

**ESTUDIO DEL EFECTO DEL CALENTAMIENTO Y EL
ENFRIAMIENTO DE LA BOTELLA DURANTE LA
PASTEURIZACIÓN DE LA CERVEZA**

**STUDY OF HEATING AND COOLING EFFECT IN BOTTLE DURING BEER
PASTEURIZATION**

Misdelki Pérez Colas^{1*} <https://orcid.org/0000-0003-1858-705X>

Martha Faustina Nápoles García¹ <https://orcid.org/0000-0002-9280-510X>

María de Lourdes de la Cruz Aragoneses¹ <https://orcid.org/0000-0003-3755-3787>

¹ Facultad de Ciencias Aplicadas. Universidad Ignacio Agramonte Loynaz, Camagüey. Carretera Circunvalación Norte km 5½. Camagüey, Cuba.

Recibido: Junio 14, 2019; Revisado: Septiembre 24, 2019; Aceptado: Octubre 21, 2019

RESUMEN

Introducción:

En la simulación del proceso de pasteurización de la cerveza, es común no considerar el espesor del contenedor. Obviar esto es válido para el caso de la cerveza enlatada, pero cuando se encuentra embotellada esta consideración no es correcta.

Objetivo:

Este trabajo tiene como objetivo realizar el estudio del calentamiento y enfriamiento del vidrio durante el proceso de pasteurización de la cerveza embotellada, utilizando el software COMSOL MULTIPHISICS v 5.1 para la simulación, basado en el método de los elementos finitos.

Materiales y Métodos:

El sistema a modelar está formado por la botella que contiene la cerveza a pasteurizar, que transita a través de las zonas del túnel, y el agua que se suministra a través de las duchas dispuestas en cada zona para tal efecto. El modelo está basado en el balance de energía para el sólido en estado no estacionario.

Resultados y Discusión:

Se presentan los cambios de temperatura durante el calentamiento y el enfriamiento del vidrio, y se analizan los tiempos requeridos para que el material alcance la temperatura del agente calefactor (agua), en cada caso.



Este es un artículo de acceso abierto, lo que permite su uso ilimitado, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada.

* Autor para la correspondencia: Misdelki Pérez, Email: misdelkis.perez@reduc.edu.cu



Conclusiones:

El estudio realizado indica la necesidad de considerar un tiempo tanto en el calentamiento como en el enfriamiento. Los resultados encontrados demuestran que no se debe omitir este tipo de análisis en procesos similares.

Palabras clave: calentamiento; elementos finitos; enfriamiento; pasteurización.

ABSTRACT

Introduction:

In beer pasteurization process simulation, is not common to consider container thickness. To obviate this is valid for canned beer case, but when beer is bottled this consideration is not correct.

Objective:

To study glass heating and cooling during bottled beer pasteurization process, using COMSOL MULTIPHISICS v 5.1 simulation software, based on finite element method

Materials and Methods:

The system to be modeled is formed by bottle containing the beer to be pasteurized, which transits through tunnel areas, and water that is supplied through the showers arranged in each zone for this purpose. Model is based on energy balance for a solid in a non-stationary state.

Results and Discussion:

Temperature changes are presented during glass heating and cooling. The required times to material take heating agent (water) temperature, in each case, are analyzed.

Conclusions:

Realized study indicates the need to consider a time during heating and cooling. The results demonstrate that this type of analysis should not be omitted in similar processes.

Keywords: heating; finite elements; cooling; pasteurization.

1. INTRODUCCIÓN

La simulación y modelación de procesos, han sido utilizadas para regular tiempos y temperaturas durante las etapas de calentamiento y enfriamiento en procesos de pasteurización, cuando intervienen diferentes líquidos, entre ellos la cerveza, que se encuentran contenidos en varios tipos de recipientes. Se han obtenido perfiles de temperatura y velocidad de los fluidos, resultados de la cinética del proceso incluyendo el comportamiento de las unidades de pasteurización y se ha analizado en algunos casos la incidencia de la posición en la que se ubican los envases (Augusto et al., 2010; Laíce, 2013; Lespinard y Mascheroni, 2014).

El proceso de pasteurización cervecera se realiza en pasteurizadores de túnel, este producto se envasa la mayoría de las veces en botellas o latas, donde estas pasan por el interior del mismo siendo bañadas por el agua que se suministra a través de duchas. El equipo se divide fundamentalmente en tres zonas: precalentamiento, calentamiento y enfriamiento, (Mendieta et al., 2012).

Los estudios relacionados con la modelación matemática de la pasteurización de la cerveza envasada en botellas, han estado dirigidos a analizar el comportamiento del fluido. Se dice haber obtenido los mismos resultados, cuando el producto está contenido

en las botellas que cuando se envasa en las latas, pero en ningún trabajo se ha encontrado el estudio realizado para el material del recipiente, es decir, no se ha considerado la velocidad de transferencia de calor, ni se hace un estudio de la distribución de temperatura en el sólido, ni el tiempo necesario. Lo toman como condiciones límites a través de la dinámica de fluidos computacional (Patiño et al., 2001; Hoffman, 2006).

Los envases utilizados para la cerveza son principalmente las latas de aluminio o botellas de vidrio. Estos materiales difieren en cuanto a su conductividad térmica, espesor y dimensiones geométricas. Las características de los recipientes tienen incidencia sobre los procesos de transferencia térmica que ocurren durante la pasteurización. Gracias a la transferencia de calor entre el agua rociada y el fluido contenido en el envase se genera un gradiente de temperatura en el seno de la cerveza, produciendo el movimiento relativo de las partículas y generando la convección natural. En general se evidencian tres mecanismos de transferencia de calor, convección forzada entre el agua rociada y la superficie externa del envase, conducción de calor a través de la pared del envase y convección libre entre la pared interna del envase y el fluido interno, es decir, dentro de la botella, donde se debe tomar en cuenta además, la difusión (Patiño et al., 2001).

Debido a la complejidad en la solución de las ecuaciones diferenciales fenomenológicas de cantidad de movimiento y calor, que se asocian a la pasteurización cervecera, es que se aplican los métodos finitos para resolver el problema, siendo la forma de resolver el sistema sin tener que construirlo físicamente. Se conocen entre estos, los métodos de diferencias finitas, volúmenes finitos y elementos finitos (MEF).

El método de diferencias finitas se basa en asignar puntos espaciados de manera apropiada sobre el dominio y aplicar las ecuaciones constitutivas correspondientes al fenómeno a cada punto, este método tiene como punto de partida las series de Taylor. El método de los volúmenes finitos se puede obtener de la ponderación de residuos con la función de pesos y aplicar el teorema de la divergencia de Gauss. Lo cual es equivalente a dividir el dominio en volúmenes de control y aplicar un balance de conservación a cada volumen. Por otra parte el MEF es un procedimiento numérico que se utiliza para resolver ecuaciones diferenciales sobre un dominio dado, en el cual el dominio es representado como una colección de dominios simples, denominados elementos finitos (Bosch, 2006; Toro, 2013).

En los últimos tiempos se han realizado simulaciones en procesos de pasteurización utilizando software profesionales que permiten obtener modelos multifísicos, es decir, relacionar la dinámica de los fluidos computacional con la transferencia de calor en sólidos. Esta situación es muy común, pues los alimentos fluidos pueden pasteurizarse, antes de ser envasados pero muchas veces se realiza este proceso cuando estos ya están contenidos en un recipiente. Entre los software se pueden mencionar el Ansys CFX, el cual basa la solución en el método de los volúmenes finitos y el COMSOL, el cual permite simular y modelar situaciones muy específicas, que se presentan en distintos procesos industriales, basando su análisis en el MEF (Hoffman, 2006; Lespinard y Mascheroni, 2014).

A partir de lo anterior, en este trabajo se tiene como objetivo realizar el estudio del calentamiento y enfriamiento del vidrio durante el proceso de pasteurización de la

cerveza embotellada, utilizando el software COMSOL MULTIPHISICS v 5.1 para la simulación, basado en el método de los elementos finitos.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Descripción del sistema a modelar

El sistema a modelar está formado por la botella que contiene la cerveza a pasteurizar y el agua que se suministra a través de las duchas dispuestas en el túnel de pasteurización para tal efecto. Esta transita por cada una de las zonas dentro del túnel, donde el agua que moja la botella por su cara exterior, posee temperaturas de 30, 40 y 50 °C (303, 313 y 323 K), en las zonas 1 a 3 respectivamente, que son zonas de calentamiento. Estas aguas recirculan dentro del equipo con las zonas 8 a 6 que son de enfriamiento. La zona 4 es de pre-pasteurización y allí la temperatura del agua es de 60 °C (333 K) y en la zona 5, donde ocurre la pasteurización, el agua tiene una temperatura de 64 °C (337 K), estas dos zonas no recirculan. En la zona 5 la botella debe alcanzar la temperatura mínima de pasteurización que es de 60°C (333 K), a esta temperatura se alcanza la letalidad de las bacterias según López (2010) y Pardo (2017).

La botella llega a la entrada del pasteurizador con una temperatura de 5°C (278 K) y a partir de allí comienza el proceso de calentamiento paulatino hasta la pasteurización y luego el enfriamiento. Todo lo anterior puede observarse en la figura 1, en la cual se presenta un esquema de un pasteurizador de túnel.

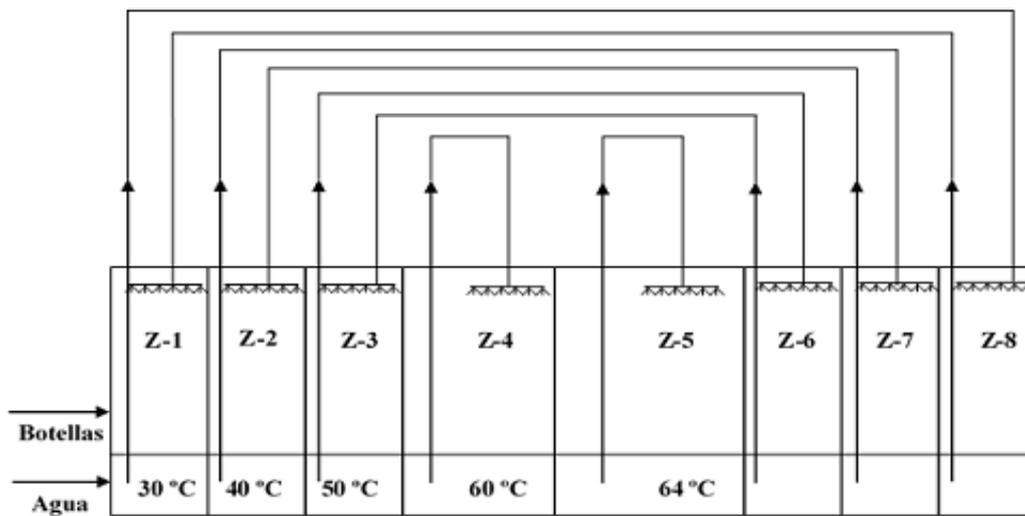


Figura 1. Esquema de un pasteurizador de túnel para botellas de cerveza

Como el objetivo del trabajo es estudiar los perfiles de temperatura que aparecen en el vidrio en función del tiempo, el dominio de simulación es representado por una botella de vidrio. Las dimensiones geométricas de esta son: 0,0286 m de radio interior, 0,239 m de altura y un espesor de 0,0027 m, se escogen estas características como ejemplo para este estudio, no respondiendo a ninguna en específico que se utilice en alguna industria. Es necesario aclarar, que los envases que se emplean para la cerveza no tienen el mismo diámetro en toda su longitud o altura. Estos tienen un radio mayor en el fondo y a una altura determinada el radio se estrecha hasta el tope, pero el espesor del vidrio si es el mismo en todas las partes de la botella que están en contacto con la cerveza. Debido a lo anterior se ha considerado un radio único para toda la geometría que se estudia.

2.2. Modelo matemático del proceso estudiado

El modelo está formado por el balance de energía para el sólido en estado no estacionario obtenida de la simplificación de la ecuación general de balance térmico reportada por (Bird et al., 1979):

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right) \quad (1)$$

Con las condiciones iniciales y límites siguientes:

Condiciones iniciales:

Considerando que el vidrio se encuentra en equilibrio térmico con la cerveza:

Para el calentamiento: (a $t = 0$ s, $T = 5$ °C = 278 K)

Para el enfriamiento (a $t = 0$ s, $T = 60$ °C = 333 K)

Condiciones de contorno:

Estas condiciones son de tipo Newman según la ecuación (2), (Hoffman, 2006; Patiño et al., 2001).

$$-k \frac{\partial T}{\partial r} = h(T - T_{\infty}) = q_0 \quad (2)$$

- En el fondo y en el tope del sistema se considera que el flujo de calor es nulo, comportándose como aislante térmico, ($q_0 = 0$).
- En las paredes laterales las condiciones se expresan como un flux, siendo T_{∞} la temperatura del agua en cada zona
- En la parte exterior del sistema es considerado un flujo de calor convectivo forzado, dado que el agua caliente, en cada zona, cae impulsada por bombas y a través de aspersores se distribuye uniformemente sobre las botellas. El coeficiente convectivo del agua, h , se evalúa mediante el software COMSOL MULTIPHYSICS a partir de los criterios adimensionales Reynold (Re), Prandl (Pr) y Nusselt (Nu), los cuales están en función de las dimensiones de la botella y las propiedades termofísicas del agua (densidad, viscosidad dinámica, capacidad térmica específica y conductividad térmica) según las temperaturas dadas en el proceso.
- El mecanismo de transferencia de calor que predomina en el sólido es la conducción del calor a través de un sólido, en estado no estacionario, en este caso se escogió como material Silica glass (vidrio de sílice). El software, ofrece sus propiedades termofísicas entre ellas la conductividad térmica (k), con un valor de 1,38 W/mK.

2.3. Procedimiento para el uso del software COMSOL v 5.1

Las simulaciones se llevan a cabo por un análisis de la combinación de la Dinámica de Fluidos Computacional, DFC, el cual se basa en el método de los elementos finitos. El modelo se obtiene para la geometría de la botella haciéndose un estudio del espesor hasta la parte fundamental que incluye el nivel de llenado de la cerveza similar a lo realizado por (Patiño et al., 2005). Debido a la simetría axial de las botellas en la posición vertical solo se considera la mitad de esta en la simulación.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la figura 2, se puede observar como durante el calentamiento, en la botella ocurren cambios, se aprecia en 2a) a 2c) que desde el tiempo inicial hasta los 60 s, existe una variación de la temperatura desde 5 °C (278 K) hasta 22 °C (295 K), este último valor

cercano a la temperatura del agua exterior que es de 30 °C (303 K). Luego se puede observar en las figuras 2d) a 2f) como a partir de los 90 s, ya se ve una homogeneidad de la temperatura y que a ese tiempo ya se ha alcanzado la estabilidad térmica. En el fondo de la botella debe haber intercambio térmico, pero este se ha despreciado, lo cual queda reflejado en la ecuación 1 donde se considera que la transferencia de calor es en el sentido radial. Esa es una de las suposiciones realizadas para la solución, esta parte está apoyada sobre la cinta transportadora.

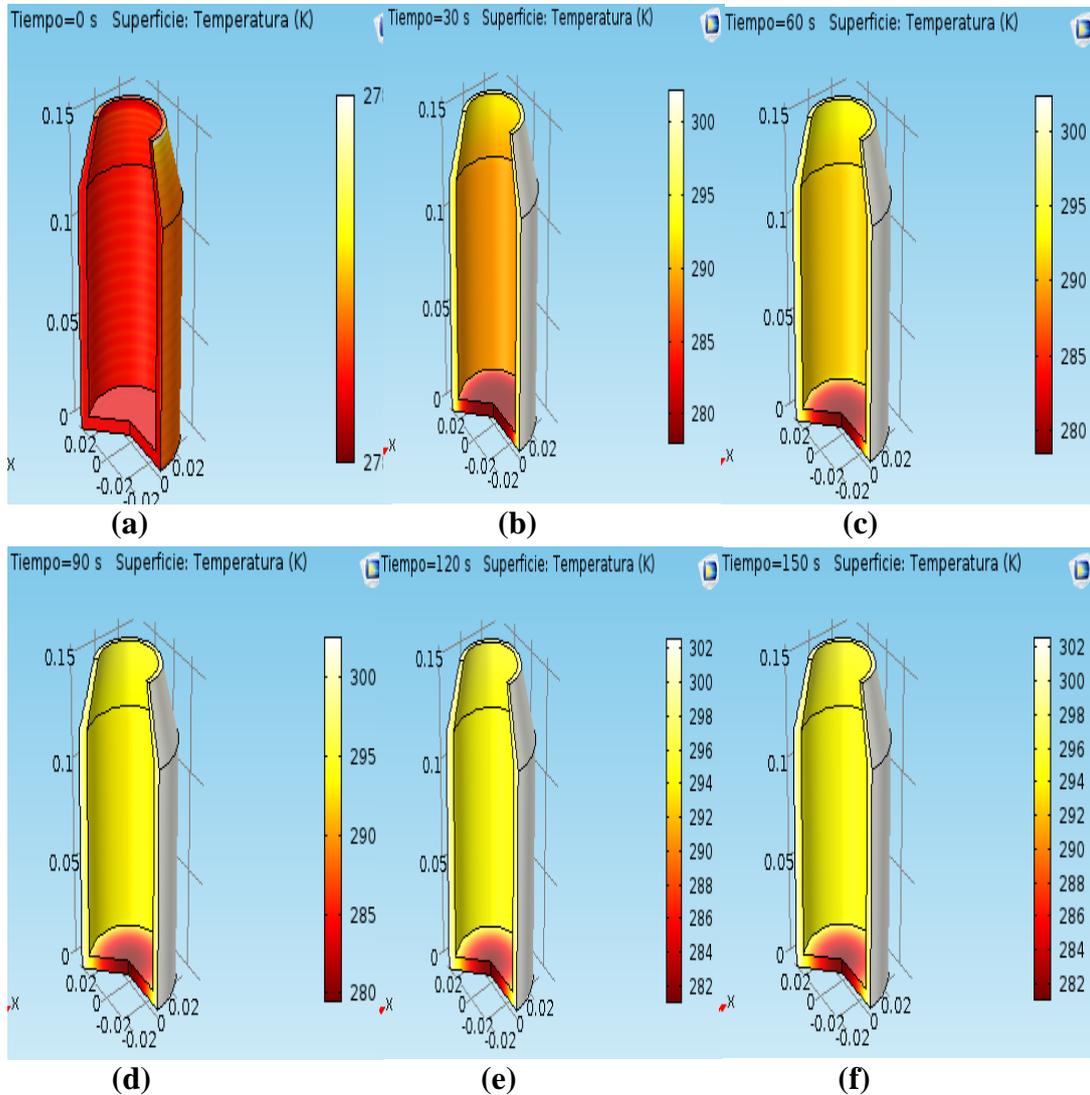


Figura 2. Resultados del COMSOL durante el calentamiento a través del tiempo
a) 0 s; b) 30 s; c) 60 s; d) 90 s; e) 120 s; f) 150 s

Los datos que fueron obtenidos luego de la simulación del calentamiento de la superficie interna de la botella, hicieron posible construir la figura 3, donde se observa el comportamiento de la temperatura interior de la botella en un tiempo de 70 s a partir del cual se logra estabilizar la temperatura, esta figura pertenece a la primera zona de calentamiento. Para el resto de las zonas de calentamiento, el tiempo es semejante. Pues, cuando la botella pasa de una zona a otra, recibe una nueva ducha de agua con una temperatura 10 grados mayor, siendo el mismo proceso en cada zona.

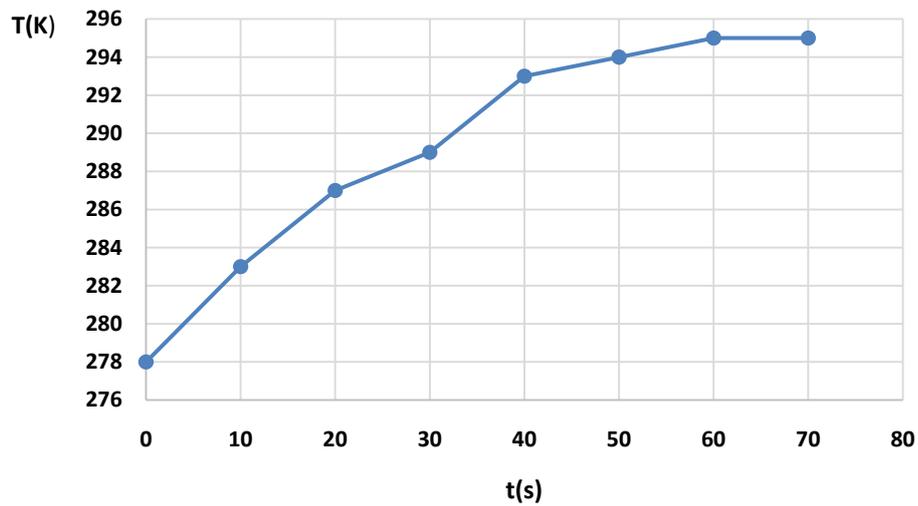
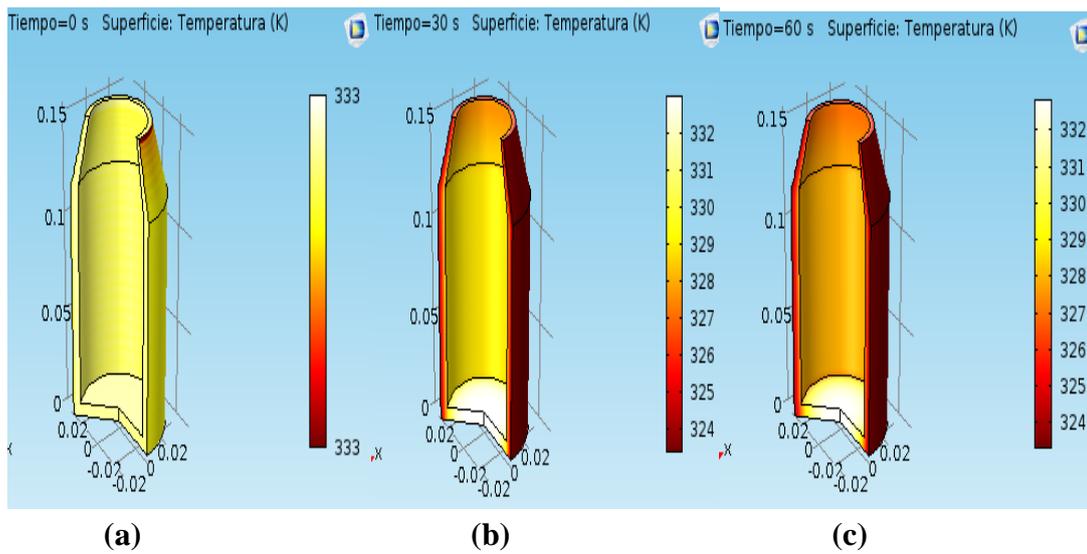


Figura 3. Comportamiento de la temperatura interior de la botella en la primera zona, donde el agua está a una temperatura de 30 °C (303 K)

La figura 4a) a 4f) muestra el resultado de la simulación del proceso de enfriamiento de la botella, desde una temperatura inicial de 60 °C (333 K) encontrándose que en un tiempo de 120 s, se alcanza un color homogéneo en la superficie interior del envase.



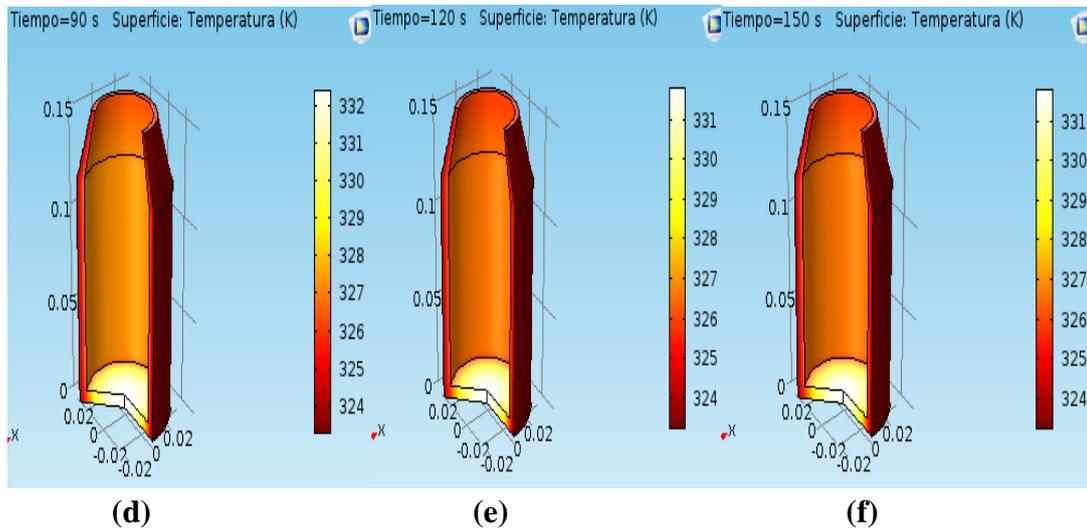


Figura 4. Resultados del COMSOL durante el enfriamiento a través del tiempo.
 a) 0 s; b) 30 s; c) 60 s; d) 90 s; e) 120 s; f) 150 s

De manera similar al proceso de calentamiento se tomaron los datos del enfriamiento, a partir de la simulación y se obtuvo la figura 5, donde se puede ver el comportamiento de la temperatura del proceso en el tiempo, para la primera zona de enfriamiento y se observa que a partir de los 100 s, es que se estabiliza el proceso.

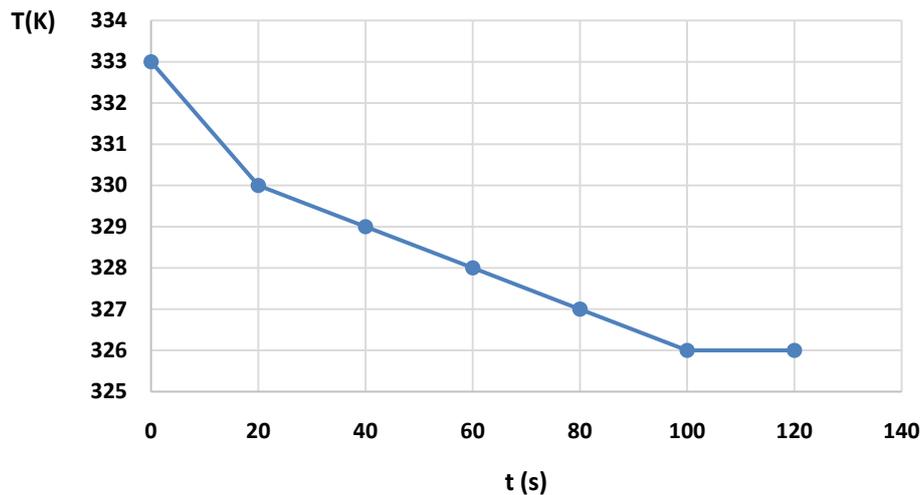


Figura 5. Comportamiento del enfriamiento del vidrio en la zona 6, donde el agua está a una temperatura de 323 K

Como puede observarse el tiempo de enfriamiento es menor que el de calentamiento, esto se debe fundamentalmente a que las diferencias de temperatura son distintas (ΔT de calentamiento es de 25 °C (K) y ΔT de enfriamiento 10 °C (K)). Al ser menor la fuerza impulsora el proceso es más lento. Este resultado depende también de los fenómenos de dilatación y contracción que sufren los materiales cuando se someten a calentamientos y enfriamientos sucesivos, que provocan diferentes caminos, (Fernández, 1971).

Estas condiciones, se han tenido en cuenta adecuadamente en el diseño del funcionamiento del pasteurizador, el cual opera de manera satisfactoria. El hecho de que

recircule el agua de las zonas 1, 2 y 3 con las zonas 8, 7 y 6 respectivamente, se debe a que durante las tres primeras zonas, el vidrio al calentarse progresivamente sufre tensiones térmicas. Estas se estabilizan en las zonas 4 y 5 donde se garantiza el tiempo suficiente de exposición, de 10 a 20 minutos, de la botella para que ocurra la pasteurización. Luego el enfriamiento debe ser lento para que el vidrio no reciba impactos térmicos bruscos, que influyan en la pérdida de la estabilidad de sus propiedades físicas y evitar así su rotura.

4. CONCLUSIONES

El estudio realizado acerca del efecto de la temperatura de pasteurización sobre la botella de cerveza, de acuerdo con las condiciones dadas, indica la necesidad de considerar un tiempo para este proceso tanto en el calentamiento como en el enfriamiento, los resultados encontrados han sido estudiados para un ejemplo, demostrando que no se debe omitir este tipo de análisis en procesos como estos:

- 1- Para el calentamiento es necesario un mínimo de 70 s, para que el vidrio alcance la temperatura del agua de riego, a partir de allí comenzaría el calentamiento de la cerveza.
- 2- Durante el enfriamiento de la botella, se observó una estabilidad térmica a los 100 s, por lo que puede considerarse suficiente para este proceso.
- 3- El uso de la simulación empleando el software COMSOL v 5.1, constituyó una herramienta importante para lograr el objetivo de esta investigación.

REFERENCIAS

- Augusto, P.E., Pinheiro, T., Cristianini, M., Using Computational Fluid-Dynamics (CFD) for the evaluation of beer pasteurization: effect of orientation of cans., *Ciencia y tecnología de los alimentos*, Campinas, Vol. 30, No. 4, 2010, pp. 980-986.
- Bird, R., Stewart, W., Lightfoot, E., *Fenómenos de transporte.*, Editorial Pueblo y Educación, Ciudad de la Habana, 1979, pp. 12.3-12.4.
- Bosch, J.F., *Métodos finitos.*, Trabajo de grado para optar al título de Especialista en Modelación, Simulación, y Optimización de Sistemas, Instituto de energía y termodinámica de Medellín, Colombia, 2006, pp. 19-82.
- Fernández, A., Estudio de recocido del vidrio., *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica*, Vol. 10, No. 2, Marzo- Abril de 1971, pp. 193 – 221.
- Hoffman, K.L., Beer pasteurization models., Tesis presentada en opción al título de Máster en Informática y Modelación Matemática, Technical University of Denmark, Dinamarca, 2006.
- Laíce, L.I., Estudo cinético do processo de pasteurização da cerveja numa pasteurizadora de túnel da fábrica de cervejas de moçambique., Tesis presentada en opción al título de Licenciado en Química, Universidad Eduardo Mondlane, Mozambique, 2013.
- Lepinard, A.R., Mascheroni, R., Simulación numérica de los perfiles de temperatura y velocidad durante la pasteurización de alimentos líquidos viscosos. Efecto de la orientación del envase., *Mecánica Computacional*, Vol. XXXIII, No. 50, 2014, pp. 3347-3360.

- López, R.C., Evaluación del sistema de pasteurización de productos de una planta cervecera., Tesis presentada en opción al Título de Ingeniero Químico, Universidad de Oriente, Venezuela, 2010, pp. 20-27.
- Mendieta, J.C., Olarte, M.A., González, H., Diseño de un sistema de control inteligente para un pasteurizador tipo túnel., Prospect, Vol. 10, No. 2, 2012, pp. 81-88.
- Pardo, L., Microorganismos termorresistentes en la producción de cerveza. Estudio inicial., Tesis presentada en opción al Título de Licenciado en Biología, Universidad de La Coruña, España, 2017.
- Patiño, L.A., Espinosa, H., Velásquez, O., Estudio numérico de la transferencia de calor en la cerveza en el proceso de pasteurización., Revista Ciencia e Ingeniería, Vol. 22, No. 3, 2001, pp. 29-25.
- Patiño, L.A., Espinosa, H., Collado, M., Velásquez, O., Estudio del efecto de la presión dinámica de CO₂ sobre la distribución de velocidades y temperatura de la cerveza en el proceso de pasteurización., Saber, Venezuela, Vol. 17, No. 1, 2005, pp. 41 -47.
- Toro, L.A., Métodos Matemáticos Avanzados para la Modelación y Simulación de Equipos para Procesos Químicos y Biotecnológicos., Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Departamento de Ingeniería Electrónica Computación, Manizales, Colombia, 2013, pp. 195-210.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no existe conflicto de interés.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

- M.Sc. Misdelki Pérez Colas. Obtuvo los datos reales en la industria. Implementó el modelo matemático en el software COMSOL MULTIPHISICS v 5.1. Escribió y corrigió el artículo completo.
- Dra.C. Martha Faustina Nápoles García. Desarrolló el modelo matemático que describen la conducción en el vidrio. Participó en la escritura y corrección completa del artículo.
- Dra.C. María de Lourdes de la Cruz Aragonese. Obtuvo los datos reales en la industria. Colaboró con el análisis de los resultados obtenidos y en la escritura y corrección del artículo.