

SIMULACIÓN DEL PROCESO DE PASTEURIZACIÓN DE LECHE POR MICROONDAS Y POR INMERSIÓN. ANÁLISIS COMPARATIVO DEL TIPO DE TRATAMIENTO Y ORIENTACION DEL ENVASE

Alejandro R. Lespinard^a, Javier R. Arballo^{b,c} y Rodolfo H. Mascheroni^{b,c}

^a *Centro de Investigación y Transferencia Villa María (CIT VM), CONICET Córdoba, Universidad Nacional de Villa María, Av. Arturo Jauretche 1555, (5900), Villa María, Argentina, alespinard@conicet.gov.ar, <http://www.unvm.edu.ar>*

^b *Centro de Investigación y Desarrollo en Criotecnología de Alimentos (CIDCA), CONICET La Plata - Universidad Nacional de La Plata, 47 y 116, (B1900AJJ), La Plata, Argentina, <http://www.cidca.org.ar>*

^c *Depto. Ing. Química – Facultad de Ingeniería, UNLP, La Plata, Argentina.*

Palabras clave: Fluido Dinámica Computacional, Pasteurización, Microondas, Leche, Orientación del Envase.

Resumen. La pasteurización por calor es uno de los procesos más utilizados para extender el período de aptitud de alimentos y hacerlos más seguros para el consumo humano. Sin embargo durante la aplicación del mismo se producen, inevitablemente, en el alimento pérdidas de componentes nutricionales y organolépticos. En este sentido el proceso de pasteurización por microondas surge como una alternativa tecnológica que provoca, en estos atributos, un daño menor en comparación con los tratamientos térmicos tradicionales. Por otra parte, para estimar los tiempos de proceso y evaluar las pérdidas de calidad es necesario conocer la evolución y distribución de la temperatura en el alimento. Sin embargo en el caso de alimentos fluidos, como la leche, la obtención de esta información en forma experimental resulta dificultosa, ya que el empleo de sensores de temperatura puede modificar los patrones de flujo y distribución de temperaturas. Por otro lado se ha observado que cambios en la orientación del envase resultan en modificaciones de dichos patrones y por consiguiente en los tiempos de proceso y pérdidas de calidad. En base a lo anterior se propone como objetivo el desarrollo de un modelo de simulación que permita predecir los perfiles de temperatura y velocidad, y a partir de ellos las pérdidas de componentes de calidad durante la pasteurización por inmersión (PI) y la pasteurización por microondas (PM) de leche envasada en botella de vidrio con el fin de realizar un análisis comparativo entre ambos procesos y diferentes orientaciones del envase. Para ello se desarrolló un modelo completo que describe tanto la distribución del campo electromagnético (horno de microondas y alimento), como la convección natural y transferencia de calor (alimento) a través de las ecuaciones de Maxwell, continuidad, conservación de cantidad de movimiento y energía, las cuales fueron resueltas numéricamente por el Método de Elementos Finitos (MEF) para un dominio tridimensional mediante el software COMSOLTM Multiphysics en su versión 5.0. Finalmente para cuantificar las pérdidas en los atributos nutricionales y sensoriales, las temperaturas obtenidas por simulación fueron acopladas a un modelo cinético de variación de calidad. De esta manera la resolución numérica del modelo y la aplicación de la simulación computacional permitió realizar un análisis comparativo entre los procesos de PI y de PM, y entre las diferentes orientaciones en cuanto a la distribución del campo electromagnético, localización de la zona de calentamiento lento (ZCL), los tiempos de procesos y la calidad del producto.

1 INTRODUCCIÓN

La pasteurización por calor es uno de los procesos más utilizados para extender el período de aptitud de alimentos y hacerlos más seguros para el consumo humano. Sin embargo durante la aplicación del mismo se producen, inevitablemente, en el alimento pérdidas de componentes nutricionales y organolépticos. Estas pérdidas de calidad se intensifican en aquellos procesos donde el calentamiento no es uniforme y el producto se encuentra expuesto a altas temperaturas cerca de paredes de recipientes, placas o tubos. Este fenómeno ocurre en procesos continuos donde se emplean intercambiadores de calor o en procesos discontinuos donde el producto es envasado para luego ser tratado térmicamente. En este sentido el proceso de pasteurización por microondas surge como una alternativa tecnológica la cual provoca un calentamiento volumétrico del producto, con un daño menor en dichos atributos en comparación con los tratamientos térmicos tradicionales, presentando además ventajas como: reducción en el impacto ambiental, ahorro de energía, uso de energía limpia, ahorro de espacio y disminución de los tiempos de proceso (Arballo et al., 2010).

Por otra parte, para poder diseñar y optimizar un proceso térmico es necesario conocer la evolución y distribución de la temperatura del alimento durante el mismo. Sin embargo en el caso de alimentos fluidos, como la leche, la obtención de esta información en forma experimental resulta dificultosa, ya que el empleo de sensores de temperatura modifica los patrones de flujo debido a que los mismos restringen el libre movimiento del fluido (Stoforos y Merson, 1990). A su vez para el diseño de procesos de pasteurización de alimentos es necesario conocer la localización de la zona de calentamiento lento (ZCL) y la evolución de su temperatura, siendo esto también difícil de obtener experimentalmente, debido a que dicha zona se desplaza durante el calentamiento del producto (Ghani et al., 2002). Este hecho explica el creciente interés en las simulaciones numéricas, las cuales pueden ser utilizadas para determinar la evolución y distribución de la temperatura en todo el dominio (Rabiey et al., 2007). En este sentido la fluidodinámica computacional (FDC) ha resultado ser una valiosa herramienta para el análisis de la transferencia de calor por convección durante el tratamiento térmico de alimentos líquidos.

Por otro lado se le ha dedicado poca atención en lo que respecta al análisis del efecto de la orientación del envase sobre la transferencia de calor y fluidodinámica en alimentos líquidos durante su procesamiento térmico y se ha observado que cambios en la orientación del envase resultan en modificaciones de los patrones de flujo y distribución de temperaturas, y consecuentemente en los tiempos de proceso (Varma y Kannan, 2005; Augusto et al., 2010; Lespinard y Mascheroni, 2014).

En base a lo anterior se proponen como objetivos de este trabajo i) desarrollar modelos matemáticos que describan la pasteurización por inmersión (PI) y por microondas (PM) de leche fluida contenida en botella de vidrio, y ii) utilizar el modelo para realizar un análisis comparativo entre ambos tipos de procesos y entre dos orientaciones del envase para la PM, en cuanto a las temperaturas y velocidades, distribuciones del campo electromagnético (para los casos de PM), ubicación de la ZCL, tiempos de proceso y pérdidas de calidad.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Modelo de simulación

Los fenómenos a modelar son la transferencia de calor y fluido dinámica que se desarrollan durante la pasteurización por inmersión y por microondas de leche fluida envasada en botella de vidrio. En el proceso por microondas también se modela la distribución del campo electromagnético.

La PI consiste en sumergir, en posición vertical, la botella con leche en un baño de agua termostatzado a 100°C (en ebullición). En la PM, la leche embotellada es colocada en la cavidad de un horno de microondas de uso doméstico (ATMA MC930XE, 30L de capacidad), el cual opera a su potencia máxima de 900 W en forma continua y a una frecuencia de 2450 MHz (ver Figura 1). Para evitar la rotación del envase, el plato giratorio fue retirado del horno y el envase colocado sobre una base cilíndrica de vidrio.

Para la PI el dominio de simulación es representado solo por la botella de vidrio (de 0.07 m de diámetro externo mayor, 0.20 m de altura y 500 cm³ de capacidad), que contiene la leche y un espacio de aire; en la PM el dominio incluye además la cavidad de resonancia del horno, la guía de onda, el magnetrón y la base cilíndrica. En el proceso por microondas la botella fue colocada en forma vertical (Figura 1a), para su comparación con PI y en forma horizontal (Figura 1b) para analizar el efecto de la orientación del envase en la PM.

En todos los casos analizados se consideró que el espacio de aire ocupa el mismo volumen (254 cm³) y que este se encuentra en la parte superior de la botella, ya sea que la botella se encuentre en posición vertical u horizontal.

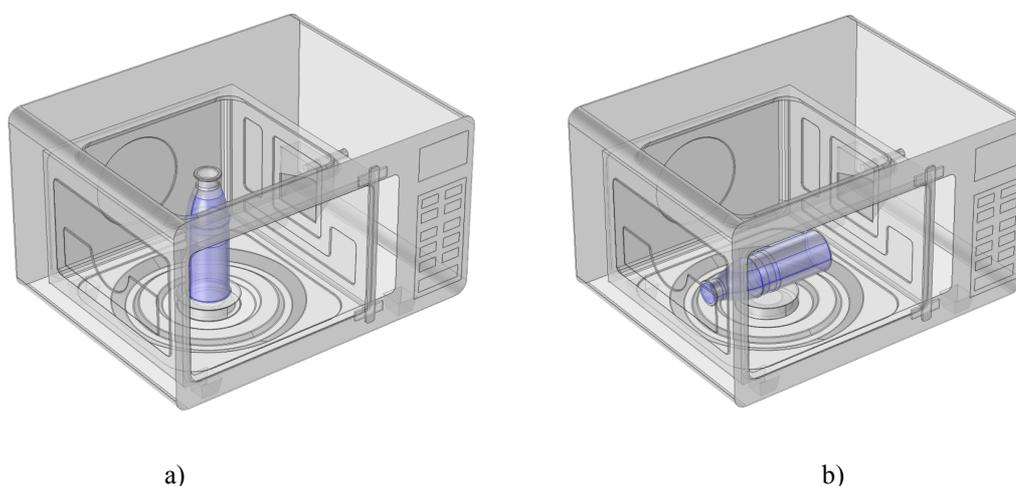


Figura 1: Esquema del microondas mostrando la guía de onda, el magnetrón, la base cilíndrica y la ubicación de la botella para las orientaciones a) vertical y b) horizontal.

Las propiedades termofísicas utilizadas en el modelo de simulación son presentadas en la Tabla 1. La densidad de la leche fue asumida constante en el modelo de simulación excepto en el término de flotación (F) (aproximación de Boussinesq), donde la Ecuación (1) fue utilizada para describir su variación con la temperatura (Bejan, 1993):

$$\rho = \rho_{ref} g [1 - \beta (T - T_{ref})] \quad (1)$$

donde β es el coeficiente de expansión térmica del líquido, T_{ref} y ρ_{ref} son la temperatura y la densidad a la temperatura de referencia (temperatura inicial de la leche).

Material	Propiedad	Valor	Fuente
Leche	Densidad, ρ (kg m ⁻³)	1016	Al-Hilphy y Ali (2013)
	Calor específico, C_p (kg ⁻¹ K ⁻¹)	3948.2	
	Conductividad térmica (k) (W m ⁻¹ K ⁻¹)	0.61	
	Viscosidad aparente, μ (Pa s)	$(-0.00445T+0.947)10^{-3}$	
	Coefficiente de expansión volumétrico, β (K ⁻¹)	0.0002	Anand Paul et al. (2011)
	Constante dieléctrica, ϵ'	82.5-0.28T	Datta y Anantheswaran (2001)
	Factor de Pérdida, ϵ''	15.2-0.026T	
Vidrio	Densidad, ρ (kg m ⁻³)	2449	Incropera y De Witt (2003)
	Calor específico, C_p (kg ⁻¹ K ⁻¹)	750	
	Conductividad térmica (k) (W m ⁻¹ K ⁻¹)	1.4	
Aire	Densidad, ρ (kg m ⁻³)	0.361	Pinho y Cristianini (2005)
	Calor específico, C_p (kg ⁻¹ K ⁻¹)	1964.95	
	Conductividad térmica (k) (W m ⁻¹ K ⁻¹)	0.023	

Tabla 1: Propiedades termofísicas empleadas en el modelo de simulación.

2.1.1 Modelado de la pasteurización por inmersión

Para describir el sistema se emplearon las ecuaciones de Navier-Stokes que gobiernan el movimiento por convección natural del fluido y se acoplaron con el balance de energía (Bird et al., 1976):

$$\text{Ecuación de continuidad:} \quad \nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (2)$$

$$\text{Balance de energía:} \quad \rho c_p \left[\frac{\partial T}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) T \right] = k \nabla^2 T \quad (3)$$

Balance de momento con la aproximación de Boussinesq:

$$\rho \left[\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} \right] = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{v} + F \quad (4)$$

Término de flotación (F):

$$F = -\rho_{ref} \beta (T - T_{ref}) \mathbf{g} \quad (5)$$

Condiciones iniciales, de contorno y de simetría:

- Inicialmente el fluido no se desplaza ($u = 0$, $v = 0$, a $t = 0$ s) y su temperatura es uniforme ($T = T_{ref} = 18^\circ\text{C}$ a $t = 0$ s).
- Condición de contorno: se impuso la temperatura del medio de calentamiento (agua en ebullición=100°C).
- Condición de simetría: sobre el eje simetría el flujo de calor es nulo en la dirección perpendicular a él.

Simplificaciones:

Para simplificar el problema se asumieron las siguientes consideraciones:

- (a) Se asumió simetría respecto del eje axial, lo cual reduce el problema de 3D a 2D.
- (b) La generación de calor por disipación viscosa es despreciable, esto es debido a que el líquido desarrolla velocidades bajas;
- (c) La densidad es considerada constante excepto en el término de flotación (aproximación de Boussinesq). Esta aproximación es válida para la mayoría de los líquidos (Jaluria, 1980)
- (d) El calor específico (C_p), conductividad térmica (k), y coeficiente de expansión volumétrico (β) son constantes;
- (e) Se asume la condición de no-deslizamiento sobre las paredes de la botella;
- (f) La resistencia a la transferencia de calor de la tapa metálica de la botella es despreciable;
- (g) Se impone como condición de contorno esencial la temperatura del medio de calentamiento (agua en ebullición=100°C), considerando un coeficiente de transferencia de calor infinito (Kiziltas et al., 2010);
- (h) El espacio de cabeza es considerado una capa de aire saturado, cuyo calentamiento se produce por conducción (Pinho y Cristianini, 2005).

Mallado computacional para la pasteurización por inmersión:

Para la discretización del dominio de simulación se empleó un sistema de mallado no uniforme. Este consiste en aplicar un mallado más fino en aquellas zonas donde se desarrollan los mayores gradientes de temperatura y velocidad, siendo esto necesario para lograr la convergencia de la solución numérica. Como se muestra en la Figura 2, para el dominio de simulación 2D se emplearon 6 capas de elementos cuadriláteros en la zona cercana a la pared y elementos triangulares en resto del dominio. De esta manera la malla obtenida quedó conformada por un total de 5628 elementos. La malla utilizada fue seleccionada a partir estudios de convergencia, donde se demuestra que el uso de una malla más fina no conduce a un aumento en la exactitud de los resultados.

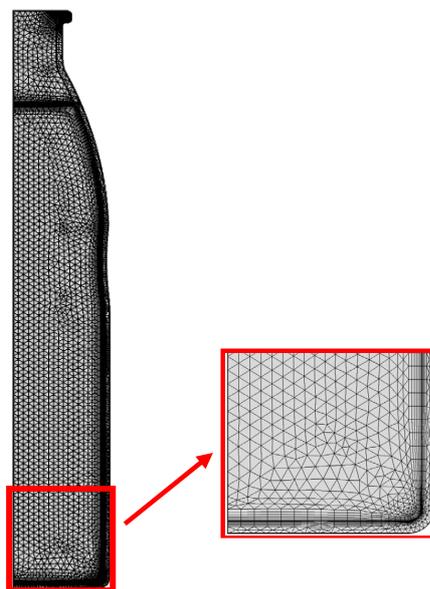


Figura 2: Dominio de simulación 2D axial simétrico y mallado computacional empleado para la PI. Una vista ampliada es presentada en el cuadro rojo.

Solución numérica:

El modelo para la PI fue resuelto por medio del método de elementos finitos, mediante el software COMSOLTM Multiphysics en su versión 5.0. Las ecuaciones de transferencia de calor y cantidad de movimiento fueron resueltas en estado transitorio, empleando el *solver*

PARDISO, que utiliza el paquete de resolución BDF (fórmula de derivación atrasada de múltiples etapas) el cual requirió, para simular 500 s de procesamiento, 39 minutos en llegar a la solución. El modelo de simulación fue resuelto en un procesador Intel Core i5 PC (Windows 7, 3.2 GHz, 8 GB RAM).

2.1.2 Modelado de la pasteurización por microondas

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:

$$\nabla \times \mu_r^{-1} (\nabla \times E) - k_o^2 \varepsilon_{rc} E = 0 \quad (6)$$

siendo

$$\varepsilon_{rc} = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (7)$$

donde ε_{rc} es la permitividad dieléctrica compleja, μ_r es la permeabilidad magnética, ε' es la constante dieléctrica, ε'' es el factor de pérdida dieléctrica y k_o es la constante de propagación definida como:

$$k_o = \alpha + i\beta \quad (8)$$

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

$$\beta = \frac{2\pi f}{c} \sqrt{\frac{\varepsilon'(\sqrt{(1 + \tan^2 \delta)} - 1)}{2}} \quad (10)$$

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (11)$$

donde β es el factor de atenuación, f es la frecuencia de la radiación y c es la velocidad de la luz.

La Ecuación (6) 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 TE₁₀ 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} , 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.

Para modelar la transferencia de calor se plantea el balance microscópico de energía considerando un término de generación interna debido a la energía suministrada por las microondas (Lin et al., 1995):

$$\rho c_p \left[\frac{\partial T}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) T \right] = k \nabla^2 T + Q_{mic} \quad (14)$$

donde ρ es la densidad, C_p capacidad calorífica específica, T temperatura, t tiempo, k conductividad térmica. Esta ecuación de transferencia de energía es acoplada a las ecuaciones de Navier-Stokes que gobiernan el movimiento del fluido dentro del envase (Ecs. (2), (4) y (5)).

Condiciones iniciales y de contorno:

- Inicialmente el fluido no se desplaza ($u = 0$, $v = 0$, a $t = 0$ s) y su temperatura es uniforme ($T = 18^\circ\text{C}$ a $t = 0$ s).
- Condición de contorno: la superficie de la botella intercambia calor por convección con el aire circundante, que se encuentra a una $T_a = 20^\circ\text{C}$. Para considerar esto se asumió un coeficiente de transferencia de calor $h = 10 \text{ W m}^{-2}\text{K}^{-1}$, el cual es un valor típico empleado para la transferencia de calor por convección natural en aire (Pitchai et al., 2014).

Simplificaciones:

- (a) La absorción de la energía electromagnética por parte del aire se consideró despreciable;
- (b) Las paredes del horno son consideradas conductores perfectos;
- (c) El ingreso de la radiación ocurre a una frecuencia 2450 MHz a través de un puerto coaxial conectado a la guía de onda;
- (d) Para modelar la transferencia de calor se asumen las simplificaciones b, c, d, e, f y h detalladas más arriba para la PI.

Mallado computacional para la pasteurización por microondas:

La malla utilizada para discretizar los diferentes dominios de simulación (cavidad de resonancia del horno, guía de onda, botella, leche y espacio de cabeza) de la PM, comprendió el empleo de 648888 y 649434 elementos tetraédricos para las configuraciones de la botella en posición vertical y horizontal, respectivamente (ver Figura 3). Para la discretización de los dominios que representan el producto (botella, leche y espacio de cabeza) se aplicó un mallado no uniforme teniendo en cuenta las mismas consideraciones que para PI. A su vez, dentro del producto se incorporó un tamaño máximo de elementos de 6mm, teniendo en cuenta la longitud de onda de las microondas dentro del mismo.

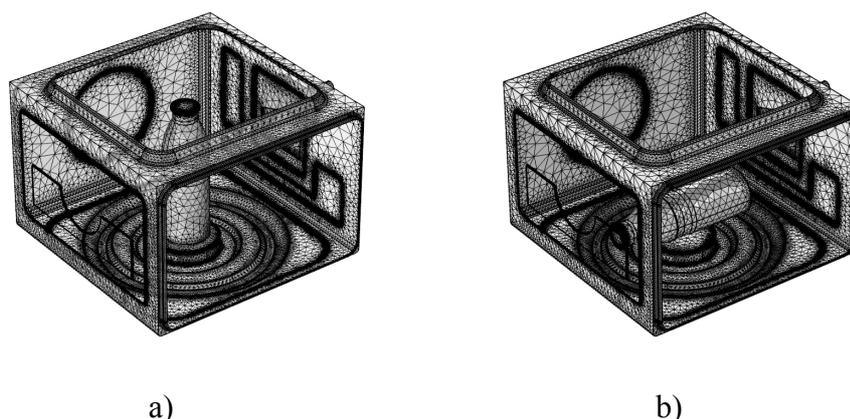


Figura 3: Mallado del dominio de simulación 3D para PM empleado para las orientaciones (a) vertical y (b) horizontal.

Solución numérica:

El modelo para la PM fue resuelto por medio del método de elementos finitos, mediante el software COMSOLTM Multiphysics en su versión 5.0. Las ecuaciones para obtener la distribución del campo eléctrico dentro del horno y del producto, fueron resueltas en estado estacionario, utilizando el *solver* FGMRES, requiriendo para ambas orientaciones aproximadamente un mismo tiempo de cálculo de 5,5 minutos. Por su parte, las ecuaciones de transferencia de calor y cantidad de movimiento fueron resueltas en estado transitorio, empleando el *solver* PARDISO, el cual requirió 4.5 horas en llegar a la solución para 380 s de pasteurización. Los modelos de simulación fueron resueltos en un procesador Intel Core i5 PC (Windows 7, 3.2 GHz, 8 GB RAM).

2.2 Determinación del tiempo de pasteurización

Para la estimación del tiempo de proceso se acopló al modelo de simulación una cinética de inactivación térmica de microorganismos (Ec.(15)). Teniendo en cuenta que el líquido y los microorganismos que se encuentran en la ZCL son expuestos a condiciones térmicas de menor intensidad que el resto del producto (condición menos favorable), se determinó la evolución de PU para dicha zona. De esta manera se calculó el tiempo que tarda la ZCL en alcanzar una unidad de pasteurización (PU) de 1 minuto, valor recomendado para la pasteurización de leche, considerando una temperatura de referencia (T_{ref}) de 72°C y un valor de z igual a 8°C (Holdsworth, 1997).

$$PU = \int_0^t 10^{(T-T_{ref})/z} dt \quad (15)$$

2.3 Pérdidas de calidad

El deterioro de componentes de calidad nutricional y sensorial del alimento durante la aplicación del proceso térmico de pasteurización fue cuantificado mediante el cálculo del valor de cocción medio (C_{medio}). El valor de C_{medio} fue determinado por integración numérica de la Ecuación (16), empleando los perfiles de temperatura simulados. Para el cálculo de este parámetro se consideró una temperatura de referencia (T_{ref}) de 100°C y una temperatura de reducción decimal z_c de 33 °C. Este valor de z_c corresponde a un valor medio de cinéticas de deterioro de parámetros de calidad en alimentos (Ohlsson, 1980).

$$C_{medio} = \int_0^{t_p} \left(\frac{\int_{\Omega} 10 \frac{T(t,\Omega) - T_{ref}}{z_c} \partial\Omega}{\int_{\Omega} \partial\Omega} \right) \partial t \quad (16)$$

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Pasteurización por inmersión

En la Figura 4 se muestran los perfiles de temperatura y de velocidad (representada por medio de vectores) para la PI, luego de 50, 150, 250 y 430 segundos de iniciado el proceso. Como se observa en dichas figuras, los perfiles de temperatura muestran que el calentamiento del fluido se produce predominantemente por el mecanismo de transferencia de calor por convección. Este fenómeno de convección natural se genera como consecuencia de que el líquido que entra en contacto con la pared de la botella se encuentra a mayor temperatura que resto del contenido. Esta diferencia de temperaturas se traduce en diferencias de densidades, lo cual genera fuerzas de flotación y movimiento del fluido. Las fuerzas de flotación producen un flujo ascendente en el líquido de menor densidad que se encuentra cerca de la pared del envase. Este líquido ascendente llega hasta la parte superior donde se desplaza radialmente hacia el centro y luego hacia abajo, donde se encuentra con otro flujo ascendente proveniente de la parte inferior del envase. El encuentro de dichas corrientes genera flujos recirculantes secundarios y zonas estancas en el centro de los mismos. Como consecuencia de dichos movimientos, la zona de calentamiento lento (ZCL) se desplaza hacia el fondo del envase. A medida que el calentamiento progresa se va generando una distribución más uniforme de la temperatura, es decir las diferencias de temperaturas entre las zonas cercana a la pared del envase y las zonas cercanas al eje axial se vuelven menores. Esto resulta en una reducción de la fuerza de flotación y por consiguiente en una disminución de la velocidad del fluido, lo cual puede apreciarse observando la longitud de los vectores de velocidad.

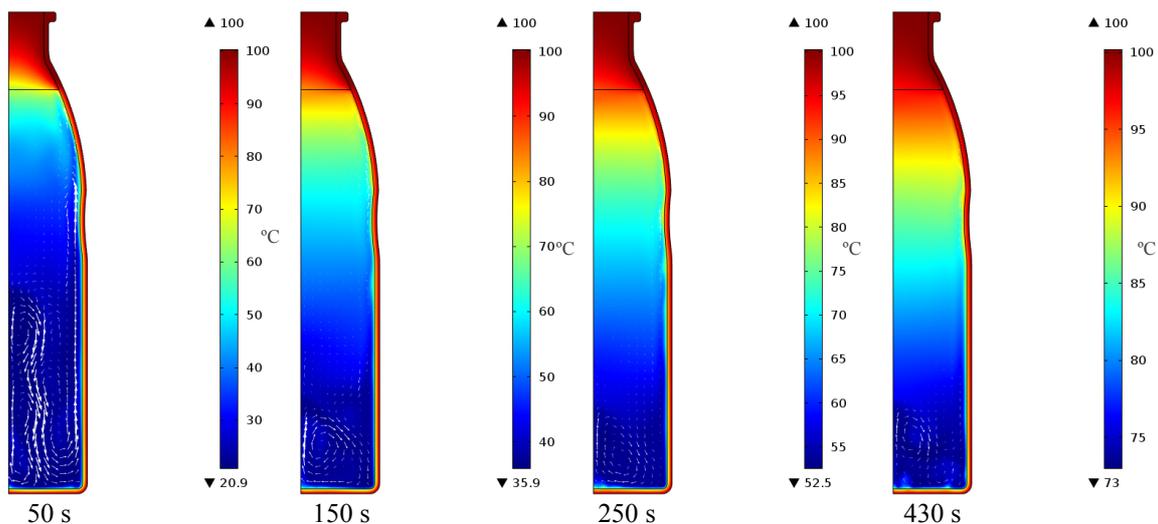


Figura 4: Perfiles de temperaturas y velocidades desarrolladas en la leche luego de 50, 150, 250 y 430 s de iniciada la pasteurización por inmersión.

3.2 Pasteurización por microondas

A partir del modelo de simulación computacional se obtuvieron, para la PM, los perfiles del campo eléctrico en el horno y en el producto, y las temperaturas y velocidades dentro del producto. En la **Figura 5** se pueden visualizar los cortes de la distribución del campo eléctrico dentro del horno considerando las dos orientaciones de la botella (vertical -a- y horizontal -b-). En dicha figura se puede observar claramente la no uniformidad del mismo, siendo evidentes los picos y valles dando muestra de los máximos y mínimos correspondientes. En el caso del proceso considerando la orientación vertical de botella (**Figura 5a**), puede observarse que los máximos se distribuyen en la parte central así como también en los vértices de la cavidad de resonancia del horno. Por otro lado, cuando analizamos los perfiles de campo eléctrico en el caso de la botella horizontal (**Figura 5b**) es posible diferenciar que los máximos están situados en la zona central, no presentando máximos en la zona de los vértices. Con respecto a los valores que alcanza el módulo del campo eléctrico, puede observarse que para la orientación horizontal del envase los valores fueron mayores que para la vertical, y del orden de $8 \cdot 10^3$ (V m^{-1}). El efecto combinado de la distribución del campo eléctrico con los valores del módulo, pueden posibilitar una mayor o menos absorción de las microondas por el alimento.

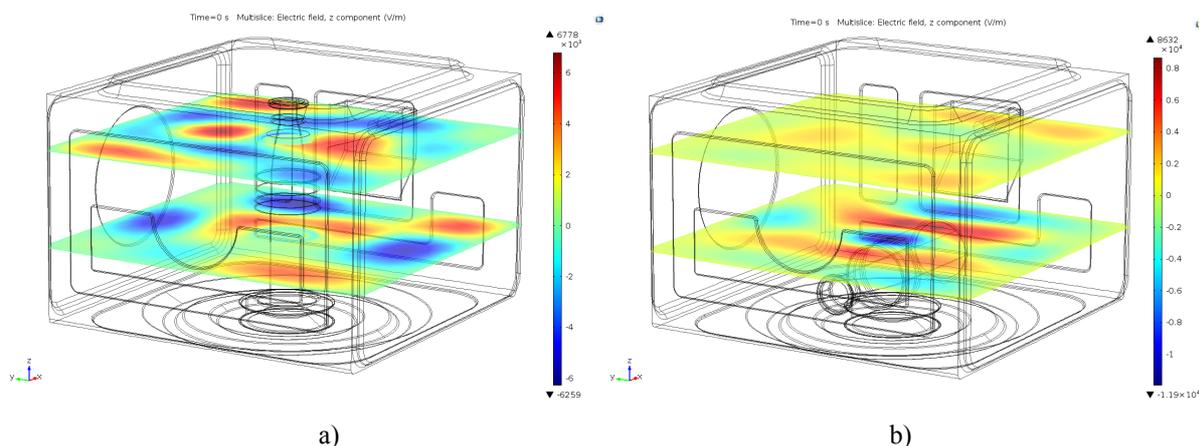


Figura 5: Distribución del campo eléctrico dentro del horno de microondas considerando dos orientaciones del envase (a) vertical y (b) horizontal.

La interacción del campo eléctrico con el alimento genera cierta energía que es absorbida por el producto dependiendo de sus propiedades dieléctricas (**Arballo, 2013**). Esta energía o potencia absorbida por el alimento sigue el patrón de distribución del campo eléctrico. Como puede observarse en la **Figura 6**, la potencia absorbida por el alimento presenta zonas de máxima y mínima absorción de las microondas. Considerando la orientación del envase de vidrio, la **Figura 6a** muestra la distribución de la potencia absorbida por el alimento cuando el envase se coloca en la posición vertical. En la misma se puede verificar que las zonas de máxima absorción de las microondas se encuentran en la parte central y superior izquierda de la botella. Por su parte, la distribución de la potencia para la botella en posición horizontal presentó múltiples zonas de máxima absorción, ubicadas en la zona correspondiente al cuello de la botella y por debajo del eje longitudinal en la zona media y cercana al fondo de la misma (**Figura 6b**).

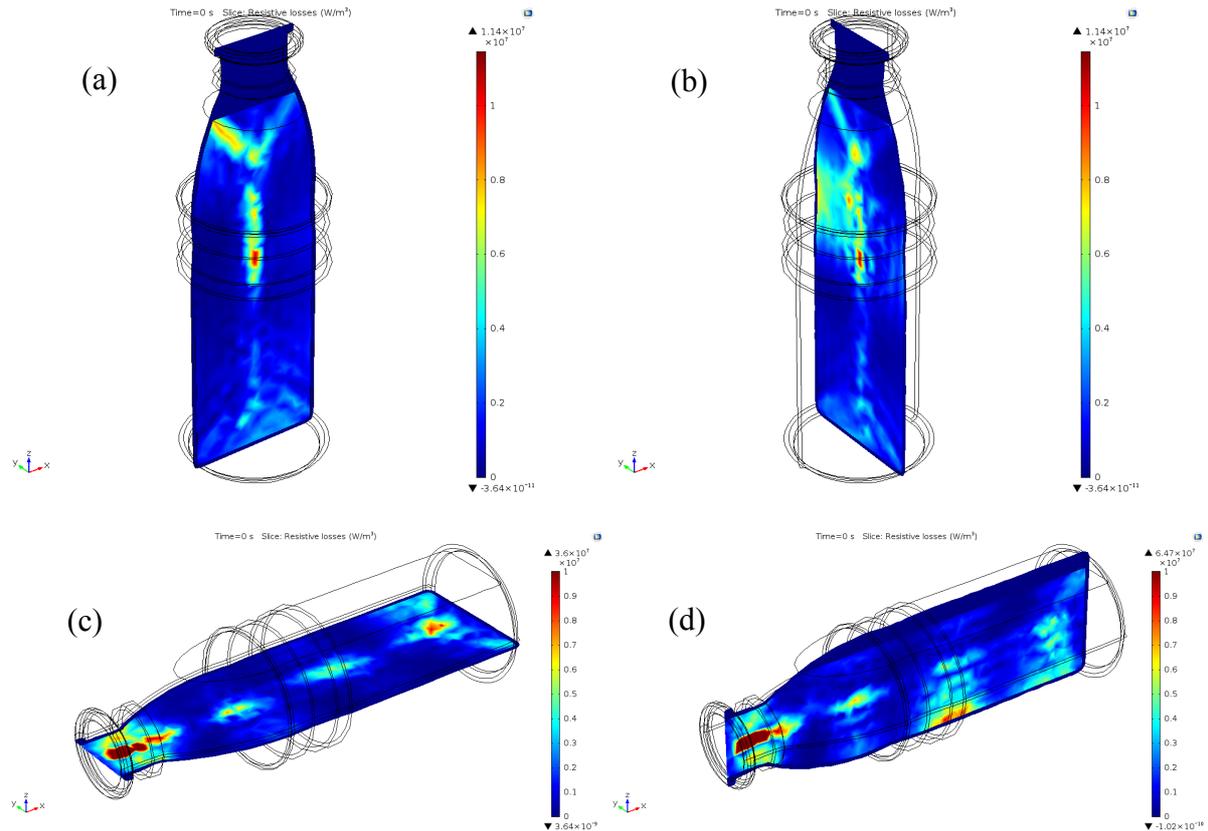


Figura 6: Distribución de la potencia absorbida por unidad de volumen dentro del producto considerando dos orientaciones del envase (a, b) vertical y (c, d) horizontal.

En la [Figura 7](#) se muestran los perfiles de temperatura y de velocidad (representada por medio de vectores) para las dos orientaciones, luego de 50, 150, 250 y 310 segundos de iniciado el proceso de pasteurización por microondas. En dicha figura se observa que en la PM-vertical se genera una estratificación de la temperatura de la leche en dos zonas, una ubicada en la mitad superior de temperaturas altas y otra en la mitad inferior, de temperaturas más bajas. Así mismo, se generan dos flujos recirculantes, uno en cada una de dichas zonas. El flujo que se desarrolla en la parte superior se vuelve menos intenso conforme progresa la pasteurización y las temperaturas se vuelven más homogéneas en esta zona, mientras el que se desarrolla en la parte inferior mantiene sus velocidades a lo largo de todo el proceso. Por su parte, la PM-horizontal genera varios flujos recirculantes cuyas posiciones varían a lo largo del proceso, lo que conduce a un mayor efecto de mezclado y una mayor uniformidad de las temperaturas con respecto a la PM-vertical. En la [Figura 7](#) también puede observarse que para la PM-vertical la ZCL se ubica en la mitad inferior, mientras para la PM-horizontal esta zona es más acotada, que la anterior, y se ubica en la parte inferior izquierda de la botella, donde la misma presenta una curvatura. Las localizaciones de estas zonas de calentamiento lento resultan coincidentes con las zonas de mínimas absorción de microondas mostradas en la [Figura 6](#).

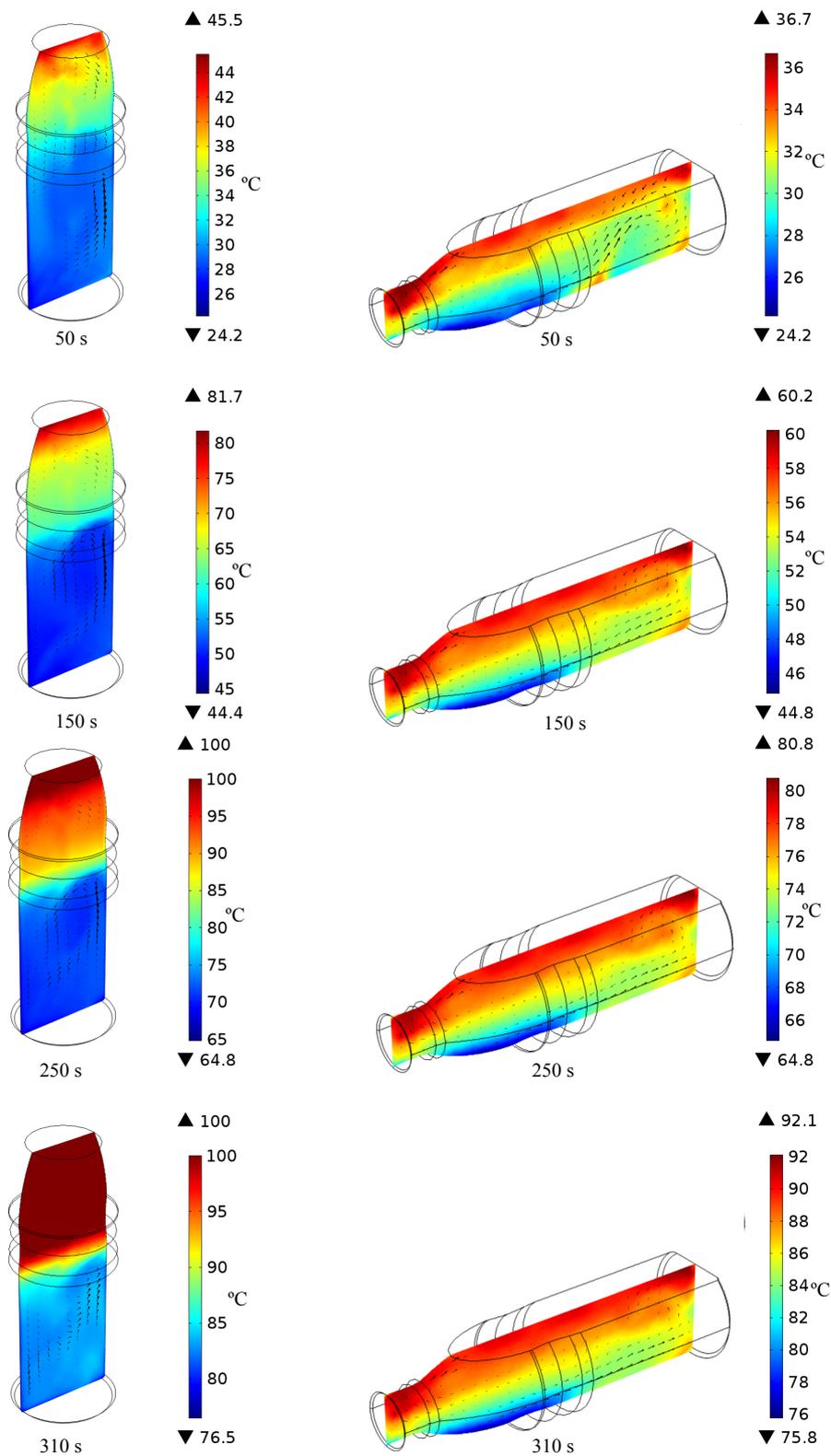


Figura 7: Perfiles de temperaturas y velocidades desarrolladas en la leche en el plano longitudinal medio para las orientaciones vertical y horizontal, luego de 50, 150, 250 y 310 s de iniciada la pasteurización por microondas.

3.3 Comparación de procesos y orientaciones

En la **Figura 8** se presentan las evoluciones de la temperatura máxima (T_{max}) y la temperatura mínima (T_{min}) en la leche para cada proceso y orientación. En la misma se observa que en la PI la T_{max} aumenta más rápidamente que en la PM, siendo esto consecuencia de que el líquido en contacto con la pared de la botella es expuesto a 100°C a pocos segundos de iniciado el proceso. Por su parte, en la PM la evolución de la T_{max} varía en función de la orientación de la botella, siendo su aumento más acelerado para la botella en posición vertical. Esto puede explicarse observando en la **Figura 6** la distribución de la potencia absorbida para cada orientación del envase. En la misma puede apreciarse que para la PM-vertical las zonas de máxima absorción de la microondas se encuentran en la mitad superior de la botella, mientras que en la PM-horizontal estas se hallan, por debajo de su eje longitudinal, en la mitad inferior. Esta distribución de potencia absorbida en la PM-vertical hace que el líquido más caliente y de menor densidad que se encuentra en la zona superior, continúe elevando su temperatura y de forma más rápida en comparación con otras zonas, como consecuencia de su mayor absorción de microondas. En cambio para la PM-horizontal el líquido que se encuentra a mayor temperatura, en la zona superior, es expuesto a una menor potencia de microondas, mientras que en gran parte de la zona inferior de la botella la potencia absorbida es alta. Esto favorece el fenómeno de flotación y el desarrollo de corrientes convectivas, lo cual induce a un calentamiento más uniforme del producto en la PM-horizontal. En la **Figura 8** se muestran también las temperaturas mínimas (T_{min}) de la leche para los tres casos. En dicha figura se observa que la T_{min} aumenta más lentamente en la PI-vertical en comparación con la PM para ambas orientaciones, siendo estas últimas prácticamente coincidentes entre sí. Este comportamiento se debe al calentamiento volumétrico del producto que se produce en la PM, lo que genera una mayor uniformidad de las temperaturas del líquido y por consiguiente un calentamiento más rápido de la ZCL.

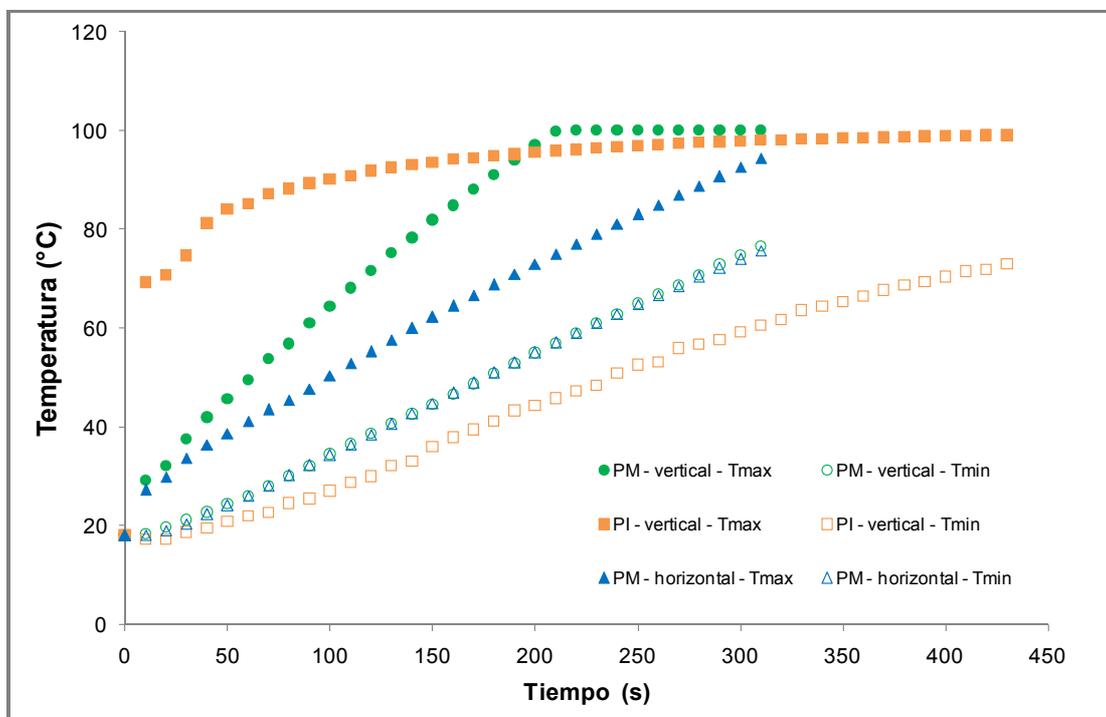


Figura 8: Evolución de las temperaturas máximas y mínimas de la leche durante la PI y la PM para distintas orientaciones del envase.

En la **Figura 9** se presenta la evolución de la diferencia entre la temperatura máxima y mínima (ΔT_{max}) de la leche durante los tres casos de pasteurización analizados. Esta figura permite observar el grado de uniformidad en el calentamiento del producto. Es evidente que la PM-horizontal alcanza un calentamiento más uniforme del producto durante todo el proceso, donde la ΔT_{max} resulta prácticamente constante e inferior a 19°C . Por su parte, en la PM-vertical la ΔT_{max} aumenta hasta los 210 s donde alcanza un valor de 43°C , y luego comienza a descender como consecuencia de que la T_{max} llegó a su valor máximo de 100°C , mientras que T_{min} continua aumentando. En el caso de la PI-vertical, la máxima ΔT_{max} se produce a aproximadamente 50 s, lo cual se corresponde con los perfiles de velocidad máximos que se desarrollan a ese tiempo (ver **Figura 4**) como consecuencia de la diferencia de densidades entre las distintas zonas del líquido.

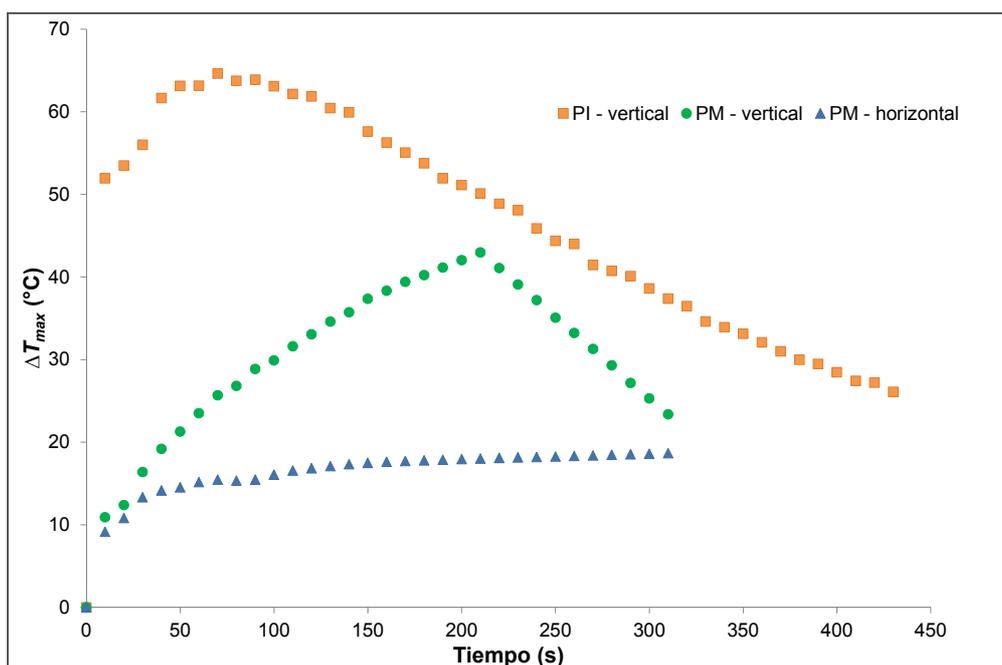


Figura 9: Evolución de la diferencia máxima de temperatura (ΔT_{max}) en la leche durante la PI y la PM para distintas orientaciones del envase.

En la **Tabla 2** se presentan los tiempos de pasteurización necesarios para alcanzar en la ZCL el valor recomendado de inactivación microbiana ($PU_{72}^{\delta} = 1$ min) para este alimento. En la misma se puede observar que en las dos orientaciones para el proceso de PM se obtuvo prácticamente el mismo tiempo de procesamiento, mientras que para la PI el mismo fue un 38.9 % superior en relación a los anteriores. Esta diferencia se debe, como ya se explicó anteriormente, al calentamiento volumétrico del producto que se produce en la PM, lo que conduce a una mayor uniformidad de las temperaturas del líquido y un calentamiento más rápido de la ZCL. Por otra parte la coincidencia en los tiempos de procesamiento para las dos orientaciones en la PM podría explicarse considerando que en ambos casos se generan zonas de calentamiento lento cercanas a la pared del envase donde la potencia absorbida es baja y similar para ambos casos, y donde el fluido no se desplaza o desarrolla velocidades muy pequeñas. En cuanto a las pérdidas de calidad, cuantificadas a través del valor de cocción medio, las mismas resultaron mayores para la PI, lo cual es una consecuencia directa del mayor tiempo proceso requerido por este tipo de pasteurización para alcanzar inocuidad en el producto. En cuanto a la PM, si bien para ambas orientaciones se requirió prácticamente el mismo tiempo de proceso, la posición horizontal logró menores pérdidas de calidad en

comparación con la vertical. Esto se debe a que la PM-horizontal logra un calentamiento más uniforme, con una temperatura máxima inferior que la alcanzada por la PM-vertical.

Tipo de tratamiento y orientación del envase	Tiempo de pasteurización (s)	Valor de cocción medio (min)
PI - vertical	430.5	0.88
PM - vertical	307.5	0.75
PM - horizontal	310.0	0.48

Tabla 2: Tiempos de pasteurización y valores de cocción medio obtenidos para las tres configuraciones de procesamiento.

4 CONCLUSIONES

Se desarrollaron modelos matemáticos que permitieron predecir los perfiles de temperatura y de velocidad durante la pasteurización por inmersión y por microondas de leche envasada en botella de vidrio. Dichos modelos fueron utilizados para determinar la localización de la ZCL, los tiempos de procesos y las pérdidas de calidad. Los resultados obtenidos mostraron que la PM logra un calentamiento más uniforme del producto y consecuentemente reduce los tiempos de procesamiento en relación a la PI. Por otro lado, en la PM la colocación de la botella en forma horizontal resultó en una mejor distribución de las temperaturas y en una disminución de las pérdidas de la calidad con respecto a la orientación vertical del envase. Los modelos desarrollados podrían ser utilizados con el objetivo de reducir aún más los tiempos de proceso y las pérdidas de calidad en la PM, evaluando otras orientaciones y ubicaciones de la botella dentro de la cavidad del horno.

REFERENCIAS

- Al-Hilphy, A.R.S. y Ali, H.I. Milk flash pasteurization by the microwave and study its chemical microbiological and thermo physical characteristics. *Journal Food Process Technology*, 4(7):1-5, 2013.
- Anand Paul D., Anishparvin, A. y Anandharamakrishnan, C. Computational fluid dynamics studies on pasteurisation of canned milk. *International Journal of Dairy Technology*, 64 (2): 305-313, 2011.
- Arballo J.R., Campañone, L.A. y Mascheroni, R.H. Modeling of microwave drying of fruits. *Drying Technology*, 28 (10): 1178-1184, 2010.
- Arballo, J.R. Modelado y simulación de la deshidratación combinada osmótica-microondas de frutihortícolas. *Tesis Doctoral*, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, 2013.
- Augusto, P.E., Pinheiro, T.F. y Cristianini, M., Using Computational Fluid-Dynamics (CFD) for the evaluation of beer pasteurization: effect of orientation of cans. *Ciencia e Tecnologia de los Alimentos*, 30: 980-986, 2010.
- Bejan, A. *Heat Transfer* (pp. 339-340). New York: Wiley, 1993.
- Bird, R.B., Stewart, W.Y., Lightfoot, E.N. *Transport Phenomena*. John Wiley and Sons, New York, 1976.
- Datta, A.K., Anantheswaran, R.C. *Handbook of microwave technology for food applications*. Marcel Dekker, USA, 2001.

- Ghani, A.G., Farid, M.M., Chen, X.D., Richards, P., Numerical simulation of natural convection heating of canned food by computational fluid dynamics. *Journal of Food Engineering*, 41:55-64, 1999a.
- Ghani, A.G., Farid M.M., Zarrouk, S.J. The effect of can rotation on sterilization of liquid food using computational liquid dynamics. *Journal of Food Engineering*, 57:9-16, 2003.
- Incropera, F.P., DeWitt, D.P. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer (in Portuguese)*. Rio de Janeiro: LTC, 2003.
- Jaluria, Y., *Natural Convection Heat and Mass Transfer*. Pergamon Press, Oxford, 1980.
- Kiziltas, S., Erdogdu, F., Palazoglu, T.K., Simulation of heat transfer for solid-liquid food mixtures in cans and model validation under pasteurization conditions. *Journal of Food Engineering*, 97: 449-456, 2010.
- Holdsworth, S.D. *Thermal processing of packaged foods*. London, Ed. Chapman Hall, 146-155, 1997.
- Lespinard, A.R., Mascheroni, R.H. Simulación numérica de los perfiles de temperatura y velocidad durante la pasteurización de alimentos líquidos viscosos. Efecto de la orientación del envase. *Mecánica Computacional*, 33:3347-3360, 2014.
- 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.
- Ohlsson, T. Optimal sterilization temperatures for flat containers. *Journal of Food Science*, 45:848-858, 1980.
- Pitchai, K., Chen, J., Birla, S., Gonzalez, R., Jones, D., Subbiah, J. A microwave heat transfer model for a rotating multi-component meal in a domestic oven: Development and validation. *Journal of Food Engineering*, 128:60-71, 2014.
- Pinho, C., Cristianini, M., Three-dimensional mathematical modeling of microbiological destruction of *Bacillus stearothermophilus* in conductive baby food packed in glass container. *International Journal of Food Engineering*, 1:1-8, 2005.
- Rabiey L., Flick D., Duquenoy A. 3D simulations of heat transfer and liquid flow during sterilisation of large particles in a cylindrical vertical can. *Journal of Food Engineering*, 82: 409-417, 2007.
- Stoforos, N.G., Merson, R.L., Estimating heat transfer coefficients in liquid/particulate canned foods using only liquid temperature data. *Journal Food Science*, 55:478-483, 1990.
- Varma M., Kannan A., Enhanced food sterilization through inclination of the container walls and geometry modifications. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48:3753-3762, 2005.