

## MODELADO MATEMATICO DEL CALENTAMIENTO CONTROLADO DE ALIMENTOS EMPLEANDO MICROONDAS

Alejandro Bonfigli <sup>a</sup>, Laura A. Campañone <sup>b, d</sup>, José A. Bava <sup>a</sup> y Rodolfo H. Mascheroni <sup>c, d</sup>

<sup>a</sup> *Departamento de Electrotecnia, Facultad de Ingeniería, UNLP, albertobava@yahoo.com.ar*

<sup>b</sup> *Departamento de Ciencias Básicas, Facultad de Ingeniería, UNLP, lacampa@ing.unlp.edu.ar.*

<sup>c</sup> *Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, UNLP, rhmasche@ing.unlp.edu.ar.*

<sup>d</sup> *Centro de Investigación y Desarrollo en Criotecnología de Alimentos, CIDCA (CONICET La Plata-UNLP), 47 y 116, La Plata (1900), Argentina, <http://www.cidca.org.ar>*

**Palabras Clave:** Calentamiento, Microondas, Ecuaciones de Maxwell.

**Resumen.** Las aplicaciones de técnicas de calentamiento empleando microondas en alimentos han ido creciendo en la última década. En este contexto, existe la necesidad de entender la interacción entre las microondas y los alimentos con la finalidad de producir una mejor eficiencia en el proceso. Existe evidencia de la aparición de puntos fríos y calientes en el interior de los productos cuando son sometidos a radiaciones electromagnéticas. Esta falta de uniformidad en los perfiles internos de temperatura, constituye un obstáculo para su implementación a nivel industrial. En este trabajo se desarrolló un modelo matemático que resuelve el balance microscópico de energía, teniendo en cuenta la interacción radiación-producto a través de las ecuaciones de Maxwell. El producto se consideró tridimensional y las propiedades térmicas y electromagnéticas como función de la temperatura interna. El modelo fue resuelto por un método numérico debido a que las ecuaciones diferenciales son no lineales y altamente acopladas. Se seleccionó el método de elementos finitos empleando el software comercial COMSOL Multiphysics™ 3.4. Los módulos utilizados para el modelo fueron: Ondas Electromagnéticas (RF) y Convección y Conducción de Energía (estado transiente), empleando un mallado selectivo para obtener mayor definición en el interior del producto. El programa empleó un resolvidor directo UMFPAK. Los resultados numéricos se compararon con los resultados experimentales obtenidos en nuestro laboratorio. Los ensayos se efectuaron en un horno experimental de laboratorio, en el cual dos señales mutuamente excluyentes inciden en caras opuestas del producto a calentar. El horno consiste en un sistema de guías de onda funcionando en el modo dominante TE<sub>10</sub> a la frecuencia de trabajo 2,45 GHz. La señal se origina en un magnetrón y se fracciona en dos ramas a través de un divisor de potencia, para permitir la incidencia de señal en ambas caras del material. Los experimentos se efectuaron sobre probetas colocadas en el interior de la guía de onda y se midió la temperatura en el interior de las muestras durante diversos períodos de tiempo. La validación del modelo matemático empleando los valores experimentales de temperatura fue exitosa para muestras líquidas y para semisólidas.

## 1 INTRODUCCIÓN

El calentamiento de alimentos mediante microondas constituye un método eficiente, capaz de generar energía dentro del producto por interacción de la radiación con las moléculas de agua. Las microondas se aplican en diversos procesos presentando como ventajas: reducción en el impacto ambiental, ahorro de energía con respecto a los métodos tradicionales, uso de energía limpia, ahorro de espacio y disminución de los tiempos de proceso (Campanone y col., 2005).

También presentan ciertas desventajas en su aplicación: baja penetración de la radiación cuando los productos se encuentran a granel, baja absorción de la energía incidente debido a pobres propiedades dieléctricas de los materiales y, por último, el calentamiento no uniforme que se produce en alimentos de determinadas geometrías y tamaños, así como también en alimentos cuyas propiedades dieléctricas cambian bruscamente con la temperatura (Ku y col., 2002).

Para caracterizar la distribución de temperatura durante el calentamiento de alimentos, se debe resolver el balance microscópico de energía considerando la absorción de energía electromagnética y suponiendo propiedades térmicas, de transporte y electromagnéticas variables con la temperatura.

El comportamiento del campo eléctrico y magnético dentro de un horno microondas es muy complejo. Las ecuaciones de Maxwell describen las distribuciones de los mismos dentro de los hornos, con o sin carga (Dibben y Metaxas, 1994; Clemens y Saltiel, 1996; Verboven y col., 2003; Rattanadecho, 2006). Los balances constituyen ecuaciones diferenciales acopladas altamente no lineales, sin solución analítica, por lo tanto se emplean métodos numéricos para la resolución.

La simulación numérica permite evaluar el efecto de las condiciones particulares de los productos (composición y tamaño) y de las condiciones de operación en los tiempos de proceso y en la uniformidad en los perfiles de temperatura durante el calentamiento.

Con respecto de los métodos de resolución numérica, dos métodos fueron los más empleados en literatura: el método de Diferencias Finitas y el método de Elementos Finitos. Este último ha sido muy usado en la resolución de problemas de transferencia de energía debido fundamentalmente a su flexibilidad para el manejo de geometrías irregulares y propiedades dependientes de la temperatura y la humedad (Lin y col., 1995; Zhou y col., 1995).

Con el fin de mejorar la uniformidad de los perfiles en el interior del alimento, en la práctica se aplican distintos esquemas de trabajo: empleo de ciclos intermitentes de potencia (Chamchong y Datta, 1999, Ni y Datta, 1999; Gunasekaran y Yang, 2007), combinación de microondas con convección de aire (Datta y col., 2005) y, en menor medida, se analizó el efecto de la interferencia de las ondas electromagnéticas en el interior del alimento y la posibilidad de modificar los patrones observados (Bows y col., 1999; Gerling, 2000).

De acuerdo a lo dicho, los objetivos de este trabajo comprenden:

- Estudiar experimentalmente el calentamiento controlado mediante microondas empleando como estrategia la interferencia de las ondas incidentes
- Desarrollar un modelo matemático que resuelva la transferencia de energía durante el proceso
- Validar el modelo matemático desarrollado con datos obtenidos en nuestro laboratorio.

## 2 MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 Modelo Matemático

Para predecir los perfiles de temperatura durante el calentamiento de alimentos mediante microondas, se planteó el balance microscópico de energía realizando las siguientes suposiciones:

- 1- Temperatura inicial uniforme en el alimento,
- 2- Propiedades térmicas y dieléctricas dependientes de la temperatura,
- 3- No se consideran cambios de volumen durante el calentamiento,
- 4- Geometría regular 3 D,
- 5- Condiciones de contorno de transferencia térmica convectivas.

El balance microscópico de energía que describe el comportamiento térmico del alimento teniendo en cuenta la interacción con las microondas es el siguiente (Ayappa y col., 1991):

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k \nabla T) + Q \quad (1)$$

donde T es la temperatura, t es el tiempo,  $\rho$  es la densidad, k es la conductividad,  $C_p$  la capacidad calorífica y Q es el término correspondiente a la generación volumétrica de energía por microondas.

Para la resolución se plantearon las siguientes condiciones iniciales y de contorno:

$$t = 0 \quad T = T_{ini} \quad -L3 \leq x \leq L3; -L2 \leq y \leq L2; -L1 \leq z \leq L1; \quad (2)$$

$$z = L1; z = -L1 \quad -k \frac{\partial T}{\partial x} = h(T - T_a) \quad (3)$$

$$y = L2; y = -L2; x = L3; x = -L3 \quad q = 0 \quad (4)$$

donde x, y, z son las coordenadas rectangulares, z es la dirección de propagación; L1, L2 y L3 son los valores del semi-espesor en cada una de las direcciones;  $T_{ini}$  es la temperatura inicial; h es el coeficiente de transferencia de energía;  $T_a$  es la temperatura del aire. La condición (4) se aplicó en las paredes de la guía en contacto con la muestra.

El balance microscópico de energía se resuelve conociendo la densidad de energía por unidad de tiempo depositada en el interior del producto, función de la posición

dentro del mismo. Con este fin se plantearon las ecuaciones de Maxwell en forma diferencial, que junto a las ecuaciones constitutivas en medios homogéneos, isotrópicos y lineales permiten conocer las distribuciones de campo eléctrico y magnético. La ecuación que se resolvió es la siguiente:

$$\nabla \times (\mu_r^{-1} \nabla \times E) - k_0^2 \varepsilon_{rc} E = 0 \quad (5)$$

siendo

$$\varepsilon_{rc} = \varepsilon_r - j \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0} \quad (6)$$

Donde E es el campo eléctrico,  $\varepsilon_{rc}$  permitividad del material,  $\varepsilon_r$  es la constante dieléctrica,  $\sigma$  es la conductividad eléctrica,  $\omega$  es la frecuencia ( $2\pi f$ ) y  $\mu_r$  es la permitividad en el vacío. Las ecuaciones de contorno planteadas para la resolución suponen continuas las componentes tangenciales del campo eléctrico y magnético a través de la interfase.

Para el contorno exterior de la guía se elige la condición de conductor eléctrico perfecto:

$$N \times E = 0 \quad (7)$$

En cuanto a los contornos de los extremos de la guía, se configuran como puertos.

La resolución de las ecuaciones diferenciales (1) y (5) con sus condiciones iniciales y de contorno se llevó a cabo empleando el método numérico de los elementos finitos utilizando un software comercial, COMSOL Multiphysics versión 3.4. Para aplicar el método de elementos finitos, el software COMSOL Multiphysics utiliza una partición en formas simples del modelo geométrico, llamada malla. La cantidad de elementos (o refinado) de la malla utilizada, influirá en la representación del modelo. Debe tenerse en cuenta que, a mayor cantidad de elementos mayor exactitud, insumiendo mayor capacidad de cálculo del procesador disponible. En la Tabla 1 se muestran los parámetros de mallado empleados para un tamaño de producto de 10 cm.

Para la resolución de la Ec. (5) se consideró el análisis de propagación armónica mientras que la ecuación de energía Ec. (1) se resolvió en el modo transiente, empleando el resolvidor Directo UMFPACK.

Parámetros de mallado	Cantidad
Puntos en la malla	1996
Elementos tetrahédricos	8426
Elementos del contorno	1804
Elementos de los lados	167

Tabla 1: Parámetros de mallado que se utilizaron en la simulación numérica (tamaño de producto 10 cm).

## 2.2 Horno experimental

Para realizar los ensayos de calentamiento de alimentos se construyó un horno experimental (Fig. 1) con un oscilador magnetrón de 500W. El mismo está acoplado a una guía de onda por donde se transfiere la onda electromagnética en el modo

dominante  $TE_{10}$  a una frecuencia de trabajo de 2,45 GHz. Para conseguir la incidencia del campo en ambas caras del material a ensayar, se diseñó un divisor de potencia en guía de onda y a través de codos se condujo la señal a un tramo de guía de onda recta en donde se introduce la muestra.

La energía generada por el magnetrón es propagada hacia el divisor de potencia, cuya función es repartir la potencia de entrada en partes iguales en las ramas de salida. Dicho divisor de potencia fue construido de forma tal de estar adaptado para poder minimizar reflexiones hacia la fuente generadora de microondas que puedan causarle daño. Los ensayos preliminares se realizaron introduciendo una probeta de acrílico en el interior de la guía de onda. El tramo recto de la guía (30 cm) posee una ventana en donde se pueden insertar las probetas a ensayar y de esa forma hacerle incidir ondas electromagnéticas en ambas caras.

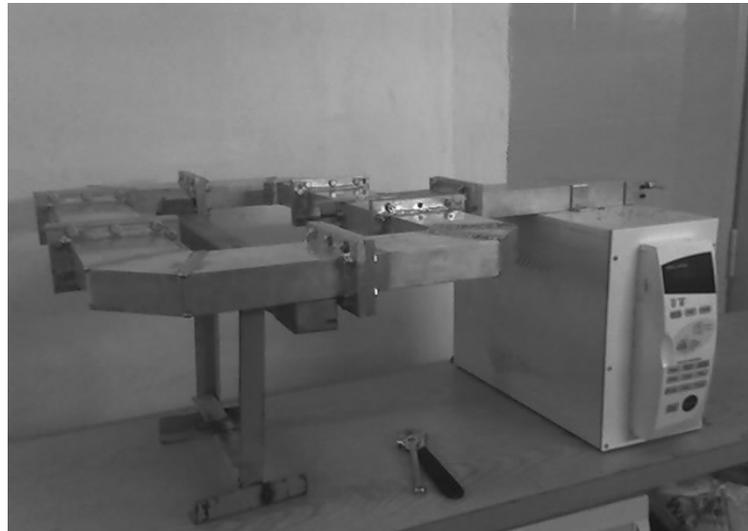


Fig.1: Horno experimental de laboratorio.

Los ensayos experimentales se efectuaron empleando tres probetas de distinto tamaño: probeta A (80x 100 x 32 mm), probeta B (80 x 50 x 32 mm) y probeta C (80 x 25 x 32 mm). En todos los casos las probetas ocupan todo el espacio de ancho y alto de la guía de onda, variando el espesor.

El ensayo experimental consiste en la determinación del aumento de temperaturas luego de un tiempo de exposición (30 s). Las temperaturas se midieron empleando un sensor de temperatura óptico modelo FOT-L (Fiso Technol. Inc, Canadá). La sonda que realiza la medición es de fibra óptica con un rango de  $-40^{\circ}\text{C}$  a  $300^{\circ}\text{C}$ , con una precisión de  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ .

En el ensayo, se introduce la sonda dentro de la probeta y se registra la temperatura durante todo el ensayo. También se registraron las temperaturas inicial y final con termocuplas tipo T para medir la temperatura media de las muestras.

### 3 RESULTADOS Y DISCUSION

#### 3.1 Determinación de la potencia

A fin de evaluar las pérdidas de potencia en el horno experimental, se realizaron medidas del divisor de potencia con un analizador de redes. Los resultados obtenidos se muestran en la Fig. 2.

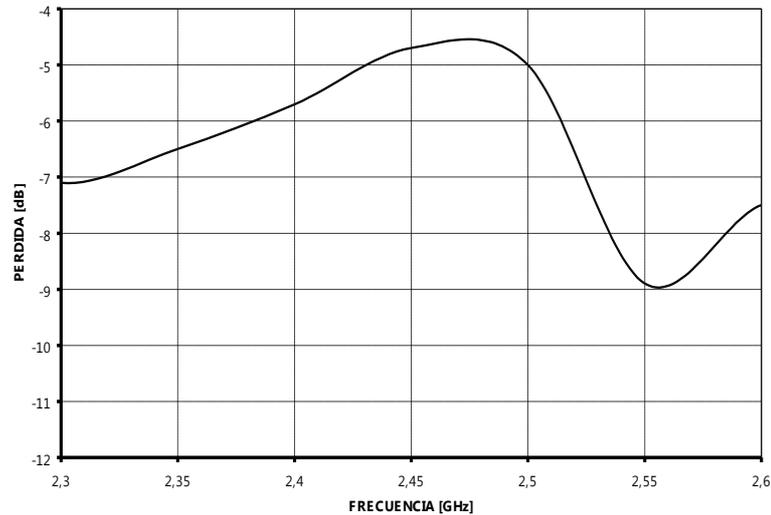


Figura 2: Grafica de pérdidas totales

Según se observa en la Fig. 2, en el rango de trabajo (2,45 GHz) existe una pérdida total de 4,7 dB. Como el divisor tiene una pérdida propia de 3 dB, esto implica una pérdida de inserción adicional de 1,7 dB, en cada rama. Sumando las pérdidas de los codos, existe una pérdida total por rama de 5 dB, teniendo en cuenta la potencia nominal del magnetron, se obtiene una potencia por rama en la zona de ensayo de 150 W. Este valor es considerado como valor de ingreso en el modelo matemático.

#### 3.2 Simulación Numérica de la Guía sin Carga

En primer lugar se simuló el sistema sin carga. El modelo numérico se resolvió sobre un tramo de guía de onda recto, en el dominio 3-D. Los resultados se observan en la Fig. 3. Al hacer incidir un campo electromagnético desde los dos extremos de la guía, se produce una onda estacionaria con sus respectivos máximos y mínimos. En la longitud del tramo recto (30 cm) se presentan 4 máximos y 3 valles.

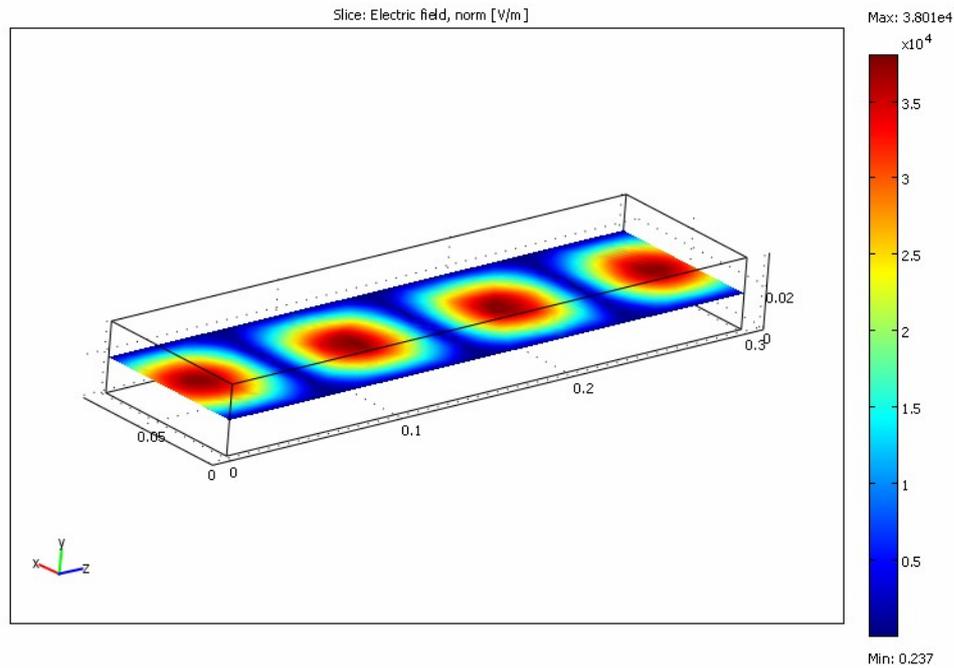


Fig.3. Simulación numérica de la guía de onda sin carga

### 3.3 Simulación Numérica de la Guía con Carga

Para realizar la simulación de la guía con carga al modelo que se presenta en la Figura 3 se le inserta un bloque en su parte central, cuyo tamaño coincide con las distintas probetas a ensayar.

En las Fig. 4, 5 y 6, se observan los resultados numéricos de las probetas con agua, desde el punto de vista electromagnético y térmico.

Los valores de temperatura media obtenidos de los ensayos experimentales utilizando diferentes tamaños de muestras se presentan en la Tabla 2.

PROBETA/ ESPESOR	TIEMPO DEL ENSAYO [s]	NUMERO DE MUESTRAS	AUMENTO PROMEDIO [°C]
<b>A (10 cm)</b>	30	15	2.4
<b>B (5 cm)</b>	30	9	2.8
<b>C (2.5 cm)</b>	30	7	6.9

Tabla 2. Resultados de ensayos experimentales luego de 30 s de calentamiento.

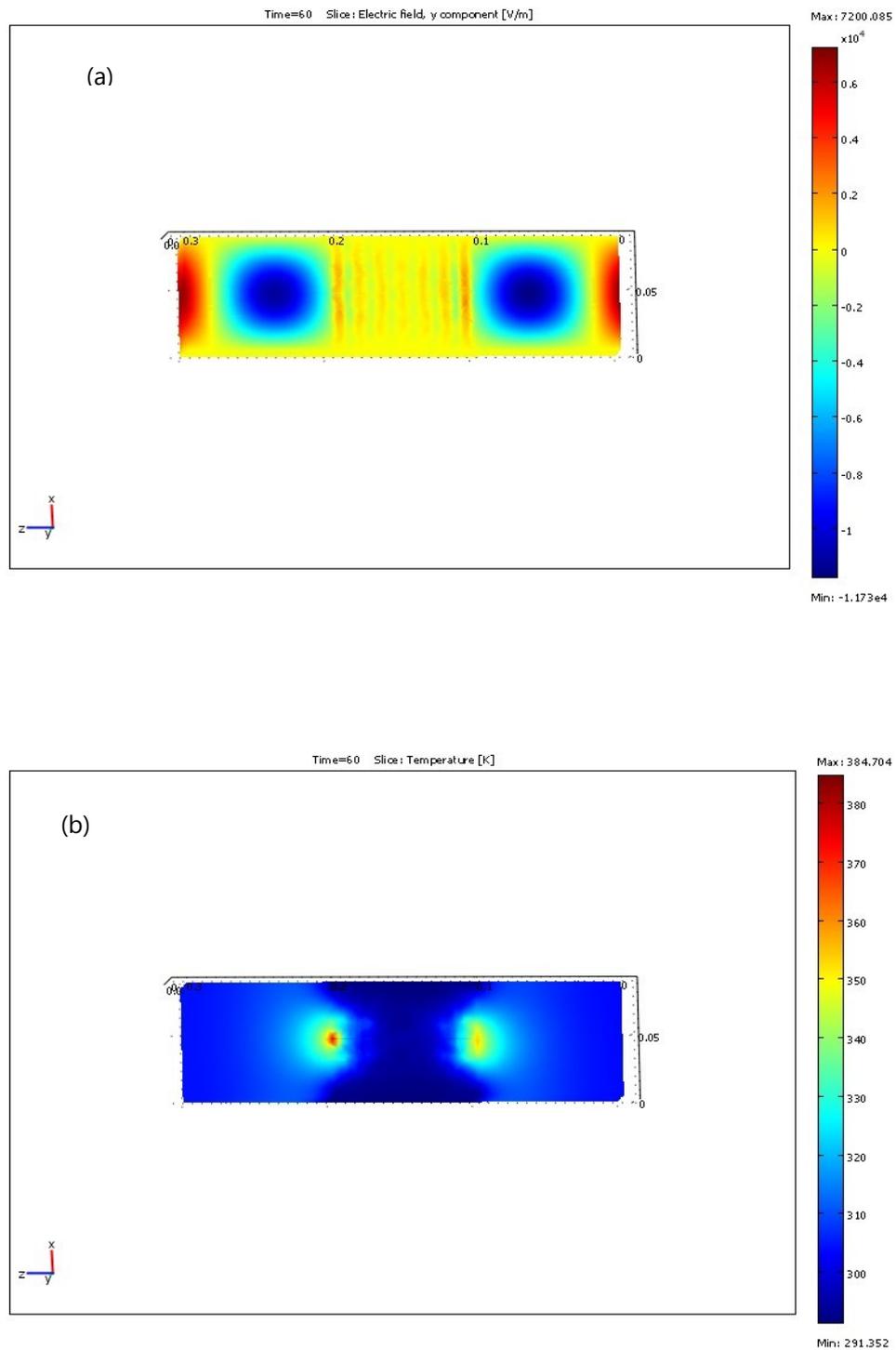


Figura 4: Resultados numéricos electromagnéticos (a) y térmicos (b) de una de las probetas ensayadas (tamaño 10 cm) luego de 60 s de calentamiento.

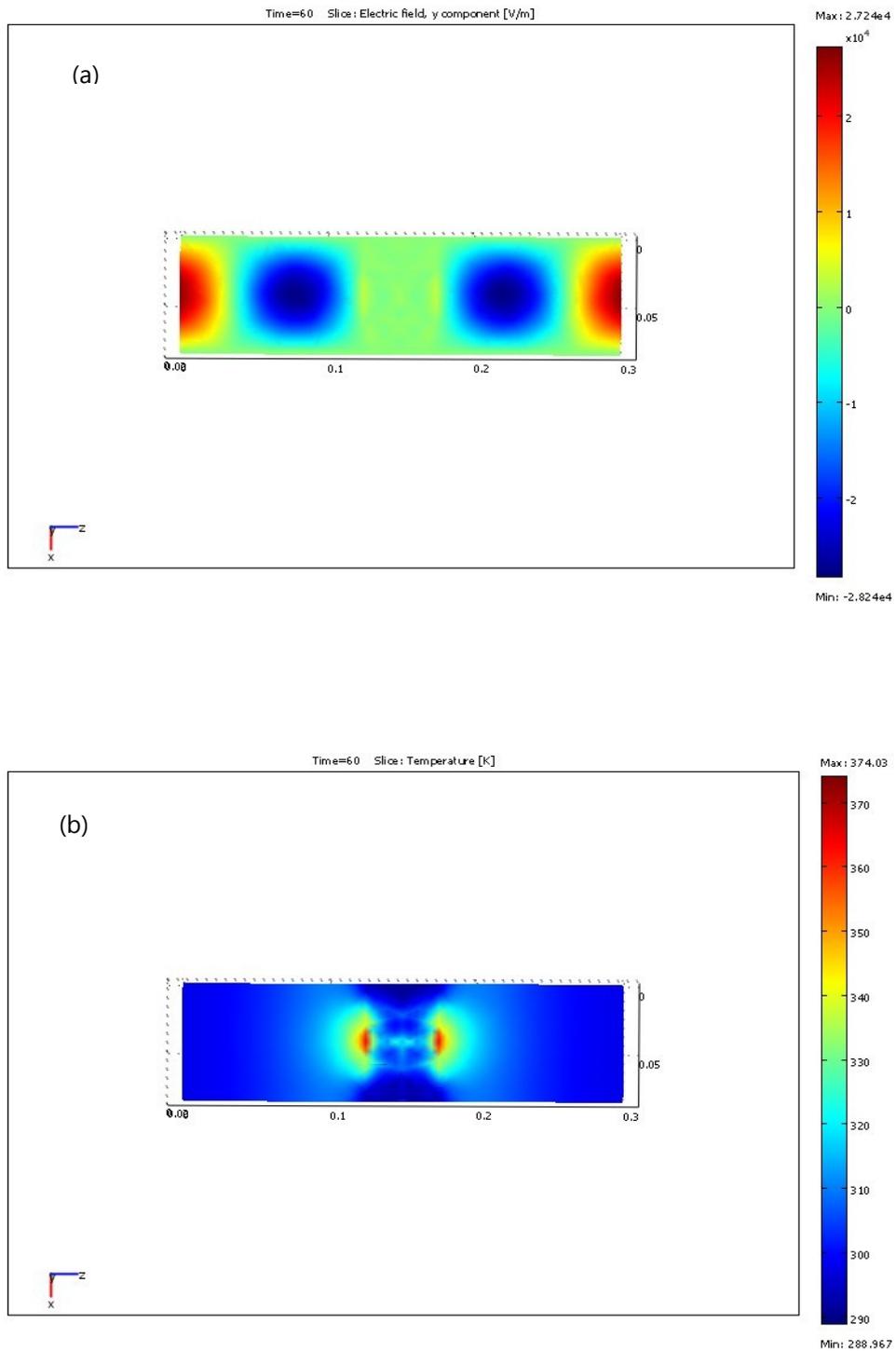


Figura 5: Resultados numéricos electromagnéticos (a) y térmicos (b) de una de las probetas ensayadas (tamaño 5 cm) luego de 60 s de calentamiento.

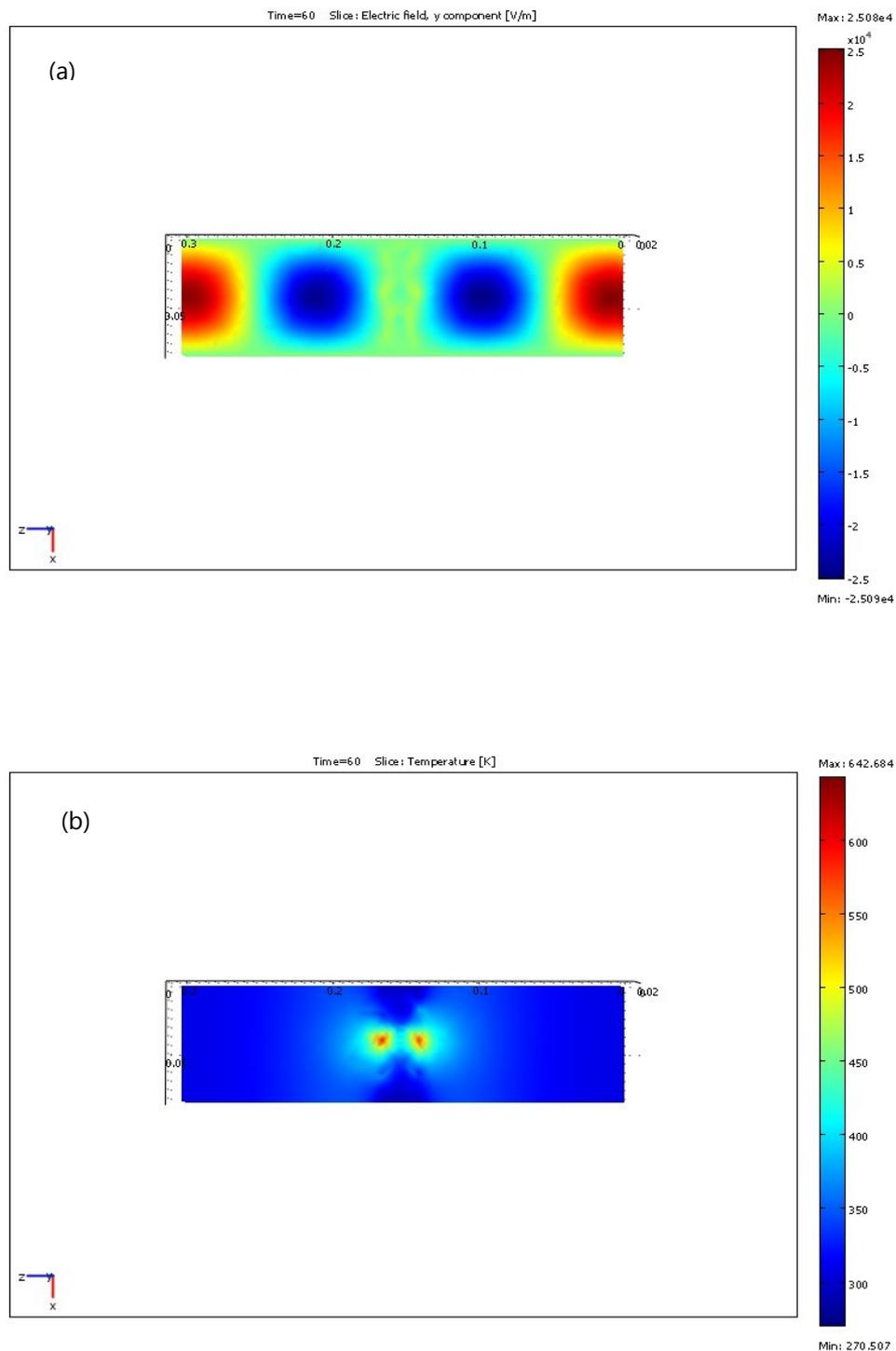


Figura 6: Resultados numéricos electromagnéticos (a) y térmicos (b) de una de las probetas ensayadas (tamaño 2.5 cm) luego de 60 s de calentamiento.

Se observa que a medida que disminuye el tamaño de la probeta, el aumento de temperatura es mayor en el tiempo ensayado. Estos valores se usaron para validar el modelo matemático. En la Tabla 3 se presentan los resultados numéricos

PROBETA	TIEMPO DEL ENSAYO [s]	TEMPERATURA INICIAL [°C]	TEMPERATURA FINAL [°C]	$\Delta T$ [°C]
<b>A</b>	30	30	32,4	2.4
<b>B</b>	30	30	32,9	2.9
<b>C</b>	30	30	36.9	6.9

Tabla 3. Resultados predichos por el modelo numérico luego de 30 s de calentamiento.

Los resultados revelan que el modelo propuesto es exitoso en la predicción del aumento de temperatura media en muestras líquidas.

Por otro lado se empleó el modelo para predecir la historia térmica de una muestra semisólida. Para ello se seleccionó puré de papas, el mismo se colocó en la probeta B y se determinó la temperatura en el centro de la probeta. En la Fig. 7 se presenta la historia térmica predicha de dicho punto y los valores obtenidos experimentalmente.

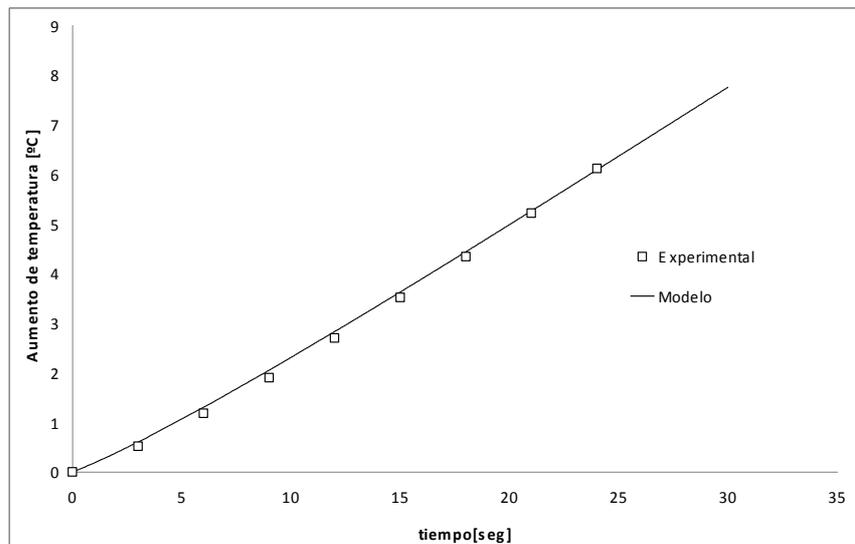


Figura 7: Historia térmica predicha y valores experimentales del centro de la probeta B (puré de papas)

#### 4 CONCLUSIONES

La simulación numérica permitió la evaluación de un esquema de trabajo con microondas en el cual se emplea la interferencia de las ondas incidentes. Se puede observar que el modelo predice con exactitud la historia térmica de las muestras analizadas. Se puede concluir que el modelo propuesto es una herramienta adecuada

para predecir correctamente la temperatura media de líquidos y además es capaz de reproducir la historia térmica de un punto en el interior de un material sólido o semisólido.

## REFERENCIAS

- Ayappa K.G., Davis H.T., Crapiste G., Davis E.A. & Gordon J., Microwave heating: an evaluation of power formulations. *Chemical Engineering Science*, 46(4): 1005-1016, 1991.
- Bows, J.R., Patrick, M.L., Janes, R., Metaxas, A.C., and Dibben, D.C., Microwave phase control heating. *International Journal of Food Science and Technology*, 34: 295, 1999.
- Campañone, L.A., and Zaritzky, N.E., Mathematical analysis of microwave heating process. *Journal of Food Engineering*, 69: 359, 2005.
- Chamchong, M., and Datta, A.K., Thawing of foods in a microwave oven: I. Effect of power levels and power cycling. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 34(1): 9, 1999.
- Clemens, J., and Saltiel, C. Numerical modeling of materials processing in microwave furnaces. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 39(8): 1665, 1996.
- Datta, A.K., and Zhang, J., Porous media approach to heat and mass transfer in solid foods. *ASAE Meeting Presentation, paper N° 99-3068*, 1, 1999.
- Datta, A.K., and Anantheswaran, R.C., Handbook of microwave technology for food applications. *Marcel Dekker Inc. USA*, 2005.
- Dibben, D.C., and Metaxas, A.C., Experimental verification of a finite element solution to heating problems in a multi-mode cavity. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 29(4): 242, 1994.
- Gerling, J.F., Waveguide components and configurations for optimal performance in microwave heating systems. *Gerling Applied Engineering Inc.*, 1, 2000.
- Gunasekaran, S., and Yang, H., Effect of experimental parameters on temperature distribution during continuous and pulsed microwave heating. *Journal of Food Engineering*, 78: 1452, 2007.
- Ku, H.S., Siores, E., Taube, A., and Ball, J.A.R., Productivity improvement through the use of industrial microwave technologies. *Computers & Industrial Engineering*, 42: 281, 2002.
- Lin, Y.E., Anantheswaran, R.C., and Puri, V.M., Finite element analysis of microwave heating of solid foods. *Journal Food Engineering*, 25: 85-112, 1995.
- Ni, H., and Datta, A.K., Moisture loss as related to heating uniformity in microwave processing of solid foods. *Journal of Food Process Engineering*, 22: 367, 1999.
- Rattanadecho, P., The simulation of microwave heating of wood using a rectangular wave guide: Influence of frequency and sample size. *Chemical Engineering Science*, 61: 4798, 2006.
- Verboven, P., Datta, A.K., Anh, N.T., Scheerlinck, N., and Nicolai, B.M., Computation

of airflow effects on heat and mass transfer in a microwave oven. *Journal of Food Engineering*, 59: 181, 2003.

Zhou, L., Puri, V.M., Anantheswaran, R.C., and Yeh, G., Finite element modeling of heat and mass transfer in food materials during microwave heating—model development and validation. *Journal of Food Engineering*, 25: 509–529, 1995.