

Validación de un simulador de esterilización de alimentos enlatados desarrollado por el método de diferencias finitas explícitas.**Validation of a simplified sterilization of canned foods developed by the explicit finite differences method.****Validação de um simulador de esterilização de alimentos enlatado desenvolvido pelo método de diferenças finitas explícitas.****Rosa Gallardo Quesquén¹, Luis Montenegro Álvarez², Walter Símpalo López³.****Resumen**

El tratamiento térmico más utilizado que asegura la inocuidad en las industrias de alimentos es la esterilización, proceso que se realiza sin tener en cuenta los subtratamientos y sobretratamientos en los alimentos. Con la finalidad de alcanzar el valor letal óptimo para productos hidrobiológicos, se realizaron estudios de penetración de calor en dos tipos de conservas, bonito (*Sarda Sarda*), en aceite, agua y sal; y bonito (*Sarda Sarda*), mix de verduras (alverjas y zanahorias), en aceite, agua y sal; ambas en envases tipo tuna (307x109 mm) - incoloro exterior/aluminio interior. Con el cual se determinó experimentalmente el f_h (pendiente de la recta), valor útil para hallar la difusividad térmica (α) mediante el método de Hayakawa para un cilindro finito, las difusividades térmicas para el primer y segundo tipo de producto en ensayos I, II y III para cada uno fueron 1.38×10^{-7} m²/s, 1.63×10^{-7} m²/s, 1.55×10^{-7} m²/s, 1.64×10^{-7} m²/s, 1.69×10^{-7} m²/s y 1.75×10^{-7} m²/s, respectivamente. Valores que en promedio coinciden a los determinados por Sing y Heldman (1998) y Shafier y Said (2009). Los valores letales (F_0) experimentales en el primer y segundo producto para los ensayos I, II y III fueron 19.67 min, 21.67 min, 22.73 min, 23.83min, 22.60 min y 21.75 min, respectivamente. Comparando los valores promedio de F_0 experimentales y los simulados en el programa de Visual Basic mediante la prueba t-student resulta que si existen diferencias significativas.

Palabras clave: Esterilización, diferencias finitas explícitas, difusividad térmica, valor letal.

Abstract

The most commonly used heat treatment that ensures safety in the food industry is the sterilization, process performed regardless subtreatments and overtreatment in food. In order to achieve optimal value lethal to marine products, heat penetration studies were performed on two types of canned, bonito (*Sarda Sarda*), oil, water and salt; and bonito (*Sarda Sarda*), mix vegetables (peas and carrots), oil, water and salt; both in type containers tuna (307x109 mm) - colorless outer / inner aluminum. With which the f_h (slope of the line), The useful value to find the thermal diffusivity (α) by the Hayakawa method for a finite cylinder, the thermal diffusivities for the first and second product types in tests I, II and III for each were 1.38×10^{-7} m²/s, 1.63×10^{-7} m²/s, 1.55×10^{-7} m²/s, 1.64×10^{-7} m²/s, 1.69×10^{-7} m²/s y 1.75×10^{-7} m²/s. Values that coincide with those determined by Sing & Heldman 1998) and Shafier & Said (2009). The experimental lethal values (F_0) in the first and second products for tests I, II and III were 19.67 min, 21.67 min, 22.73 min, 23.83min, 22.60 min y 21.75 min. Comparing the average values of experimental and simulated F_0 in the Visual Basic program if there are significant differences.

Keywords: Sterilization, explicit finite difference, thermal diffusivity, lethal value.

Resumo

O tratamento térmico mais utilizado, que garante a segurança na indústria alimentar é o processo de esterilização é executada independentemente subparcelas e sobretratamento em alimentos. A fim de

¹Ingeniería Agroindustrial y Comercio Exterior. Ingeniería, Arquitectura y Urbanismo. Bachiller. Universidad Señor de Sipán. Chiclayo. Lambayeque. Perú. quesquenrb@crece.uss.edu.pe

²Ingeniería Agroindustrial y Comercio Exterior. Ingeniería, Arquitectura y Urbanismo. Bachiller. Universidad Señor de Sipán. Chiclayo. Lambayeque. Perú. malvaresl@crece.uss.edu.pe.

³Ingeniería Agroindustrial y Comercio Exterior. Ingeniería, Arquitectura y Urbanismo. Docente. Universidad Señor de Sipán. Chiclayo. Lambayeque. Perú. wsimpalo@crece.uss.edu.pe. <http://orcid.org/0000-0001-9930-3076>.

Recibido: 15/04/ 2017 Aceptado: 10/05/2017

atingir o valor óptimo letal para productos do mar, estudos de penetração de calor foram realizados em dois tipos de enlatados, bonito (*Sarda sarda*), óleo, água e sal; e de bonito (*Sarda sarda*), misturar vegetais (cenouras e ervilhas), óleo, água e sal; tanto no tipo atum recipientes (307x109mm) - alumínio exterior / interior incolor. Com o qual o F_0 (declive da linha), útil para encontrar a difusividade térmica (α) pelo método de Hayakawa para um valor de cilindro finito, as difusividades térmicas para o primeiro e segundo tipo de produto em testes que foi experimentalmente determinado, II e III para cada um foram $1.38 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, $1.63 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, $1.55 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, $1.64 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, $1.69 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ y $1.75 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, respectivamente. Os valores médios coincidem com os valores determinados por canta & Heldman (1998) e Shafier & Said (2009). Valores experimentais letais (F_0) no primeiro e segundo produto para teste I, II e III foram 19,67 min, 21,67 min, 22,73 min, 23.83min, 22,60 min e 21,75 min, respectivamente. Comparando-se os valores médios de F_0 experimental e simulado no programa Visual Basic, os resultados do teste t de Student se existem diferenças significativas.

Palavras-chave: Esterilização, diferenças finitas explícito, difusividade térmica, valor letal.

Introducción

Para el hombre siempre ha sido un gran problema poder prolongar el tiempo de vida de los alimentos. Palazzesi (2010) afirmó que Nicolás Appert (1810), logró desarrollar un método de preservación de los alimentos de forma empírica, mediante el cual se dio inicio a estudios de mejoras de los procesos térmicos.

En Actualidad, Prospectiva 2020 (2015), mencionó que Estados Unidos es líder en consumo de enlatados y conservas a nivel mundial, abarcando el 20% del total consumido en el 2014, el mismo que se valorizó en USD 19.5 mil millones. Le sigue Francia (con un consumo de un poco más de USD 4 mil millones), Reino Unido, España e Italia.

Las industrias en los últimos años, han logrado desarrollar gracias a la ciencia y tecnología, sistemas computacionales para el diseño y evaluación de procesos a través de la simulación; ya que para el diseño y evaluación se requiere de una cantidad excesiva de experimentos y con el fin de evitar los subtratamientos que afectan a la salud pública y sobretratamientos que afectan la calidad nutricional y sensorial de los alimentos e implican un uso irracional de energía, altos costos de operación y mantenimiento de la tecnología usada, además que a largo plazo se realiza una emisión significativa de sustancias contaminantes al medio ambiente (Elías, *et al.*, 2014).

Es por esto que se propone validar la aplicación de un simulador desarrollado por el método de diferencias finitas explícitas para determinar el valor de F_0 en la esterilización comercial de alimentos enlatados.

Investigaciones anteriores, como Domínguez (2011), demostraron que para implementar la simulación numérica de estos alimentos, es necesario establecer modelos que describan al proceso y lo usual es aplicando métodos numéricos de discretización, siendo el uso del método de diferencias finitas, común en ingeniería de alimentos.

El método de diferencias finitas es un método de carácter general que permite la resolución aproximada de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales definidas en recintos finitos. El primer paso para la aplicación del método consiste en discretizar el recinto del plano en el que se quiere resolver la ecuación con una malla, es decir, la ecuación se resolverá en términos discretos, punto a punto por iteración, la malla proporciona el dominio que se desea resolver el cual es impuesta a conveniencia del investigador. Por conveniencia la malla será cuadrada (caso bidimensional). Los puntos estarán separados una distancia h en ambas direcciones x e y , tal como se muestra en la Figura 1, se discretiza la ecuación según el dominio unidimensional. Como ejemplo mostramos en la figura una malla que tiene 5 nodos equiespaciados, siendo Δx la distancia entre nodos consecutivos.

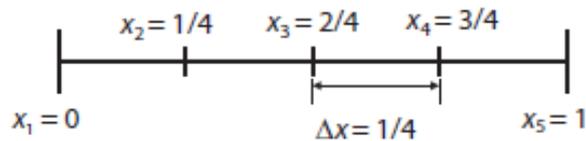


Figura 1. Discretización con 5 nodos.

Fuente: Técnicas numéricas en ingeniería de fluidos (2012)

Para ello se hace uso del desarrollo de la serie de Taylor alrededor de un punto.

$$T(x + h, y) \cong T(x, y) + \frac{\partial T(x, y)}{\partial x} \cdot h + \frac{\partial^2 T(x, y)}{\partial x^2} \cdot \frac{h^2}{2} + O(h^3)$$

$$T(x - h, y) \cong T(x, y) - \frac{\partial T(x, y)}{\partial x} \cdot h + \frac{\partial^2 T(x, y)}{\partial x^2} \cdot \frac{h^2}{2} - O(h^3)$$

El error que se comete por despreciar los términos de orden superior de la serie de Taylor se denomina error de truncamiento. En este caso, puesto que el error de truncamiento es de orden se dice que esta representación discreta tiene una precisión de primer orden.

Agrupando los términos, despreciando los términos $O(h^3)$ y despejando la segunda derivada:

$$\frac{\partial^2 T(x, y)}{\partial x^2} = - \frac{T(x - h, y) - 2T(x, y) + T(x + h, y)}{h^2}$$

De forma similar se obtiene la expresión equivalente:

$$\frac{\partial^2 T(x, y)}{\partial y^2} = - \frac{T(x, y - h) - 2T(x, y) + T(x, y + h)}{h^2}$$

Las cuales son usadas para ecuaciones de segundo grado como la ecuación de Laplace. En forma unidimensional es desarrollable en formas: hacia adelante, atrás y centrada.

La obtención de la solución aproximada a la ecuación diferencial pasa por resolver el sistema de ecuaciones definidas en cada nodo (tantas como nodos de la malla haya definidos). (Fernández, 2012).

Material y Métodos

El desarrollo de esta investigación se realizó con “bonito” adquirido en el terminal pesquero Ecopinsa de la caleta Santa Rosa, a los cuales se les realizaron un análisis sensorial para conocer el estado organoléptico de los pescados.

Se elaboraron 75 envases de 170 g cada uno, para la conserva de bonito en aceite, agua y sal con formulación: bonito (64.71%) y líquido de gobierno (35.29%); y conserva de bonito con alverjas y zanahorias en aceite, agua y sal, con formulación: bonito (29.41%), verduras (35.29%) y líquido de gobierno (35.29%). Por cada producto se hicieron tres corridas experimentales con 25 envases cada uno, para corroborar los datos obtenidos de tiempos y temperaturas para determinar la curva promedio para cada producto.

Se utilizó el método de Patashnik (1953) para obtener valores experimentales del factor de la pendiente, de este modo resolver la ecuación de difusividad térmica para alimentos en envases de forma de un cilindro finito (método de Hayakawa). El método general de Bigelow se utilizó para obtener los valores letales.

La metodología que se utilizó en la presente investigación se muestra en la Figura 2.

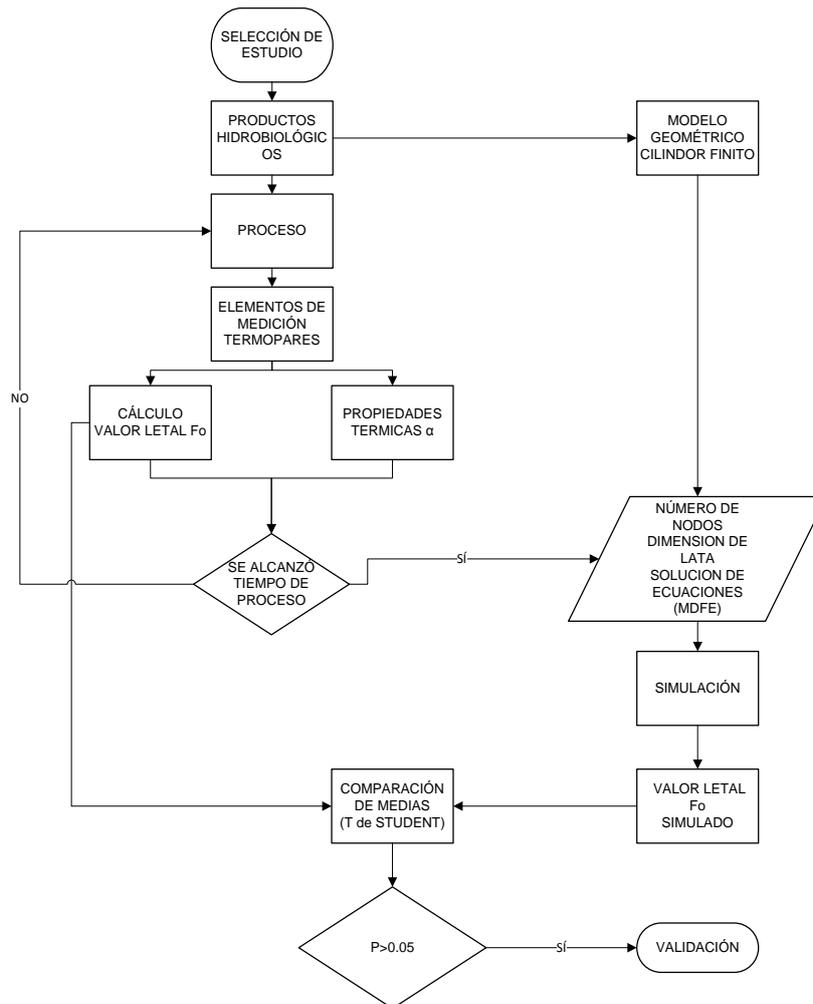


Figura 2. Diagrama de la validación de valores letales experimentales y simulados.
Fuente: Elaboración propia

Para la solución numérica de la ecuación de difusión, se tiene que típicamente las ecuaciones generales de gobierno de la mecánica de fluidos, como las que describen la conservación de masa, momento o energía, están expresadas en términos de variables específicas o intensivas, es decir, de cantidades expresadas por unidad de masa. Considérese una variable específica ϕ definida sobre un volumen de control de dimensiones Δx , Δy , Δz . (en tres dimensiones)

Por tanto, se observa que en la ecuación general aparecen cuatro términos:

$$\underbrace{\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t}}_{\text{temporal}} + \underbrace{\nabla \cdot (\rho\vec{v}\phi)}_{\text{convectivo}} = \underbrace{\nabla \cdot (\Gamma\nabla\phi)}_{\text{difusivo}} + \underbrace{S}_{\text{fuente}}$$

Término temporal, que representa la variación local con el tiempo en el interior del volumen de control; es decir, la acumulación o disminución de ϕ .

Término convectivo, que representa el transporte de la variable de un punto a otro del dominio por medio de la velocidad del flujo.

Término difusivo, que se corresponde con alguno de los fenómenos de transporte que ocurren a nivel molecular: la ley de Fourier para la difusión de calor; la ley de Fick para la difusión de masa o la ley de Newton para la difusión de cantidad de movimiento por efectos viscosos.

Término fuente, para tener en cuenta fuentes de generación o destrucción de la variable transportada.

La mostrada representa la forma conservativa (en términos de divergencia) de la ecuación general de conservación. Nótese que en caso de flujo estacionario y en ausencia de cualquier tipo de producción y/o destrucción de la variable, la divergencia de los flujos convectivos y difusivos es cero: Por tanto, la forma conservativa es una definición exacta acerca de la conservación de ϕ en función de los mecanismos físicos de flujo (convección y difusión) (Fernández, 2012).

Resultados

3.1. Curvas de penetración de calor experimentales de las conservas.

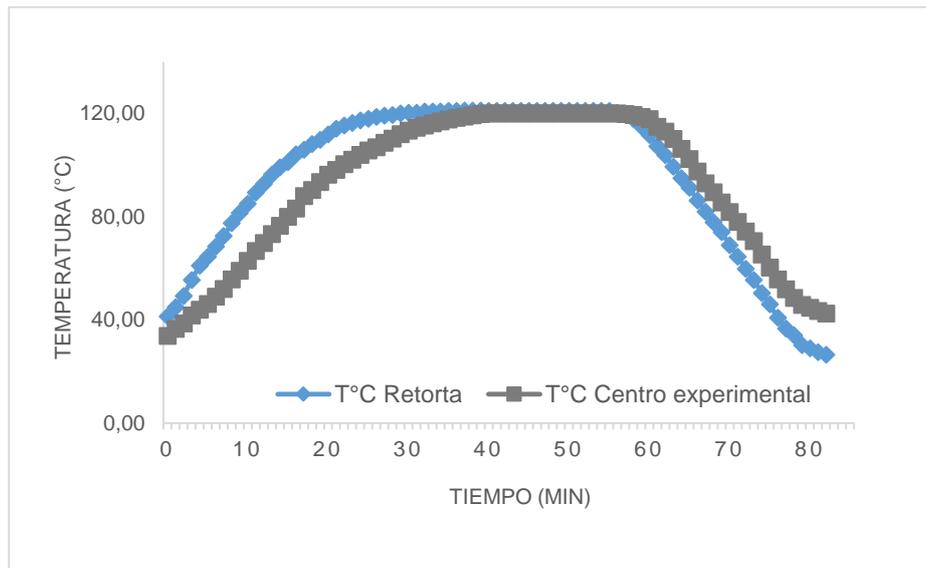


Figura3. Curvas de penetración de calor experimentales en conservas de bonito en aceite, agua y sal.

Fuente: Elaboración propia

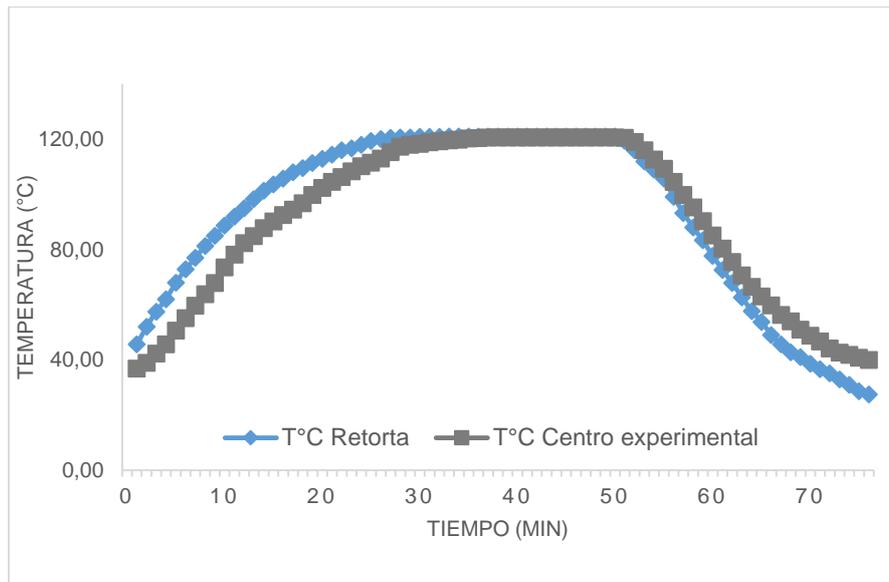


Figura 4. Curvas de penetración de calor experimental en conservas de bonito con alverja y zanahoria en aceite, agua y sal.

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 3, de la curva promedio del proceso, se observa que la temperatura de la retorta asciende rápido con respecto a la temperatura del centro térmico, pero a diferencia de la etapa de calentamiento del primer producto, Figura 4, ambas temperaturas (retorta y del producto), presentan un calentamiento similar; la retorta llega a la temperatura del tratamiento (121°C) antes que el centro del producto y finalmente en la etapa de enfriamiento las temperatura de retorta como las del centro térmico realizan en forma simultánea el enfriamiento.

3.2. Cálculo de letalidades experimentales de las conservas.

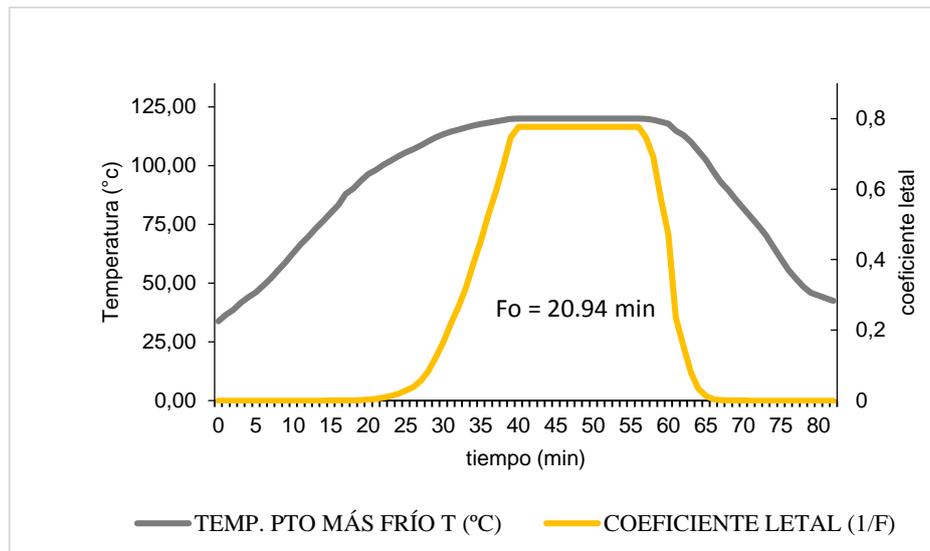


Figura 5. Curvas de penetración de calor de la retorta y coeficiente letal. Cálculo de la letalidad experimental de la conserva de bonito en aceite, agua y sal.

Fuente: Elaboración propia.

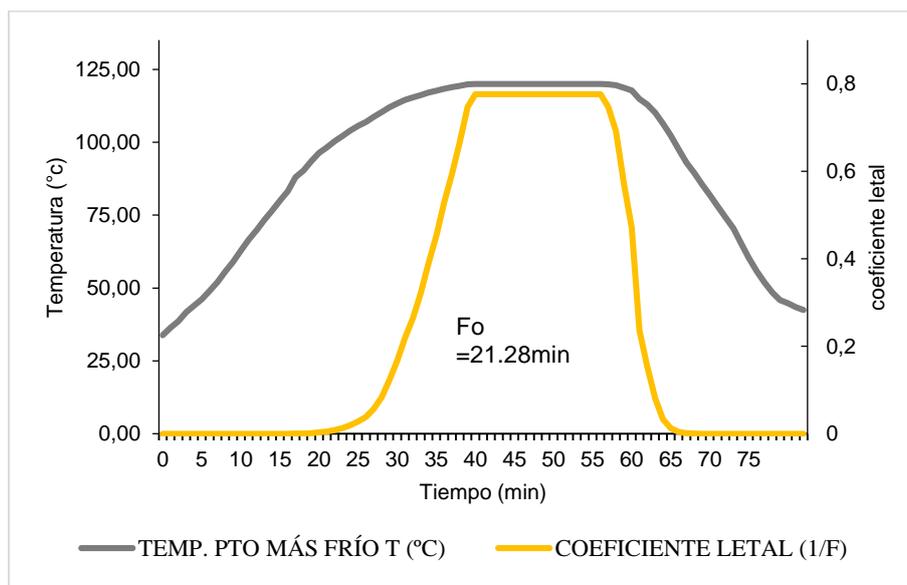


Figura 6. Curvas de penetración de calor de la retorta y coeficiente letal. Cálculo de la letalidad experimental de la conserva de bonito con alverja y zanahoria en aceite, agua y sal.

Fuente: Elaboración propia.

En las Figuras 5 y 6 se observa que las curvas de velocidades letales tienen el mismo comportamiento, el valor de letalidad promedio que se encuentra en el área bajo de la curva, para la conserva de bonito en aceite, agua y sal es de 25.25 min y la conserva de bonito con alverja y zanahoria en aceite, agua y sal es 21.28 min, tiempo que es igual a la muerte térmica para las condiciones de este proceso.

3.3 Cálculo de letalidades de las conservas mediante el simulador

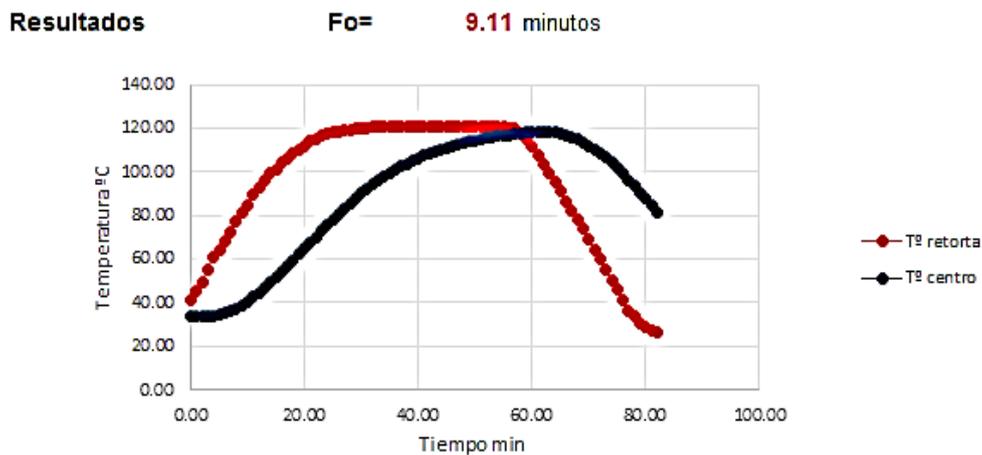


Figura 7. Comportamiento del calentamiento de la conserva de bonito en aceite, agua y sal en el simulador.

Fuente: Elaboración propia.

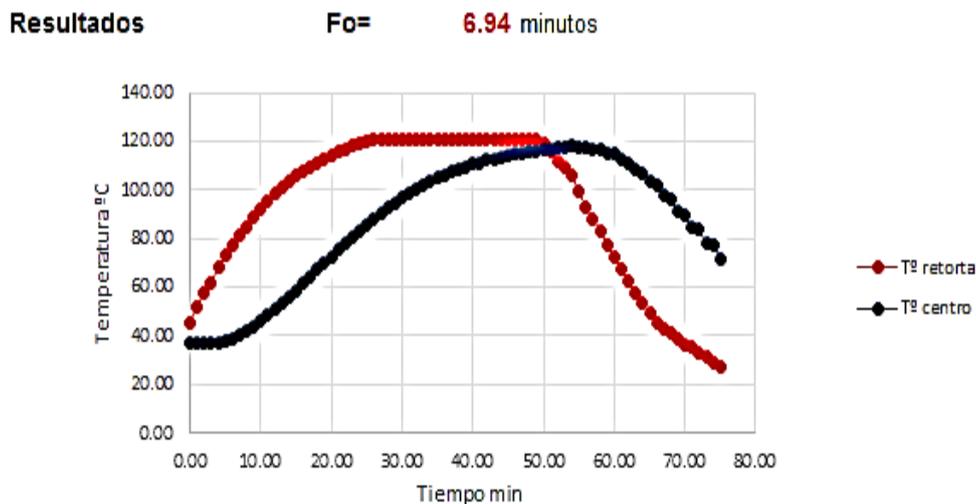


Figura 8. Comportamiento del calentamiento de la conserva de bonito con alverja y zanahoria en aceite, agua y sal en el simulador.

Fuente: Elaboración propia.

Diagrama de cajas de la prueba t student para muestras independientes

En los diagramas de cajas para los dos tipos de conserva, Figuras 9 y 10, se observa que sí existen diferencias significativas entre las medias de los valores experimentales y simulados del registro de tiempos y temperaturas de las corridas experimentales, debido a que las cajas se encuentran muy alejadas y tienen una significancia $p < 0.05$.

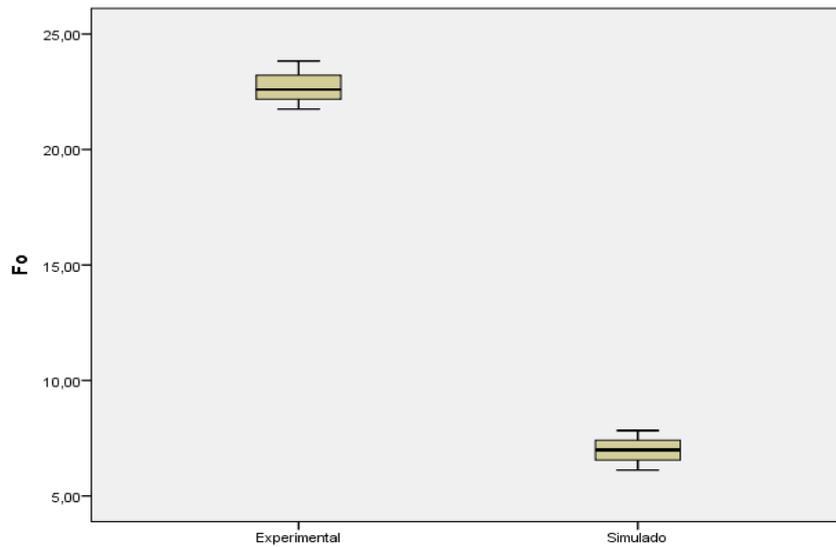


Figura 9. Diagrama de cajas para valores letales experimentales y simulados de las conservas de bonito en aceite, agua y sal.
Fuente: Elaboración propia.

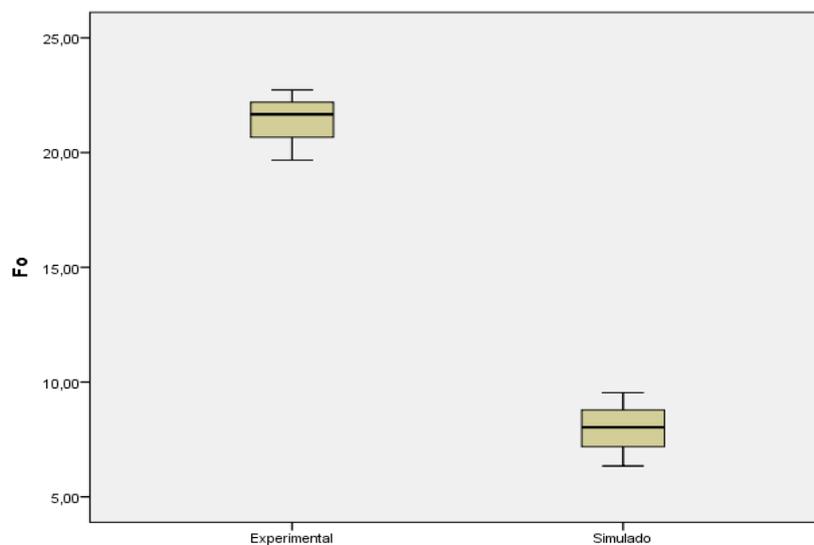


Figura 10. Diagrama de cajas para valores letales experimentales y simulados de las conservas de bonito con alverja y zanahoria en aceite, agua y sal.
Fuente: Elaboración propia.

Discusión

La curva de penetración de calor del promedio de registros de tiempos y temperaturas para los dos productos presentan un comportamiento similar. Según Shafiur y Said (2009), menciona que el pescado a una temperatura de 0°C tiene una conductividad térmica de 0.409 (W/mK), conforme la temperatura se incrementa la conductividad también, a 10 °C, 20°C, 30°C y 40°C sus valores son 0.419; 0.422, 0.431; 0.454 (W/mK) respectivamente, previa etapa al sellado, para asegurar la inocuidad del producto se ha realizado un evacuado, donde el producto se sometió a altas temperaturas (100°C) por lo tanto la conductividad y la difusividad al ser directamente proporcionales también presentan valores altos, por consecuencia en el calentamiento de ambos productos se muestra una rápida transferencia de calor, tal que se asemeja al calentamiento de la retorta. Para la prueba experimental de la conserva de bonito con alverja y zanahoria en aceite, agua y sal, esta curva debería presentar un comportamiento de

calentamiento más tardío ya que la composición de esta influye en la transferencia de calor, pero al trabajar los dos productos con porcentaje mayor de pescado, se tendrá comportamiento de calentamientos similares.

La difusividad térmica promedio obtenida de los registros de tiempo y temperatura de la conserva de bonito en aceite, agua y sal es $1.607 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, Singh y Heldman (1998) mencionaron que a 65°C con 81% en peso de contenido de agua la difusividad térmica es $1.42 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, mientras que Shafiur y Said (2009) mencionan un valor de $1.5 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ a 120°C , valor que es similar al obtenido al promedio de los tres ensayos experimentales $1.52 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$. Mientras la difusividad térmica promedio de la conserva de bonito con alverja y zanahoria en aceite, agua y sal es $1.729 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$. Singh y Heldman (1998) mencionaron que la difusividad térmica de la judías cocidas de 4 a 122°C es $1.68 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ valor que coincide con el promedio de las tres pruebas experimentales $1,69 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$.

Al comparar ambas difusividades térmicas se deduce que la velocidad de calentamiento de la conserva de bonito en agua, aceite y sal es más rápida que la conserva de bonito con mix de verduras, debido a la alverja que, según FAO (2003), presenta hidratos de carbono 58.9% que con el pasar de los días de la postcosecha se transforman en almidón, que según Casp y Abri (2003) este carbohidrato de reserva es sensible al calor en medio acuoso, transformándose en engrudo, red de polímeros lineales que se enriquece en agua y que puede impregnar las estructuras vecinas, obteniendo coeficiente transferencia de calor lento.

El valor letal promedio obtenido del registro de tiempos y temperaturas de la conserva de bonito y el mix de verduras, tienen un promedio de 20.94 y 21.28 minutos respectivamente, que según la FAO (1995), sugiere un tratamiento térmico entre 10 a 15°C , teniendo como referencia al *Clostridium botulinum*, siempre y cuando en el proceso se considere las buenas prácticas de manufactura considerando a la vez que existen otras cepas termoresistentes; como el *C. thermosaccharolyticum*, con 17.5°C de tratamiento; sin embargo, Bendezu (2015), en su trabajo de investigación menciona que el tratamiento térmico de jurel enlatado, tiene un tiempo de 40 minutos, dependiendo éste de la carga, tipo de producto, envase y autoclave.

Los valores letales promedio simulados y experimentales presentan diferencias significativas en sus medias debido, según Teixeira y Shoemaker (1989), a que para la simulación por el método de diferencias finitas explícitas, ésta se ajusta a productos que tenga un comportamiento de transferencia de calor por conducción, pero la temperatura del punto más frío experimental con el simulado no tienen similitud, debido a que el comportamiento de la transferencia de calor de un sólido con líquido de gobierno, según Casp y Abril, (2003), como se muestra la Figura 21.

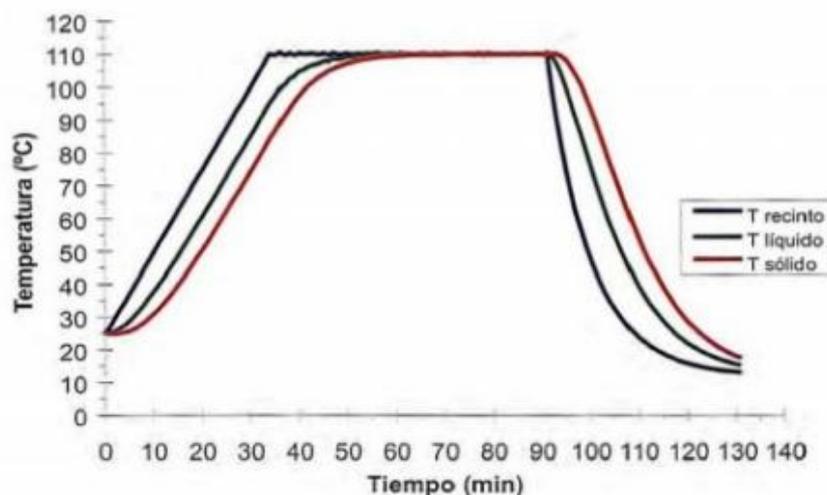


Figura 11. Simulación de las curvas de penetración de calor en el caso de un producto sólido envasado en líquido de gobierno.

Fuente: Elaboración propia.

Conclusión

Los rendimientos en la etapa de corte, eviscerado y lavado en el bonito (*Sarda Sarda*) es del 84%, en la cocción y enfriado es del 73%, en el fileteado es del 51% y en el corte y envasado es del 49%; y en la etapa de desvainado de alverjas y pelado de zanahorias son de 42% y 77% respectivamente.

La difusividad térmica promedia obtenida experimentalmente de la conserva de bonito en aceite, agua y sal; y la conserva de bonito con alverja y zanahoria en aceite, agua y sal son $1.607 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ y $1.729 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ respectivamente.

El valor letal promedio obtenido por el método general de la conserva de bonito en aceite, agua y sal; y la conserva de bonito con alverja y zanahoria en aceite, agua y sal son 20.94 min y 21.28 min respectivamente.

El valor letal promedio de las curvas de penetración de calor de retorta simuladas para la conserva de bonito en aceite, agua y sal es de 9.11 min y de la conserva de bonito con alverja y zanahoria en aceite, agua y sal es de 6.94 min.

Al realizar la simulación de las pruebas experimentales, los valores de punto más frío no realizan el mismo comportamiento en el simulador, y estos valores al compararse por la prueba T Student si presentaron diferencias significativas, por ende no se pudo validar el simulador con estos tipos de producto.

Referencias Bibliográficas

- Alais, C. (2003). *Actividad del agua : Ciencia de la leche Principios de técnica lechera*. Barcelona: Reverté, S.A.
- Bedolla, S., Dueñas C., Esquivel I., Favela T., Guerrero R., Mendoza E., Trujillo M. (2004). *Books* Google. Recuperado de <https://books.google.com.pe/books?id=V2IqmVapJWkC&pg=PA55&dq=ph+en+los+alimentos&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwjFioyovprPAhVJmh4KHVGvCz0Q6AEIGjAA#v=onepage&q=ph%20en%20los%20alimentos&f=true>
- Collinao, E. (2003). *cybertesis.uach*. Recuperado de <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2003/bmfcic699s/doc/bmfcic699s.pdf>.
- Domínguez, E. (2011, 08, 18). *Avalon Cuautitlan*. Recuperado de <http://avalon.cuautitlan2.unam.mx/biblioteca/tesis/1031.pdf>.
Lima: Fondo Editorial.
- Elías, C., Morales, E. y García, S. M. (2014). *Manual de tratamiento térmico de alimentos*.
- Incropera, F. P. (1999). *Fundamentos de transferencia de calor*. Naucalpan de Juárez: Prentice Hall Hispanoamericana, S.A.
- Miranda, W. y Teixeira, A. (2012). *Principios matemáticos del proceso térmico de los alimentos*. Madrid: Acrinsa.
- Palazzesi, A. (2010, 05, 08). *Neoteo*. Recuperado de <http://www.neoteo.com/el-origen-de-los-alimentos-enlatados>.
- Prospectiva 2020. (2015, 05). *Prospectiva2020.com*. Recuperado de http://www.prospectiva2020.com/sites/default/files/report/files/86_i2020_alimentos_procesados_bbaa_lima_web.pdf