

## **SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LOS PERFILES DE TEMPERATURA Y VELOCIDAD DURANTE LA ESTERILIZACIÓN DE ALIMENTOS LÍQUIDOS ENVASADOS EN FRASCOS. ANÁLISIS DE LA ORIENTACIÓN DEL FRASCO E INFLUENCIA DEL ESPACIO DE CABEZA.**

**Alejandro R. Lespinard, Pablo R. Salgado, Rodolfo H. Mascheroni**

*Centro de Investigación y Desarrollo en Criotecnología de Alimentos (CIDCA), CONICET – Facultad de Ciencias Exactas Universidad Nacional de La Plata (UNLP), Calle 47 y 116 S/Nº, 1900 La Plata, Buenos Aires, Argentina, alespinard@cidca.org.ar <http://www.cidca.org.ar>*

**Palabras clave:** Esterilización, Frascos de vidrio, Convección, Espacio de cabeza, Orientación.

**Resumen.** La esterilización 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. Existe una amplia cantidad de trabajos sobre análisis y simulación de la transferencia de calor durante el tratamiento térmico de alimentos envasados, pero la mayoría de ellos sólo se aplicaron a modelos conductivos con condiciones de contorno constantes, dejando de lado el fenómeno convectivo sobre el cual existen muy pocos trabajos.

En el presente trabajo se simuló los perfiles de temperatura y velocidad, durante el calentamiento por convección natural para un alimento líquido viscoso envasado en frasco de vidrio, con temperatura externa variable con el tiempo (característica de autoclaves de baja capacidad). Las ecuaciones de continuidad, conservación de momento y energía fueron resueltas numéricamente por el método de elementos finitos para un dominio de simulación 2D axisimétrico. Se emplearon las propiedades de carboximetil celulosa (0.85 % p/p) (simulante de alimentos líquidos de alta viscosidad), las cuales se asumieron constantes, excepto para la viscosidad (dependiente de la temperatura) y la densidad. Se analizó la influencia de la orientación del frasco (0 y 180°) y el espacio de cabeza (EC) (0 y 1 cm) en la velocidad del fluido, localización de la zona de calentamiento lento, espesor del líquido ascendente y tiempo de proceso. Se encontró que la velocidad de calentamiento para frascos con la tapa hacia arriba (0°) es menor con la presencia de espacio de cabeza; sin embargo, para los frascos con la tapa hacia abajo (180°) se observó una velocidad mayor debido a lo mismo. Esto concuerda con los valores de velocidad del fluido encontrados para dicha configuración. Esto último se debe a que el espacio de cabeza permite un mayor movimiento del líquido y a su vez la zona inferior se calienta más rápidamente que la superior generando una recirculación mayor del líquido que las restantes combinaciones. Por su parte, el espesor de líquido ascendente no depende de las dos variables analizadas (espacio de cabeza y orientación), pero es función del tiempo de proceso.

Finalmente los tiempos de proceso necesarios para obtener un valor de letalidad de 3 minutos fueron los siguientes: 4260 s (180° - con EC), 4374.6 s (180° - sin EC), 4470 segundos (0° - sin EC) y 4545 segundos (0° - con EC). Esto nos indica que el empleo de un mismo tiempo de esterilización para las diferentes configuraciones (de orientación y espacio de cabeza) puede producir, dependiendo del caso, sobrecocción o falta de inocuidad en el alimento.

## 1 INTRODUCCIÓN

La esterilización por calor es uno de los procesos mayormente utilizados para la preservación de los alimentos. El mismo extiende el período de aptitud y lo hace más seguro para el consumo humano, por inactivación de enzimas deteriorativas y destrucción de microorganismos patógenos. Actualmente existe un gran número de estudios sobre el análisis y simulación de la transferencia de calor durante el tratamiento térmico de alimentos envasados. Si bien en estos procesos la transferencia de calor puede desarrollarse por conducción o por convección natural o forzada, dependiendo de la estructura del alimento y características del sistema de calentamiento, la mayoría de los trabajos hacen referencia al calentamiento por conducción, dejando de lado al mecanismo convectivo sobre el cual existen muy pocos trabajos experimentales (Akterian et al., 1994). Esta carencia de información es debida, entre otras causas, a las dificultades que implican resolver y comprender las ecuaciones diferenciales que gobiernan la transferencia de calor por convección y su relación con los patrones y perfiles de velocidad y temperatura, en las diferentes zonas o regiones del envase que contiene al alimento (Welti et al., 2005).

Los pocos trabajos publicados, que han estudiado el calentamiento por convección natural, han resuelto los balances por medio de fluidodinámica computacional (FDC) para alimentos envasados en latas (Ghani et al., 1999; Kumar y Bhattacharya, 1991; Rabiey et al., 2007; Varma y Kannam, 2005) o en pouches (Ghani et al., 2006), con condiciones de contorno constantes. De estos trabajos sólo dos autores consideraron el efecto de la orientación del envase sobre el tiempo de esterilización: Ghani et al. (2002) estudiaron la esterilización de jugo de naranja en latas y concluyeron que cuando la orientación de las mismas es vertical la velocidad de calentamiento es mayor que en sentido horizontal, mientras que Varma y Kannam (2005) analizaron los tiempos de esterilización para envases metálicos de igual volumen pero diferentes geometrías (cilindros, conos y conos truncados) y orientaciones.

Por su parte la influencia del espacio de cabeza (EC) en los tiempos de esterilización ha recibido poca atención, considerándose el envase completamente lleno en los trabajos mencionados anteriormente.

El análisis numérico en este estudio describe la esterilización de alimentos de alta viscosidad, envasados en recipientes de vidrio, colocados en diferentes orientaciones con y sin EC, calentados con una temperatura externa variable (característico de autoclaves de baja capacidad). Los objetivos de este trabajo fueron los siguientes: (i) obtener los perfiles de temperatura y velocidad para las diferentes combinaciones de las variables: EC y orientación, (ii) estimar los tiempos de proceso necesarios para alcanzar inocuidad microbiológica en cada sistema.

## 2 MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 Modelo de simulación

En este estudio se empleó un dominio de simulación 2D-axisimétrico para un recipiente cilíndrico de vidrio con un radio externo de 0.044 m, una altura 0.137 m y un espesor de 0.004 m. A los efectos de estudiar la influencia del EC y la orientación del frasco se analizaron distintas combinaciones de estas variables descriptas en la tabla 1.

Configuración	Orientación	Espacio de cabeza
1	Vertical (0°)	Sin
2	Vertical (0°)	Con (1cm)
3	Invertido (180°)	Sin
4	Invertido (180°)	Con (1cm)

Tabla 1: Combinaciones de las variables orientación y espacio de cabeza empleadas en la simulación.

### Propiedades físicas:

Carboximetil celulosa sódica (CMC) suspendida en agua (0.85% p/p), fue empleada como modelo de un alimento líquido de alta viscosidad (como sugieren Steffe et al. (1986)), y sus propiedades dadas por Ghani et al. (1999) (Tabla 2) fueron utilizadas en la simulación.

Propiedad	Valor
Densidad ( $\rho$ )*	950 kg m <sup>-3</sup>
Calor específico ( $C_p$ )	4100 J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
Conductividad térmica ( $k$ )	0.7 W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
Coefficiente de expansión volumétrico ( $\beta$ )	0.0002 K <sup>-1</sup>
Viscosidad ( $\mu$ )	4.135-6.219 10 <sup>-2</sup> T+2.596 10 <sup>-4</sup> T <sup>2</sup> Pa s

Tabla 2. Propiedades de CMC (0.85 % P/P) reportadas por Ghani et al. (1999) empleadas en el modelo de simulación.

Los alimentos son generalmente no-Newtonianos y su viscosidad depende de la velocidad de deformación y la temperatura. Debido a la alta viscosidad de la CMC, las velocidades que desarrolla el líquido son muy bajas y por consiguiente también las velocidades de deformación, siendo del orden de 0.01 s<sup>-1</sup> (Ghani et al, 1998). A los valores de velocidades de deformación observados en nuestro trabajo la viscosidad puede asumirse independiente de la velocidad de deformación y el fluido considerarse Newtoniano. Por lo anterior, en la simulación la viscosidad de la CMC fue considerada solamente variable con la temperatura.

La variación de la densidad con la temperatura es generalmente expresada (Adrian, 1993) como:

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

donde  $\beta$  es el coeficiente de expansión térmica de el líquido,  $\rho_{ref}$  y  $T_{ref}$  son la temperatura y la densidad a la condición de referencia. La densidad fue asumida constante en el modelo de simulación excepto en el término de flotación (aproximación de Boussinesq), donde la ecuación 1 fue utilizada para describir su variación con la temperatura.

Para líquidos viscosos, como la CMC, la fuerzas viscosas son grandes y el número de Grashof es bajo (10<sup>-2</sup> - 10<sup>-1</sup>), indicando que el flujo por convección natural es laminar.

## 2.1 Modelo de simulación:

Las ecuaciones diferenciales parciales de Navier-Stokes que gobiernan el movimiento convectivo natural del fluido con propiedades termofísicas constantes, en coordenadas cilíndricas, se acoplaron con el balance de energía y se emplearon para describir el sistema (Bird et al., 1976):

$$\text{Ecuación de continuidad: } \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho u) = 0 \quad (2)$$

$$\text{Balance de energía: } \frac{\partial T}{\partial t} + v \frac{\partial T}{\partial r} + u \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{k}{\rho c_p} \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] \quad (3)$$

Balance de momento en dirección vertical (z) con la aproximación de Boussinesq:

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + v \frac{\partial u}{\partial r} + u \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] + \rho_{ref} g [1 - \beta(T - T_{ref})] \quad (4)$$

Balance de momento en la dirección radial (r):

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial r} + u \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial r} + \mu \left[ \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(rv) \right) + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right] \quad (5)$$

### Condiciones iniciales y de contorno:

El procesamiento térmico consistió de una etapa inicial de calentamiento de aproximadamente 30 minutos donde la temperatura del autoclave ( $T_e$ ) aumenta de una temperatura inicial igual a la temperatura ambiente hasta una temperatura final de 121°C. Esta etapa es seguida de un segundo período durante el cual la temperatura se mantiene prácticamente constante. Este perfil sigmoideo de temperatura es característico de autoclaves tipo batch, frecuentemente utilizadas por pequeños productores de conservas.

Contorno lateral:  $r = R_e$ ,  $T = T_e(t)$ ,  $u$  (velocidad en dirección vertical) = 0,  $v$  (velocidad en dirección radial) = 0, para  $0 \leq z \leq H$ .

Contorno inferior  $z = 0$ ,  $T = T_e(t)$ ,  $u = 0$ ,  $v = 0$ , para  $0 \leq r \leq R_e$ .

Contorno superior  $z = H$ ,  $T = T_e(t)$ ,  $u = 0$ ,  $v = 0$ , para  $0 \leq r \leq R_e$ .

Condición de simetría, en  $r = 0$   $\frac{\partial T}{\partial r} = 0$ ,  $\frac{\partial u}{\partial r} = 0$ ,  $v = 0$ , para  $0 \leq z \leq H$ .

Inicialmente el fluido no se desplaza y su temperatura es uniforme,  $T = T_a$ ,  $u = 0$ ,  $v = 0$  a  $0 \leq r \leq R_e$ ,  $0 \leq z \leq Z$ . Este modelo fue resuelto por medio del método de elementos finitos (COMSOL AB).

### Simplificaciones:

Para simplificar el problema se asumieron las siguientes consideraciones: (a) simetría axial, lo cual reduce el problema de 3D a 2D; (b) la generación de calor por disipación viscosa es despreciable, debido al empleo de un líquido altamente viscoso con muy bajas velocidades; (c) es válida la aproximación de Boussinesq; (d) el calor específico ( $C_p$ ), conductividad térmica ( $k$ ), y coeficiente de expansión volumétrico son constantes ( $\beta$ ); (e) la viscosidad es función de la temperatura  $\mu(T)$ ; (f) la condición de no-desplazamiento sobre las paredes del frasco y la tapa es válida; (g) la resistencia a la transferencia de calor de la tapa metálica es despreciable; (h) Las propiedades térmicas del frasco de vidrio son constantes ( $C_p = 720 \text{ J Kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ;  $k = 0.8 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ;  $\rho = 6400 \text{ Kg. m}^{-3}$ ).

### Mallado computacional:

En la figura 1a y 1b se muestra el dominio de simulación discretizado mediante un sistema de mallado no uniforme, para un frasco sin EC y otro con EC, respectivamente. En este se aplicó un mallado más fino en las zonas donde hay gran variación de temperatura y velocidades, siendo necesario para lograr la convergencia de la solución numérica. En el resto del dominio donde no se producen variaciones de tales magnitudes, un mallado fino solo incrementaría el

tiempo de procesamiento computacional sin aumentar la exactitud de la solución, por lo que se empleó en esta área un mallado más grueso.

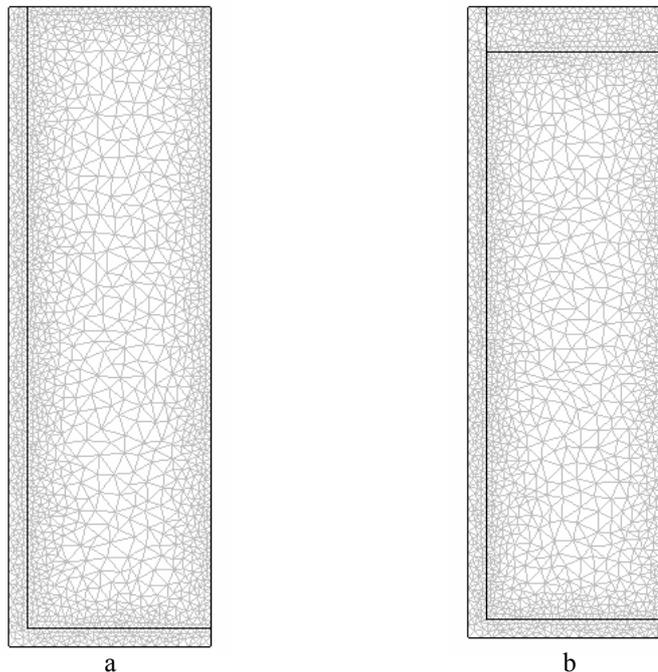


Figura 1: a) Geometría sin espacio de cabeza discretizada en 3411 elementos y b) geometría con espacio de cabeza discretizada en 3629 elementos.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la figura 2 se muestran los perfiles de temperatura y de velocidad (por medio de vectores) para las cuatro combinaciones de orientación y espacio de cabeza, luego de 3000 segundos de iniciado el calentamiento. En esta se observa como el líquido en contacto con la pared del frasco, se encuentra a mayor temperatura que resto del contenido. Esta diferencia en temperaturas se traduce en diferencias de densidades, lo cual genera fuerzas de flotación y movimiento en el fluido. Las fuerzas de flotación producen un flujo ascendente en el líquido de menor densidad que se encuentra cerca de la pared del frasco. Este líquido caliente es deflectado por la tapa, desplazándose radialmente hacia el centro y luego hacia abajo, generándose un flujo recirculante. Debido a esto, la zona de calentamiento lento (ZCL) se desplaza hacia el fondo del envase situándose en aproximadamente un 7% de la altura medida desde el fondo. Otros autores (Zechman & Plug, 1989; Datta & Teixeira, 1987; Ghani et al., 1999 y Kumar & Bhattacharya, 1991) han reportado, para latas, valores mayores (10-15%). Esta localización de la ZCL a una altura menor podría deberse a la mayor conductividad de la tapa (metal) respecto del fondo del frasco (vidrio), lo que desplaza a la ZCL aún más hacia abajo que en latas. En la zona inferior derecha se presenta, en todos los casos, la formación de un flujo secundario, siendo el mismo de mayor longitud para los frascos invertidos.

En la figura 3 se presentan las velocidades axiales desarrolladas, en la altura media del frasco, para las cuatro combinaciones, a los 1500 segundos de iniciado el calentamiento. Las magnitudes de estas fueron del orden de  $10^{-3}$  -  $10^{-4}$  m s<sup>-1</sup> similares a las encontradas por Ghani et al. (1999) para el mismo líquido pero condiciones de contorno constantes (121°C).

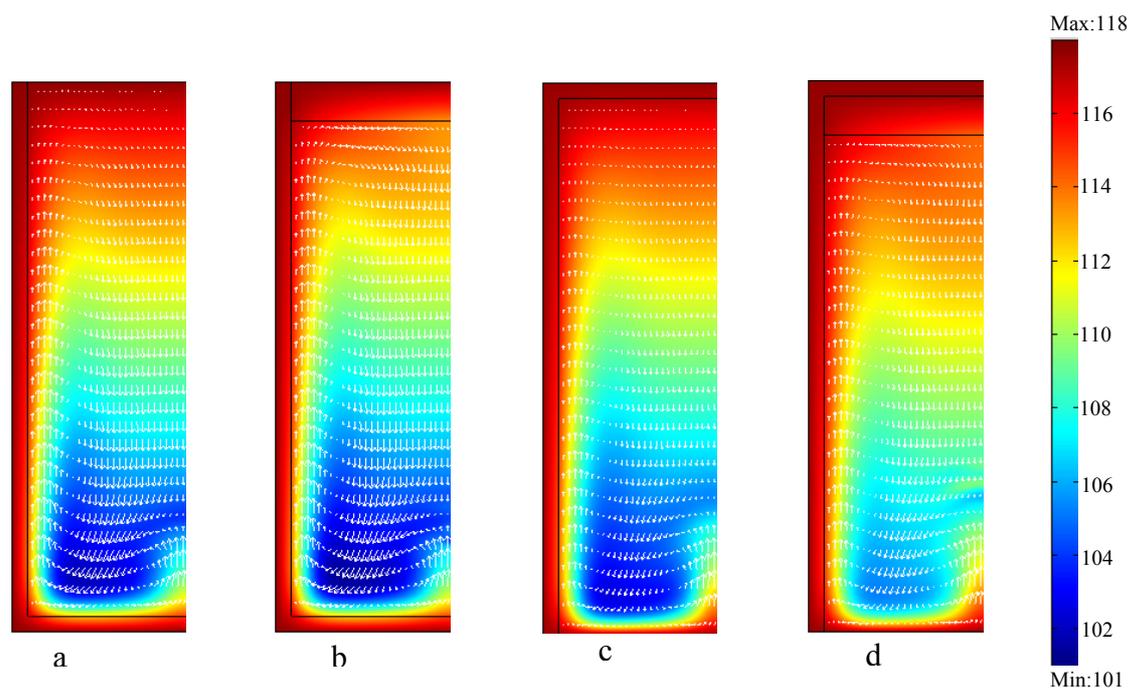


Figura 2: Perfiles de temperaturas y velocidades para las siguientes configuraciones: a) 0°- sin EC, b) 0°- con EC, c) 180°- sin EC y d) 180°- con EC, luego de 3000 segundos de iniciado el calentamiento.

En la figura 3 se observa que las velocidades, para igual orientación del frasco, son ligeramente mayores para las configuraciones con EC. No obstante el espacio de aire actúa como una capa aislante disminuyendo la velocidad de calentamiento cuando los frascos están orientados verticalmente (0°). Por otro lado, los frascos invertidos (180°) desarrollaron mayores velocidades que los orientados con la tapa hacia arriba, esto se debe probablemente a un calentamiento más rápido del líquido que se encuentra en la parte inferior del frasco, debido a la mayor conductividad de la tapa respecto del vidrio, favoreciendo así el flujo recirculante. Esta asimetría, entre el fondo y la parte superior, es más pronunciada en presencia del espacio de cabeza, produciéndose mayores velocidades de flujo y por consiguiente de calentamiento para los frascos a 180° con EC. En la figura 3 también se puede observar el espesor de la zona de líquido ascendente (distancia entre la pared y donde la velocidad del líquido es cero) el cual es de aproximadamente 11 mm, no habiendo prácticamente diferencias entre las distintas configuraciones, ya que el mismo depende principalmente de la viscosidad del líquido. Estos valores son menores que los determinados por Ghani et al. (1999) y Kumar & Bhattacharya (1991), quienes reportaron valores de 16-20 mm y 15-16 mm, respectivamente, para CMC. Estas diferencias se deben probablemente a la menor velocidad de calentamiento de nuestro sistema de autoclave.

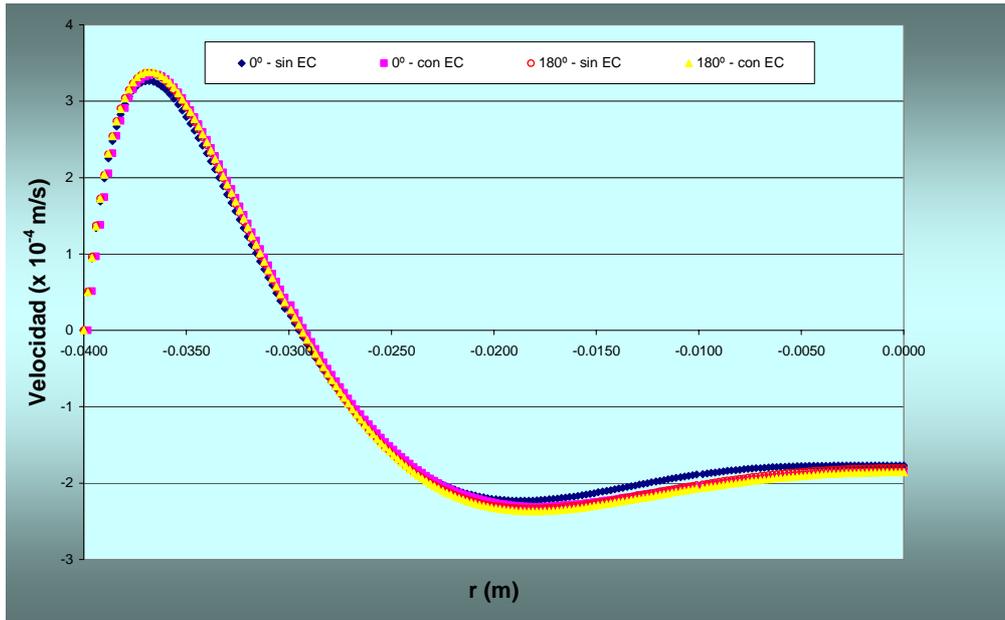


Figura 3: Velocidades desarrolladas por el fluido en la altura media del frasco, a diferentes posiciones respecto del centro.

En la figura 4 se presenta la evolución de la temperatura del centro térmico (punto más frío) para cada una de las configuraciones estudiadas. En esta se puede observar que los frascos colocados a  $180^\circ$  se calientan más rápidamente que los mismos a  $0^\circ$ . Por su parte la presencia del EC en los orientados a  $180^\circ$  aumenta la velocidad de calentamiento, mientras que a  $0^\circ$  la disminuye, concordando esto con lo expresado anteriormente para las velocidades. Si bien se encontraron pequeñas diferencias en temperatura y velocidad, para los distintos casos analizados en este trabajo, estas inciden en mayor medida en los tiempos de procesos estimados para cada uno de los casos.

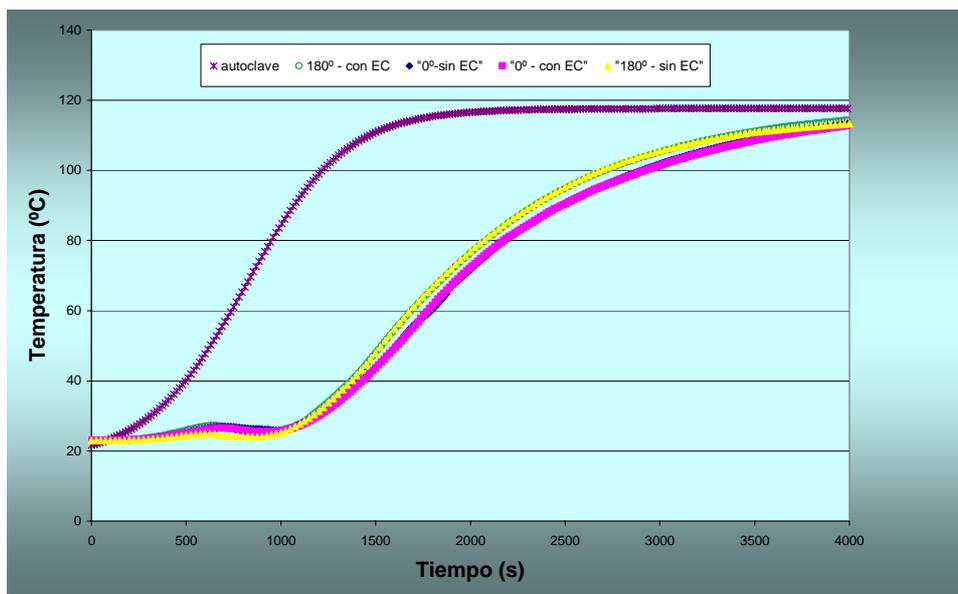


Figura 4: Evolución térmica del centro térmico para las diferentes configuraciones.

El movimiento del punto más frío es un parámetro crítico en la identificación de la ZCL para el diseño de un proceso térmico. El líquido y las bacterias que se encuentran en esta localización son expuestos a condiciones térmicas de menor intensidad que el resto del producto. En la tabla 3 se presentan los tiempos de proceso, para que el líquido viscoso alcance en dicho punto una letalidad acumulada de 3 minutos, necesaria para lograr la inocuidad microbiológica del mismo.

Configuración	Tiempo de proceso (s)
0°- sin EC	4470.0
0°- con EC	4545.0
180°- sin EC	4374.6
180°- con EC	4260.0

Tabla 3: Tiempos de esterilización necesarios para alcanzar una letalidad acumulada de 3 minutos.

En esta se observa que las configuraciones que requieren menor y mayor tiempo de esterilización son a 180° con EC y 0° con EC respectivamente, siendo la diferencia entre ambos de 285 segundos. Por otra parte el EC aumenta en 75 segundos dicho tiempo cuando el frasco se orienta con la tapa hacia arriba y lo disminuye en 104,6 segundos cuando se orienta en forma contraria. Por todo esto la falta de consideración del EC en el cálculo del tiempo de proceso cuando este se encuentra presente originará en el producto falta de inocuidad o sobre cocción dependiendo de la orientación del frasco.

## CONCLUSIONES

Perfiles de temperatura y velocidad durante el calentamiento por convección natural para un alimento líquido viscoso envasado en frasco de vidrio fueron simulados por medio del método de elementos finitos, para distintas combinaciones de la orientación del frasco y del espacio de cabeza. Del análisis de la influencia de estos parámetros se determinó que los frascos colocados a 180° se calientan más rápidamente que los mismos a 0°. Por su parte la presencia del espacio de cabeza en los frascos invertidos aumenta la velocidad de calentamiento, mientras que a 0° la disminuye. Si bien estas diferencias en temperatura, entre las distintas configuraciones, no son tan marcadas, las mismas se traducen en diferencias considerables en los tiempos estimados de proceso. De lo anterior se concluye que la falta de consideración, tanto del espacio de cabeza como de la orientación, puede producir errores en el cálculo de los tiempos necesarios de procesamiento térmico y por consiguiente falta de inocuidad o sobre cocción del producto.

**REFERENCIAS**

- Akteriam S. Numerical simulation of unsteady heat conduction in arbitrary shaped canned foods during sterilization processes. *Journal of Food Engineering*, 21: 343-354, 1994.
- Bird R., Stewart W y Lightfoot E. Transport Phenomena. John Wiley and Sons, New York, 1976.
- COMSOL AB. COMSOL Multiphysics User's Guide. Version: September 2005, COMSOL 3.2.
- Datta A. y Teixeira A. Numerically Predicted Transient Temperature and Velocity Profiles During Natural Convection Heating of Canned Liquid Foods. *Journal of Food Science*, 53: 191-195, 1988.
- Ghani A., Farid M., Chen X., Richards, P. Numerical simulation of natural convection heating of canned food by computational fluid dynamics. *Journal of Food Engineering*, 41: 55-64, 1999.
- Ghani A., Farid M., Chen X., Richards, P. Numerical simulation of transient temperature and velocity profiles in a horizontal can during sterilisation using computational fluid dynamics. *Journal of Food Engineering*, 51: 77-83, 2002.
- Ghani, A.G. A Computer Simulation of Heating and Cooling Liquid Food during Sterilization Process Using Computational Fluid Dynamics. *Association for Computing Machinery New Zealand Bulletin*, 2, n. 3, 2006.
- Kumar, A.; Bhattacharya, M. Transient temperature and velocity profiles in a canned non-Newtonian food during sterilisation in still-cook retort. *Int. J. Heat Mass Transfers*, 34: 1083-1096, 1991.
- Marra, F.; Romano, V. Canned food sterilization: analysis of low-acid food and acid food processing with a fem approach. *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Conference on Computational Heat and Mass Transfer*: Federal University of Rio de Janeiro, Brazil, 2001.
- Miri T., Tsoukalas A., Bakalis S., Pistikopoulos E., Rustem B., Fryers P. Global optimization of process conditions in batch thermal sterilization of food. *Journal of Food Engineering*, 87: 485-494, 2008.
- Norton T., Sun, D. Computational fluid dynamics (CFD) – an effective and efficient design and analysis tool for the food industry: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 17: 600-620, 2006.
- 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.
- Steffe J., Mohamed E., Ford E. Rheological Properties of fluid foods: data compilation, in: M.R. OKOS (Ed.), *Physical and Chemical Properties of Foods*, American Society of Agricultural Engineering, St. Joseph, MI, 1986.
- 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.
- Walti Chanes J., Gómez Palomares O., Vergara Balderas F., Alzamora S. Aplicaciones de ingeniería y fenómenos de transporte al estudio de la transferencia convectiva de calor en alimentos envasados. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 4: 89-106, 2005.
- Zechman, L.G. & Pflug, I.J. Location of the slowest heating zone for natural convection heating fluids in metal containers. *Journal Food Science*, 54:205-209, 1989.