

Asociación Argentina  
de Mecánica Computacional



Mecánica Computacional Vol XXXV, págs. 789-804 (artículo completo)  
Martín I. Idiart, Ana E. Scarabino y Mario A. Storti (Eds.)  
La Plata, 7-10 Noviembre 2017

## MODELADO DE LA FLUIDODINÁMICA Y TRANSPORTE DE VAPOR EN HORNOS MICROONDAS

Javier R. Arballo<sup>a,b</sup>, Sandro M. Goñi<sup>a,b</sup> y Rodolfo H. Mascheroni<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup>CIDCA (CONICET La Plata-UNLP-CIC). 47 y 116 (1900), La Plata, Argentina,  
[jraballo@conicet.gov.ar](mailto:jraballo@conicet.gov.ar), <https://cidca.quimica.unlp.edu.ar>

<sup>b</sup>Facultad de Ingeniería, UNLP. 1 y 47 (1900), La Plata, Argentina, <http://www.ing.unlp.edu.ar>

**Palabras Clave:** Hornos microondas, CFD, Acumulación de vapor, Condensación.

**Resumen.** El objetivo del presente trabajo fue estudiar la acumulación de vapor de agua dentro de hornos de microondas (HMO), tanto experimental como numéricamente a través del modelado y simulación computacional. El agua que se evapora de los alimentos debe purgarse del horno para evitar su acumulación. Cuando el vapor alcanza las paredes frías del horno, condensa y produce gotas, las cuales continúan creciendo hasta que eventualmente caerán. Esto puede producir daños en los recipientes debido al rápido calentamiento del agua sobre los mismos. En este trabajo, se determinó experimentalmente el caudal de aire que circula dentro de un HMO. Luego se desarrolló un modelo-3D de la geometría del HMO y se aproximaron las secciones de entrada y salida de aire con rectángulos. Dado el bajo caudal de aire obtenido en los experimentos, se determinó que un modelo laminar es suficiente para representar el flujo de aire dentro del horno. Se realizaron diversas simulaciones del flujo de aire dentro del horno, tanto en estado estacionario como transitorio. Luego se realizaron experimentos de calentamiento de agua pura (potencia: 10, 20 y 30%), se midió la humedad y temperatura del aire a la salida, la temperatura del agua, y la pérdida de peso al final del proceso. Posteriormente se incorporó al modelo la geometría del recipiente con agua y de la guía de ondas, de manera tal de incluir el balance de energía y materia. Para disminuir los tiempos de cálculo, se resolvió la fluidodinámica en estado estacionario, y luego se usó el campo de velocidades obtenido para resolver el balance de energía y de materia en estado transitorio. Las predicciones de humedad y temperatura se compararon aceptablemente con los valores experimentales.

## 1 INTRODUCCIÓN

La cocción o calentamiento en hornos de microondas (HMO) es una práctica muy habitual a nivel hogareño, debido a su velocidad de calentamiento y facilidad de uso. Asimismo, en los últimos años se está produciendo un aumento gradual en las aplicaciones industriales, como así también en su uso junto a otras técnicas tradicionales de cocción y a otros procesos (Datta y Rakesh, 2012; Chizoba Ekezie et al. 2017; Orsat et al. 2017), debido a la mayor velocidad de calentamiento, mayor productividad, y a la eficiencia energética (Marra et al. 2010).

En la cocción o calentamiento tradicional de alimentos sólidos y semisólidos, la energía que alcanza la superficie del mismo (por conducción, convección y/o radiación) se transfiere internamente por conducción. En cambio, en el calentamiento en HMO, la absorción de energía se realiza en forma volumétrica, debido a que las microondas se propagan en forma de ondas electromagnéticas que gradualmente son absorbidas por moléculas dipolares (como el agua) y por iones (sales) que se encuentran en los alimentos. En consecuencia, las moléculas dipolares tratan de rotar siguiendo la variación del campo electromagnético (típicamente 2450 MHz), lo cual produce una gran liberación de energía debido a la fricción. La absorción de esta energía por parte de los alimentos depende fuertemente de sus propiedades dieléctricas, sus propiedades térmicas, su composición y forma.

Si bien el procesamiento por microondas es una tecnología madura, continúa siendo un área de investigación y desarrollo activa, principalmente debido a su velocidad de calentamiento y a la posibilidad de disminuir el consumo de energía. En la literatura especializada pueden encontrarse numerosos trabajos respecto al modelado y la simulación del calentamiento en HMO de alimentos y otros materiales. Los balances de energía y materia dentro del alimento para describir el fenómeno pueden tener diferentes grados de complejidad. Campañone y Zaritzky (2005) consideraron únicamente la transferencia de energía usando la ley de Fourier, en geometrías unidimensionales y tridimensionales, utilizando propiedades térmicas y dieléctricas dependientes de la temperatura, y una condición de contorno convectiva con un coeficiente de transferencia de energía efectivo. Asumieron que el campo electromagnético incidente es uniforme y normal a la superficie de la muestra, y se utilizó ley de Lambert para aproximar la energía absorbida por el alimento. La validación fue realizada considerando diversos resultados de otros autores y experimentos propios. Resolvieron todo el sistema usando el método de diferencias finitas, implementado ad-hoc, y obtuvieron buenos resultados, excepto a tiempos largos, donde la evaporación de agua comienza a ser relevante y el modelo no lo considera.

Zhou et al. (1995) consideraron la transferencia de energía usando la ley de Fourier, mientras que la ley de Fick fue usada para describir la variación interna del contenido de agua, para un paralelepípedo rectángulo y un cilindro finito, usando muestras de papa para los experimentos. Utilizaron propiedades térmicas y dieléctricas constantes, y determinaron la absorción de microondas usando la ley de Lambert. Para ambos balances emplearon condiciones de contorno convectivas. La evaporación fue impuesta en la superficie, a partir de mediciones experimentales. El sistema fue resuelto usando el método de elementos finitos y ANSYS, con resultados aceptables, pero usaron tiempos cortos para evitar la evaporación intensiva.

Arballo et al. (2010), también consideraron transferencia de energía usando la ley de Fourier y transporte de agua usando la ley de Fick, para un paralelepípedo rectángulo, usando muestras de pera. Utilizaron propiedades térmicas constantes y dieléctricas dependientes de la temperatura, y la absorción de microondas se estimó usando la ley de Lambert, considerando ciclos de encendido/apagado. Para ambos balances emplearon condiciones de contorno convectivas, y el calor de vaporización fue impuesto en la superficie. El proceso fue dividido

en dos etapas; en la primera se obtiene el calentamiento del sistema hasta alcanzar la temperatura de evaporación, y en la segunda se produce una vaporización intensa, donde la potencia absorbida se equilibra con la evaporación. El sistema fue resuelto usando el método de diferencias finitas implementado ad-hoc, con buenos resultados.

Chen et al. (2014) modelaron la geometría de un HMO y un recipiente con puré de papa. La distribución del campo electromagnético en el horno y el alimento fue resuelta usando las ecuaciones de Maxwell, y se utilizó un modelo bifásico de medio poroso para describir la variación de contenido de agua líquida, vapor de agua y aire dentro del alimento, considerando transporte difusivo, convectivo y cambio de fase. El balance de energía también cuenta con términos conductivos y convectivos, además de la absorción de microondas y el calor de vaporización. Las propiedades térmicas y dieléctricas dependieron de la temperatura. El flujo de vapor en la superficie considera transporte difusivo y convectivo, y además puede estar presente flujo de líquido, si la superficie se encuentra saturada. El flujo de energía en la superficie también considera el flujo de las especies (y líquido si está presente), y el enfriamiento (debido a que el aire del horno está a menor temperatura) usando un coeficiente de transferencia de energía. El modelo completo fue resuelto en COMSOL Multiphysics, usando rotación del plato del HMO, y se obtuvieron resultados aceptables. Diversos parámetros del modelo fueron fijados arbitrariamente, dada la falta de información para estimar sus valores, y con otros parámetros los autores realizaron un análisis de sensibilidad.

Ninguno de los trabajos mencionados anteriormente consideró la fluidodinámica dentro de los HMO. En todos los casos se establecieron las condiciones de contorno para los balances de materia y energía usando coeficientes de transferencia de energía y materia efectivos, obtenidos de correlaciones o ajustados a partir de experimentos. Asimismo, no se consideró el efecto de la variación de humedad y temperatura del aire dentro del HMO.

Pocos trabajos han abordado el estudio de la fluidodinámica en HMO. Verboven et al. (2003) realizaron simulaciones de la fluidodinámica en un HMO, considerando una muestra de forma cilíndrica. Dado que sus objetivos fueron estudiar el patrón de flujo y estimar valores de coeficientes de transferencia de energía, resolvieron los balances para el aire, en estado estacionario, asumiendo una temperatura constante de la superficie del alimento (sin resolver el modelo de microondas), considerando convección natural, forzada y combinada. Dada la baja velocidad de circulación de aire, emplearon un modelo laminar. En pocos trabajos se ha considerado el efecto del aporte de energía y vapor desde el alimento hacia el ambiente del HMO. Marra et al. (2010) desarrollaron un modelo 2D para estudiar el efecto de la circulación de aire en la distribución de temperatura y humedad del alimento. Implementaron un modelo de régimen turbulento, transitorio, y en el alimento incorporaron el balance de energía y de agua líquida y vapor. Consideraron el caso de secado tradicional con circulación forzada de aire y sin microondas, el secado solo por microondas, y el secado combinado, con diferentes velocidades de circulación. Los autores emplearon un modelo de flujo turbulento, dado que las velocidades de circulación de aire fueron mucho más elevadas que en los HMO de tipo doméstico.

La acumulación de vapor de agua dentro de los HMO se evita usando perforaciones en sus paredes, por las cuales circula aire impulsado por un ventilador. A pesar de este diseño, la función principal de la ventilación forzada es refrigerar el magnetrón, por lo cual no es suficiente para remover el vapor generado. Cuando se genera una cantidad apreciable de vapor, el sistema no puede removerlo, y una cantidad importante de agua condensa en las paredes del horno, las cuales están frías. Las gotas formadas pueden seguir creciendo, si el campo local es lo suficientemente débil como para evaporarlas, hasta el tamaño suficiente para fluir por las paredes y caer del techo.

En consecuencia, el objetivo de este trabajo fue estudiar, experimental y numéricamente, la

acumulación de vapor de agua dentro de HMO. Para esto, se realizaron pruebas experimentales usando agua como muestra, calentada en un HMO doméstico. Durante los experimentos se midió la temperatura del agua, y la humedad y temperatura del aire a la salida. El sistema se modeló usando una geometría aproximada del HMO, las secciones de entrada y salida de aire, la guía de ondas, y el vaso de vidrio conteniendo el agua, y se resolvió finalmente la fluidodinámica y la distribución del campo electromagnético en estado estacionario, y el calentamiento de agua y transporte de vapor y energía en el aire en estado transitorio. Los resultados obtenidos fueron satisfactorios, y el modelo servirá como punto de partida para el desarrollo de geometrías y ventilación que eviten o disminuyan la condensación de agua en el techo y paredes del HMO.

## 2 MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 Experimentos

**Determinación del caudal de aire.** Con el propósito de medir la velocidad de flujo de aire dentro del horno de microondas (configurado con el magnetrón apagado), se construyó un sistema de canalización del fluido a la salida (Fig. 1), que permite simplificar el complejo sistema de orificios a una sola sección de salida. De esta manera, se midió la velocidad del aire a la salida con un anemómetro (TESTO, modelo 475-2). A partir de las mediciones fueron obtenidos los valores del caudal utilizando la Ec. (1) y (2).

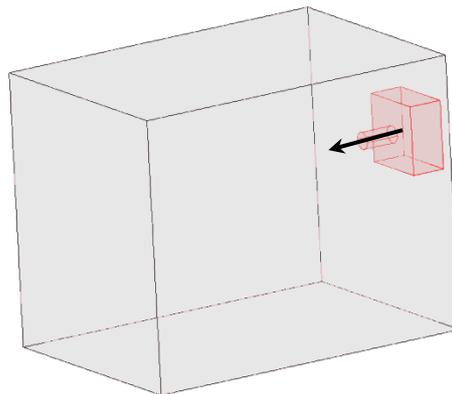


Figura 1. Esquema del sistema de canalización del aire, colocado en la sección de salida de aire del horno de microondas.

$$Q_{v \text{ aire}} = v \cdot S \quad (1)$$

$$Q_{m \text{ aire}} = Q_{v \text{ aire}} \cdot \rho_{\text{aire}} \quad (2)$$

donde  $Q_v$  y  $Q_m$  son el caudal de aire volumétrico ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) y másico ( $\text{kg}/\text{s}$ ), respectivamente;  $v$  es la velocidad del aire ( $\text{m}/\text{s}$ ),  $S$  es el área de la sección transversal al flujo del aire ( $\text{m}^2$ ) y  $\rho_{\text{aire}}$  es la densidad del aire ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ).

**Mediciones de temperatura y humedad.** Para la validación el modelo matemático se realizaron experimentos de calentamiento de agua destilada empleando un horno microondas (BGH, modelo Quick-Chef 17950) cuya potencia nominal es 1000 W y frecuencia de operación de 2450 MHz. Para medir la evolución de la temperatura del agua dentro del horno, se colocaron 100mL agua destilada en un vaso de precipitado de 250mL y se tomaron las medidas en diferentes puntos dentro del vaso durante el calentamiento con microondas (exactitud  $\pm 1^\circ\text{C}$ ) usando sensores de fibra óptica (FISO Technologies Inc., modelo FOT-L-

SD), que permiten medir la temperatura dentro del horno en funcionamiento (Fig. 2). Los sensores se conectaron a un dispositivo de adquisición de datos (FISO Technologies Inc., modelo FTI-10 single-channel signal conditioner) vinculado a una computadora, que cuenta con un software (FISOCOMMANDER standard-edition v2.2.2.1) que permite leer y registrar valores de temperatura a ciertos intervalos de muestreo (1s para el presente trabajo).



Figura 2. Medición de la temperatura con sonda de fibra óptica dentro del vaso con agua destilada durante el calentamiento en horno de microondas.

Al mismo tiempo, se midió la temperatura y la humedad del aire luego de atravesar la sección de salida del horno de microondas (Fig. 3, HYGROCHRON-iButton, modelo DS1923 F5).

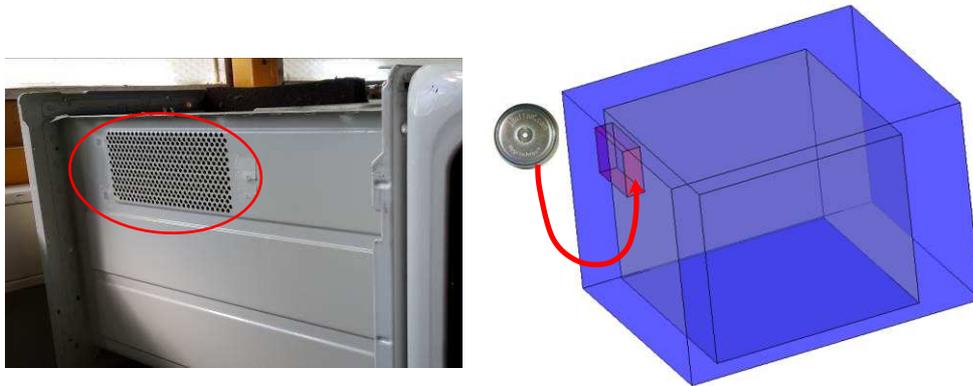


Figura 3. (a) Foto de la sección de salida de aire y (b) esquema del sistema para las mediciones de temperatura y humedad del aire.

## 2.2 Modelado Matemático

Durante el proceso de calentamiento con microondas es necesario modelar varios fenómenos físicos que incluyen 1) la fluidodinámica del aire dentro del horno de microondas vacío y cargado, 2) la distribución del campo electromagnético en el horno y en la muestra, 3) el transporte de vapor y de energía en el aire, y 4) el calentamiento del agua.

### Modelado geometría 3D

La construcción del modelo geométrico completo consistió en 5 partes diferentes (Fig. 4). La cavidad del HMO con secciones entrada y salida del aire, la guía de onda, el magnetrón, el

vaso de vidrio y el agua. No se consideró la base de apoyo del vaso; la misma puede afectar al flujo de aire pero no a la distribución del campo electromagnético.

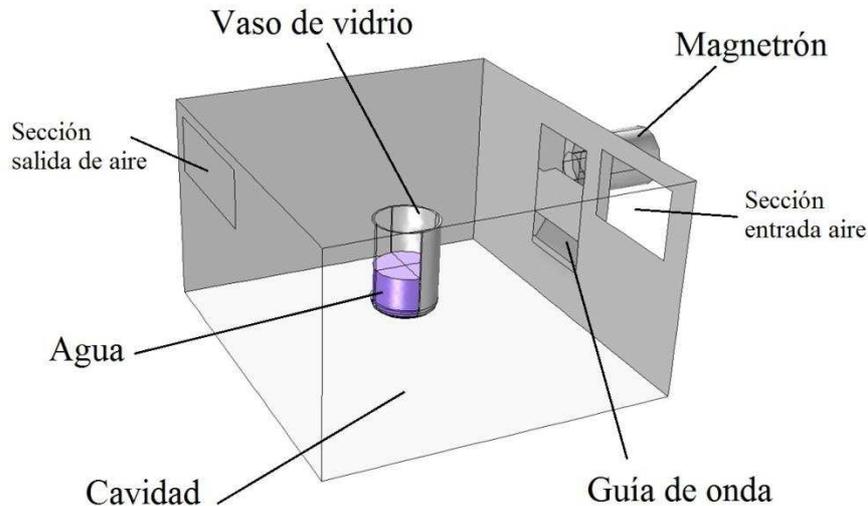


Figura 4. Geometría 3D del horno de microondas conteniendo un vaso con agua líquida.

#### Modelado de la Fluidodinámica (CFD)

Considerando trabajos publicados sobre esta temática, se estableció en primera instancia un modelo de flujo laminar incompresible, dado que se espera que las velocidades de circulación de aire sean bajas (Verboven et al., 2003), y se trabajó en estado estacionario, dado que se asume que se alcanza muy rápidamente un estado estable del sistema. Entonces, en el aire se plantearon el balance de cantidad de movimiento y de materia:

$$\rho_{aire} \vec{u} \cdot \nabla \vec{u} = \nabla \cdot (\mu_{aire} (\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T)) - \nabla \cdot p \quad (3)$$

$$\nabla \vec{u} = 0 \quad (4)$$

donde  $\rho_{aire}$  es la densidad del aire,  $\vec{u}$  es el vector de velocidad del aire,  $\mu_{aire}$  es la viscosidad dinámica del aire y  $p$  es presión.

Las condiciones de contorno para el balance de cantidad de movimiento se establecieron como: (a) velocidad nula en todas las paredes y superficies (como las paredes del vaso); (b) flujo másico (el medido experimentalmente) en la sección de entrada; (c) presión prescrita en la sección de salida. La fluidodinámica se resolvió usando solo la geometría del horno, y luego incorporando el vaso con agua.

#### Modelado de la distribución del campo electromagnético

Para el modelado del campo electromagnético se considera la distribución de energía tanto en el horno como dentro del producto a través de la resolución de las ecuaciones de Maxwell:

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

donde  $\epsilon_{rc}$  es la permitividad dieléctrica compleja,  $\mu_r$  es la permeabilidad magnética y  $k_o$  es la constante de propagación.

$$\epsilon_{rc} = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (6)$$

$$k_o = \alpha + i\beta \quad (7)$$

$$\alpha = \frac{2\pi f}{c} \sqrt{\frac{\varepsilon'(\sqrt{(1 + \tan^2 \delta)} + 1)}{2}} \quad (8)$$

$$\beta = \frac{2\pi f}{c} \sqrt{\frac{\varepsilon'(\sqrt{(1 + \tan^2 \delta)} - 1)}{2}} \quad (9)$$

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (10)$$

donde  $\varepsilon'$  es la constante dieléctrica,  $\varepsilon''$  es el factor de pérdida dieléctrica,  $\beta$  es el factor de atenuación,  $f$  es la frecuencia de la radiación y  $c$  es la velocidad de la luz.

La Ec. (5) se resolvió considerando las respectivas condiciones de contorno. Para las paredes metálicas del horno y de la guía de onda se empleó la condición de conductor eléctrico perfecto:

$$n \times E = 0 \quad (12)$$

La fuente de energía electromagnética se incorporó a través de la condición de contorno de puerto coaxial (magnetron). Este puerto es excitado por medio de una onda eléctrica transversal. Teniendo en cuenta la frecuencia de operación del horno de microondas (2.45 GHz), el modo TE<sub>10</sub> se consideró como único modo de propagación a través de la guía de onda. Por consiguiente, en este modelo la potencia absorbida por unidad de volumen,  $Q_{mic}$  (W/m<sup>3</sup>), debido a la interacción de las microondas con el alimento se expresa como:

$$Q_{mic}(x, y, z, t) = \frac{1}{2} \omega \varepsilon_0 \varepsilon'' |E|^2 \quad (13)$$

donde  $E$  es la intensidad del campo eléctrico.

### Modelado de la transferencia de calor y materia

Para el desarrollo del modelo de la transferencia de calor y materia se deben considerar los sistemas: aire y agua.

En el caso del agua el balance microscópico de energía incluye un término de generación interna debido a la energía suministrada por las microondas (Lin et al., 1995) (Ec. (14)).

$$\rho_{agua} C_{p\ agua} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k_{agua} \nabla T) + Q_{mic} \quad (14)$$

donde  $C_{p\ agua}$  es la capacidad calorífica específica (J/(kg °C)),  $T$  es la temperatura (°C),  $t$  es el tiempo (s),  $k$  es la conductividad térmica (W/(m °C)). Nótese que en este trabajo preliminar no se consideró el movimiento del agua. Para las fronteras en contacto con el vaso se aplica la condición de continuidad térmica y para el borde superior en contacto con el aire, se aplica la condición evaporativa:

$$q_{n\ agua} = -\Delta H_{vap} m_{evap} \quad t > 0 \quad (15)$$

donde  $q_{n\ agua}$  es el flujo de calor normal a la superficie,  $\Delta H_{vap}$  es el calor de vaporización del agua y  $m_{evap}$  es la tasa de evaporación de agua.

Con respecto a los mecanismos de transporte en el aire, el modelado debe considerar tanto la transferencia de energía desde el vaso y el agua (que se calientan por efecto de las microondas) como el transporte de vapor asociado al proceso de vaporización. Con este fin se

plantean los balances de energía y materia, que incorporan el efecto de la fluidodinámica dentro del horno de microondas:

$$\rho_{\text{aire}} C_{p \text{ aire}} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k_{\text{aire}} \nabla T) - \rho_{\text{aire}} C_{p \text{ aire}} \vec{u} \nabla T \quad (16)$$

$$\frac{\partial C_v}{\partial t} = \nabla(D_{v-a} \nabla C_v) - \vec{u} \nabla C_v \quad (17)$$

donde  $C_v$  es la concentración de vapor en el aire ( $\text{mol/m}^3$ ) y  $D_{v-a}$  es el coeficiente de difusión del vapor en el aire ( $\text{m}^2/\text{s}$ ). Estos balances con sus condiciones iniciales y de contorno completan la formulación de modelado matemático. Para el balance de energía se define la siguiente condición en la interface agua líquida-aire:

$$q_{n \text{ aire}} = \Delta H_{\text{vap}} m_{\text{evap}} \quad t > 0 \quad (18)$$

y en el caso del transporte de vapor se considera constante la concentración de vapor en aire en la sección de entrada, en la interface agua líquida-aire se considera la concentración de vapor saturado a la temperatura local (Ec. (19)) y en la sección de salida del aire se considera flujo difusivo nulo (Ec. (20)).

$$C_{v \text{ interface}} = \frac{P_{\text{sat}}}{RT} \quad (19)$$

$$-n \cdot D \nabla C_{v \text{ seccion salida}} = 0 \quad (20)$$

donde  $P_{\text{sat}}$  es la presión (Pa) de saturación del vapor de agua a la temperatura  $T$  y  $R$  es la constante universal de los gases. A partir de la concentración prescrita en la superficie del agua  $C_{v \text{ interface}}$  se calcula el flujo de agua evaporada ( $m_{\text{evap}}$ ). Para las paredes del horno se consideró flujo nulo de calor y de materia.

La resolución de los modelos se realizó usando el software COMSOL Multiphysics, versión 5, el cual permite trabajar con diferentes modelos físicos simultáneamente.

### 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La velocidad a la salida de la canalización se estimó en 1.74 m/s, y a partir de los datos de densidad del aire y área de sección transversal del tubo se estimó un flujo másico de  $2.96 \times 10^{-4}$  kg/s. Este valor equivale aprox. a 0.25 l/s (en las condiciones de operación), y considerando el volumen del horno, el tiempo de residencia del aire dentro del horno es cercano a 2 minutos. Considerando el caudal de aire medido y el número de orificios a la entrada (366) y la salida (449), se estimó una velocidad promedio en cada orificio a la entrada y a la salida de 0.11 y 0.09 m/s, respectivamente, lo cual lleva a valores de Reynolds menores a 40.

En la Tabla 1 se presentan los parámetros y propiedades utilizados en el modelado computacional utilizando COMSOL Multiphysics.

#### 3.1 Resolución de la Fluidodinámica del Horno

Para resolver la fluidodinámica en el HMO, se trabajó en primera instancia con una geometría sin el vaso ni el magnetrón. El sistema fue resuelto numéricamente por el Método de los Elementos Finitos, usando el software comercial COMSOL Multiphysics. La geometría fue mallada usando opciones de capa límite las cuales realizan un mallado mucho más fino en

las cercanías de las paredes. Se evaluaron diferentes mallas, cada vez más finas, para elegir un tamaño óptimo para esta física. Un segundo modelo geométrico fue también evaluado, en el cual se implementaron las perforaciones reales de entrada (366) y salida (449); el comportamiento del flujo obtenido en el seno del fluido fue esencialmente el mismo, pero a un costo mucho mayor, dado el grado de detalle, por lo cual se siguió trabajando con las secciones de entrada y salida rectangulares.

Parámetros	Aire	Vidrio	Agua
Conductividad Térmica, $k$ , [W/(m°K)]	$-0.0022+1.15\cdot 10^{-4}TK-7.90\cdot 10^{-8}TK^2+4.11\cdot 10^{-11}TK^3-7.43\cdot 10^{-15}TK^4$	1.4	$-0.869+0.0089TK-1.58\cdot 10^{-5}TK^2+7.97\cdot 10^{-9}TK^3$
Capacidad calorífica, $C_p$ , [J/(kg °K)]	$1047.63-0.37TK+9.45\cdot 10^{-4}TK^2-6.02\cdot 10^{-7}TK^3+1.28\cdot 10^{-10}TK^4$	730	$12010.14-80.40TK+0.30TK^2-5.38\cdot 10^{-4}TK^3+3.62\cdot 10^{-7}TK^4$
Densidad, $\rho$ , [kg/m <sup>3</sup> ]	$P_{\text{aire}}/M_{\text{aire}}/(R\cdot TK)$	2210	$838.46+1.40TK-0.003TK^2+3.71\cdot 10^{-7}TK^3$
Viscosidad, $\mu$ , [Pa s]	$-8.38\cdot 10^{-7}+8.35\cdot 10^{-8}TK-7.69\cdot 10^{-11}TK^2+4.64\cdot 10^{-14}TK^3-1.06\cdot 10^{-17}TK^4$	-	-
Constante dieléctrica, $\epsilon'$	1	4.2	$222.52-139.04e^{-T/522.35}$
Factor de Pérdida, $\epsilon''$	-	-	$3.12+17.99e^{-T/22.46}$
Calor latente vaporización, $\Delta H_{\text{vap}}$ , [J/kg]	-	-	$2.26\cdot 10^6$
Humedad relativa inicial, $\phi$ , [%]	37	-	-
Temperatura inicial, $T_0$ , [°C]	15	15	15
Concentración inicial de vapor, $C_{v0}$ , [mol/m <sup>3</sup> ]	0.585	-	-
Frecuencia de operación, $f$ , [GHz]	2.45	-	-
Potencia nominal microondas, $P_0$ , [W]	1000	-	-
Flujo de aire, [kg/s]	$2.96\cdot 10^{-4}$	-	-
Coefficiente de difusión de vapor en aire, $D_{v-a}$ , [m <sup>2</sup> /s]	$2.6\cdot 10^{-5}$	-	-
Presión de vapor saturado, $P_{\text{sat}}$ , [Pa]	$\exp(1.39-5800.22/TK-0.048TK+0.41\cdot 10^{-4}TK^2-0.14\cdot 10^{-7}TK^3+6.546\cdot \log(TK))$	-	-

Tabla 1: Parámetros y propiedades utilizados en las simulaciones. (TK es la temperatura absoluta)

Posteriormente se incorporó la geometría de la guía de ondas, el vaso de vidrio, y el agua (Fig. 4 y 5), y se realizaron nuevamente pruebas de mallado, resolviendo únicamente la fluidodinámica. En este caso, la incorporación del vaso incrementa sensiblemente el número de elementos, y dentro del agua se incorporó un tamaño máximo de los elementos de 6 mm, teniendo en cuenta la longitud de onda de la radiación dentro del mismo, la cual se resolvió posteriormente. En la geometría y mallado final se usaron 72697 elementos, el mínimo posible que permite obtener una solución aceptable teniendo en cuenta el número mínimo de

10 elementos por longitud de onda de las microondas en cada material (aire, vidrio y agua). Con éstas características, el tiempo de resolución de la fluidodinámica fue menor a 5 min en una PC de escritorio (Intel Core i5, Windows 7 64 bits, 3.2 GHz, 16 GB RAM).

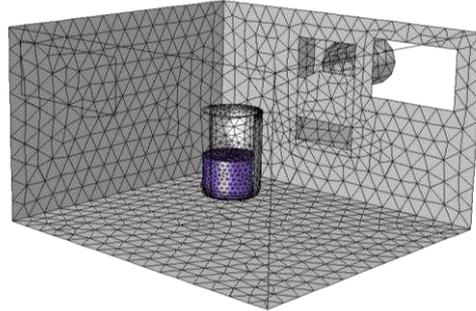


Figura 5. Mallado del dominio usado para las simulaciones.

La Fig. 6 muestra el patrón de flujo dentro de horno de microondas con y sin carga. Considerando un corte en la zona media podemos observar la distribución del flujo de velocidades donde se presentan valores máximos del lado derecho (frente a la entrada del aire), este se presenta en el HMO vacío y cargado. Esta zona de máxima velocidad se debe al patrón de flujo que se observa en la Fig. 6c y d, mostrando que a medida que en aire ingresa al horno este lo hace a la máxima velocidad siguiendo una trayectoria recta, perpendicular la sección de entrada, y en la proximidades de la pared las líneas de flujo hacen un giro abrupto hacia la parte inferior y hacia la sección de salida dando lugar a zonas de máxima velocidad. Adicionalmente se pueden apreciar las diferencias en el patrón de flujo mirando las líneas de corriente y flechas en horno vacío (Fig. 6c) y cargado (Fig. 6d). En ambos casos se obtuvieron grandes regiones de estancamiento en las cercanías de la pared que contiene la sección de entrada.

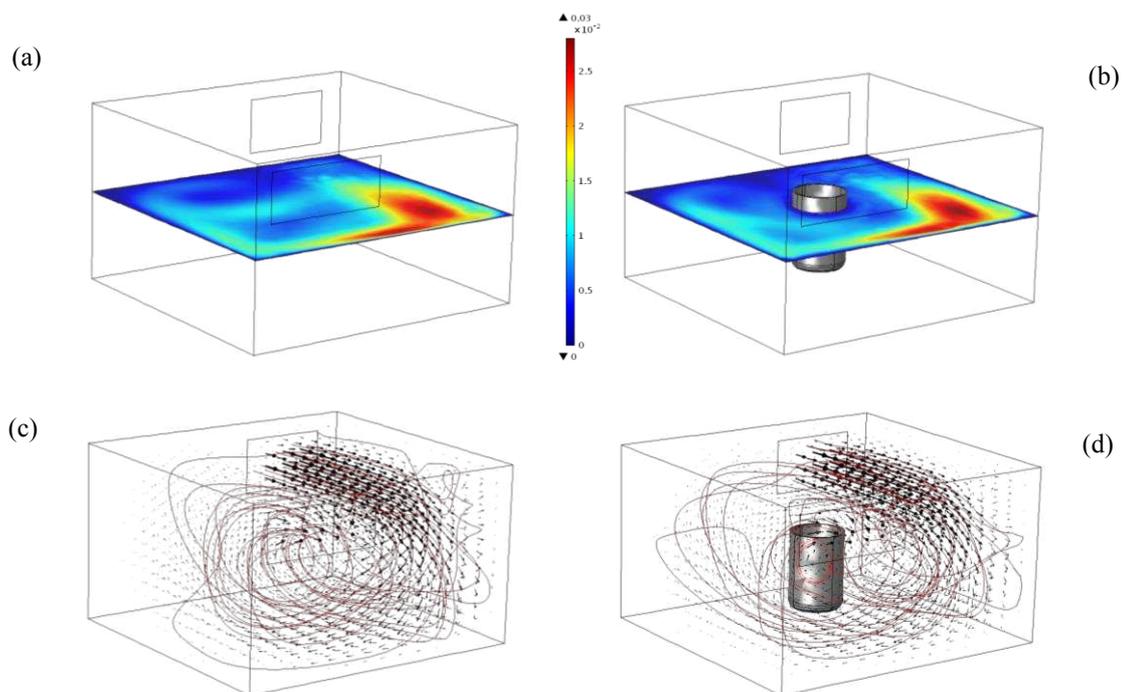


Figura 6. Perfil de magnitud de velocidad a la altura media del horno, y líneas de corriente y vectores de velocidad (flechas). a y c) Sin vaso; b y d) Con vaso. (Nótese que la velocidad máxima es de 3cm/s)

### 3.2 Resolución de la distribución del Campo Electromagnético

Para la resolución de las ecuaciones de Maxwell para el campo electromagnético con sus condiciones iniciales y de contorno (Ec. (5) y (12)), se empleó el análisis de la propagación armónica (frequency-domain) que utiliza el paquete de resolución FGMRES. Se probaron diferentes mallados, y finalmente se usó la misma malla que para el caso del flujo de aire. Los cálculos tomaron aproximadamente 70s para alcanzar la solución. De esta manera se logró estimar los valores del campo eléctrico en cada posición del horno y dentro de la carga, además de la energía absorbida por el producto y por el vaso de vidrio.

#### Patrón de distribución de campo eléctrico ( $E$ ) y energía absorbida ( $Q_{mic}$ )

En la Fig. 7 se observa la distribución del campo eléctrico como resultado de la resolución de las ecuaciones de Maxwell. A partir de la figura se puede visualizar un corte de la distribución del campo eléctrico dentro del horno cargado. Puede observarse claramente la no uniformidad del mismo, siendo evidentes los picos y valles dando muestra de los máximos y mínimos correspondientes. El pico máximo del campo eléctrico dentro del horno ( $3.32 \times 10^4$  V/m) fue obtenido en la parte inferior cerca del centro.

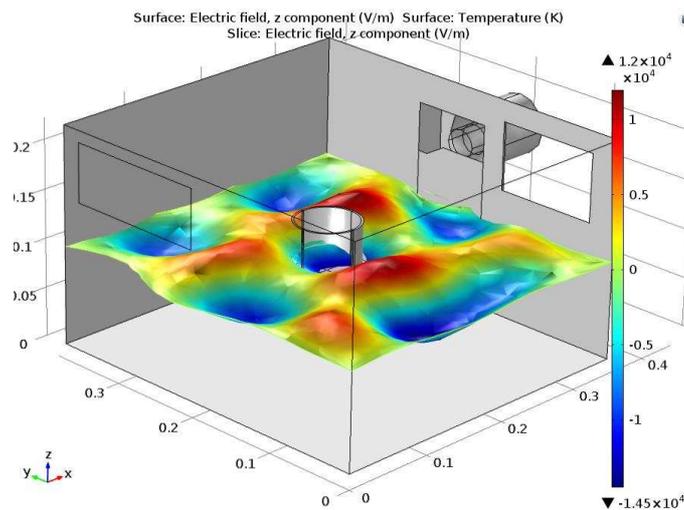


Figura 7. Distribución del campo eléctrico dentro del horno de microondas.

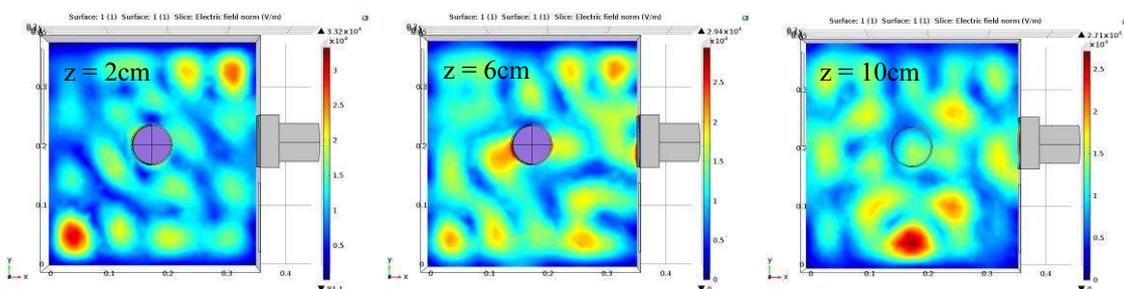


Figura 8. Cortes del campo eléctrico dentro del horno de microondas conteniendo un vaso con agua líquida.

Considerando cortes cada 2 cm del campo eléctrico resultante (Fig. 8) se puede apreciar que cerca de la base del horno se presentan los mayores valores y a mayores alturas va descendiendo, esta es una característica de los hornos domésticos donde se busca que la zona

de mayor absorción de energía se ubique en las proximidades a la bandeja giratoria. En consecuencia, dentro del agua líquida (Fig. 9a y b) podemos visualizar también la ubicación del valor máximo de la energía absorbida en la parte central, ligeramente desplazada hacia la parte inferior del vaso. Este efecto de no uniformidad es debido a la característica ondulatoria de las microondas que son las responsables de la energía generada dentro de la muestra.

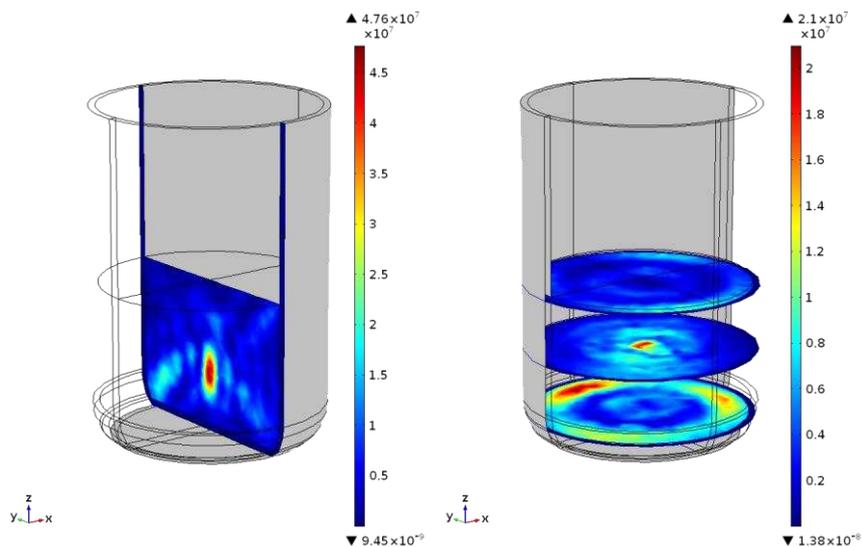


Figura 9. Distribución de la energía absorbida por unidad de volumen dentro del agua.

### 3.3 Resolución del calentamiento y transporte de vapor

Las ecuaciones de transferencia de energía y materia en el vaso y agua líquida como en el aire con sus condiciones iniciales y de contorno fueron resueltas numéricamente. Se utilizaron los módulos de transferencia de calor en fluidos y el transporte de especies diluidas en estado transitorio en COMSOL, para la resolución de las ecuaciones acopladas se empleó el solver PARDISO (paso temporal de 1s). Para simular 420 s de proceso de calentamiento llevó 75 minutos de tiempo de máquina. Como resultado se obtuvieron los perfiles y la evolución en el tiempo de la temperatura en el agua líquida, el vaso de vidrio y el aire y de la concentración de vapor en el aire dentro del horno.

#### Calentamiento con microondas

El campo eléctrico interactúa con la carga dieléctrica generando su calentamiento. En la Fig. 10 se puede observar la evolución de la temperatura del agua (en el centro de la muestra), contenida en el vaso de vidrio, que se encuentra dentro del horno de microondas. Como puede apreciarse el modelo matemático predice con suficiente exactitud el aumento de la temperatura del agua. En la Fig. 11 se visualiza una imagen termográfica y el resultado de las simulaciones. A partir de la figura, se observa que la distribución de temperatura en la cara superior no es uniforme, característica del calentamiento con microondas (aunque el agua se mezcla y tiende a uniformizar su temperatura). Las simulaciones usando el modelo computacional logran predecir la ubicación del punto caliente, el cual está localizado en la parte inferior desplazado ligeramente hacia la izquierda.

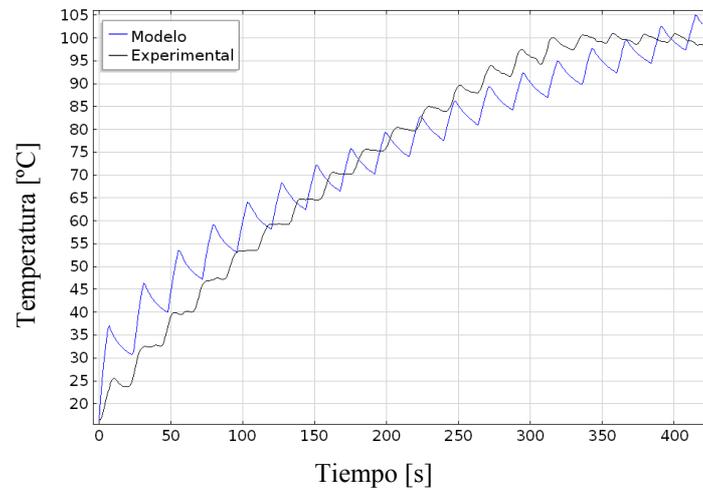


Figura 10. Evolución de la temperatura experimental y simulada en el agua líquida (30% potencia microondas)

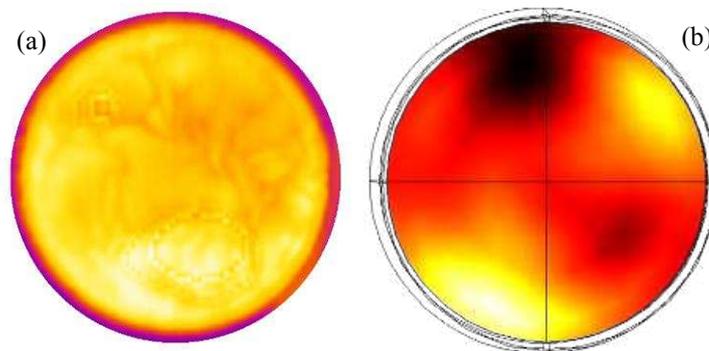


Figura 11. Distribución de la temperatura en la cara superior del vaso con agua, (a) imagen termográfica y (b) simulación (300W potencia microondas)

### Producción de vapor en el horno

Al tiempo que se produce el calentamiento del agua como resultado de la interacción con las microondas, tiene lugar la producción de vapor que aumenta a medida que aumenta la temperatura y el tiempo de exposición a las microondas. Las Fig. 12a, b y c muestran los perfiles de concentración de vapor desde la entrada hasta la sección de salida de aire del horno de microondas. Como puede apreciarse en las figuras, a medida que aumenta la potencia de microondas de 100 a 300W aumenta la producción de vapor como resultado de un calentamiento más intenso del agua líquida, que promueve una mayor velocidad de vaporización.

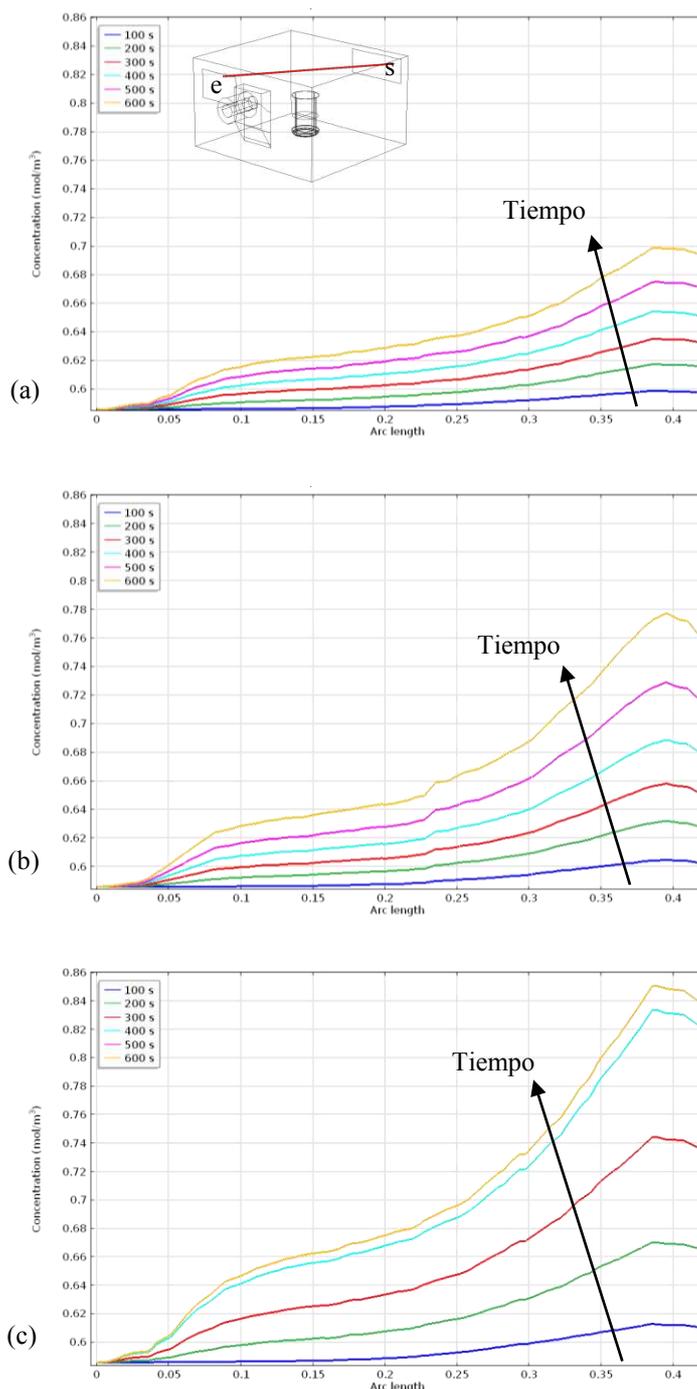


Figura 12. Perfiles de concentración de vapor en el aire a diferentes tiempos (100-600s) durante el procesamiento con microondas de (a) 100, (b) 200 y (c) 300W de potencia nominal.

Con respecto al acoplamiento de las diferentes físicas (transferencia de calor, materia y cantidad de movimiento en el aire), puede observarse a partir de las Fig. 13a y b que a medida que la producción de vapor aumenta el flujo del mismo se desplaza hacia arriba, luego hacia la parte izquierda y hacia abajo. Al mismo tiempo la temperatura en el aire aumenta en mayor medida en las cercanías de la parte inferior del vaso de vidrio, donde se concentra la mayor absorción de calor por parte del agua. Sin embargo puede visualizarse (Fig. 13b) que la temperatura por encima de la boca del vaso sigue la trayectoria del flujo de vapor, efecto que

sería esperable obtener como resultado del movimiento del vapor que se encuentra a mayor temperatura que el aire circundante.

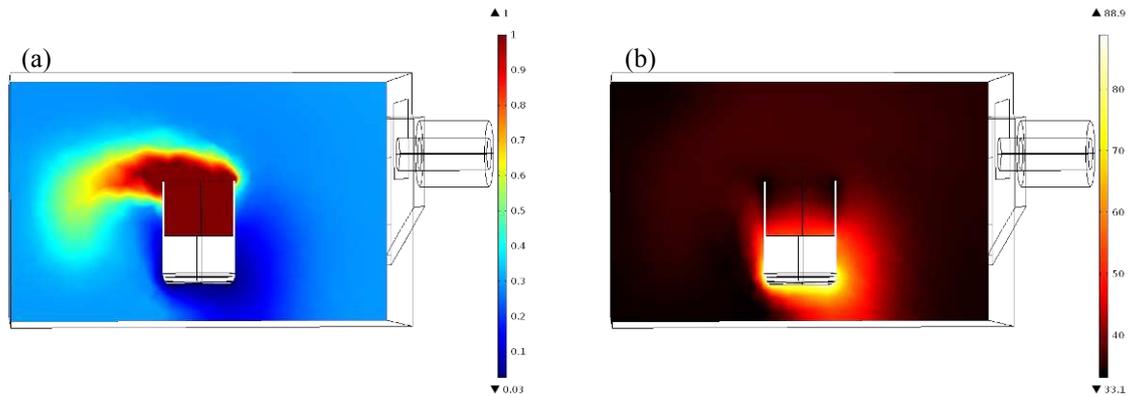


Figura 13. Perfil de (a) Humedad Relativa y (b) Temperatura del aire durante calentamiento de agua con microondas (420s y 300W)

A partir de la Fig. 14a se puede observar una zona en el techo donde tiene lugar la condensación de vapor. Este efecto se debe a una combinación de factores: esta zona está inmediatamente sobre la muestra y se encuentra fría, y al mismo tiempo en esa zona hay una baja absorción de las microondas (Fig. 14b), promoviendo la aparición de las primeras pequeñas gotas de agua líquida que a medida que prosigue el calentamiento van aumentando de tamaño como resultado de un constante aumento de la concentración de vapor en el HMO.

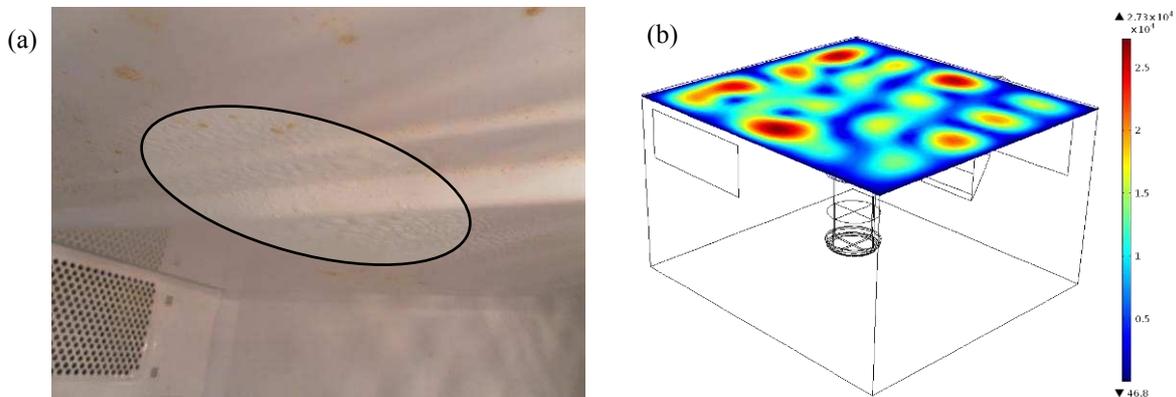


Figura 14. (a) Imagen de las gotas condensadas en el techo del horno y (b) distribución de campo eléctrico en la cercanía al techo del HMO.

#### 4 CONCLUSIONES

Un modelo matemático completo ha sido desarrollado para la predicción de la fluidodinámica dentro de hornos microondas, la distribución del campo electromagnético, el aumento de la temperatura y el transporte de agua durante el proceso de calentamiento con microondas. Además, se logró predecir el transporte de vapor de agua en el aire y se predijo satisfactoriamente la variación de temperatura de la muestra.

El modelado tanto del equipo como del proceso es una herramienta poderosa que puede usarse para: determinar caudales de aire óptimos, diseñar el sistema de circulación de aire;

ubicación y distribución de secciones de entrada y salida de aire, diseñar la orientación y forma del techo de un horno de microondas doméstico o industrial.

## REFERENCIAS

- Arballo, J.R., Campañone, L.A., and Mascheroni, R.H., Modeling of microwave drying of fruits. *Drying Thechnology*, 28:1178–1184, 2010.
- Campañone, L.A., and Zaritzky, N.E., Mathematical analysis of microwave heating process. *Journall of Food Engineering*, 69:359–368, 2005.
- Chen, J., Pitchai, K., Birla, S., Negahban, M., Jones, D., and Subbiah, J., Heat and mass transport during microwave heating of mashed potato in domestic oven - model development, validation, and sensitivity analysis. *Journal of Food Science*, 79:1991–2004.
- Chizoba Ekezie, F.G., Sun, D.-W., Han, Z., and Cheng, J.-H., Microwave-assisted food processing technologies for enhancing product quality and process efficiency: A review of recent developments. *Trends in Food Science & Technology*, 67:58–69, 2017.
- Datta, A.K., and Rakesh, V., Principles of microwave combination heating. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 12:24–39, 2012.
- Lin, Y.E., Anantheswaran, R.C., and Puri, V.M., Finite element analysis of microwave heating of solid foods. *Journal of Food Engineering*, 25:85–112, 1995.
- Marra, F., De Bonis, M.V., and Ruocco, G., Combined microwaves and convection heating: A conjugate approach. *Journal of Food Engineering*, 97:31–39, 2010.
- Orsat, V., Raghavan, G.S.V., and Krishnaswamy, K., 5- Microwave technology for food processing: an overview of current and future applications. En: *The Microwave Processing of Food*, 2° Ed. 100–116, Elsevier, 2017.
- 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*, 59:181–190, 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.