

## **ABSTRACT (italiano)**

Corso di Dottorato di Ricerca in Ingegneria Meccanica, XIII Ciclo – Nuova Serie 2011 – 2014

Titolo della tesi: Analisi teorica e sperimentale dei processi di riscaldamento con microonde

Dottoranda: Laura Giordano

Relatore: Prof. Ing. Gennaro Cuccurullo

Coordinatore: Prof. Ing. Vincenzo Sergi

I trattamenti termici costituiscono la principale applicazione tecnologica dell'industria alimentare ed hanno lo scopo di estendere la durata di conservazione dei prodotti senza comprometterne la sicurezza alimentare.

Oltre all'effetto positivo dei trattamenti alimentari, come l'inattivazione di agenti patogeni, ci sono anche alcuni limiti dovuti alla distruzione parziale di attributi di qualità dei prodotti, in particolare nutrienti termolabili, e degli attributi sensoriali.

La rivoluzione tecnologica, la consapevolezza alimentare, e la continua richiesta delle nuove generazioni hanno reso necessaria la ricerca di nuove tecnologie o miglioramenti per la trasformazione dei prodotti alimentari. Attualmente sono investigate molte tecnologie, tra cui il riscaldamento con microonde, al fine di migliorare, sostituire o integrare le tecniche convenzionali.

Le microonde vengono utilizzate con successo per riscaldare, essiccare e sterilizzare molti prodotti alimentari. Rispetto al riscaldamento tradizionale, il riscaldamento con microonde offre i seguenti vantaggi: 1) le microonde penetrano all'interno dei prodotti e quindi la cottura ha luogo nell'intero volume dell'alimento ed in modo rapido; ciò riduce in modo significativo i tempi di processo; 2) dal momento che il trasferimento di calore è veloce, i nutrienti e le vitamine, così come il sapore, le caratteristiche sensoriali ed il colore dei cibi sono ben conservati; 3) la velocissima pastorizzazione o sterilizzazione dei fluidi minimizza le perdite di nutrienti, colore e sapore; 4) minima deposizione di materiale indesiderato, grazie all'eliminazione delle superfici calde per il trasferimento di calore, dal momento che la tubazione usata è trasparente alle microonde e resta relativamente fredda rispetto al prodotto; 5) risparmio di energia a causa dell'assenza di un mezzo tra il campione e le microonde; in aggiunta, se il sistema è ben progettato, può essere raggiunta un'alta efficienza (alcuni autori hanno mostrato una riduzione dei costi energetici durante i processi di essiccazione usando le microonde, con un ulteriore incremento usando un essiccatore ad aria e le microonde in sequenza; inoltre, si consideri la possibilità di utilizzare fonti di energia alternativa, ad esempio il fotovoltaico); 6) geometria perfetta per la pulizia del sistema sul posto; 7) basso costo nella manutenzione del sistema; 8) risparmio di spazio, se il sistema viene paragonato con quelli tradizionali, basati su caldaie e scambiatori di calore a superficie.

D'altro canto, ci sono alcuni problemi che impediscono la diffusione di questa tecnica; tra essi: 1) la distribuzione disuniforme della temperatura dei prodotti trattati, dovuta alla disuniformità del campo elettromagnetico all'interno della cavità a microonde; 2) problemi relativi alla lettura e al controllo della temperatura, perché le sonde tradizionali non possono essere usate: in particolare, le termocoppie disturbano la misura e sono danneggiate dal campo elettrico, mentre le sonde a fibra ottica consentono di conoscere la temperatura soltanto in pochi punti; 3) difficoltà nella predizione del campo di temperatura, a causa dell'accoppiamento di tre fenomeni fisici, cioè la propagazione di onde elettromagnetiche, il trasferimento di calore e, in molti casi, il moto dei fluidi. Si consideri che il dimensionamento, durante la fase di progettazione, e il controllo, durante la fase operativa, potrebbero essere basati su predizioni teoriche, evitando il cosiddetto approccio "trial and error".

Per affrontare i punti critici sopra citati, durante il lavoro di tesi, sono stati sviluppati modelli teorici e sono state effettuate prove sperimentali, con riferimento ai processi "batch" e a quelli "in continuous flow".

In particolare, dopo una breve descrizione dei principi di riscaldamento con microonde, sono stati analizzati alcuni processi batch, cioè l'essiccazione delle mele e il riscaldamento "in-package" di acqua e olio. In entrambi i casi, l'uso della termografia all'infrarosso ha consentito di ottenere la distribuzione spaziale di temperatura dei campioni in prova.

L'essiccazione con microonde è stata applicata a fette di mela, e la rilevazione della temperatura con l'infrarosso ha consentito di tenere sotto controllo il loro livello termico medio superficiale nel tempo; quindi, ciò permette di seguire le curve temperatura-tempo durante il riscaldamento con microonde, secondo il processo in oggetto, entro i limiti specificati.

E' stato sviluppato un modello isoterma 2D instazionario per il trasferimento di massa per descrivere il calo peso misurato relativo all'essiccazione delle mele. Sono stati ottenuti risultati molto soddisfacenti applicando il modello al fine di recuperare i dati sperimentali, probabilmente grazie al fatto di aver operato con livelli di temperatura fissati dei campioni in prova.

L'analisi della seconda tipologia di prodotti considerati, il riscaldamento "in-package" di acqua e olio, ha consentito di mostrare la sensibilità della distribuzione di temperatura all'orientamento dei campioni, alla massa e alle proprietà dielettriche. Inoltre è stato usato un software agli elementi finiti, Comsol Multyphysics, allo scopo di sviluppare un modello numerico 3D per predire la distribuzione di temperatura della superficie dei campioni. Confrontando i risultati sperimentali e numerici, è stato provato che la strategia di simulazione agli elementi finiti proposta è molto robusta e può essere opportunamente estesa per comprendere problemi più complicati e realistici riguardanti il riscaldamento con microonde.

Nella seconda parte della tesi, è stato analizzato il processo di riscaldamento con microonde di fluidi in moto, che è più interessante avendo in mente applicazioni industriali.

Lo scopo principale è stato quello di sviluppare uno strumento numerico, capace di predire l'andamento della temperatura bulk senza grandi sforzi computazionali. E' stato dimostrato che, in assenza di variazioni significative della temperatura e per alte velocità, possono essere considerate velocità costanti e può essere usato un modello analitico che è basato sull'assunzione di generazione uniforme all'interno del liquido. Pertanto, è stato dimostrato che, in opportune condizioni, può essere ottenuta una risposta rapida adottando il modello analitico. Negli altri casi è necessario prendere in considerazione le variazioni delle proprietà dielettriche durante il processo; a questo scopo, è stata sviluppata una soluzione ibrida, numerica-analitica, che è stata confrontata con quella ottenuta Comsol Multyphisich, considerando la dipendenza della permittività dielettrica dalla temperatura; la soluzione completa numerica (CN), a causa dell'accoppiamento del problema termico e di quello elettromagnetico, ha richiesto un grande onere computazionale. Al contrario, la nuova soluzione ibrida riduce il tempo richiesto per il calcolo, ottenendo soltanto la soluzione elettromagnetica con lo strumento numerico e considerando proprietà dielettriche costanti. La dipendenza della permittività dielettrica dalla temperatura è stata tenuta in considerazione attraverso una manipolazione della distribuzione della generazione termica, introducendo un funzione peso opportunamente scelta: quest'ultima teneva conto delle variazioni del fattore di perdita dielettrica. Quindi il problema termico è stato risolto analiticamente, alimentando il termine di generazione termica con quello ottenuto interpolando la distribuzione discreta della generazione termica, utilizzando la Trasformata di Fourier Discreta. La soluzione trovata attraverso la procedura descritta è stata denominata "Enhanced Hybrid" (EH), perché migliora la cosiddetta soluzione "Basic Hybrid" (BH) mediante l'introduzione della funzione peso. Infine, è stata sviluppata una procedura teorico-sperimentale per misurare la distribuzione della temperatura dell'acqua riscaldata dalle microonde mentre fluisce in un tubo di vetro. Sono state ottenute in tempo reale mappe termiche ad alta risoluzione, elaborando le immagini termografiche. Considerando l'equazione della termografia per il caso in esame, la distribuzione di temperatura con elevata risoluzione è stata ottenuta dopo un'opportuna calibrazione; quest'ultima era richiesta a causa della presenza della griglia.

Quindi, la procedura sviluppata offre un grande contributo per la misura della temperatura all'interno di un forno a microonde, tenendo in considerazione che usualmente la temperatura è misurata in pochi punti. E' necessario un tale approccio, poiché il campo elettromagnetico irregolare provoca una distribuzione spaziale disuniforme del campo di temperatura.

Al fine di verificare la bontà del veloce modello ibrido precedentemente sviluppato, i risultati sperimentali sono stati confrontati con la soluzione EH, mostrando un accordo accettabile, con una previsione migliore per portate elevate.