.

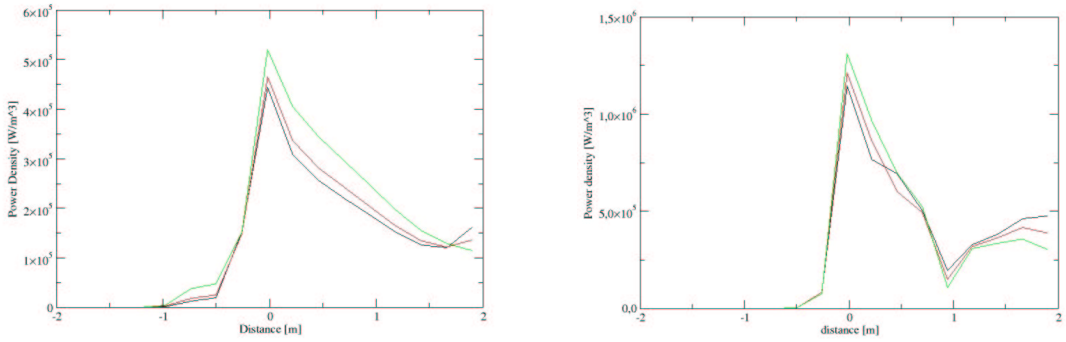

Figura 2. Potenza media dissipata su ogni plumcake. Caso con i tubi distanti 100 mm a sinistra e 80 mm a destra. Sull'asse delle ascisse è riportata la distanza del bordo del cake dall'ingresso della camera di cottura, la curva in nero si riferisce alla fila di cake più vicina al centro, poi viene la fila di cake rappresentata in rosso ed infine, la più esterna è rappresentata in verde.

In una simulazione più realistica l'altezza dell'impasto che varia dai 30 mm all'ingresso della camera di cottura ai 50 mm in uscita dalla stessa. Essi sono posti sul nastro trasportatore come rappresentato in Figura 1 e sono distanti tra loro 50 mm lungo l'asse *z* e 40 mm lungo l'asse *x*. Anche la temperatura dei cake è stata presa variabile, dai

25 °C in ingresso alla camera di cottura ai 100 °C dei cake in uscita della stessa. Inoltre, ipotizzando una condizione di cottura a regime, sono stati anche inseriti i cake nella parte iniziale del forno, uguali a quello in entrata, e nella parte finale uguali a quello in uscita. In questo modo si è persa la simmetria nel piano centrale del forno perpendicolare al nastro trasportatore, il tempo di calcolo di una esecuzione è raddoppiato così come la memoria.
La Figura 3 riporta i valori medi della potenza assorbita dai cake su ognuna delle tre file, al variare della posizione sul nastro trasportatore. Si nota che la potenza assorbita nella parte finale del forno è maggiore di quella della parte iniziale, questo è dovuto al fatto che la conducibilità dell'impasto utilizzato, aumenta all'aumentare della temperatura nel dominio di interesse, facendo si che il cake caldo assorba una potenza elettromagnetica maggiore. Per altri tipi di impasti, si ha un andamento diverso della conducibilità con la temperatura e si dovrebbe avere maggiore potenza assorbita dai cake che si trovano nella prima parte della camera di cottura.
A fine nastro il valore misurato in due punti a forno non caricato è pari a 6 V/m e 9 V/m mentre quello calcolato è in buon accordo con questi valori come riportato in Figura 4 ove sono mostrati i valori del campo elettrico alla fine del forno su un piano perpendicolare al nastro trasportatore (asse *z*). Le misure sperimentali e le simulazioni hanno dimostrato che i valori del campo elettromagnetico all'esterno del forno rientrano perfettamente nelle normative vigenti anche nel caso peggiore di forno vuoto.

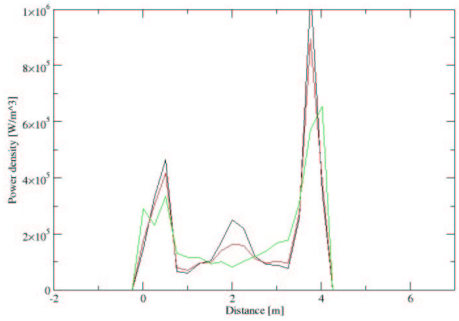

Figura 3. Potenza media dissipata su ogni plumcake per la simulazione completa del forno. Sull'asse delle ascisse è riportata la distanza del bordo del cake dall'ingresso della camera di cottura, la curva in nero si riferisce alla fila di cake più vicina al centro, poi viene la fila di cake rappresentata in rosso ed infine, la più esterna è rappresentata in verde.

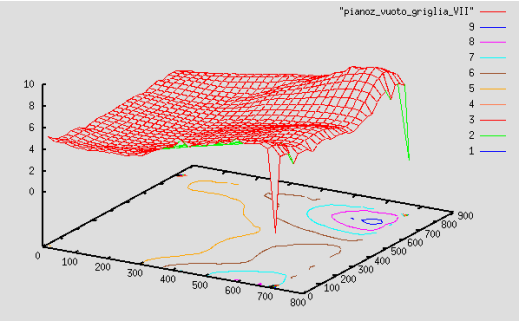

Figura 4. Valori del modulo del campo elettrico (espresso in V/m) su un piano verticale alla fine del forno, dove si potrebbe trovare un operatore, per il forno non caricato nel caso di interasse tra i tubi di 80 mm. Nel piano orizzontale sono riportate il numero di celle elementari FDTD aventi lato di 10 mm. Essendo i campi elettrici sempre minori di 10 V/m questa configurazione è stata scelta per l'analisi completa del forno.

RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia Costanzo di Perna e Renato Ricci del Dipartimento di Energetica dell'Università di Ancona per l'aiuto sulla la parte termica, Valter Mariani del Dipartimento di Elettronica ed Automatica dell'Università di Ancona per le misure elettromagnetiche e Gino Polin della Ing. Polin & C. S.p.A. di Verona per la costruzione del prototipo di forno. Questo programma di ricerca è stato finanziato dal MURST nel progetto "Prodotti a base di cereali ad alta valenza nutrizionale".