

USS



**UNIVERSIDAD
SEÑOR DE SIPÁN**

**FACULTAD DE INGENIERÍA, ARQUITECTURA Y URBANISMO
ESCUELA ACADÉMICA PROFESIONAL DE INGENIERÍA
AGROINDUSTRIAL Y COMERCIO EXTERIOR**

TESIS

**VALIDACIÓN DE UN SIMULADOR DE ESTERILIZACIÓN
DE ALIMENTOS ENLATADOS DESARROLLADO POR EL
MÉTODO DE DIFERENCIAS FINITAS EXPLÍCITAS
CHICLAYO-2016**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO AGROINDUSTRIAL Y COMERCIO
EXTERIOR**

Autores

Bach. Gallardo Quesquén Rosa Berbelinda

Bach. Montenegro Alvarez Luis Anderson

PIMENTEL – PERÚ

2017

**Validación de un simulador de esterilización de alimentos
enlatados desarrollado por el método de diferencias finitas
explícitas.**

Aprobación del Informe de Investigación

Msc.Ing. Augusto A. Mechato Anastasio
Presidente del Jurado de Tesis

Msc.Ing. Walter B Símpalo López
Asesor Metodólogo

Msc. Ing. Walter B. Símpalo López
Secretario del Jurado de tesis

Msc. Ing. Miguel A. Solano Cornejo
Vocal del Jurado de tesis

DECLARACIÓN JURADA

Proyecto

Desarrollo de Tesis

Nosotros ROSA BERBELINDA GALLARDO QUESQUEN Y LUIS ANDERSON MONTENEGRO ALVAREZ, con DNI N° 47223027, y con DNI N° 71629095, con Código N° 2121811147, Y con Código N° 2121817261, estudiantes de la modalidad PRESENCIAL del ciclo X de la ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL Y COMERCIO EXTERIOR y la FACULTAD DE INGENIERÍA, ARQUITECTURA Y URBANISMO de la Universidad Señor de Sipán.

DECLARO BAJO JURAMENTO QUE:

1. Somos autores del proyecto e informe de investigación titulada:

VALIDACIÓN DE UN SIMULADOR DE ESTERILIZACIÓN DE ALIMENTOS ENLATADOS DESARROLLADO POR EL MÉTODO DE DIFERENCIAS FINITAS EXPLÍCITAS, la misma que se presentó para optar el TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO AGROINDUSTRIAL Y COMERCIO EXTERIOR.

2. Que, el título de investigación es auténtico y original.

3. Que, el proyecto e informe de investigación presentado no ha sido plagiado ni de forma total o parcialmente.

4. He respetado las normas de citas y referencias para las fuentes consultadas.

5. Que, el proyecto e informe de investigación presentada no atenta contra los derechos de autor.

6. Los datos presentados en los resultados reales, no han sido falsificados, ni duplicados, ni copiados.

7. El proyecto e informe de investigación no ha sido publicada ni presentada anteriormente para obtener algún grado académico previo o título profesional.

Asumo frente UNIVERSIDAD SEÑOR DE SIPAN cualquier responsabilidad y cargas económicas que pudiera derivarse por la autoría, originalidad y veracidad del contenido de la tesis. En consecuencia, me hago responsable frente a la UNIVERSIDAD SEÑOR DE SIPAN y frente a terceros, de cualquier daño que pudiera ocasionar ya sea por fraude, plagio, autoplagio, piratería o falsificación, asumiendo las consecuencias, sanciones reclamaciones o conflictos derivados del incumplimiento de lo declarado o las que encontraren causa en el contenido de la tesis. Bajo el sometimiento a la normatividad vigente de la UNIVERSIDAD SEÑOR DE SIPAN.

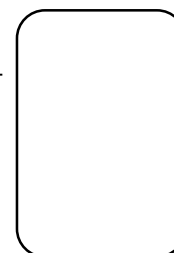
ROSA BERBELINDA
GALLARDO QUESQUEN

DNI N° 47223027



LUIS ANDERSON
MONTENEGRO ALVAREZ

DNI N° 71629095



DEDICATORIA

A mi familia, en especial a mis padres (Jesús y Rosa), tía Gregoria y a mi abuelo Agustín, por la confianza depositada en mi persona, por creer que sí lo lograría. Esta tesis es la representación de un arduo trabajo, que sin la motivación de ustedes no se hubiese concretado.

Rosa Gallardo.

A mi padre Gabriel por enseñarme el valor del estudio, a mi abuela Olga por entregar su tiempo para aconsejarme, a mis hermanos, y en especial a la mujer que me dio la vida, mi madre Viviana.

Luis Montenegro.

AGRADECIMIENTO

A Dios, ser maravilloso que nos brindó las fuerzas necesarias y su bondad infinita para la realización de este nuevo y anhelado reto.

Un sincero agradecimiento al Msc. Ing. Julio Mauricio Vidaurre Ruiz, quien fue el propicio de esta investigación, guiándonos e impartiéndonos conocimientos para desarrollar con dedicación y ahínco este exitoso trabajo.

A los docentes de la E.A.P. Ingeniería Agroindustrial y comercio exterior de nuestra casa de estudio, que con su ejemplo, laboriosidad y humildad, formaron en nosotros capacidades y habilidades que caracterizan el perfil de un profesional idóneo.

Al Ing. Willy Montalvo, docente de la UNPRG, por su tiempo y dedicación al realizar las pruebas experimentales.

ÍNDICE

CAPÍTULO I: PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	1
1.1. Situación Problemática	1
1.2. Formulación del Problema	3
1.3. Delimitación de la Investigación.....	3
1.4. Justificación e Importancia de la Investigación.....	3
1.5. Limitaciones de la Investigación	5
1.6. Objetivos de la Investigación.....	5
1.6.1. Objetivo General.....	5
1.6.2. Objetivos Específicos.....	5
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....	7
2.1. Antecedentes de la investigación	7
2.2. Estado del Arte	12
2.3. Bases teóricas científicas.....	14
2.3.1. Conservación por calor.....	14
2.3.2. Esterilización	15
2.3.3. Factores que influyen en la reducción de microorganismos.....	19
2.3.4. Cinética de destrucción térmica.	22
2.3.5. Letalidad y valor de esterilización.....	26
2.3.6. Transferencia de calor.....	27
2.3.7. Flujo de calor.....	29
2.3.8. Ecuación de difusión de calor.....	32
2.3.9. Condiciones iniciales y de frontera para la ecuación de difusión de calor...	38
2.3.10. Modelación y simulación de procesos.....	39
2.3.11. Software	49
2.4. Definición de términos básicos.....	50
CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO.....	53
3.1. Tipo y diseño de investigación	54
3.1.1. Tipo de investigación	54
3.1.2. Diseño de investigación.....	54
3.2. Población y muestra.....	55
3.2.1. Población	55
3.2.2. Muestra	56
3.3. Hipótesis	56

3.4.	Variables	56
3.4.1.	Variables independientes	56
3.4.2.	Variable dependiente	56
3.5.	Operacionalización	56
3.6.	Abordaje metodológico, técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	57
3.6.1.	Abordaje metodológico	57
3.6.2.	Técnicas de recolección de datos.....	57
3.6.3.	Instrumentos de recolección de datos.....	58
3.7.	Procedimiento para la recolección de datos	58
3.7.1.	Elaborar los productos a simular.....	58
3.7.2.	Elaborar las curvas de penetración de calor.....	67
3.7.3.	Determinar el valor de esterilización por el método general.....	68
3.7.4.	Determinar la difusividad térmica.....	68
3.7.5.	Programar y simular en el Visual Basic	68
3.7.6.	Validar	70
3.8.	Análisis estadístico e interpretación de los datos.....	70
3.9.	Principios éticos	71
3.10.	Criterios de rigor científico	72
CAPÍTULO IV: ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS.....		74
4.1.	Resultados en tablas y gráficos	74
4.1.1.	Curvas de penetración de calor experimentales de las conservas.....	74
4.1.2.	Cálculo del factor de la pendiente de la recta de las conservas.....	76
4.1.3.	Curvas experimentales y simuladas del punto más frío de las conservas...	79
4.1.4.	Cálculo de letalidades experimentales de las conservas.....	82
4.1.5.	Cálculo de letalidades de las conservas mediante el simulador.....	83
4.1.6.	Comparación de los valores letales promedio experimentales y simulados.	85
4.2.	Discusión de resultados	90
CAPÍTULO V: PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN.....		94
CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		96
6.1.	Conclusiones.....	96
6.2.	Recomendaciones.....	97
Referencias.....		98
Anexos.....		102

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Dependencia del tiempo y temperatura de la cinética de inactivación bacteriana en el procesamiento térmico de calentamiento de conducción en alimentos enlatados.	25
Figura 2: Vectores en el plano tridimensional.	31
Figura 3: Conducción tridimensional del calor a través de un volumen de control	34
Figura 4: Sistema de red las intersecciones entre el eje radial y axial.	45
Figura 5: Diagrama de flujo de conserva de bonito en aceite, agua y sal.	60
Figura 6: Diagrama de flujo de conserva de bonito con alverja y zanahoria en aceite, agua y sal.	65
Figura 7: Sección del envase en donde se indica el eje radial, axial y red nodal.	69
Figura 8: Valores solicitados por el simulador.	69
Figura 9: Temperatura vs tiempo promedio del tratamiento térmico de la conserva de bonito en aceite, agua y sal.	74
Figura 10: Temperatura vs tiempo promedio del tratamiento térmico de la conserva de bonito con alverja y zanahoria en aceite, agua y sal.	75
Figura 11: $\text{Log}(T_r - T_p)$ vs <i>tiempo</i> , de la conserva de bonito en aceite, agua y sal.	76
Figura 12: $\text{Log}(T_r - T_p)$ vs <i>tiempo</i> , del primer ensayo de la conserva de bonito en aceite, agua y sal.	78
Figura 13: Curvas de penetración de calor de la retorta, centro térmico experimental y simulado.	80
Figura 14: Curvas de penetración de calor de la retorta, centro térmico experimental y simulado.	81
Figura 15: Curvas de penetración de calor de la retorta y coeficiente letal.	82
Figura 16: Curvas de penetración de calor de la retorta y coeficiente letal.	83
Figura 17: Comportamiento del calentamiento de la conserva de bonito en aceite, agua y sal en el simulador.	84

Figura 18: Comportamiento del calentamiento de la conserva de bonito en aceite, agua y sal en el simulador.	84
Figura 19: Diagrama de cajas para valores letales experimentales y simulados de las conservas de bonito en aceite, agua y sal.	87
Figura 20: Diagrama de cajas para valores letales experimentales y simulados de las conservas de bonito con alverjas y zanahorias en aceite, agua y sal.	89
Figura 21: Simulación de las curvas de penetración de calor en el caso de un producto sólido envasado en líquido de gobierno.	92
Figura 22: Diagrama de la validación de valores letales experimentales y simulados mediante la prueba t student.	94

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Resumen de la ecuación de difusión de calor en diferentes coordenadas geométricas.</i>	37
Tabla 2 <i>Condiciones de frontera para la ecuación de difusión de calor en la superficie ($X=0$).</i>	39
Tabla 3 <i>Operacionalización de variables en la validación de un simulador de esterilización de alimentos enlatados.</i>	56
Tabla 4 <i>Formulación de líquido de gobierno para una conserva de bonito</i>	64
Tabla 5 <i>Formulación de una conserva de bonito en aceite, agua y sal.</i>	64
Tabla 6 <i>Formulación de la conserva de bonito con mix de verduras en aceite, agua y sal.</i>	67
Tabla 7 <i>Valores promedio de letalidad experimental y simuladas de las conservas.</i>	85
Tabla 8 <i>Datos estadísticos para la conserva de pescado en aceite, agua y sal.</i>	86
Tabla 9 <i>Prueba de muestras independientes para la conserva de pescado en aceite, agua y sal.</i>	86
Tabla 10 <i>Datos estadísticos para la conserva de pescado con alverja y zanahoria en aceite, agua y sal.</i>	88
Tabla 11 <i>Prueba de muestras independientes para la conserva de pescado con alverja y zanahoria en aceite, agua y sal.</i>	88

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) - 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 $1.38 * 10^{-7} m^2/s$, $1.63 * 10^{-7} m^2/s$, $1.55 * 10^{-7} m^2/s$, $1.64 * 10^{-7} m^2/s$, $1.69 * 10^{-7} m^2/s$ y $1.75 * 10^{-7} m^2/s$, respectivamente. Valores que en promedio coinciden a los determinados por Sing & Heldman (1998) y Shafier & Said (2009). Los valores letales (F_0) experimentales en el primer y segundo producto para los ensayos I, II y III fueron $19.67 min$, $21.67 min$, $22.73 min$, $23.83 min$, $22.60 min$ 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: Simulador. Esterilización, Conservas de pescado, conducción, Difusividad térmica, Valor letal, Método de diferencias finitas explícitas.

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) - 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 $1.38 * 10^{-7} m^2/s$, $1.63 * 10^{-7} m^2/s$, $1.55 * 10^{-7} m^2/s$, $1.64 * 10^{-7} m^2/s$, $1.69 * 10^{-7} m^2/s$ y $1.75 * 10^{-7} m^2/s$, 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 $19.67 min$, $21.67 min$, $22.73 min$, $23.83 min$, $22.60 min$ y $21.75 min$ Comparing the average values of experimental and simulated F_0 in the Visual Basic program if there are significant differences.

Key words: Simulater, Sterilization, Conduction, Thermal diffusivity, Lethal value, Finite difference method,

INTRODUCCIÓN

En la industria de los alimentos enlatados, el principal problema es el diseño del proceso térmico, para determinar el valor letal óptimo, evitando de esta manera riesgos a la salud del consumidor, gastos innecesarios de combustible, por ende a largo plazo es un medio de contaminación del medioambiente, además que afectan al valor nutricional y características sensoriales de los productos (Elías, Morales & García, 2014).

Por lo cual este trabajo de investigación, tiene como objetivo validar un simulador de esterilización de alimentos enlatados desarrollado por el método de diferencias finitas explícitas propuesto por Texeira (1989), con la finalidad de no realizar excesivas pruebas experimentales, minimizando riesgos y gastos anteriormente mencionados; para ello se realizó la elaboración de dos tipos de producto, de origen hidrobiológico, conserva de bonito (*Sarda sarda*) en aceite, agua y sal; conserva de bonito (*Sarda sarda*) con alverja y zanahoria en aceite, agua y sal; se realizó tres ensayos por cada producto y se tomó los tiempos y temperaturas del punto más frío del alimento y de la retorta.

Con los cuáles permitieron determinar los valores letales experimentales para ser comparados con los valores letales simulados, siendo analizados por el programa t de student de muestras independientes.

CAPÍTULO I: PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Situación Problemática

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, en sus primeros experimentos notó que aquellos alimentos que eran calentados en el interior de un envase hermético, libres de la acción del aire, eran capaces de permanecer en buen estado por varios meses, a partir de estas experiencias, Alvarado, Martínez, Botello & Jiménez (2015), afirmaron que se inició una gran cantidad de estudios enfocados a la mejora de los procesos térmicos, con la finalidad de garantizar esterilidad comercial, minimizar costos, etc. La revolución de esta industria generó en el tiempo el consumo de estos productos que de alguna forma facilitan la vida del consumidor y es así como poco a poco en el mundo se ha ido masificando su consumo. En la actualidad Proyectiva 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.

El mismo hecho de ser un punto crítico para garantizar la esterilización comercial de los productos que conlleven a tener la seguridad de la no existencia de agentes biológicos que de subsistir ocasionen la muerte del consumidor. Tanto el diseño como el control adecuado de sus variables operacionales resulta primordial, todas ellas limitadas por la composición del producto, propiedades térmicas como conductividad térmica, calor específico, densidad, difusividad térmica; tipo de envase y tipo de autoclave. Por lo cual se debe realizar un adecuado diseño de tratamiento térmico para evitar consecuencias como en el año 1963, en Estados Unidos cuando se reportó en atún enlatado un brote de intoxicaciones alimenticias debido a la

presencia de microorganismos (esporulados) resistentes a elevadas temperaturas como el *Clostridium botulinum*, atribuidos a fallas en el proceso de esterilización del producto (Grau, 1987).

Un estudio de fabricación a escala de planta piloto de conservas de mejillones al natural, intentó establecer las condiciones de procesamiento térmico más ideal para obtener un producto con la suficiente garantía de estabilidad, sin que disminuya por un exceso de esterilización la calidad del producto terminado; el mejillón se sometió en principio a un proceso de precocción con vapor directo a 90° C. Los tiempos de tratamiento térmico variaron de unas experiencias a otras, ensayándose los de 2, 5, 8, 10 y 15 minutos. Asimismo, se fabricaron conservas de mejillones al natural con tres tipos distintos de esterilización: 115°C-90 minutos, 115°C-60 minutos y 110°C-105 minutos, de tal forma, que cada una de estas series de esterilización comprendía muestras de moluscos precocidos a los diferentes tiempos y temperatura antes señalados). Por último, otro tipo de experiencias consistió en someter el mejillón ya cocido a un segundo tratamiento térmico previo al envasado a 115° C durante 10 minutos (Panizo, Gallardo & López, 1980).

De esta manera se demuestra que existe mucho empirismo al determinar los tiempos y temperaturas adecuadas para los tratamientos térmicos de pasteurización y esterilización.

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 experimentalmente 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).

Domínguez (2011), realizó un estudio en donde se demostró que para implementar la simulación de estos alimentos, es necesario establecer modelos que describan al proceso y lo usual de hacerlo es aplicando métodos numéricos de discretización, siendo el uso del método de diferencias finitas, común en ingeniería de alimentos.

Para el desarrollo de la presente investigación se propone la solución de la ecuación de transferencia de calor en alimentos envasados en geometría cilíndrica desarrollados por el método de diferencias finitas explícitas para la simulación y posterior validación del tratamiento térmico aplicado al alimento.

1.2. Formulación del Problema

¿En qué medida es válido 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?

1.3. Delimitación de la Investigación

El presente trabajo de investigación se desarrolló en las instalaciones de la planta piloto de la Universidad Señor de Sipán y planta piloto de Industrias Alimentarias en la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, con el apoyo de docentes y técnicos especialistas, teniendo como estudio la validación de un simulador de esterilización desarrollado por el método de diferencias finitas, desarrollado en un periodo de 4 meses.

1.4. Justificación e Importancia de la Investigación

Esta investigación se enfocó en la validación de un simulador de esterilización de alimentos enlatados con la ayuda de un software, Microsoft Visual Basic ® a través del cual se espera poder minimizar los costos en

pruebas al desarrollar nuevos productos, determinar con mayor precisión los tiempos y temperaturas para un adecuado tratamiento térmico, basados en las características y tipo de producto, tipo y posición de la máquina (autoclave), tiempo de letalidad, tipo de microorganismo, etc.

Las industrias han logrado un aumento increíble en la producción y ahorro de costos gracias a la aplicación de herramientas computacionales y la tecnología; Incropera (1999), menciona que para lograr diseñar los tratamientos térmicos existen tres métodos por el cual se puede dar solución a la ecuación de transferencia de calor, estos son analítico, numérico y gráfico o de trazo del flujo; los métodos analíticos, proporcionan resultados exactos en cualquier punto, los métodos gráficos y numéricos proporcionan solo resultados aproximados en puntos discretos. Sin embargo, como los métodos se adaptan a geometrías complejas y condiciones de frontera, a menudo ofrecen los únicos medios para resolver problemas de conducción multidimensional. El método gráfico, o de trazo del flujo sirve de estimación aproximada del campo de temperaturas, mientras que el método numérico se aplica para obtener resultados extremadamente precisos en cuanto a geometrías complejas.

Domínguez (2011), en su tesis doctoral obtuvo como resultados, que la aplicación de un software (Quickfield 5.8 ®) a través de modelos matemáticos ayudaron eficientemente al diseño del tratamiento térmico, logrando establecer el tiempo adecuado de tratamiento para un determinado alimento, evitando así los sobretamientos que implica pérdidas de energía, calidad sensorial y nutricional del producto; y subtratamientos que afecten la salud pública. Teniendo en cuenta las prácticas a modo piloto realizadas en algunas universidades de la región, en la elaboración de nuevos productos enlatados desarrollados por estudiantes, el desarrollo de modelos informáticos en la actualidad es de gran ayuda para diseñar tratamientos térmicos; Por lo anteriormente mencionado esta investigación tiene como objetivo validar un simulador de esterilización de alimentos enlatados desarrollado por el método de diferencias finitas explícitas.

1.5. Limitaciones de la Investigación

Este proyecto de investigación se limitó en estudios de penetración de calor en envases de 1/2 libra, tipo Tuna (307x109) Aluminio y en productos hidrobiológicos, además de utilizar tan sólo 2 sensores alámbricos.

1.6. Objetivos de la Investigación.

1.6.1. Objetivo General.

Validar un simulador de esterilización de alimentos enlatados desarrollado por diferencias finitas explícitas.

1.6.2. Objetivos Específicos

Elaborar las muestras de los alimentos enlatados tomando como referencia parámetros establecidos industrialmente.

Determinar los valores experimentales de difusividad térmica de diferentes alimentos enlatados.

Determinar el valor de esterilización F_0 por el método general.

Programar la solución de la ecuación diferencial de transferencia de calor desarrollado por el método numérico de diferencias finitas explícitas en el Microsoft Visual Basic®.

Simular la curva de penetración de calor de los alimentos elaborados.

Comparar las temperaturas experimentales, en el punto más frío de diferentes alimentos, con las temperaturas simuladas.

CAPÍTULO II

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación

En la Universidad Nacional Autónoma de México, se desarrolló el trabajo de investigación titulado: Aplicación de la simulación de procesos para la evaluación de la letalidad conseguida durante la esterilización de alimentos sólidos; por el autor Domínguez (2011) quién en el resumen mencionó:

Se utilizó el método del elemento finito para simular el flujo térmico en un alimento sólido, envasado en lata (401x411 mm) y bolsa flexible (tipo stand up). Para eso se crearon modelos geométricos en dos dimensiones, que representaran a los sistemas de interés y que puedan ser discretizados en un software comercial. La validación de los modelos obtenidos se hizo por medio de la comparación de los resultados obtenidos en el simulador y aquéllos originados en estudios de penetración del calor. La diferencia entre los valores simulados y reales no fue significativa. Con los datos de temperatura obtenidos en la evaluación de la letalidad se calcularon historias térmicas promedio para cada conjunto de factores y éstas se ajustaron a una función estadística. Los modelos obtenidos representan las soluciones de la ecuación de conducción en condiciones específicas del proceso, y con estos se diseñó una aplicación externa de post-procesamiento y visualización de historias térmicas generadas. Finalmente, se evaluó la influencia de las variables de proceso en la letalidad conseguida, para cada tipo de envase, utilizando un diseño factorial 2⁴. Los factores a evaluar fueron: temperatura inicial del alimento, temperatura del autoclave en el calentamiento y enfriamiento, mismos que se caracterizaron con la técnica Monte Carlo y para los cuales se generaron 100 valores aleatorios y normalmente distribuidos, el cuarto factor fue el tipo de envase: lata o bolsa. Los niveles bajo y alto de los factores numéricos se seleccionaron con base en su media y desviación estándar. Se determinó que, dentro del rango de

variabilidad estudiado, el factor que tiene el efecto más significativo sobre la letalidad es la temperatura de la retorta en el calentamiento, mientras que los efectos de la temperatura de la autoclave en el enfriamiento fueron despreciables ($p < 0.01$).

Del anterior trabajo de investigación se concluye que para la programación de valores letales para envases de latas (401x411 mm) y bolsas flexibles (tipo stand up), la solución que más se ajusta a la ecuación de transferencia de calor es por el método numérico del elemento finito.

En la Universidad de Parma en Italia, se desarrolló el trabajo de investigación titulado: Un método rápido para la estimación de difusividad térmica: Aplicación a varios alimentos; por los autores Betta, Rinaldi, Barbanti, & Massini, (2009) quienes en el resumen mencionaron:

Un método fiable, rápido y fácil de usar para la estimación de la difusividad térmica, se ha desarrollado una herramienta de software adecuado, basado en la optimización de los cuadrados mínimos de una solución de la ecuación de Fourier por diferencias finitas, se ha creado, un elemento de medición adecuado, ha sido diseñado y realizado con el fin de disminuir el error sistemático en el posicionamiento de la sonda. El método ha sido validado experimentalmente y sus resultados se han comparado con los obtenidos por otros tres métodos disponibles, varios alimentos se ensayaron (productos de tomate, salsas de baja acidez, pasta, paté de oliva, y mermelada de albaricoque) y en cada caso el método demostró ser eficaz. El software desarrollado también permitió la estimación de difusividad térmica a través de curvas de penetración de calor obtenidos por los tratamientos de temperatura variables. Por lo que también fue posible excluir la contribución de los materiales del envase de la estimación de difusividad térmica de alimentos líquidos envasados. El método propuesto resulta ser una herramienta útil para el diseño científico de varios procesos, tales como la esterilización y pasteurización, y para el

control correcto de transporte, almacenamiento y la distribución de alimento (Betta, Rinaldi, Barbanti, & Massini, 2009) (p 01).

En este trabajo de investigación se concluye que el método de diferencias finitas es válido para que el software pueda predecir valores de difusividad térmica en pastas de alimentos.

En la Universidad de Mersin en Turquía, se desarrolló el trabajo de investigación titulado: Simulación de transferencia de calor para las mezclas de alimentos sólido-líquido en latas y validación del modelo en condiciones de pasteurización; por los autores Kızıltaş, Erdoğan y Palazoğlu (2009). quienes en el resumen mencionaron:

Durante el procesamiento de mezclas de alimentos enlatados de sólido-líquido, conducción y convección se producen simultáneamente. La falta de literatura en estudios de simulación completa donde un gran número de los sólidos se dispersan en la fase líquida, por ejemplo, guisantes enlatados. Por lo tanto, los objetivos de este estudio fueron determinar los cambios de temperatura dentro de una lata que contiene mezcla de alimentos sólido-líquido. Para este propósito, sólidos estacionarios dispersados (guisantes enlatados en agua) en una configuración 2D (axi-simétrica) se aplicaron Ansys V11 (Ansys Inc., Canonsburg, PA) se utilizó para resolver ecuaciones de continuidad, energía y momento. Para los experimentos, las muestras de guisantes enlatados se prepararon en 500 g por lata, y el proceso de calentamiento se llevó a cabo en una retorta bajo condiciones de pasteurización alrededor de 98 ° C. Los cambios de temperatura se midieron utilizando termopares de tipo aguja y los resultados de la simulación fueron validados con datos experimentales. Se espera que este estudio sea una contribución significativa a la literatura para otros estudios de optimización y para formar base de un proyecto industrial para mejorar el proceso de enlatado de las mezclas sólido-líquido (Kiziltas, Erdogdu, & Koray Palazoglu, 2009) (p 01).

En el anterior trabajo de investigación se concluye que los modelos matemáticos se ajustan a alimentos que tienen transferencia de calor por conducción y convección, o ambos, y a diferentes composiciones.

En la Universidad Pública de Navarra en España, se desarrolló el trabajo de investigación titulado: Control de tratamientos térmicos mediante un simulador; por los autores Requena y Ochoa de Alda (2004). quienes en el resumen mencionaron:

Existen distintos sistemas para conseguir la simulación de los tratamientos térmicos aplicados a los alimentos. Cuando el alimento está envasado en un recipiente con una figura geométrica sencilla: cilindro, paralelepípedo, esfera, la simulación puede realizarse mediante la resolución de la ecuación diferencial de transmisión de calor por conducción por un método numérico como pueden ser las diferencias finitas. El paso siguiente es emplear esta simulación en el sistema de control del equipo en el que se produce el tratamiento térmico. La resolución de la ecuación diferencial de transmisión de calor por conducción exige el conocimiento de la difusividad térmica del producto, lo que no siempre es fácil de conseguir en la bibliografía. El sistema de control desarrollado parte de las temperaturas del centro térmico del alimento y del recinto donde se produce el tratamiento térmico y a partir de estos datos establece la curva de penetración de calor, elige la rama descendente y calcula el factor de pendiente y la difusividad térmica del alimento. Conocida la difusividad térmica, se simula tanto el resto del calentamiento como el enfriamiento posterior del alimento y se toma la decisión de detener la calefacción en el momento en que el tratamiento total previsto ha alcanzado la intensidad prefijada. Es decir, se detiene el proceso cuando la suma del tratamiento dado junto con el que se recibirá durante el enfriamiento alcanza el valor previsto. Todo el desarrollo se ha realizado mediante el programa LabVIEW 6.1, que se ha mostrado muy eficaz para resolver

todos los problemas planteados por este caso (Abril & Gómez, 2004) (p 01).

En el anterior trabajo de investigación se concluye que el método de diferencias finitas, se ajustan para determinar el punto más frío del producto en formas cilíndricas, paralelepípedo, esféricas; además que es imprescindible conocer el valor de la difusividad térmica para realizar la simulación.

En la Universidad Pública de Putra en Malasia, se desarrolló el trabajo de investigación titulado: La simulación por ordenador de la esterilización de alimentos utilizando una forma alternativa el método de diferencias finitas implícita; por Mohamed (2003). quienes en el resumen mencionaron:

Un modelo de simulación por ordenador para la esterilización de alimentos fue desarrollado en base a la solución de la ecuación de conducción de calor de Fourier para la forma geométrica cilíndrica finita. La solución se basa en utilizar de forma alternativa el método de diferencias finitas. La verificación experimental del modelo se realizó usando dos conjuntos de datos publicados, lo que muestra una buena concordancia con los resultados de la simulación. Por otra parte, los resultados del modelo se ensayaron sometiendo un perfil constante de la temperatura de retorta a diferentes condiciones, el modelo respondió muy bien, dirigiendo su potencial para investigaciones de la influencia de la temperatura de retorta constante, condiciones de letalidad y los efectos de los perfiles de temperatura de retorta variables en la retención de la calidad y optimización de procesos. Además, el modelo también puede ser utilizado para el control de procesos (Mohamed, 2003) (p 01).

En el anterior trabajo de investigación se concluye que las soluciones de las ecuaciones de transferencia de calor en un cilindro finito también se pueden realizar por diferencias finitas implícitas.

2.2. Estado del Arte

Desde la antigüedad prolongar la vida útil de los alimentos siempre ha sido uno de los principales problemas del hombre, razón por la cual de manera empírica desarrollaron métodos para poder conservar sus alimentos como, la salazón, el ahumado, secado, entre otros y así tener un producto en condiciones adecuadas para su consumo, evitando el deterioro del mismo y tener un alimento para esas épocas del año que se encontraba escaso; el pionero en desarrollar las primeras pruebas aplicando calor en conservas de alimentos en frascos de vidrios, para evitar el deterioro de los alimentos fue Nicolás Appert, llegó a la conclusión que aplicando calor y logrando la hermeticidad en el cierre podía ralentizar el deterioro del producto, a raíz de estas experiencias publica su libro, este hecho es materia de estudio de ahí en adelante en la aplicación del calor, con base científica (Palazzesi, 2010).

En la actualidad existen diversos métodos de conservación por calor, como la pasteurización, cocción, escaldado, esterilización, entre otros, además existen herramientas como los simuladores que ayudan en la mejora de los procesos antes mencionados. A Rocchini (1777), se le atribuye la primera simulación, con el planteamiento del problema “La aguja de Buffon” de un método matemático sencillo para ir aproximando el valor del número π a partir de sucesivos intentos, Laplace (1812) mejoró y corrigió la solución de Buffon y desde entonces se conoce como la solución Buffon-Laplace. Posteriormente, el estadístico William Sealy Gosset, que trabajaba en la destilería de Arthur Guinness, ya aplicaba sus conocimientos estadísticos en la destilería y en su propia explotación agrícola, este diseñó experimentos de mejora en la cebada, para evitar futuras filtraciones de información, publicaba con el seudónimo “Student”, razón por la cual se le atribuye a la “distribución t de Student”. Este hito histórico abrió las puertas a la aplicación de la simulación en el campo de proceso de control industrial así como a las sinergias que generaba esta simulación basada en la experimentación y técnicas de análisis para descubrir soluciones exactas a problemas clásicos de la industria y la ingeniería. En los años 40 destacaron

la construcción de las primeras computadoras de propósito general y el trabajo de Stanislaw Ulam, John Von Neumann y otros científicos para usar el método de Montecarlo en computadoras modernas y solucionar problemas de difusión de neutrones en el diseño y desarrollo de la bomba de nitrógeno. Tocher (1960), desarrolló un programa de simulación general cuya principal tarea era la de simular el funcionamiento de una planta de producción, en 1963 se produjo el primer libro sobre simulación titulado, *The Art of Simulation*. En los años de 1960 y 1961 el Sistema de Simulación de propósito general o General Purpose Simulation System (GPSS). El GPSS se diseñó para realizar simulaciones de teleprocesos; por otro lado en 1963 se desarrolló SIMSCRIPT, otra tecnología alternativa al GPSS basada en FORTRAN; en 1961 el desarrollo del programa SIMULA con ayuda de Univac, el resultado fue SIMULA I, probablemente el lenguaje de programación más importante de toda la historia. En 1967 se fundó el WSC (Winter Simulation Conference), lugar donde desde entonces y hasta ahora se archivan los lenguajes de simulación y aplicaciones derivadas, siendo en la actualidad el referente en lo que a avances en el campo de los sistemas de simulación se refiere (Lander, 2016).

Desde los años de 1970, se desarrollaron avanzadas herramientas de modelado y de análisis de resultados, gracias también a los desarrollos obtenidos en la generación de datos y a las técnicas de optimización y representación de datos, la simulación llega a su fase de expansión donde comienza a aplicarse en múltiples campos; Teixeira (1969), realizó varios estudios en la ingeniería de alimentos, siendo pionero en plantear el uso de métodos numéricos para modelar y simular estas experiencias de historias térmicas, método que es común para simuladores en la ingeniería de alimentos, desde esta primera experiencia se han desarrollado diversos estudios en la simulación de procesos industriales, ya no solo con un modelo matemático, sino con diferentes de acuerdo al tipo de investigación (Teixeira & Shoemaker, 1989).

Alvarado et al (2015), Domínguez (2011) y Mohamed (2003) realizaron estudios en la ingeniería de alimentos, enfocados en la simulación de

procesos, apoyados en diferentes herramientas computacionales, que se ajustan a los diferentes modelos y variables de estudio, logrando obtener resultados tan próximos a los valores reales de los procesos térmicos.

2.3. Bases teóricas científicas

2.3.1. Conservación por calor

Los alimentos que consumimos hoy en día, la gran mayoría derivan del reino animal y vegetal, por lo tanto tienen una estructura biológica que altera su composición hasta producir su deterioro, estas modificaciones también generan cambios químicos, bioquímicos y microbiológicos.

La conservación de los alimentos se práctica hace miles de años, iniciándose de manera empírica, desde la cultura Egipcia hasta en la actualidad que se aplican diversas técnicas y métodos de conservación de manera científica; en la actualidad es común que las industrias apliquen altas temperaturas, es decir calor; los parámetros más destacados e importantes para la conservación de los alimentos son el tiempo que se exponen como las temperaturas que alcancen.

Chavarrías (2013), lo determinó como el conjunto de técnicas o tratamientos térmicos que con la acción del calor se logra la destrucción de microorganismos como bacterias, esporas, hongos, levaduras, etc. que se encuentran presentes en los alimentos con el fin de prolongar su vida útil; pero también Casp & Abril (2003), afirmaron que el efecto de calor puede causar deterioro en los alimentos, como desnaturalización de proteínas, rompimiento de las emulsiones, destrucción de vitaminas y resecamiento al eliminar la humedad. Esto se debe a que los parámetros de temperatura en que se manejan los alimentos entre 10 a 38°C, por cada incremento de

10°C se duplican aproximadamente la velocidad de las reacciones químicas, incluyendo las velocidades de las reacciones enzimáticas como de las no enzimáticas.

Elías et al (2014) afirmó que los tratamientos térmicos, se pueden utilizar dos criterios para clasificarlos, ya sean por la conveniencia del tratamiento térmico y por la severidad del tratamiento térmico, es en este caso que se encuentra la esterilización, para evaluar el tratamiento térmico adecuado se debe considerar el tipo de alimentos, pH, etc.

2.3.2. Esterilización

Este tratamiento térmico es aplicado generalmente a productos poco ácidos en los que pueden desarrollarse bacterias esporuladas, cuyo propósito es eliminar los riesgos para la salud pública y que el producto sea suficientemente estable para permitir un almacenamiento de larga duración a temperatura ambiente; para garantizar la salud pública, indispensablemente se tendrá que trabajar con temperaturas mayores a 100°C con un tiempo de proceso razonablemente corto y así evitar efectos indeseables en las cualidades organolépticas del alimento, luego se tendrá que determinar las condiciones óptimas del tratamiento (tiempo y temperatura), que deberán ajustarse también al efecto de “cocción” admitido o buscado (Casp & Abril, 2003).

Peñafiel et al (2014), mencionaron que de acuerdo al concepto actualizado de la esterilización por calor, en la esterilización se busca la estabilidad, no la esterilización absoluta, porque ésta última es improcedente porque no es económica y se ve afectada la calidad organoléptica del producto. Debido a esto surge el concepto de esterilización comercial en donde sobreviven algunos microorganismos y se destruyen gérmenes patógenos que pueden

desarrollarse en condiciones normales de almacenamiento y transporte. Para poder obtener la estabilidad del producto en anaquel, se ajustara el proceso térmico a la bacteria termoresistente, para este tratamiento se considera el *Clostridium botulinum*.

El proceso de esterilización se puede aplicar a los alimentos antes o después del envasado, requiriéndose en cada caso, tecnologías diferentes.

Domínguez (2011), mencionó que Holdsworth y Simpson (2007) y Toledo, (2007), determinaron una secuencia de operaciones para esterilizar un alimento:

Cargar los envases en la autoclave.

Introducir el medio de calentamiento y eliminar el aire contenido en el equipo, de modo que se consiga una atmósfera interna homogénea (*Purga*).

Incrementar la temperatura del alimento (*Calentamiento*). El tiempo que va desde la entrada del vapor hasta que se llega a la temperatura de proceso se llama “tiempo de subida” (*retort come-up time*).

Una vez que se logra la temperatura de proceso, ésta se sostiene por un tiempo determinado, que será la duración efectiva del proceso (*Mantenimiento*).

Se cierra el suministro del medio de calentamiento y se introduce agua fría, reduciendo gradualmente la temperatura del alimento (*Enfriamiento*).

a. Esterilización de productos envasados.

Casp & Abril (2003), mencionó que la esterilización fue ensayada por primera vez por Nicolas Appert, este consiguió la elaboración de conservas estables envasadas en tarros de vidrio sellados, el proceso térmico de productos envasados en tarros de vidrio o en tarros de hojalata habitualmente se denomina “Apertización”, para obtener mejores resultados en esta técnica, si el producto es sólido se tiene que realizar tratamientos previos, como escaldado, blanqueado, además de la adición de caldos o líquidos que contribuyan a asegurar la esterilización comercial.

Sistemas de esterilización por cargas

Debido a la diversificación de productos (diferentes productos, en envases diferentes y de tamaños variados) en la industria alimentaria, el sistema por cargas tiene la flexibilidad suficiente para responder de forma eficiente a las variaciones de tiempos y temperaturas de proceso que exige este tipo de trabajo (Casp & Abril, 2003); mientras que Domínguez (2011), afirmó lo de Berk (2009); Holdsworth y Simpson (2007), que los sistemas discontinuos son recomendados para plantas pequeñas que producen simultáneamente una gran variedad de productos.

Fonseca (2010) mencionó que la esterilización por cargas se realiza en un autoclave, que es un recinto, de forma cilíndrica vertical u horizontal, capaz de soportar una presión interna mayor que la atmosférica, en el que se colocan los envases a tratar (generalmente en unas cestas o jaulas) y que dispone de los adecuados sistemas de calefacción, de enfriamiento y de control de proceso para que éste se realice

en las condiciones apropiadas; se encuentra un gran número de autoclave, de tecnologías muy diferentes; para sistematizar el análisis de estas máquinas se han ordenado por el tipo de calefacción que usan, ya que ésta condiciona en gran medida sus demás características constructivas, su operación y los productos para los que pueden utilizarse.

Sistemas de esterilización por sistema continuo.

El diseño y montaje para el proceso de esterilización en continuo tiene sentido siempre y cuando se trabajen grandes volúmenes del mismo producto en el mismo envase y no se requieren ajustes constantes de las condiciones de operación, por lo que es conveniente reducir el tiempo de para de la máquina, Berk (2009) y Holdsworth y Simpson (2007), mencionó (Domínguez, 2011).

Casp & Abril (2003), mencionó que la diferencia esencial entre una autoclave y un esterilizador continuo es que en este último se encuentran zonas con un diferencial de temperaturas que se mantendrán constantes durante todo el tiempo en que el esterilizador esté en marcha. Es decir que el calentamiento, mantenimiento y enfriamiento del producto no se realiza porque el esterilizador se calienta, mantienen su temperatura y se enfría, sino porque el producto se traslada por las zonas de temperatura creciente, de temperatura de régimen y de temperatura decreciente del esterilizador. La ventaja que se puede ver a simple vista es el ahorro de energía, ya que en cada operación solo se calienta los envases con producto y no es necesario calentar la masa de la autoclave, pero si se realiza sistemas de trabajo con paradas frecuentes para cambio de condiciones de proceso o de formato de los envases. Otras ventajas son la uniformidad del tratamiento y la

disminución de las necesidades de mano de obra. Estos procesos se llevaran a cabo a la presión de saturación del vapor de agua, a una presión superior o incluso a la presión atmosférica, dependiendo del esterilizador, este calentamiento se producirá por vapor saturado, por mezcla de vapor y aire comprimido, por agua sobrecalentada, se a visto para las autoclaves, y también por otros medios característicos de algunos esterilizados especiales; y entre los sistemas de esterilización en continuo más importantes se encuentra los esterilizadores hidrostáticos, neumohidrostáticos, continuos y por llama directa.

2.3.3. Factores que influyen en la reducción de microorganismos

a. Tipos de calor

Eroski consumer (2003), mencionó que la aplicación del calor en los alimentos tiene varios objetivos. El primero de ellos es convertir a los alimentos en digestibles, hacerlos apetitosos y mantenerlos a una temperatura agradable para comerlos, Neusa (2012) afirmo la reducción de agentes biológicos para obtener productos más sanos y duraderos, los tratamientos térmicos tienen la finalidad de destruir agentes biológicos, como bacterias, virus y parásitos con la finalidad de obtener productos más sanos; conseguir productos que tengan una vida comercial más larga, debido fundamentalmente a la eliminación o reducción de los microorganismos causantes de la alteración de los alimentos; y disminuir la actividad de otros factores que afectan a la calidad de los alimentos, como determinadas enzimas (por ejemplo, las que producen el oscurecimiento de los vegetales cuando éstos son cortados).

Elías et al. (2014), mencionaron que existen dos tipos de calor:

Calor seco

Es menos eficiente, el medio de transferencia de calor es el aire y la causa de la destrucción térmica es la oxidación.

Calor húmedo

Es el más eficiente, el medio de transferencia de calor es el agua (vapor de agua) y la causa de la destrucción térmica es la desnaturalización. Con este tipo de calor se desnaturalizan las proteínas y las enzimas del microorganismo, al no haber hidrólisis enzimática no hay simplificación de los nutrientes presentes en los alimentos y estos no pueden ser utilizados como sustratos, por lo que el microorganismo no tiene energía para realizar sus funciones vitales como crecer, reproducirse y moverse.

b. pH

Bedolla et al. (2004), mencionaron que Cameron y Esty (1940), consideraron al pH como uno de los factores de mayor importancia, el cual define el tipo de proceso requerido para un alimento, ya que la resistencia térmica de las esporas está íntimamente ligada con la acidez del medio en que se desarrollan, clasificándola así: alimentos de baja acidez (pH 5.0 o más), alimentos de mediana acidez (pH 5.0 a 4.5), alimentos ácidos (pH 4.5 a 3.7) y alimentos de alta acidez (pH 3.7 a menor); luego se ajustó de la siguiente manera en alimentos de baja acidez (pH > 4.5), alimentos ácidos (pH 4.0 a 4.5) y alimentos de alta (acidez pH < 4.0).

El pH 4.5, es de suma importancia en la elección de las condiciones del proceso debido a que algunas cepas del *Clostridium botulinum* pueden crecer y producir toxinas a pH tan bajos como 4.6, razón por la cual, que los alimentos con un pH inferior a 4.5, es conveniente someterlos a solo a un proceso de pasteurización como método de conservación y los alimentos con pH superiores a 4.5, requieren de un proceso más severo como la esterilización comercial, en la actualidad FDA (2014) determinó algunas regulaciones para alimentos enlatados definiéndolas en alimentos enlatados de baja acidez (LACF) (a excepción de bebidas alcohólicas) con un pH final de equilibrio superior a 4.6, un caso especial son los tomates y sus subproductos que deben tener un equilibrio de pH inferior a 4.7; y alimentos acidificados (AF), siendo estos de baja acidez al cual se le agrega(n) ácido(s) o alimento(s) ácido(s) y tienen un equilibrio de pH no superior a 4.6.

c. Actividad de agua (a_w)

Alais (2003), afirmó que la forma más conveniente de representar la disponibilidad de agua en un producto alimentario, la actividad del agua, a_w , está definida por el descenso de la temperatura parcial del vapor por los componentes del medio, como se muestra en la ecuación 01.

$$a_w = \frac{P_W}{P_W^O} \quad \text{Ec. 1}$$

Donde P_W es la presión de vapor de agua del alimento a cierta temperatura y en equilibrio y P_W^O es presión de vapor de agua pura en condiciones iguales.

La mayoría de los microorganismos y especialmente las bacterias se desarrollan a a_w cercanas a 1 (0.993-0.998). La

a_w del agua pura es 1. A valores inferiores de a_w , la velocidad de crecimiento o la masa celular final disminuye y la fase de latencia aumenta, conservándose mejor los alimentos. Entre las prácticas más frecuentes que ha empleado el hombre para alargar la vida útil de un alimento se encuentra la deshidratación, como es el proceso de salazón (utilizando sal como soluto para eliminar el agua de los alimentos, mediante el fenómeno de osmosis, en donde la solución salina se traslada desde el medio más concentrado, exterior, hasta el de menor concentración, tales como carnes, pescados); también se han utilizado azúcares para aumentar la presión osmótica del producto, este es el caso de los dulces en almíbar, las mermeladas, las conservas de guayabas, mangos, etc.

FDA (2014), mencionó que un alimento de baja acidez (LACF) debe tener una actividad de agua superior a 0.85 mientras que un alimento acidificado (AF) debe tener una actividad de agua mayor a 0.85.

2.3.4. Cinética de destrucción térmica.

La cinética de destrucción térmica de las bacterias en forma vegetativa o espora, puede modelarse matemáticamente, utilizando el modelo mecanicista de cinética de primer orden; (Pérez, Rodríguez & Toledano (2002), dicen que aplicando la clásica ecuación de Arrhenius, si se representara la evolución de una población bacteriana sometida a la acción de calor letal a una temperatura constante en un eje logarítmico de ordenadas frente al tiempo en el eje de abscisas se obtendría una recta.

Esta gráfica se denomina “curva de supervivencia térmica” y se realiza para determinados microorganismos alterantes para obtener un parámetro conocido como valor D o tiempo de reducción

decimal a una determinada temperatura, se define como el tiempo durante el cual el número de microorganismos muere uno de diez, del número inicial en un intervalo de tiempo, independiente de la concentración inicial. En los alimentos de baja acidez, el nivel aceptable de sobrevivencia de esporas de *Clostridium botulinum* es 10^{-12} ; que es, 1 esporas en 10^{12} inicialmente puede sobrevivir el proceso térmico. Este rango de supervivencia o de reducción de 12 ciclos logarítmicos, para el *Cl. Botulinum* es conocido como el concepto de 12D, que fue propuesto por Lewia y Heppell (2000) en (Vázquez-Aguilar, 2007).

Vázquez-Aguilar (2007), mencionó que Rees y Bettison (1991), aseguraron que la muerte térmica de microorganismos puede ser expresada matemáticamente en términos de la concentración de microorganismos, como se muestra en la ecuación 02.

$$\log 10 \left(\frac{C}{C_0} \right) = - \frac{kt}{2.303} \quad \text{Ec.02}$$

Donde C es la concentración final de esporas, C_0 es la concentración inicial de esporas, t el tiempo y κ la constante de velocidad de constante de inactivación.

La convención estándar para los procesos térmicos es definir un tiempo de reducción decimal D como el tiempo requerido para destruir el 90% de los microorganismos aplicando una cierta temperatura, como se encuentra en la ecuación 03.

$$\log C = \log C_0 - \frac{t}{D} \quad \text{Ec.03}$$

Pueden igualarse los parámetros cinéticos D y κ de ambas ecuaciones en la siguiente relación, ecuación 04.

$$D = \frac{2.303}{k} [=]min \quad \text{Ec.04}$$

En una gráfica de concentración contra tiempo, D es el tiempo necesario para alcanzar un ciclo logarítmico de reducción en concentración. Es útil definir un valor D de referencia (D_r) con base en la temperatura. La temperatura de referencia (T_{ref}) en los procesos de esterilización es de 121.1°C.

La velocidad con que se reduce la concentración de microorganismos depende de la temperatura. En una gráfica D contra temperatura, la pendiente de la curva es $1/z$, donde z se conoce como constante de resistencia térmica y es el cambio de temperatura necesario para alterar en 90% el valor de D ., se puede establecer el valor de z a partir de dos valores de D y sus correspondientes temperaturas, expresada en la ecuación 05.

$$\log\left(\frac{D_1}{D_2}\right) = (T_2 - T_1) / z [=]^\circ\text{C} \quad \text{Ec.05}$$

Dependencia del tiempo y la temperatura de la cinética de inactivación bacteriana.

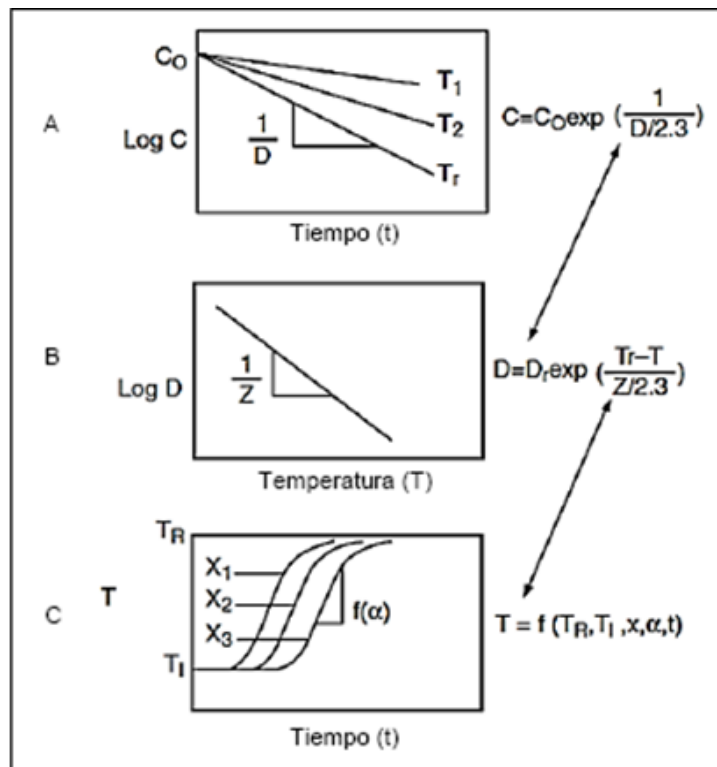


Figura 1: Muestra la dependencia del tiempo y temperatura de la cinética de inactivación bacteriana en el procesamiento térmico de calentamiento de conducción en alimentos enlatados, donde C es la concentración de esporas viables, D y Z son factores que describen la cinética de reacción, T y T_R son temperatura inicial y de retorta, x es cualquier ubicación dentro del recipiente, y α es la difusividad térmica de la producto.

FUENTE: (Teixeira & Shoemaker, 1989).

La temperatura alcanzada dentro del producto es función de su temperatura inicial (T), su posición dentro del equipo (x), su difusividad térmica (α), la temperatura de la autoclave (T_R) y el tiempo, como se muestra en la Figura 1. De esta forma, la concentración de esporas bacterianas durante el procesamiento térmico disminuirá de acuerdo a su cinética de inactivación que, por

ser función de la temperatura, también lo será de las variables que afecten la transferencia de calor dentro del producto (Domínguez, 2011).

2.3.5. Letalidad y valor de esterilización.

Miranda & Teixeira (2012), afirmó que el término de letalidad, se refiere al valor F_0 , que es una medida del tratamiento térmico o proceso de esterilización, duración requerida para alcanzar una razón de reducción a una temperatura dada, Morales – Blancas y Torres (2003), define este término como el tiempo necesario para inactivar todas las esporas bacterianas en un medio específico a una temperatura específica, demostrado en la ecuación 06.

$$F = D \log\left(\frac{C_0}{C}\right) \quad \text{Ec.06}$$

Para determinar el valor F de referencia todo lo que se requiere es especificar cuantos minutos, a una cierta temperatura, serán necesarios para lograr el mismo nivel de inactivación que la del proceso a 121.1 °C, y para este propósito se utiliza el valor D_{121} , (Domínguez, 2011), como a continuación se muestra en la ecuación 07.

$$F = D_{121} \log\left(\frac{C_0}{C}\right) \quad \text{Ec.07}$$

El valor F también sirve como punto de referencia para especificar procesos equivalentes a cualquier otra temperatura constante, ecuación 08.

$$F = 10^{((T-121.1)/Z)t} \quad \text{Ec.08}$$

Donde Z es la constante de resistencia térmica, T es la temperatura y t el tiempo utilizado en el proceso. La siguiente ecuación se vuelve importante cuando la temperatura varía y el valor F debe obtenerse matemáticamente, en la ecuación 09.

$$F = \int_{t=0}^t 10^{((T-121.1)/Z)} dt \quad \text{Ec.09}$$

En este punto, debe notarse que las ecuaciones 08 y 09 son dos expresiones diferentes para la letalidad de un proceso, siendo la primera un valor que debe ser especificado para un proceso y, la segunda, la letalidad conseguida en un proceso Holdsworth y Simpson (2007) y Teixeira (2006). Otra observación importante es que la ecuación (08) utiliza el valor D_{121} para convertir ciclos logarítmicos a minutos, mientras que (Ec. 09) hace uso del valor Z para convertir la historia térmica en minutos a 121.1°C (Domínguez, 2011).

2.3.6. Transferencia de calor.

Kreith, Manglik, & Bohn (2012) definen a la transferencia de calor como la transmisión de energía de una región a otra como resultado de un diferencial de temperaturas entre sí, Martín & Serrano (2006) definen que los cuerpos no almacena calor sino energía térmica, llamada comúnmente energía calorífica o contenido calorífico, con la condición que ambos estén a diferentes temperaturas, para calcular el contenido calorífico se trabaja con la siguiente expresión (ecuación 10).

$$Q = mC_p \Delta T \quad \text{Ec. 10}$$

Donde m es la masa (kg), C_p es calor específico a presión constante (kJ/(kg K)), y ΔT es la diferencia de temperatura. Por lo

tanto, la energía (calor) viaja desde las regiones (u objetos) de mayor temperatura hacia las regiones de menor temperatura (u objetos) por conducción, convección o radiación térmica (Singh & Heldman, 2009)

a. Transmisión de calor por conducción.

Kreith et al (2012) afirmó que conducción es un mecanismo de transmisión de calor en el cual el transporte de energía tiene lugar a nivel molecular; existen dos teorías las que mencionan también Singh & Heldman, (2009) la primera dice que cuando las moléculas de un material sólido alcanzan cierta energía térmica, se vuelven más energéticas y vibran cada vez con una mayor amplitud dentro de la estructura molecular del sólido; estas vibraciones se transmiten de una molécula a otra sin movimiento de traslación. De esta forma, el calor se transmite de las zonas de mayor a las de menor temperatura, la otra teoría afirma que la conducción ocurre a nivel molecular debido al movimiento de los electrones libres. Estos electrones libres son abundantes en los metales y transportan energía térmica y eléctrica. Razón por la cual, los materiales buenos conductores de electricidad, como la plata o el cobre, también son buenos conductores térmicos. La transmisión de calor por conducción en un objeto no existe movimiento físico del mismo.

$$q_x = -kA \frac{dT}{dx} \quad \text{Ec.11}$$

En la ecuación 11 se dice que, q_x es el flujo de calor en la dirección de transmisión (W); K es la conductividad térmica ($w / [m^{\circ}C]$); A es el área que a través de la cual tiene lugar el

flujo de calor (m^2); T es la temperatura ($^{\circ}C$): y x es la longitud m , una variable (Singh & Heldman, 2009).

b. Transmisión de calor por convección.

Godino & Olivia (2011) mencionan que si se produce un gradiente de temperatura entre los fluidos o entre un líquido y un cuerpo sólido, en otras palabras, si el movimiento del fluido está involucrado, entonces el calor se transfiere por convección, dependiendo de si el flujo es inducido artificialmente o no, existen dos tipos de transferencia de calor por convección: forzada y natural; la convección forzada implica el uso de un medio mecánico como una bomba o un ventilador que mueva el fluido; por el contrario, la convección natural ocurre debido a la diferencia de densidades a su vez, debidas a gradientes de temperatura en el sistema. Ambos mecanismos pueden dar lugar a flujo laminar o turbulento.

La solución de la ecuación de difusión de calor se puede desarrollar por métodos analíticos o numéricos, las cuales dan paso a la simulación del proceso.

La simulación puede ser definida como una técnica para evaluar en forma rápida un proceso con base en una representación del mismo, mediante modelos matemáticos (Martínez, 2000).

2.3.7. Flujo de calor

Cengel (2007) mencionó que cuando se habla de flujo de calor (q'') se quiere decir la transferencia de energía térmica, no el flujo de una sustancia semejante a un fluido llamada calor, aun cuando esta

última interpretación incorrecta, basada en la teoría del calórico, es el origen de esta frase.

La ley especial que rige la relación entre el flujo de calor y la temperatura, lleva el nombre de Joseph Fourier. Para un sólido homogéneo isotrópico (es decir, material en el que la conductividad térmica (k) es independiente de la dirección).

Cengel (2007), menciona que la razón de la transferencia de calor a través de un medio en una dirección específica (por ejemplo, en la dirección x) es proporcional a la diferencia de temperatura (∂T) entre uno y otro lados del medio y al área (A) perpendicular a la dirección de la transferencia de calor, pero es inversamente proporcional a la distancia (∂x) en esa dirección. Esto se expresó en forma diferencial por la Ley de Fourier de la conducción del calor en forma unidimensional, ecuación 12:

$$q'' = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad \text{Ec.12}$$

Cengel (2007), menciona que el calor es conducido en la dirección de la temperatura decreciente y, por tanto, el gradiente de temperatura es negativo cuando el calor es conducido en la dirección positiva de x . El signo negativo en la Ecuación 12 garantiza que la transferencia de calor en la dirección positiva de x sea una cantidad positiva.

Incropera (1999), menciona que si aceptamos que el flujo de calor es una cantidad vectorial, es posible escribir un planteamiento más general de la ecuación de conducción (*Ley de Fourier*) como se muestra en la ecuación (13).

$$\mathbf{q}'' = -k\nabla T = -k \left(i \frac{\partial T}{\partial x} + j \frac{\partial T}{\partial y} + k \frac{\partial T}{\partial z} \right)$$

Ec.13

Vectores normales de transferencia de calor

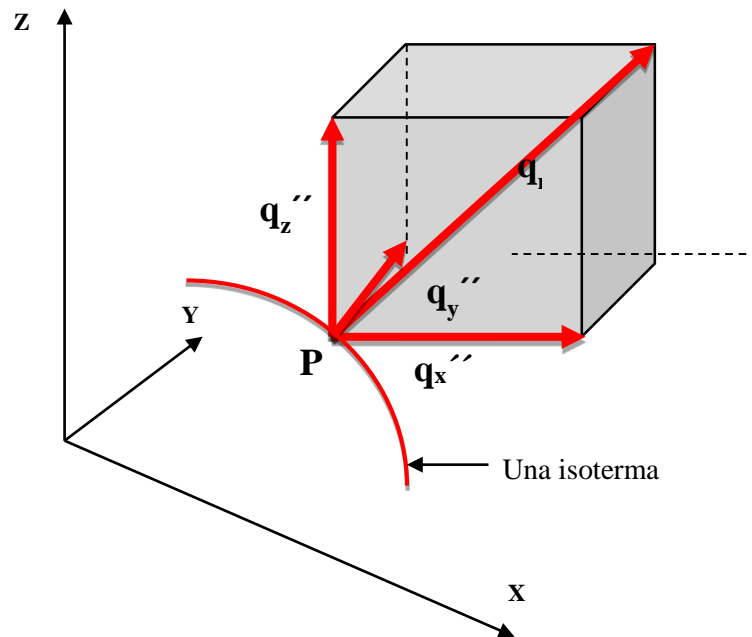


Figura 2: Muestra los vectores en el plano tridimensional.

FUENTE: Çengel (2007).

Donde ∇ es el operador nabla tridimensional y $T(x, y, z)$ es el campo escalar de temperaturas. Está implícito en la Ecuación 11, que el vector de flujo de calor se encuentra en una dirección perpendicular a las superficies isotérmicas.

Çengel (2007); Incropera (1999), menciona que el vector de flujo de calor se resuelve en componentes de modo que, en coordenadas cartesianas, la expresión general para \mathbf{q}'' se expresa en la siguiente ecuación 14.

$$\mathbf{q}'' = i q''_x + j q''_y + k q''_z$$

Ec. 14

Donde la ecuación 14, se sigue que:

$$q_x'' = -k \frac{\partial T}{\partial x} \quad \text{Ec.15.1}$$

$$q_y'' = -k \frac{\partial T}{\partial y} \quad \text{Ec.15.2}$$

$$q_z'' = -k \frac{\partial T}{\partial z} \quad \text{Ec.15.3}$$

Cada una de estas expresiones relaciona el flujo de calor a través de una superficie con el gradiente de temperatura en una dirección perpendicular a la superficie (Figura 02). También está implícito en la Ecuación 13, que el medio en el que ocurre la conducción es isotrópico. Para este medio el valor de la conductividad térmica (k) es independiente de las direcciones coordenadas.

Según Incropera (1999), las características claves de la Ley de Fourier se resumen como sigue. No es una expresión que deriva de principios fundamentales: es, en cambio, una generalización que se basa en pruebas experimentales, es también una expresión que define una propiedad material importante, la conductividad térmica. Además, la Ley de Fourier es una expresión vectorial que indica que el flujo de calor es normal a una isoterma y en la dirección de la temperatura decreciente. Finalmente, se puede mencionar que la Ley de Fourier se aplica para toda la materia sin importar su estado, sólido, líquido o gaseoso.

2.3.8. Ecuación de difusión de calor

Para el estudio de la conducción de calor en un sólido debe realizarse un balance de energía en un elemento de volumen del

material suponiendo despreciables los mecanismos de convección y radiación. Este balance dará lugar a una ecuación que se utiliza para los cálculos de los perfiles de temperatura en el sólido, así en la obtención del flujo de calor que lo atraviesa. La transmisión de calor por unidad de tiempo, debida a la conducción, está relacionada con la distribución de temperaturas mediante la Ley de Fourier (Incropera, 1999)

Incropera (1999), mencionó que la ecuación fundamental se obtiene al realizar el balance energético en un volumen control del sólido, según la expresión, ecuación 16.

$$\dot{E}_{ent} + \dot{E}_g - \dot{E}_{sale} = \dot{E}_{atm} \quad \text{Ec.16}$$

Para coordenadas rectangulares, Incropera (1999), define primero un volumen de control pequeño (diferencial), dx , dy , dz ; como se muestra en la Figura 03.

El segundo paso es considerar los procesos de energía que son relevantes para este volumen de control. Si hay gradientes de temperatura, la transferencia de calor por conducción ocurrirá a través de cada una de las superficies de control.

Las velocidades de transferencia de calor por conducción perpendiculares a cada una de las superficies de control en las coordenadas x , y y z se indican con los términos q_x , q_y y q_z , respectivamente. Las velocidades de transferencia de calor por conducción en las superficies opuestas se expresan como una expansión en series de Taylor donde, dejando de lado términos de orden superior, como se muestran en las ecuaciones (17.1), (17.2) y (17.3)

$$q_{x+dx} = q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx \quad \text{Ec.17.1}$$

$$q_{y+dy} = q_y + \frac{\partial q_y}{\partial y} dy \quad \text{Ec.17.2}$$

$$q_{z+dz} = q_z + \frac{\partial q_z}{\partial z} dz \quad \text{Ec.17.3}$$

Conducción tridimensional del calor a través de un volumen de control

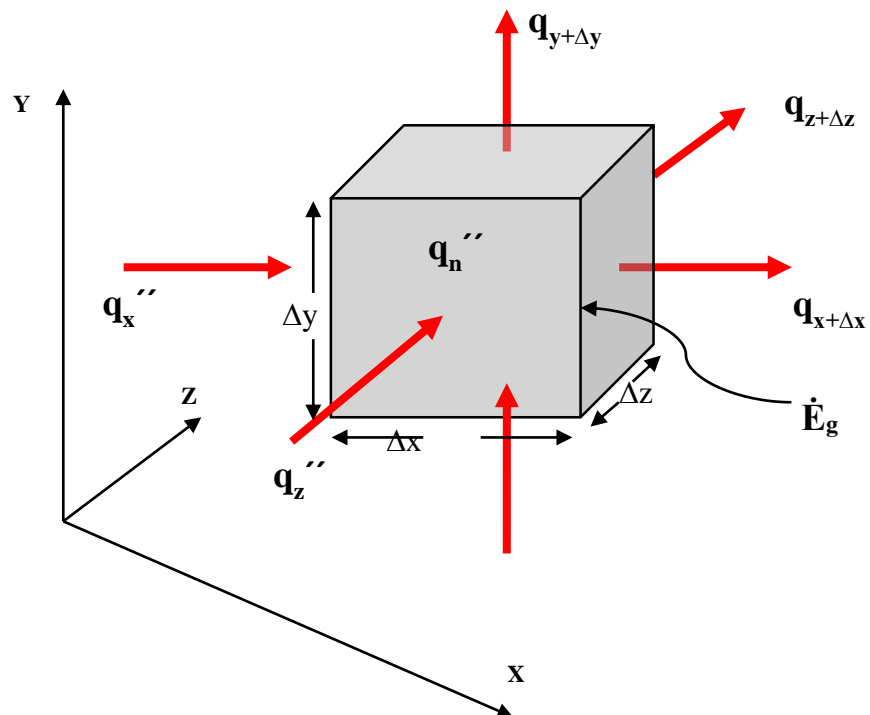


Figura 3: Conducción tridimensional del calor a través de un volumen de control

FUENTE: Cengel (2007).

Expresado en palabras, la ecuación 17.1 simplemente afirma que el componente x de la rapidez de transferencia de calor en $x + dx$ es igual al valor de este componente en x más la cantidad por la que cambia con respecto a x veces dx .

Dentro del medio también puede haber un término de fuente de energía asociado con la velocidad de generación de energía térmica (\dot{E}_g). Este término se representa en la ecuación 18 como:

$$\dot{E}_g = \dot{q} \, dx \, dy \, dz \quad \text{Ec.18}$$

Donde \dot{q} es la rapidez a la que se genera energía por unidad de volumen del medio (W/m^3). Además, pueden ocurrir cambios en la cantidad de la energía térmica interna almacenada por el material en el volumen de control. Si el material no experimenta un cambio de fase, los efectos de energía latente no existen, y el término de almacenamiento de energía (\dot{E}_{alm}) se expresa en la ecuación 19.

$$\dot{E}_{alm} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \, dx \, dy \, dz \quad \text{Ec.19}$$

Donde $\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t}$ es la rapidez de cambio temporal de la energía sensible del medio por unidad de volumen.

Una vez más es importante advertir que los términos \dot{E}_g y \dot{E}_{alm} , representan diferentes procesos físicos. El término de generación de energía \dot{E}_g es una manifestación de algún proceso de conservación de energía que incluye energía térmica por un lado y energía química, eléctrica o nuclear por el otro lado. El término es positivo (fuente) si la energía térmica se genera en el material a expensas de alguna otra forma de energía; es negativo (sumidero) si la energía térmica se consume. En cambio, el término de almacenamiento de energía \dot{E}_{alm} se refiere a la tasa de cambio de la energía térmica almacenada por la materia.

Al sustituir estos términos en la ecuación de balance energético en un volumen control Ec.14, así, al reconocer que las velocidades

de transferencia de calor por conducción constituyen el flujo entrante de energía, \dot{E}_{entra} , y el flujo de salida, \dot{E}_{sale} , y al sustituir las ecuaciones 18 y 19, obtenemos la expresión dada en la ecuación 20.

$$q_x + q_y + q_z + \dot{q} dx dy dz = q_{x+dx} + q_{y+dy} + q_{z+dz} + \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz \quad \text{Ec.20}$$

Sustituyendo cada término en la Ec. 17 y acomodando los términos, tenemos la siguiente expresión, ecuación 21.

$$-\frac{\partial q_x}{\partial x} dx - \frac{\partial q_y}{\partial y} dy - \frac{\partial q_z}{\partial z} dz + \dot{q} dx dy dz = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz \quad \text{Ec.21}$$

Çengel (2007); Incropera (1999), mencionan que para evaluar la rapidez de conducción de calor se evalúa a partir de la Ley de Fourier, donde cada componente de flujo de calor de la Ecuación 15 se multiplica por el área de la superficie (diferencial) de control apropiada para obtener la rapidez de transferencia de calor, como se aprecia en las ecuaciones 22.

$$q_x = -k dy dz \frac{\partial T}{\partial x} \quad \text{Ec.22.1}$$

$$q_y = -k dx dz \frac{\partial T}{\partial y} \quad \text{Ec.22.2}$$

$$q_z = -k dx dy \frac{\partial T}{\partial z} \quad \text{Ec.22.3}$$

Al sustituir las Ecuaciones 22 en la ecuación 21 y dividir las dimensiones del volumen de control (dx , dy , dz), obtenemos la ecuación 23, la cual es la forma general, en coordenadas cartesianas, de la ecuación de difusión de calor.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad \text{Ec.23}$$

Esta ecuación, conocida normalmente como la ecuación de difusión del calor, proporciona la herramienta básica para el análisis de conducción de calor. De su solución obtendremos la distribución de temperaturas $T(x, y, z)$ como función del tiempo.

(Incropera, 1999), mencionan que de la misma manera se puede realizar el balance de calor para coordenadas cilíndricas y esféricas y también se puede trabajar con versiones simplificadas de la ecuación 23 como se muestran en la Tabla 1.

La ecuación de difusión del calor puede simplificarse, por ejemplo, si consideramos la conductividad térmica como constante; en este caso podemos simplificar los términos de las propiedades termo físicas, como la densidad (ρ), calor específico (c_p) y conductividad térmica (k) en la propiedad térmica denominada difusividad térmica ($\alpha = \frac{k}{\rho c_p}$).

Tabla 1

Resumen de la ecuación de difusión de calor en diferentes coordenadas geométricas.

Ecuación de difusión de calor	
$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla^2 T = \nabla \cdot \nabla T$	
Coordenada	3D
Rectangular	$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)$
Cilíndrica	$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)$
Esférica	$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\frac{\partial T}{\partial \varphi} \right)$

F

FUENTE: Incropera (1999)

2.3.9. Condiciones iniciales y de frontera para la ecuación de difusión de calor.

Incropera (1999), mencionó que para determinar la distribución de temperaturas en un medio es necesario resolver la forma apropiada de la ecuación de calor. Sin embargo, esta solución depende de las condiciones físicas que existan en las fronteras del medio y, si la situación depende del tiempo, también dependerá de las condiciones que existan en el medio en algún tiempo inicial.

Cengel (2007), señaló que la ecuación de difusión de calor implica la primera derivada con respecto al tiempo y la segunda derivada con respecto a las coordenadas espaciales. Como resultado de su solución, es necesario tener una condición inicial y dos condiciones de contorno para cada coordenada, para describir los problemas de transferencia de calor en estado no estacionario.

La condición de frontera comúnmente utilizada, y posiblemente la más simple posible, es tener una distribución de temperatura fija a través del límite. Esto se conoce como condición de contorno de primer orden. La segunda posibilidad es una especificación sobre el flujo de calor a través del límite, como es para el caso más común el cual es mantener un de flujo de calor constante, o para un caso especial, como es que exista una superficie aislada.

La condición de frontera de tercera clase u orden corresponde a la existencia de calentamiento (o enfriamiento) por convección en la superficie. La ecuación básica para la convección es la ecuación de Newton que simplemente establece que el flujo de calor por convección es proporcional a la diferencia entre la temperatura superficial (T_s) y la temperatura del fluido (normalmente denotado por T_∞) multiplicado por el coeficiente de transferencia de calor por convección ($h=W/m^2\text{°C}$) (Incropera, 1999).

Los tres tipos de orden de condiciones de fronteras que se pueden presentar en el análisis de la ecuación de difusión de calor, se resumen en la Tabla 2.

Tabla 2

Condiciones de frontera para la ecuación de difusión de calor en la superficie ($X=0$).

Orden	Condición	Ecuación
Primero	Temperatura superficial constante	$T_{(0,t)} = T_s$
Segundo	Flujo de calor superficial constante	
	a) Flujo finito de calor	$-k \frac{\partial T}{\partial x} _{x=0} = q''$
	b) Superficie adiabática o aislada	$\frac{\partial T}{\partial x} _{x=0} = 0$
Tercero	Convección superficial	$-k \frac{\partial T}{\partial x} _{x=0} = h(T_\infty - T_{(0,t)})$

FUENTE: Elaboración propia.

2.3.10. Modelación y simulación de procesos

La simulación de procesos se define como una técnica para evaluar rápidamente el efecto de diferentes sistemas y parámetros en un proceso y el resultado de éste, tomando como base una representación del mismo utilizando modelos matemáticos que se ajustan a las especificaciones determinadas (Domínguez, 2011).

Los métodos numéricos son útiles cuando no hay una solución analítica disponible para un problema particular. Ellos se han hecho populares por su flexibilidad en el manejo de geometrías irregulares, complejas condiciones de contorno, las propiedades térmicas dependientes de la temperatura, cambio de fase, etc. Sin embargo, se debe señalar que las soluciones numéricas no son exactas, sino, sólo aproximaciones para exigir soluciones. Los métodos numéricos se basan en el reemplazo de las ecuaciones diferenciales por un

conjunto de n ecuaciones algebraicas para las temperaturas desconocidas en n puntos seleccionados en el medio y la solución simultánea de estas ecuaciones conduce a valores de la temperatura en esos puntos discretos (Cengel, 2007).

Estas ecuaciones algebraicas pueden ser resueltas por simples manipulaciones matemáticas, tales como suma, resta, multiplicación y división, que se pueden automatizar fácilmente usando un ordenador. Sin embargo, como consecuencia de la discretización la solución obtenida ya no es exacta, por lo tanto resulta en una aproximación de la solución exacta. Afortunadamente, el error de aproximación puede reducirse sustancialmente mediante el aumento del número de puntos de discretización y reducción del paso de tiempo (Collinao, 2003).

Cabe mencionar que en los últimos años el crecimiento de poderosas computadoras con mayores capacidades computacionales ha facilitado la formulación de métodos numéricos sofisticados que logran imitar y simular los sistemas físicos reales, mediante la resolución de complejos modelos matemáticos (Mohamed, 2003).

En la literatura, hay diferentes métodos numéricos que incluyen métodos diferenciales (por ejemplo, el método de las diferencias finitas), métodos integrales (variación y ponderados residuales, por ejemplo., el método de elementos finitos), y métodos estocásticos (por ejemplo, el método de Monte Carlo) (Lander, 2016).

En aplicaciones de ingeniería de alimentos, los métodos de diferencias finitas y elementos finitos son las técnicas numéricas más empleadas. El primero es un método barato y menos complejo computacionalmente en comparación con este último. Sin embargo, el primero tiene limitaciones en el modelado, por ejemplo, resulta

muy complicado ser aplicado en los alimentos heterogéneos (Collinao, 2003).

a. Método de diferencias finitas

El método de diferencias finitas es el método más antiguo de discretización para la solución numérica de ecuaciones diferenciales y fue descrito en 1768 por Euler. El método se basa en la aproximación de los derivados en las ecuaciones que rigen por la relación de dos diferencias (Collinao, 2003).

Incropera (1999), propuso la idea de la representación de la diferencia finita de una derivada puede ser introducida recordando la definición de la derivada de la función $F(x, y)$ en $x = x_0, y = y_0$ con respecto a x , a continuación se expresa en la ecuación 24.

$$\frac{\partial F}{\partial x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{F(x_0 + \Delta x, y_0) - F(x_0, y_0)}{\Delta x} \quad \text{Ec.24}$$

Claramente, si la función $F(x, y)$ es continua, el lado derecho de ecuación (x) puede ser una aproximación razonable a $\frac{\partial F}{\partial x}$ durante un periodo suficientemente pequeño pero con Δx finita.

Consideramos que el desarrollo en serie de Taylor de las funciones $f(x + h)$ y $f(x - h)$ alrededor del punto x , está dada por las siguientes ecuaciones 25.1 y 25.2.

$$f(x + h) = f(x) + hf'(x) + \frac{h^2}{2!} f''(x) + \frac{h^3}{3!} f'''(x) \quad \text{Ec.25.1}$$

$$f(x - h) = f(x) + hf'(x) + \frac{h^2}{2!} f''(x) + \frac{h^3}{3!} f'''(x) \quad \text{Ec.25.2}$$

Donde los números primos denotan derivadas con respecto a x. La primera y segunda derivada, $f'(x)$ y $f''(x)$, pueden ser representados en forma de diferencias finitas de muchas maneras diferentes mediante la utilización de desarrollos en serie de Taylor.

La aproximación de las derivadas parciales de la ecuación de difusión de calor, se pueden realizar mediante el uso de diferencias finitas (Çengel, 2007). El método explícito o también llamado hacia adelante, es el método más simple de operar, en las diferencias finitas, debido a que utiliza las temperaturas actuales para simular la temperatura anterior, pero tiene la desventaja de imponer un límite sobre el intervalo de tiempo admisible para evitar inestabilidades en la solución (Incropera, 1999).

Los problemas de conducción de calor en estado no estacionario, pueden resolverse numéricamente mediante la transformación de la ecuación diferencial parcial de la conducción de calor a las ecuaciones en diferencias finitas, en ambos dominios, tanto del espacio y tiempo (Incropera, 1999).

La primera derivada en el tiempo de alguna función $\frac{\partial T}{\partial t}$ en el tiempo t_i se puede aproximar a la siguiente expresión, ecuación 26.

$$\frac{\partial T}{\partial t} \cong \frac{T(t_{i+1}) - T(t_i)}{\Delta t} \quad \text{Ec.26}$$

La ecuación 25, es llamada diferencia hacia adelante o explícita, ya que utiliza el valor futuro de la función.

Del mismo modo, las fórmulas de diferencias finitas se pueden establecer para los derivados de segundo orden, como se muestra en la ecuación 27, donde la segunda derivada $\frac{\partial^2 T}{\partial L^2}$ en el espacio denominado "L" se puede aproximar a la siguiente expresión:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial L^2} = \frac{T(L_{i+1}) - 2T(L_i) + T(L_{i-1}))}{\Delta L^2} \quad \text{Ec.27}$$

La ecuación clásica que describe la conducción de calor transitoria de dos dimensiones de un cilindro finito está dada por la ecuación 28.

$$\frac{\delta T}{\delta t} = \alpha \left\{ \frac{\delta^2 T}{\delta r^2} + \frac{1}{r} \frac{\delta T}{\delta t} + \frac{\delta^2 T}{\delta h^2} \right\} \quad \text{Ec.28}$$

Donde α es la difusividad térmica (cm^2/s), r es la distancia radial desde el bote en el eje vertical, h es la distancia vertical, desde el eje horizontal, T es la temperatura del lugar de interés y t es el tiempo en el momento de su interés, transcurrido desde el momento previo de su interés.

Varias técnicas para resolver la ecuación 28, se han propuesto; aquellos el empleo de la integración de las diferencias finitas se prestan a la solución numérica por ordenador y han sido descritos por muchos incluyendo Teixeira

& Shoemaker (1989) que se utilice el método para determinar la distribución de la supervivencia de las esporas y la retención de nutrientes en todo el recipiente considerando cada elemento de volumen separadamente.

En esta solución, se supone que la temperatura que rodea a la lata es constante sobre toda la superficie en cualquier momento y que la resistencia a la transferencia de calor en la superficie de la lata, a través de la pared de la lata y en el producto no es significativo en cualquier superficie de la lata (ignorando de este modo cualquier influencia de espacio de cabeza de gas). También se supone que la difusividad térmica del producto es constante a lo largo de la lata. Por lo tanto, se deduce que existe simetría cada lado del eje vertical y en cada lado del eje horizontal, de una de dos dimensiones sección a través de la lata (Bown, 2004).

La técnica de diferencias finitas establece una red bidimensional de puntos de nodo a lo largo de la lata. Dada la simetría se ha indicado anteriormente, es sólo necesario establecer una cuadrícula nodal para un único cuadrante de una sección a través de la como puede se muestra en la Figura 4.

Sistema de red nodal para un cilindro finito

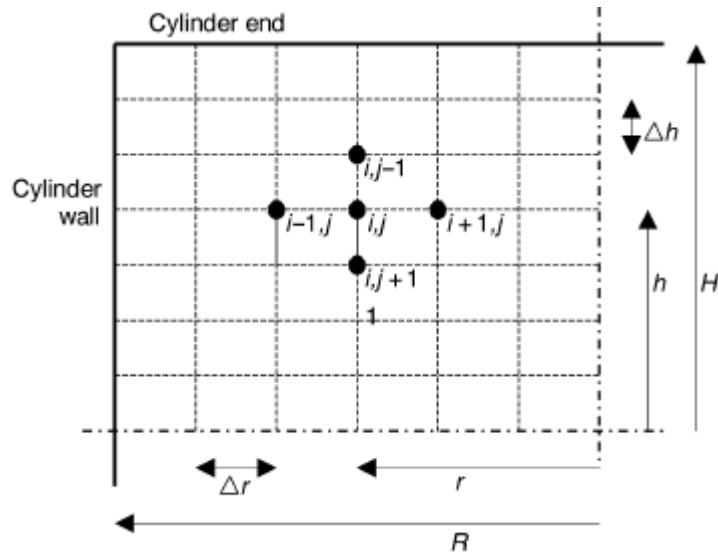


Figura 4: En este sistema de red las intersecciones entre el eje radial y axial, son nodos, los cuales se aproximan o se alejan en cada uno de los ejes.

FUENTE: (Bown, 2004)

Tres variables incrementales también necesitan ser definidos: cambio en la distancia radial desde el eje vertical (Δr); cambio en la distancia vertical desde el eje horizontal (Δh); y el cambio en el tiempo desde el inicio del proceso térmico para el momento en que se examina (Δt).

La temperatura en un punto situado en el nodo digamos, i columna y la fila j de la rejilla nodal en el tiempo t , se describe como $T_{i,j}^{(t)}$ en el tiempo $t + \Delta t$ como $T_{i,j}^{(t+\Delta t)}$ en un incremento radial más lejos del eje vertical como $T_{i+1,j}^{(t)}$ y en un incremento vertical lejos del eje horizontal como $T_{i,j+1}^{(t)}$. Análogamente, los subíndices de T se expresan como $i - 1$ o $j - 1$ si la posición nodal es más cercana a la vertical o al eje horizontal.

Carnaham et al. (1969) muestran que una expansión en serie de Taylor para $T_{i-1,j}^{(t)}$ y $T_{i+1,j}^{(t)}$ sobre $T_{i,j}^{(t)}$ y para $T_{i,j-1}^{(t)}$ y $T_{i,j+1}^{(t)}$ sobre $T_{i,j}^{(t)}$ proporcionar un conjunto de ecuaciones que

describen la diferencia hacia adelante y diferencias centrales como muestran en las ecuaciones 29, 30, 31 y 32.

$$\frac{\delta T}{\delta t} = \frac{T_{i,j}^{(t+\Delta t)} - T_{i,j}^{(t)}}{\Delta t} \quad \text{Ec.29}$$

$$\frac{\delta^2 T}{\delta r^2} = \frac{[T_{i-1,j} - 2T_{ij} + T_{i+1,j}]^{(t)}}{(\Delta r)^2} \quad \text{Ec.30}$$

$$\frac{1}{r} \frac{\delta T}{\delta t} = \frac{1}{r} \frac{[T_{i-1,j} - T_{i+1,j}]^{(t)}}{2(\Delta r)} \quad \text{Ec.31}$$

$$\frac{\delta^2 T}{\delta h^2} = \frac{[T_{i,j-1} - 2T_{ij} + T_{i,j+1}]^{(t)}}{(\Delta h)^2} \quad \text{Ec.32}$$

Donde r es la distancia radial del nodo en cuestión desde el eje vertical y h es la distancia vertical del nodo bajo la consideración del eje horizontal.

Una solución general surge si se considera la forma explícita para permitir el cálculo directo de $T_{i,j}^{(t+\Delta t)}$ de la siguiente manera.

$$\begin{aligned} T_{i,j}^{(t+\Delta t)} = T_{i,j}^{(t)} &+ \frac{\alpha \Delta t}{(\Delta r)^2} \{T_{i-1,j} - 2T_{ij} + T_{i+1,j}\}^{(t)} \\ &+ \frac{\alpha \Delta t}{2r(\Delta r)} \{T_{i-1,j} - T_{i+1,j}\}^{(t)} \\ &+ \frac{\alpha \Delta t}{(\Delta h)^2} \{T_{i,j-1} - 2T_{ij} + T_{i,j+1}\}^{(t)} \end{aligned} \quad \text{Ec.33}$$

Bown (2004) muestra que la solución de diferencias finitas proporciona una aproximación aceptable a la ecuación 28

(cilíndrica) en los nodos, pero también señalan que los valores de cómputo para $T_{i,j}^{(t)}$ involucra errores de redondeo. Por lo tanto, si esta solución numérica se utiliza para calcular la lata temperaturas internas y letalidad de allí, la salida sólo puede ser una aproximación.

Se examina la convergencia, la estabilidad y la precisión de estos errores de redondeo y dar pautas para el número de radial y vertical nodos necesarios en una cuadrícula para lograr la estabilidad matemática con razonable eficiencia de cálculo. Bown (2004) y Teixeira & Shoemaker (1989) muestran que un mayor número de puntos nodales no aumentan significativamente a la sensibilidad del modelo cuando se utiliza el modelo para calcular la letalidad Conseguido.

Bown (2004) proporciona una tabla de números óptimos de los puntos de nodo para una gama de tamaños de lata.

Las reglas de simetría discutida anteriormente se pueden usar para derivar cuatro casos específicos de la ecuación 33.

1. El caso general, cuando r está entre la superficie lateral de la lata y el eje vertical, pero no en el eje vertical y cuando se encuentra entre el extremo de la lata y el eje horizontal, pero no en el eje horizontal. Es decir dada en la ecuación 33.

2. El caso eje central vertical, cuando r se encuentra en el eje vertical y h mentiras entre el extremo de lata y el eje horizontal, pero no en el eje horizontal, ecuación 34.

$$\begin{aligned}
T_{i,j}^{(t+\Delta t)} = T_{i,j}^{(t)} &+ \frac{4\alpha\Delta t}{(\Delta r)^2} \{T_{i-1,j} - T_{i,j}\}^{(t)} \\
&+ \frac{\alpha\Delta t}{(\Delta h)^2} \{T_{i,j-1} - 2T_{i,j} + T_{i,j+1}\}^{(t)}
\end{aligned}
\tag{Ec.34}$$

3. El caso eje central horizontal, cuando h se encuentra en el eje horizontal y r está entre la superficie lateral de la lata y el eje vertical pero no en el eje vertical, ecuación 35.

$$\begin{aligned}
T_{i,j}^{(t+\Delta t)} = T_{i,j}^{(t)} &+ \frac{\alpha\Delta t}{(\Delta r)^2} \{T_{i-1,j} - 2T_{i,j} + T_{i+1,j}\}^{(t)} \\
&+ \frac{\alpha\Delta t}{2r(\Delta r)} \{T_{i-1,j} - T_{i+1,j}\}^{(t)} \\
&+ \frac{2\alpha\Delta t}{(\Delta h)^2} \{T_{i,j-1} - T_{i,j}\}^{(t)}
\end{aligned}
\tag{Ec.35}$$

4. El centro geométrico caso, cuando ambos r y h son coincidentes en el centro geométrico, ecuación 36.

$$\begin{aligned}
T_{i,j}^{(t+\Delta t)} = T_{i,j}^{(t)} &+ \frac{4\alpha\Delta t}{(\Delta r)^2} \{T_{i-1,j} - T_{i,j}\}^{(t)} \\
&+ \frac{2\alpha\Delta t}{(\Delta h)^2} \{T_{i,j-1} - T_{i,j}\}^{(t)}
\end{aligned}
\tag{Ec.36}$$

Este conjunto de cuatro ecuaciones se puede utilizar para definir una serie de matrices de temperatura con una progresión en el tiempo (Δt). La temperatura de cada nodo en una matriz a un momento dado está relacionada con las condiciones de contorno (temperatura de la lata) y los nodos adyacentes. La gama de temperatura de un conjunto de nodos a la vez, t está relacionado con que un intervalo más adelante, en el momento $= t + \Delta t$. Por lo tanto, es posible calcular la temperatura en cualquier punto nodal dentro de una lata en cualquier momento desde el inicio del proceso térmico de

acuerdo con el cambio de temperatura en la superficie del bote y dentro de la suposiciones hechas aquí.

El ejemplo de modelado utilizado anteriormente describe el efecto del proceso térmico de la temperatura dentro de un producto sencillo, calefacción por conducción dentro de una lata típica. Un enfoque similar se puede usar para modelar otras situaciones para el ajuste de las condiciones de contorno del modelo de cilindro, incluyendo, por ejemplo transferencia de calor a través de la variable el espacio de cabeza dentro de una lata; variaciones en la difusividad térmica dentro de un producto o bien con el tiempo o el espacio, a simular los alimentos reales de múltiples componentes; La influencia del material de envase en la transferencia de calor (por ejemplo, vidrio); una gama más amplia de situaciones puede ser modelada mediante el empleo de otras ecuaciones diferenciales parciales, incluyendo, por ejemplo los efectos de la transferencia de calor por convección y paquete geométrico alternativo incluyendo bolsas planas, latas más cortas o más altas.

2.3.11. Software

Los modelos desarrollados, así como las correlaciones matemáticas para la predicción de las propiedades térmicas de los productos, fueron implementados en un programa computacional, escrito en Visual Basic versión 6.0, ejecutable en cualquier plataforma de operación Windows®. La herramienta utilizada está basada en objetos (Visual) con propiedades y métodos, los cuales se usan para crear la interfaz gráfica de usuario (GUI). En lugar de escribir numerosas líneas de código para describir la apariencia y la ubicación de los elementos de la interfaz, simplemente se

pueden arrastrar y colocar objetos prefabricados en su lugar dentro de la pantalla.

Por otro lado, La palabra “Basic” hace referencia al lenguaje BASIC (Beginners All-Purpose Symbolic Instruction Code), un lenguaje original creado en 1963, utilizado por más programadores que ningún otro lenguaje en la historia de la informática o computación. Visual Basic ha evolucionado a partir del lenguaje BASIC original y ahora contiene centenares de instrucciones, funciones y palabras clave, muchas de las cuales están directamente relacionadas con la interfaz gráfica de Windows (Collinao, 2003).

2.4. Definición de términos básicos

Alimento enlatado

Es un alimento fresco, envasado en recipientes herméticamente cerrados, el cual se somete a un proceso de esterilización o pasteurización, a determinado tiempo y temperatura, para poder conservar el alimento a temperatura ambiente hasta el momento de su consumo. (Amerling, 2001).

Envases de hojalata

Este tipo de envase es el más utilizado para productos en conserva; existen de dos o tres piezas, en diferentes tamaños y formas. La hojalata consiste en una lámina de acero dulce de baja carbonación cuyas dos caras se han cubierto electrolíticamente con una capa de estaño. El calibre de la lámina base varía según el tamaño que han de tener las lata y el uso que se le dará, habitualmente fluctúa entre 0.15 y 0.30 *mm*. Actualmente se fabrican láminas de calibre extra fino, por lo

cual la hoja de acero se somete a dos laminaciones en frío antes de estañarla. (FAO, 2012).

Autoclave.

Una autoclave es un recipiente metálico con cierre hermético. La forma en la que trabaja la autoclave es por medio de alta presión lo que permite que la temperatura del agua exceda el punto de ebullición, originando la coagulación de las proteínas de los microorganismos de los objetos que son depositados en el interior de la autoclave. Al coagular las proteínas esenciales para la vida y la reproducción de los microorganismos estos se destruyen (Cruz, 2014).

Microorganismos Deteriorantes

Son aquellos que alteran el color, olor, sabor y textura de los alimentos. Estos microorganismos no afectan a la salud pública, entre ellos se encuentran bacterias, mohos y levaduras, siendo más importante en el deterioro los dos primeros (FAO, 2007).

Microorganismos Patógenos.

Son seres vivos muy pequeños que se pueden observar microscópicamente, que no causan alteraciones en las características organolépticas, pero pueden ocasionar enfermedades a quienes lo consumen. (FAO, 2007).

Difusividad Térmica

Es una propiedad térmica capaz de determinar las velocidades de transmisión de calor en alimentos sólidos, tales como conducir y su habilidad para almacenar calor. (Martinez, 2012).

Simulador

Es aquel programa que mediante técnicas permite evaluar instantáneamente el efecto de diferentes sistemas y parámetros de un proceso. Actualmente las tecnologías modernas, diversas herramientas de solución aplicables a programas computacionales modernos, permiten el uso de modelos como parte integral de muchos estudios en la Ingeniería de Alimentos. (Domínguez, 2011)

Temperatura

Magnitud física que expresa el grado o nivel de calor o frío de los cuerpos o del ambiente, capaz de determinar si dos sistemas se encuentran o no en el mismo nivel térmico (Godino & Olivia, 2011).

Existen dos categorías en las unidades de medida para la temperatura. Las absolutas las que parten del cero absoluto, que es la temperatura teórica más baja posible, y corresponde al punto en el que las moléculas y los átomos de un sistema tienen la mínima energía térmica posible ($^{\circ}K$) y relativas por que se comparan con un proceso fisicoquímico establecido que siempre se produce a la misma temperatura ($^{\circ}C$) y ($^{\circ}F$) (Pce-Ibérica, 2015).

CAPÍTULO III

CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO

3.1. Tipo y diseño de investigación

Hernández, Fernández y Baptista (2003), establecen cuatro tipos de investigación: exploratorios, descriptivos, correlacionales y explicativos; basándose en la estrategia de investigación que se emplea, ya que al escoger el tipo de investigación determinará los pasos a seguir del estudio, sus técnicas y métodos; además se determina el enfoque de la investigación influyendo en instrumentos y hasta la manera de cómo se analizan los datos recaudados; existen otras maneras de clasificar los tipos de investigación, por el proceso formal, grado de abstracción, grado de generalización, naturaleza de los datos, orientación, manipulación de variables, naturaleza de los objetos tiempo que se efectúan, dimensión cronológica, enfoque, fuentes, naturaleza de la información, lugar, muestra, entre otras (Gobierno Bolivariano de Venezuela, 2008).

3.1.1. Tipo de investigación

Según el tiempo en que se efectúan, esta es una investigación sincrónica, ya que el periodo de investigación de este proyecto tiene un tiempo establecido, ahora según la naturaleza de datos y de la información es una investigación cuantitativa, ya que en la investigación se emplearan el estudio de ciencias.

3.1.2. Diseño de investigación

El diseño se refiere al plan o estrategias concebidas para obtener la información que se desea conocer de tu objeto de estudio. Una vez elegido el tipo y alcance de investigación, planteado el problema y formulada la hipótesis se procede a elegir el diseño, que será el que te permitirá dar respuesta a las preguntas que has planteado y cumplir con los objetivos del estudio. Debes seleccionar un diseño específico ya sea este experimental o no experimental. Si

el diseño está bien estructurado, el producto final de un estudio (sus resultados) tendrá mayores posibilidades de éxito para generar conocimiento Hernández, R., Baptista, P. y Fernández, C. (2010) en Martínez (2013), esta investigación será de tipo experimental en donde se manipulará una variable experimental no comprobada, en condiciones rigurosamente controladas, con el fin de describir de qué modo o por qué causa se produce una situación o acontecimiento en particular. Se trata de un experimento porque precisamente el investigador provoca una situación para introducir determinadas variables de estudio manipuladas por él, para controlar el aumento o disminución de esa variable, y su efecto en las conductas observadas. El investigador maneja deliberadamente la variable experimental y luego observa lo que sucede en situaciones controladas.

3.2. Población y muestra

3.2.1. Población

El tema de investigación titulado “Validación de un simulador de esterilización de alimentos enlatados aplicando el método de diferencias finitas explícitas”, tiene como objeto de estudio las conservas de pescado, en donde se incluye especies industrialmente comercializadas como atún, sardina, bonito, jurel, caballa, etc. En diferentes presentaciones como filete, lomito, sólido, trozos, desmenuzado o grated, medallones, pasta, entre otros; solos o acompañados con verduras, hortalizas o legumbres; según la composición de líquido de gobierno como en su propio jugo, agua, sal, aceite, esencias, pasta o salsa, entre otros; y comercializados en diversos tipos y tamaños de altura y diámetro de los envases en forma circulares, ovals, semiovals y rectangulares, de hojalata o de aluminio.

3.2.2. Muestra

Las pruebas experimentales y posteriores simulaciones se realizaron en dos tipos de conservas, la primera fue conserva de bonito en aceite, agua y sal y la segunda conserva de bonito con mix de verduras (alverjas y zanahorias) en aceite, agua y sal; ambas en envases tipo tuna (307x109) - incoloro exterior / aluminio interior.

3.3. Hipótesis

H_i: A través de la aplicación de un simulador desarrollado por el método de diferencias finitas explícitas, es posible predecir el proceso de esterilización comercial de alimentos enlatados, considerando un porcentaje mínimo de error.

H₀: A través de la aplicación de un simulador desarrollado por el método de diferencias finitas explícitas, el proceso de esterilización comercial de alimentos enlatados se logrará predecir con un porcentaje de error elevado.

3.4. Variables

3.4.1. Variables independientes

Tipo de producto

3.4.2. Variable dependiente

Valor del F₀

3.5. Operacionalización

Tabla 3

Operacionalización de variables en la validación de un simulador de esterilización de alimentos enlatados.

Variables		Dimensiones	Indicadores	Técnicas e instrumentos de recolección de datos
Independiente	Tipo de Producto	Difusividad térmica	m^2/s	Registros de datos Método de Hayakawa
Dependiente	Valor de F_0	Minutos	121°C / 20 minutos	Registros de datos Método General

FUENTE: Elaboración propia.

3.6. Abordaje metodológico, técnicas e instrumentos de recolección de datos.

3.6.1. Abordaje metodológico

Investigación cuasi experimental, enfocada a lograr predecir a través de la simulación el proceso de esterilización de productos enlatados.

3.6.2. Técnicas de recolección de datos

Para hallar la difusividad térmica de alimentos en envases que se asemejen a un cilindro finito se utilizó el método de Hayakawa (Rahman, 1995),

$$\alpha = \frac{0.398}{\left[\frac{1}{R^2} + \frac{0.427}{H^2} \right] f_h} \quad \text{Ec.37}$$

En donde α es difusividad térmica (m^2/s), R es radio del envase (m), H es la mitad de la altura del envase (m) y f_h la pendiente de la recta (s).

El valor de la pendiente de la recta (f_h) se halló mediante el gráfico entre $\log(T_r - T)$ vs t ; en donde T_r es temperatura de referencia, T es temperatura del producto y t es tiempo (min). La ecuación lineal ($y = ax + b$) de ese gráfico permite obtener a para realizar la siguiente operación:

$$f_h = -(1/-a)$$

Los valores de F_0 se determinaron mediante el método general propuesto por Bigelow & Esty (1920).

$$L = 10^{\frac{T-T_r}{Z}} * t$$

En donde L es valor letal y Z es constante de resistencia.

3.6.3. Instrumentos de recolección de datos

Para obtener los datos de difusividad térmica en primer lugar se utilizó el instrumento de registro de datos en donde se recopiló tiempos y temperaturas experimentales de cada uno de los ensayos de los dos tipos de productos, útiles para determinar la pendiente de la recta (f_h) valor letal.

3.7. Procedimiento para la recolección de datos

3.7.1. Elaborar los productos a simular.

Se elaboraron dos productos, conserva de bonito en aceite, agua y sal; y conserva de bonito con zanahoria y alverja en aceite, agua y sal, productos que se encuentra en el mercado, con parámetros establecidos, los cuales fueron tomados en cuenta en el proceso.

La elaboración del producto se realizó cumpliendo los Procedimientos Operativos de Limpieza y Sanitización (SSOP), desinfectando los ambientes, equipos, materiales e indumentaria; y las Buenas Prácticas de Manufactura (BPM) antes, durante y después del proceso, con la finalidad de obtener un producto inocuo al consumidor.

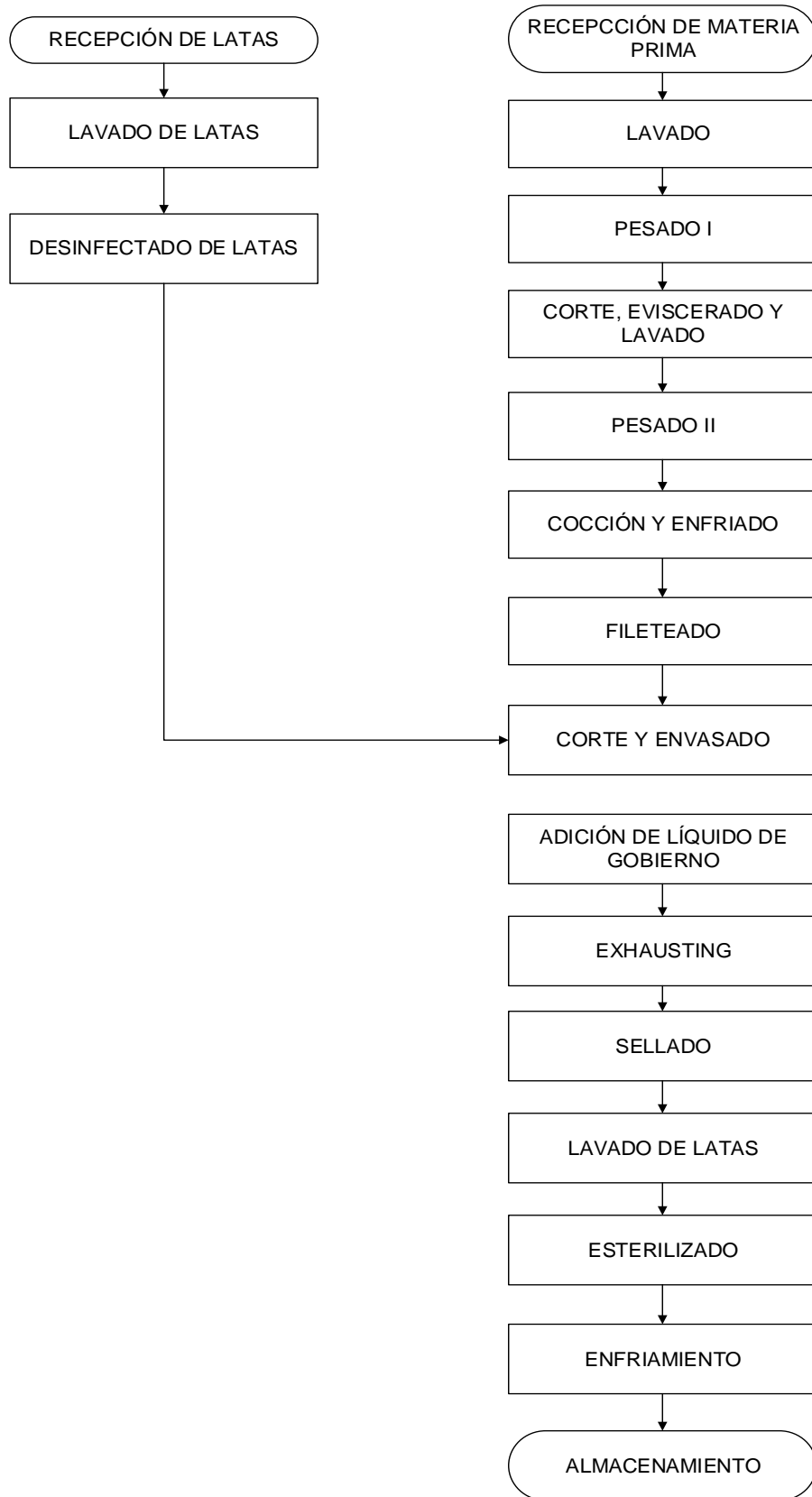


Figura 5: Diagrama de flujo de conserva de bonito en aceite, agua y sal.

Descripción del proceso: conserva de bonito en aceite, agua y sal.

Recepción de la materia prima

Se compró bonito (*Sarda Sarda*) en el terminal pesquero “Ecopinsa” de la caleta Santa Rosa, a los cuales se le realizaron un análisis sensorial para conocer el estado organoléptico de los pescados.

Pesado I

Operación realizada para determinar los pesos y rendimientos, inicio de proceso 16.75 kg.

Corte, Eviscerado y Lavado.

Se realizó un corte sagital, para retirar vísceras y agallas, de ese modo evitar el crecimiento de microorganismos. Luego se lavaron los pescados con agua para retirar cualquier materia extraña.

Pesado II

Se procedió a pesar las vísceras y agallas, el cuál fue de 2.75 kg, obteniéndose un peso neto de 14 kg.

Cocción y enfriado

Una vez limpiado, y eviscerado el pescado se llevó al exhausting para ser cocinado a 100°C a vapor por 30 minutos, con la finalidad de eliminar microorganismos y coagular la proteína (miocina) del pescado; No hay ningún tiempo

estimado, depende siempre del tamaño y la grasa del pescado. Los tiempos de cocción es una tarea muy delicada, un exceso de cocción deja el pescado seco y poco jugoso, así como una pérdida de rendimiento.

Después se retiran del exhausting con la ayuda de una espátula para enfriarlos a temperatura ambiente.

Fileteado

Luego de haber enfriado los pescados, se procedió a retirar la piel, esqueleto y partes no magras, con mucho cuidado de no maltratar el producto para obtener trozos de pescado con características que confieren buena presentación del producto.

Corte y envasado

Se realizó un trozado de acuerdo al peso y tamaño de la lata para luego ser envasado y pesado en latas previamente lavadas y desinfectadas al 10 ppm, cada lata contenía un promedio de 110 g.

Adición de líquido de gobierno

Para 75 envases se realizó un líquido de gobierno en aceite, pimienta, agua y sal, en un total de 60 g / lata (ver Tabla 4), y se vertió entre los 70°C a 80°C.

Evacuado

Consistió en pasar los envases por el exhaustor para eliminar la presencia de oxígeno y elevar la temperatura del producto importante para el inicio del tratamiento térmico.

Sellado

Los envases son sellados inmediatamente después de salir del exhaustor, con la selladora semiautomática de pedal. Operación importante para asegurar la inocuidad del producto, un mal sellado será una fuente para la proliferación de microorganismos.

Lavado de latas

Consiste en lavar las latas con agua y detergente para retirar residuos de líquido de gobierno.

Esterilizado

Se llevó los envases a la autoclave, en donde se sometió a tratamiento térmico a 121°C por 23 minutos, con la finalidad de reducir la carga microbiana para obtener un producto inocuo (en un 90% de la carga inicial).

Enfriamiento

Después de la esterilización se realizó una inmersión de los envases en agua a temperatura ambiente, hasta enfriar a los 40°C, evitando la cocción excesiva y la incubación de microorganismos termófilos.

Secado de las latas

Consiste en dejar escurrir los envases y con una franela se secó cada uno de ellos con la finalidad de evitar la corrosión de los envases.

Almacenamiento

Es importante inspeccionar los envases antes de su consumo, por ende se dejará en cuarentena para verificar la calidad, en caso se presente defectos como abombamiento o filtración de líquidos.

Tabla 4

Formulación de líquido de gobierno para una conserva de bonito

LÍQUIDO DE GOBIERNO	PESO /LATA (g)	PESO TOTAL	PORCENTAJE
ACEITE	18	810.00	30%
AGUA	40.05	1802.25	66.75%
PIMIENTA	0.15	7	0.25%
SAL	1.8	81	3%
TOTAL	60	2700.00	100%

FUENTE: Elaboración propia.

Para la elaboración de conserva de bonito en aceite, agua y sal se realizó siguiendo las proporciones de la Tabla 5.

Tabla 5

Formulación de una conserva de bonito en aceite, agua y sal.

MATERIAS PRIMAS	PESO (g)	PORCENTAJE
Bonito	110	64.71%
Líqu. Gobierno	60	35.29%
TOTAL	170	100%

FUENTE: Elaboración propia.

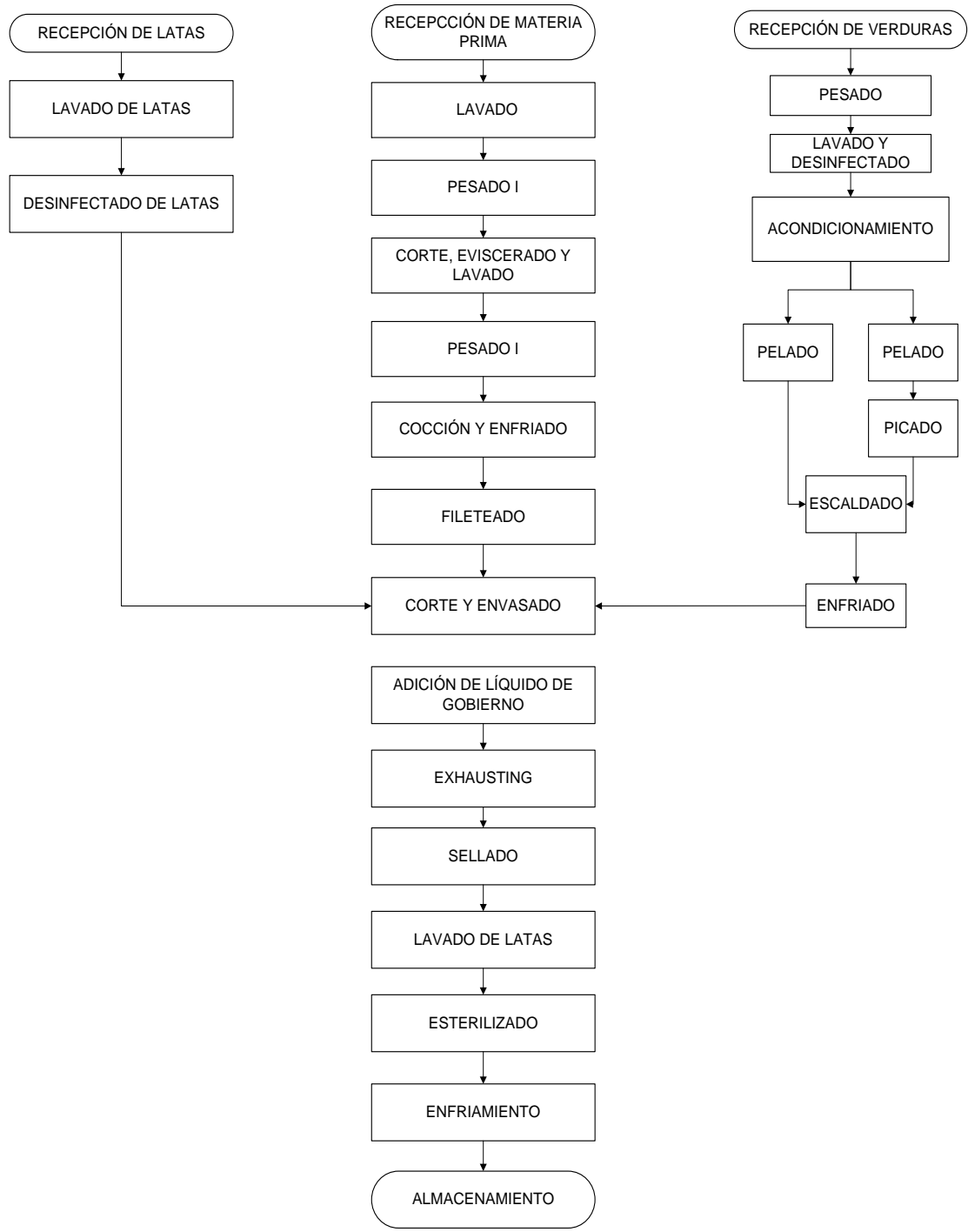


Figura 6: Diagrama de flujo de conserva de bonito con alverja y zanahoria en aceite, agua y sal.

Descripción del proceso: conserva de bonito con mix de verduras en aceite, agua y sal.

Para la elaboración de este producto se procedió a seguir las mismas etapas de la conserva de bonito en aceite, agua y sal, con la inclusión del mix de verduras (alverjas y zanahorias) y la disminución de la proporción de bonito (*Sarda Sarda*). Por lo cual se detalla el acondicionamiento de las verduras

Recepción de las materias primas

Se compraron 2.15 kg de alverjas y 4.7 kg de zanahoria, a las cuales se les realizaron un análisis sensorial.

Pelado y cortado

En esta etapa se desvainó la alverja obteniendo 1.25 kg de descarte; y a la zanahoria se peló y cortó en cuadraditos, con 1.08 kg de descarte.

Lavado y desinfección

Consistió en lavar las verduras y desinfectarlas con hipoclorito de sodio (*NaClO*) a 10 ppm, para disminuir la carga microbiana.

Escaldado

Se sumergió las verduras en agua hirviendo por cinco minutos con la finalidad de inactivar enzimas que podrían deteriorar a la materia prima y reducir la carga microbiana inicial mediante la inactivación de microorganismos sensibles al calor como hongos y levaduras.

Almacenamiento

Esta etapa consistió en dejar reposar las verduras en agua con hielo a temperatura de 8 a 10 °c, hasta su posterior envasado.

Las proporciones que fueron colocados en cada envase de este tipo de producto se describen en la Tabla 6.

Tabla 6

Formulación de la conserva de bonito con mix de verduras en aceite, agua y sal.

MATERIAS PRIMAS	PESO	PORCENTAJE
Bonito	50	29.41%
Mix verduras	60	35.29%
Líqu. Gobierno	60	35.29%
TOTAL	170	100%

FUENTE: Elaboración propia.

3.7.2. Elaborar las curvas de penetración de calor

Se determinó el punto más frío de la lata y la temperatura de autoclave, haciendo un estudio de penetración de calor, donde se realizó un total de seis corridas experimentales, tres para cada producto, 25 latas por prueba; las temperaturas fueron medidas con el equipo *Ellab*, cuenta con tres sensores alámbricos calibrados por Metroill año 2014; el Instituto de Especialistas en Procesos Térmicos sugiere realizar tres pruebas experimentales por producto y trabajar con un mínimo de 10 sensores para un estudio de penetración de calor en procesos industriales.

El desarrollo de esta investigación tuvo un alcance piloto, trabajando con dos sensores; acorde a que estamos trabajando con un producto de transferencia de calor por conducción, se colocó un

sensor en el punto más frío del producto, ubicado en el centro geométrico del envase, determinado por un vernier, altura: 0.04 m y diámetro: 0.084 m y el otro distribuido en la autoclave para determinar la temperatura de retorta. Se registró tiempos y temperaturas en intervalos de 1 minuto, para realizar las curvas.

3.7.3. Determinar el valor de esterilización por el método general

Luego de determinar el registro de tiempo y temperatura del punto más frío de la conserva y retorta, se procedió a calcular el valor letal del proceso térmico de las corridas experimentales, mediante la fórmula del método general, ecuación 08.

3.7.4. Determinar la difusividad térmica

Las curvas de penetración de calor permitieron determinar la pendiente de la recta, importante para reemplazar en la ecuación 37 (Uno & Hayakawa, 1980) en (Rahman, 1995).

$$\alpha = \frac{0.398}{\left[\frac{1}{R^2} + \frac{0.427}{H^2} \right] f_h} \quad \text{Ec.37}$$

3.7.5. Programar y simular en el Visual Basic

Se diseñó el software mediante una malla 5 x 5 en el eje axial y radial, constituido en total por 25 nodos como se aprecia en la figura 7, asumiendo que la resistencia superficial es despreciable, el calor se transfiere en el interior de la lata por conducción y la difusividad térmica es constante. Posteriormente se simuló resolviendo las ecuaciones de transferencia de calor por conducción por el método de diferencias finitas explícitas. (Ver en anexos código Basic).

Programándose en el ordenador la solución de la ecuación 28 del cilindro finito por el método de diferencias finitas explícitas, ecuaciones 33, 34, 35 y 36; nodo interior, nodo vertical, nodo horizontal y nodo central respectivamente en el Visual Basic® 6.0 de Excel.

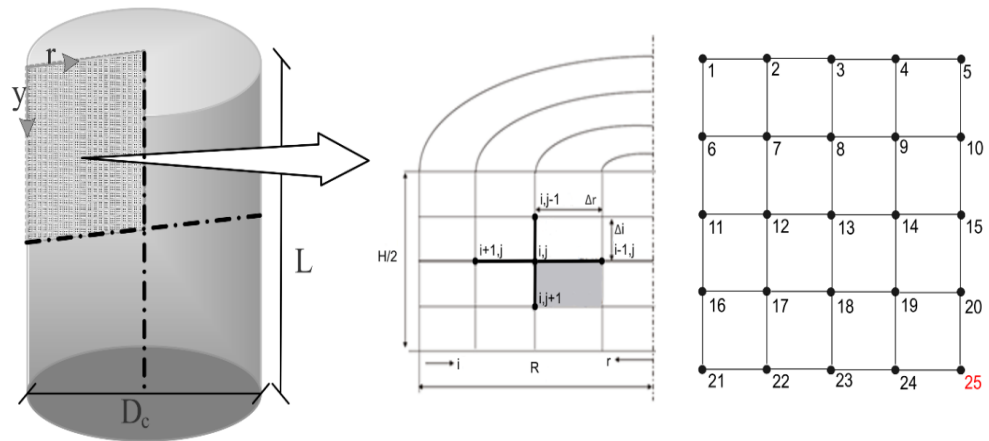


Figura 7: Sección del envase en donde se indica el eje radial, axial y red nodal.

El registro de tiempos y temperaturas de retorta experimentales del producto se ingresaron al simulador, además de ciertos datos como se aprecia en la figura 8.

Introducir valores			
Temperatura inicial de la lata	To=	34.5	°C
Temperatura de referencia	TR=	121.1	°C
z-value	z=	10	°C
Difusividad térmica	α =	1.63E-07	m ² /s
Altura de la lata	L=	0.04	m
Diámetro de la lata	D _c =	0.084	m
Variación de tiempo	Δt =	1	min
Numero de puntos a plotear	n=	82	

Figura 8: Valores solicitados por el simulador.

3.7.6. Validar

Se comparó el F_0 simulado y experimental en IBM SPSS Statistics 22 mediante la prueba t student para muestras independientes, en donde se comparó las medias, para saber si existen o no diferencias significativas entre ambos resultados, el cuál debe ser mayor a 0.05 para que no haya diferencia y sea validado.

3.8. Análisis estadístico e interpretación de los datos

Se utilizó la prueba t student para muestras independientes para comparar las medias de dos grupos de casos, es decir, cuando la comparación se realice entre las medias de dos poblaciones independientes (los individuos de una de las poblaciones son distintos a los individuos de la otra).

La variable de prueba fueron los valores F_0 y la variable de agrupación fueron los datos experimentales y simulados, se realizó para cada producto.

Para esta comparación de medias se realizó previamente la Prueba de Levene que se origina por defecto en la prueba t. García , González & Jornet (2010) mencionan que su misión es estudiar la varianza de la medias, la prueba t arroja dos resultados, en función de si las varianzas son iguales o no, si la significación de la prueba de Levene es <0.05 , existen diferencias entre varianzas, por lo que elegiríamos el resultado de la prueba t indicado como No se han asumido varianzas iguales; y si es superior se elegirá la primera fila, Se han asumido varianzas iguales.

En la prueba t se observó la significancia bilateral según la fila correspondiente de datos a interpretar, si esta es superior a 0,05 se puede afirmar que no hay diferencias significativas entre ambos valores letales;

esto se respalda observando el intervalo de confianza para la diferencia, que se debe estar incluido el 0 (la diferencia entre las medias puede ser igual a 0).

Además se interpretará en diagrama de cajas, que es una representación visual de un conjunto de datos, donde se halla un rectángulo, el cual figura los cuartiles y rectas a los extremos que figuran los valores mínimos y máximos de valores letales donde se muestra, se apreciará si los valores se encuentran dispersos.

3.9. Principios éticos

Código ético de aplicación.

Los datos experimentales obtenidos en esta investigación podrán ser utilizados como referencia para estudios similares.

El beneficio a la humanidad.

Al ser validado el simulador de alimentos alimentados, los consumidores tendrán alimentos con mayor retención de nutrientes además que se evitará las ETAs (Enfermedades Transmitidas por alimentos). Por estas razones los datos obtenidos deberán ser verídicos.

Ética de la publicación.

En esta investigación se respetará los derechos de autor, por lo tanto nuestros resultados se utilizarán como antecedentes para trabajos posteriores.

3.10. Criterios de rigor científico

Fiabilidad

En esta investigación los resultados obtenidos serán verdaderos, ya que se actuará con honestidad en la recolección de los datos experimentales.

Validez

Las variables que se estudiarán serán válidas, relevantes y contemplarán los requisitos de investigación científica.

Replicabilidad

El tema de investigación se podrá aplicar en otra investigación de igual magnitud, ya que tendrá capacidad de reproducción en diferentes escenarios.

CAPÍTULO IV

CAPÍTULO IV: ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

4.1. Resultados en tablas y gráficos

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

Las curvas de penetración de calor en la conserva de bonito en aceite, agua y sal de las tres repeticiones se analizaron mediante una curva promedio como se muestra en la figura 9.

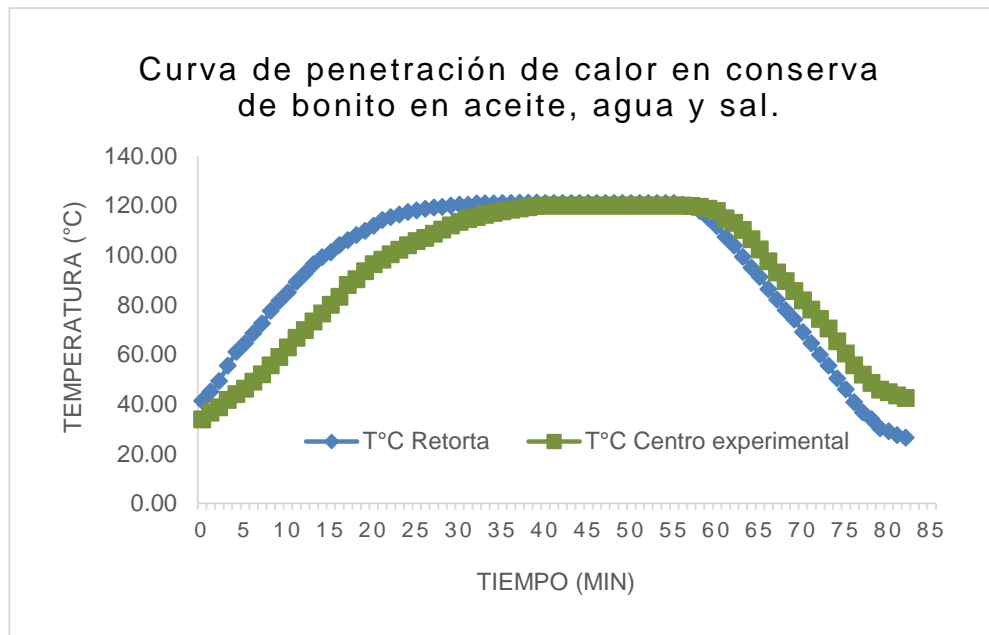


Figura 9: Temperatura vs tiempo promedio del tratamiento térmico de la conserva de bonito en aceite, agua y sal.

En esta curva promedio del proceso se observa que la temperatura de la retorta asciende más rápido con respecto a la temperatura del centro del producto, llegando a la temperatura del tratamiento (121°C) antes que la temperatura del centro del producto; además cuando la retorta da inicio al enfriamiento sucede lo inverso a la etapa de calentamiento, es decir la temperatura de la retorta desciende rápidamente para que el producto se enfríe.

Las curvas de penetración de calor en la conserva de bonito con alverja y zanahoria en aceite, agua y sal de las tres repeticiones se analizaron mediante una curva promedio como se muestra en la figura 10.

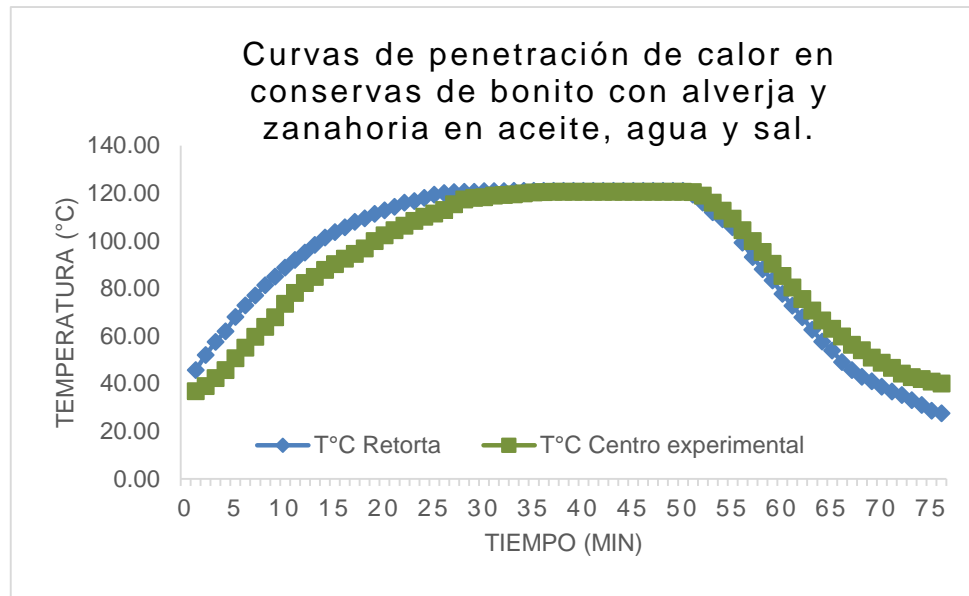


Figura 10: Temperatura vs tiempo promedio del tratamiento térmico de la conserva de bonito con alverja y zanahoria en aceite, agua y sal.

En esta 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 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 la temperatura de retorta como la del centro térmico realizan en forma simultánea el enfriamiento.

4.1.2. Cálculo del factor de la pendiente de la recta de las conservas.

Para obtener experimentalmente los valores de difusividad térmica mediante el método de Hayakawa, se debe conocer primero el valor de la pendiente de la recta en la etapa de calentamiento de los productos; por lo tanto se realizó gráficos en donde se realizó un versus entre $\text{Log}(T_r - T_p)$ y *tiempo* (min).

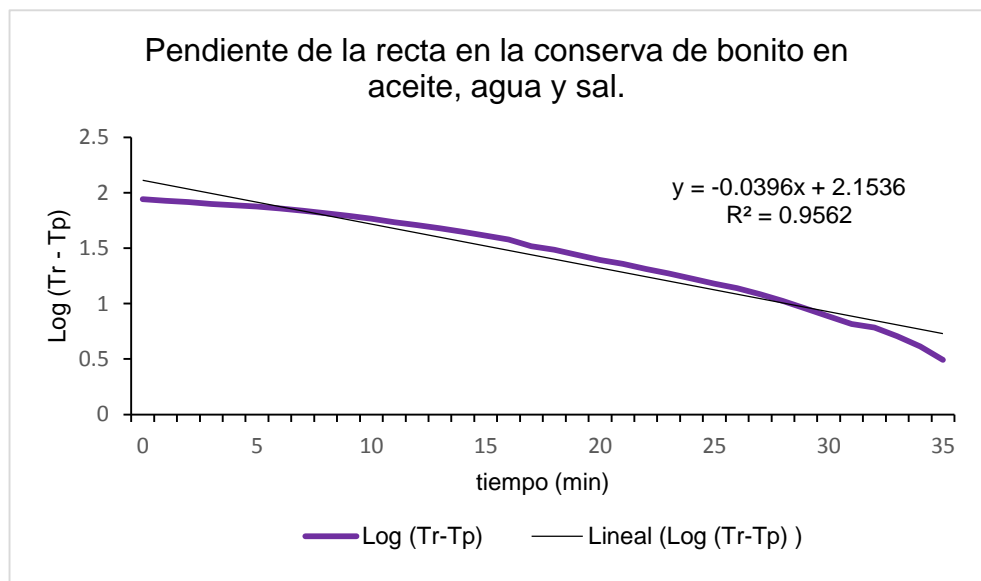


Figura 11: $\text{Log}(T_r - T_p)$ vs *tiempo*, de la conserva de bonito en aceite, agua y sal.

En la figura 11 se observa la representación del logaritmo promedio de la diferencia entre la temperatura de referencia (121.1°C) y la del producto, opuesta al tiempo del proceso; a la rama descendente de esta curva se le ajusta una recta, cuyo valor inverso de la pendiente será el valor f_h que se muestra en la tabla 7, además los valores calculados para la línea de tendencia tienen proximidad ($R^2 = 0.9562$, cercano a 1) a los datos reales; el valor a que acompaña a la variable x en la ecuación es -0.0396 y el tiempo que demoró la conserva de bonito en aceite, agua y sal, en llegar a la temperatura de tratamiento fue de 35 minutos.

Se halló el factor de la pendiente de la recta promedio de la curva de calentamiento de la conserva de bonito en aceite, agua y sal, mediante la siguiente fórmula:

$$f_h = |1/-a|$$

Donde f_h es factor de la pendiente de la recta, a es el valor que acompaña a la variable x en la ecuación de la recta (línea de tendencia), reemplazando:

$$f_h = |1/-0.0396|$$

$$f_h = 25.25 \text{ min}$$

Luego el valor del f_h (s) se reemplazó en la ecuación de la difusividad térmica para un cilindro finito, en donde radio (R) y semi altura (H), se encuentra en metros.

$$\alpha = \frac{0.398}{\left[\frac{1}{R^2} + \frac{0.427}{H^2}\right] f_h}$$

$$\alpha = \frac{0.398}{\left[\frac{1}{(0.042 \text{ m})^2} + \frac{0.427}{(0.02 \text{ m})^2}\right] * (25.25 \text{ min} * \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}})}$$

$$\alpha = 1.607 * 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$$

Por lo tanto el valor promedio de la difusividad térmica experimental en la conserva de bonito en aceite, agua y sal es de $1.607 * 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$.

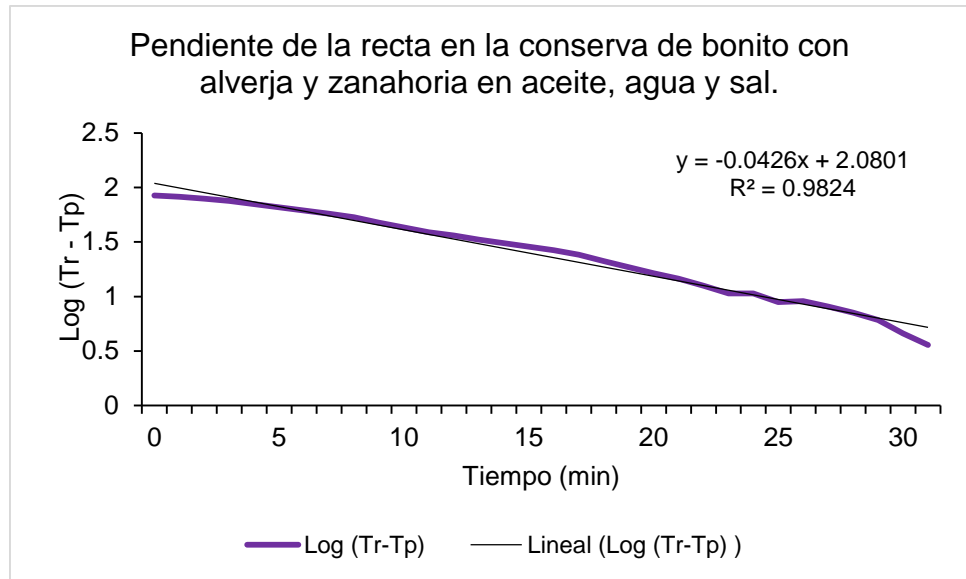


Figura 12: $\text{Log } (T_r - T_p)$ vs *tiempo*, del primer ensayo de la conserva de bonito con alverja y zanahoria en aceite, agua y sal.

En la figura 12 se observa que los valores calculados para la línea de tendencia para este producto se tiene más proximidad ($R^2 = 0.9824$, cercanos a 1) a los datos promedios del $\text{Log } (T_r - T_p)$, a diferencia de las conservas de bonito en aceite, agua y sal; el valor a que acompaña a la variable x en la ecuación es -0.0426 y el tiempo que demoró la conserva de bonito con alverja y zanahoria en aceite, agua y sal, en llegar a la temperatura de tratamiento fue de 31 minutos.

Se halló el factor de la pendiente de la recta promedio de la curva de calentamiento de la conserva de bonito con zanahoria y alverjas en aceite, agua y sal, mediante la fórmula:

$$f_h = |1 / -a|$$

Reemplazando:

$$f_h = |1 / -0.0426|$$

$$f_h = 23.47 \text{ min}$$

Luego el valor del f_h (s) se reemplazó en la ecuación de la difusividad térmica para un cilindro finito.

$$\alpha = \frac{0.398}{\left[\frac{1}{R^2} + \frac{0.427}{H^2} \right] f_h}$$

$$\alpha = \frac{0.398}{\left[\frac{1}{(0.042 \text{ m})^2} + \frac{0.427}{(0.02 \text{ m})^2} \right] * (23.47 \text{ min} * \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}})}$$

$$\alpha = 1.729 * 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$$

Por lo tanto el valor promedio de la difusividad térmica experimental en la conserva de bonito con alverja y zanahoria en aceite, agua y sal es de $1.729 * 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$.

4.1.3. Curvas experimentales y simuladas del punto más frío de las conservas.

Las curvas promedio del centro térmico del producto experimental y simulado para la conserva de bonito en aceite, agua y sal se observan en la figura 13.

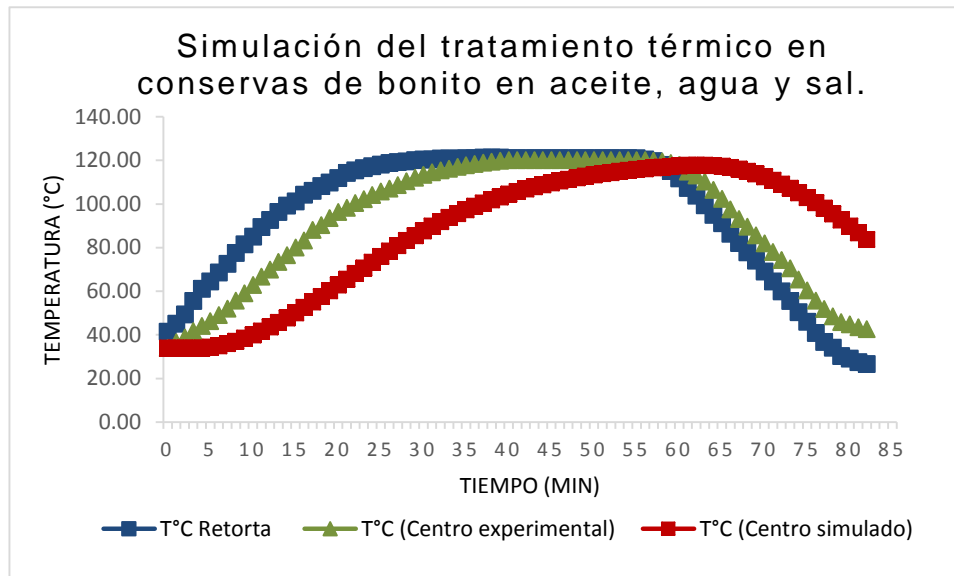


Figura 13: Curvas de penetración de calor de la retorta, centro térmico experimental y simulado.

En la comparación de estas curvas se observa que la del centro térmico experimental no presenta el mismo comportamiento que el simulado; la curva simulada realiza un calentamiento lento respecto a la temperatura experimental de la retorta, no llegando a la temperatura de tratamiento (121.1°C) en el tiempo que se realiza en lo experimental; en el enfriamiento realiza un descenso lento en comparación con la retorta y centro térmico experimental.

Las comparaciones de las curvas promedio del centro térmico del producto experimental y simulado para la conserva de bonito con alverja y zanahoria en aceite, agua y sal se observan en la figura 14.

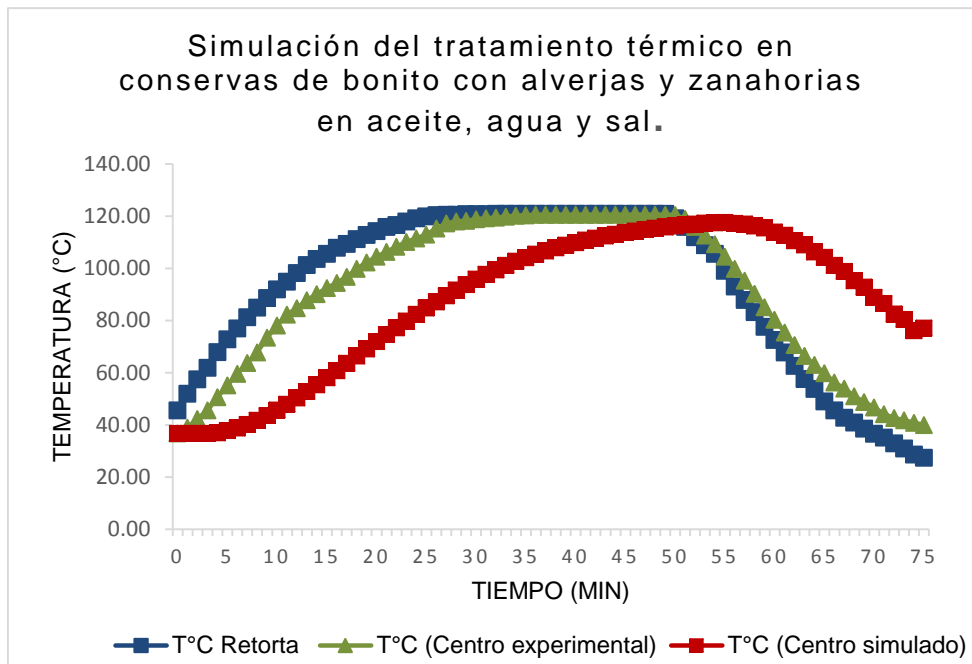


Figura 14: Curvas de penetración de calor de la retorta, centro térmico experimental y simulado.

En esta comparación de curvas se observa que la del centro térmico experimental no presenta el mismo comportamiento que el simulado; la curva simulada realiza un calentamiento lento respecto a la temperatura experimental de la retorta, no llegando a la temperatura de tratamiento (121.1°C) en el tiempo que se realiza en lo experimental; similares al comportamiento de la conserva de bonito en aceite, agua y sal pero difiere en el enfriamiento ya que realiza un descenso más lento en comparación con la retorta.

4.1.4. Cálculo de letalidades experimentales de las conservas.

Los valores letales experimentales se obtuvieron con el registro de tiempos y temperaturas promedios; mediante el método general que consiste en la integración gráfica o numérica de la ecuación 09. Luego se representa estos valores frente al tiempo; para calcular el valor letal F_0 se utilizó el sistema propuesto por Patashnik (1953), que es el más usado adaptando intervalos de tiempo a 1 minuto y sumando los valores de coeficiente de letalidad calculados para las temperaturas correspondientes en estos intervalos de tiempo.

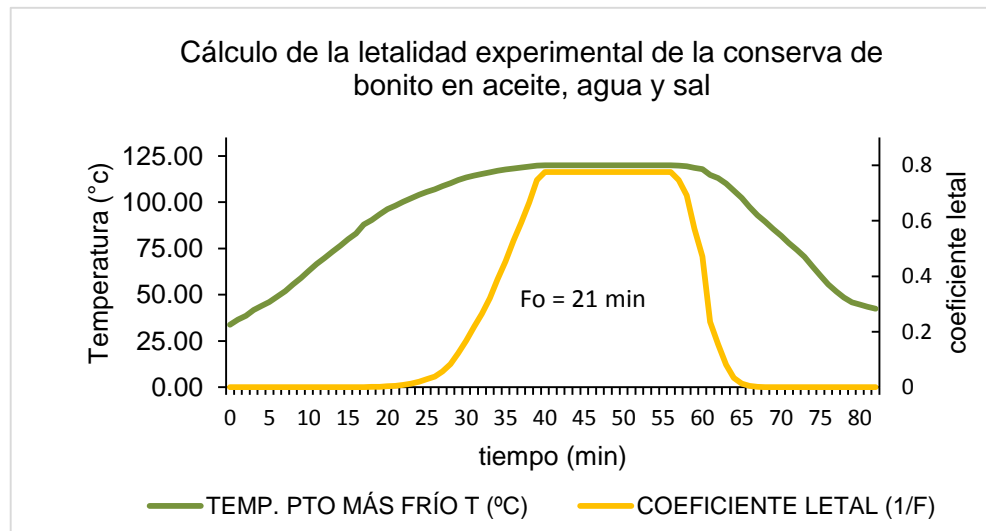


Figura 15: Curvas temperatura del punto más frío y coeficiente letal.

En la figura 15 se observa que a cada pareja de tiempo y temperatura le corresponde un valor de coeficiente letal (velocidad letal), el valor de letalidad promedio se encuentra en el área bajo de la curva, que para la conserva de bonito en aceite, agua y sal es 21 min, tiempo que es igual a la muerte térmica de esporas termoresistentes del *Clostridium botulinum*, para estas condiciones de proceso.

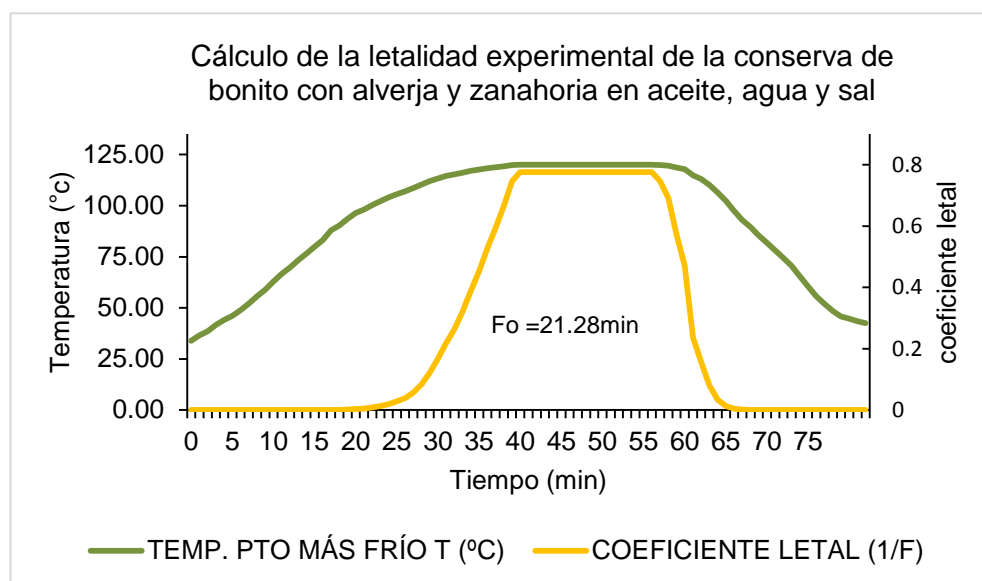


Figura 16: Curvas temperatura del punto más frío y coeficiente letal.

En la figura 16 se observa que la curva de velocidad letal tiene el mismo comportamiento que la conserva de bonito en aceite, agua y sal, el valor de letalidad promedio que se encuentra en el área bajo de la curva, para 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.

4.1.5. Cálculo de letalidades de las conservas mediante el simulador

En el simulador se ingresaron las condiciones como temperatura inicial del centro térmico de la lata, valor z , radio del envase, altura del envase, temperatura de referencia, números a plotear, algunas de éstas obtenidas por las curvas de penetración de calor mediante el registro de tiempos y temperaturas promedio de cada uno de los productos.

Curva del centro térmico simulado de una conserva de bonito en aceite, agua y sal.

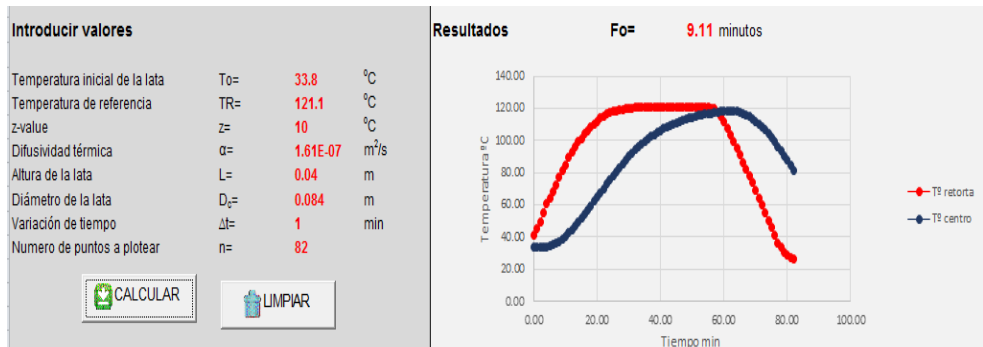


Figura 17: Comportamiento del calentamiento de la conserva de bonito en aceite, agua y sal en el simulador.

En la figura 17 se observa la simulación de la curva de penetración del calor en la conserva de bonito en aceite, agua y sal, con un valor letal promedio de 9.11 minutos.

Curva del centro térmico simulado de una conserva de bonito con alverja y zanahoria en aceite, agua y sal.

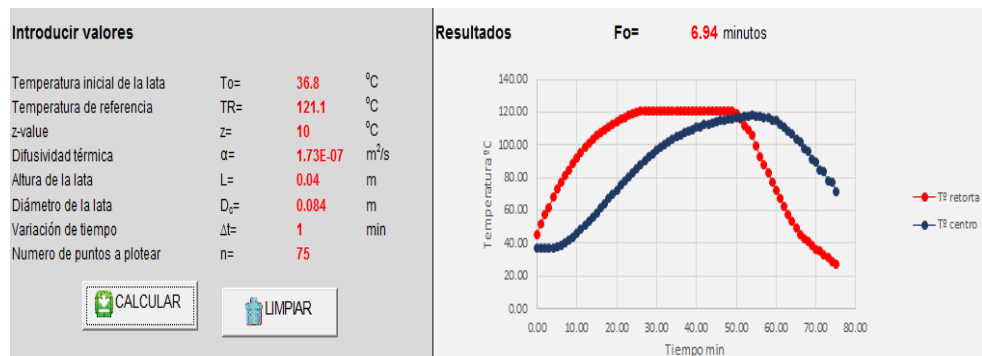


Figura 18: Comportamiento del calentamiento de la conserva de bonito con alverja y zanahoria en aceite, agua y sal en el simulador.

En la figura 18 se observa la simulación de la curva de penetración del calor en la conserva de bonito con alverja y zanahoria en aceite, agua y sal, con un valor letal promedio de 6.94 minutos.

Los valores de letalidad promedio obtenidos experimentalmente por el método general, utilizando además el sistema de Patashnik y los valores letales simulados mediante la programación de las soluciones de las ecuaciones de transferencia de calor por conducción, por el método de diferencias finitas explícitas, se resumen en la tabla 7.

Tabla 7

Valores promedio de letalidad experimental y simuladas de las conservas.

Conservas	Valores promedio	
	Fo Experimental (min)	Fo Simulado (min)
Bonito en aceite, agua y sal.	20.94	9.11
Bonito con alverja y zanahoria en aceite, agua y sal.	21.28	6.94

Fuente: Elaboración Propia.

4.1.6. Comparación de los valores letales promedio experimentales y simulados.

Los valores letales promedio experimentales y simulados comparados mediante la prueba t student en el IBM SPSS Statistics 22, para muestras independientes, de cada uno de las conservas se muestran en las siguientes tablas y gráficos.

Prueba T para la conserva de bonito en aceite, agua y sal.

Tabla 8

Datos estadísticos para la conserva de pescado en aceite, agua y sal.

	Pruebas	N	Media	Desviación estándar	Media de error estándar
Fo	Experimental	3	21,3567	1,55388	,89713
	Simulado	3	7,9700	1,60084	,92425

Fuente: IBM SPSS Statistics 22

Tabla 9

Prueba de muestras independientes para la conserva de pescado en aceite, agua y sal.

		Fo	
		Se sumen varianzas iguales	No se asumen varianzas iguales
Prueba de Levene	F	,003	
	Sig.	,957	
Prueba t para la igualdad de medias	t	10,393	10,393
	gl	4	3,996
	Sig (bilateral)	,000	,000
	Diferencia de medias	13,38667	13,38667
	Diferencia de error estándar	1,28805	1,28805
	95% de I.C. de la diferencia	Inferior Superior	9,81046 16,96287

Fuente: IBM SPSS Statistics 22, Elaboración propia.

En la tabla 9 se muestra la prueba de Levene en donde el supuesto de homogeneidad de varianzas indica que se cumple en estos ensayos ($F = 0,003$; $p > 0,05$), por ende se interpretan los datos de la primera fila. La prueba t para muestras independientes nos indica que si hay diferencias significativas entre las medias de los F_0 experimentales y simulados ($t = 10,393$; grados de libertad = 4; $p < 0,05$).

Diagrama de cajas

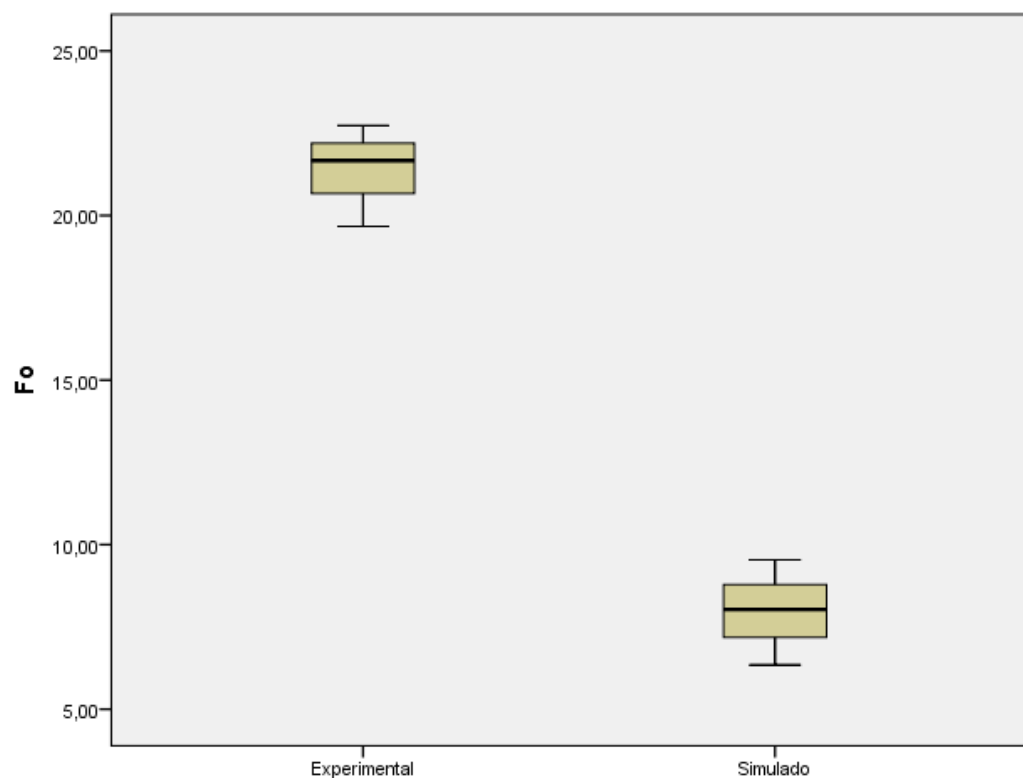


Figura 19: Diagrama de cajas para valores letales experimentales y simulados de las conservas de bonito en aceite, agua y sal.

En la figura 19 se observa que sí existen diferencias significativas entre los valores letales experimentales y simulados de la conserva de bonito en aceite, agua y sal, debido a que las cajas se encuentran muy alejadas.

Prueba T de Student para la conserva de bonito con alverja y zanahoria en aceite, agua y sal

Tabla 10

Datos estadísticos para la conserva de bonito con alverja y zanahoria en aceite, agua y sal.

	Pruebas	N	Media	Desviación estándar	Media de error estándar
Fo	Experimental	3	22,7267	1,04577	,60378
	Simulado	3	6,9800	,85504	,49366

Fuente: IBM SPSS Statistics 22

Tabla 11

Prueba de muestras independientes para la conserva de pescado con alverja y zanahoria en aceite, agua y sal

			Fo	Fo
			Se sumen varianzas iguales	No se asumen varianzas iguales
Prueba de Levene	F		,152	
	Sig.		,717	
	t		20,191	20,191
	gl		4	3,848
Prueba t para la igualdad de medias	Sig (bilateral)		,000	,000
	Diferencia de medias		15,74667	15,74667
	Diferencia de error Estándar		,77990	,77990
	95% de I.C. de la diferencia	Inferior	13,58132	13,54719
	Superior	17,91202	17,94615	

Fuente: IBM SPSS Statistics 22, Elaboración propia.

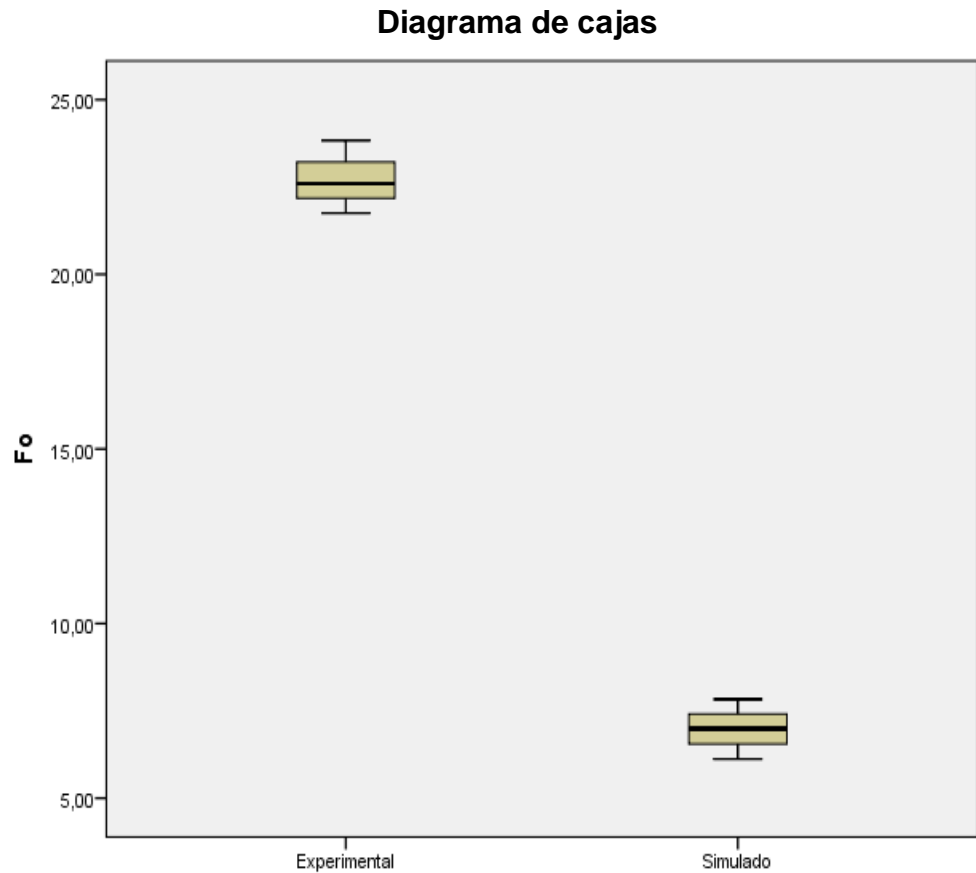


Figura 20: Diagrama de cajas para valores letales experimentales y simulados de las conservas de bonito con alverjas y zanahorias en aceite, agua y sal.

En la figura 20 se observa que sí existen diferencias significativas entre los valores letales experimentales y simulados de la conserva de bonito con alverja y zanahoria en aceite, agua y sal, debido a que las cajas se encuentran muy alejadas. Los valores experimentales están más dispersos respecto a los valores simulados por la altura de las cajas.

4.2. Discusión de resultados

La curva de penetración de calor del promedio del registros de tiempos y temperaturas para los dos productos presentan un comportamiento similar, según Shafiur & 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.

La difusividad térmica promedio obtenida de los registros de tiempo y temperatura de la conserva de bonito en aceite, agua y sal es $1.607 \cdot 10^{-7}$ m²/s, Singh y Heldman (1998) mencionaron que a 65°C con 81% en peso de contenido de agua la difusividad térmica es $1.42 \cdot 10^{-7}$ m²/s, mientras que Shafiur & Said, (2009) mencionan un valor de $1.5 \cdot 10^{-7}$ m²/s a 120°C, valor que es similar al obtenido al promedio de los tres ensayos experimentales $1.52 \cdot 10^{-7}$ m²/s (ver anexo Tabla 18). Mientras la difusividad térmica promedio de la conserva de bonito con alverja y zanahoria en aceite, agua y sal es $1.729 \cdot 10^{-7}$ m²/s, Singh y Heldman (1998) mencionaron que la difusividad térmica de la judías cocidas de 4 a 122°C es $1.68 \cdot 10^{-7}$ m²/s valor que coincide con el promedio de las tres pruebas experimentales $1,69 \cdot 10^{-7}$ m²/s (ver anexo Tabla 18).

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 & Abril (2003) este carbohidrato de reserva es sensible al calor en medio acuoso, transformándose en una masa, red de polímeros lineales que se enriquece en agua y que puede lograr 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 botulinium*, 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 a que según Teixeira & Shoemaker, (1989), afirman 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 & Abril, (2003) se muestra en la figura 21.

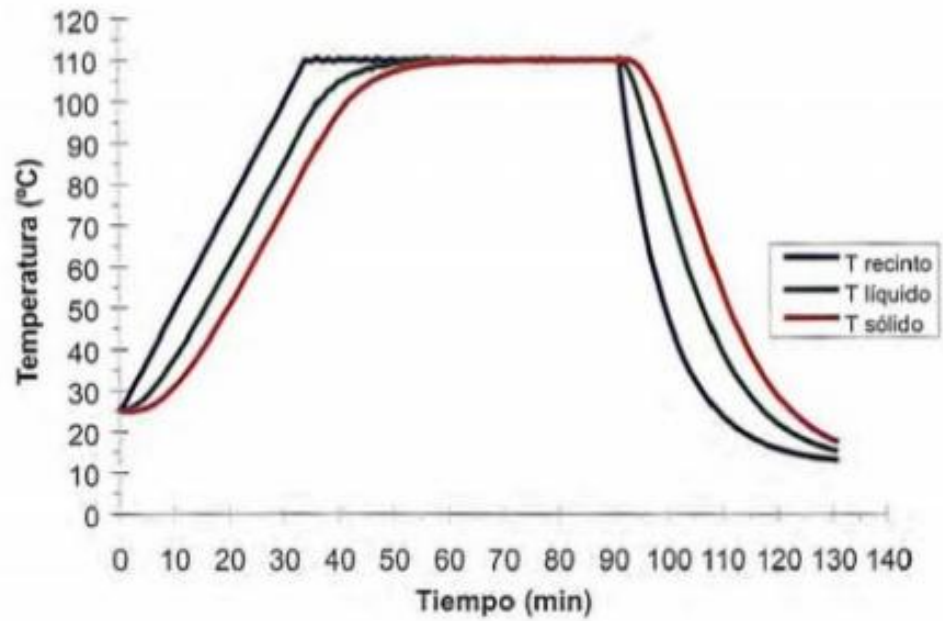


Figura 21: Simulación de las curvas de penetración de calor en el caso de un producto sólido envasado en líquido de gobierno.

Como se observa en la figura 21, esta representación es similar al comportamiento de las curvas experimentales en la conserva de bonito en aceite, agua y sal y conserva de bonito con alverja y zanahoria en aceite, agua y sal.

CAPÍTULO V

CAPÍTULO V: PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN

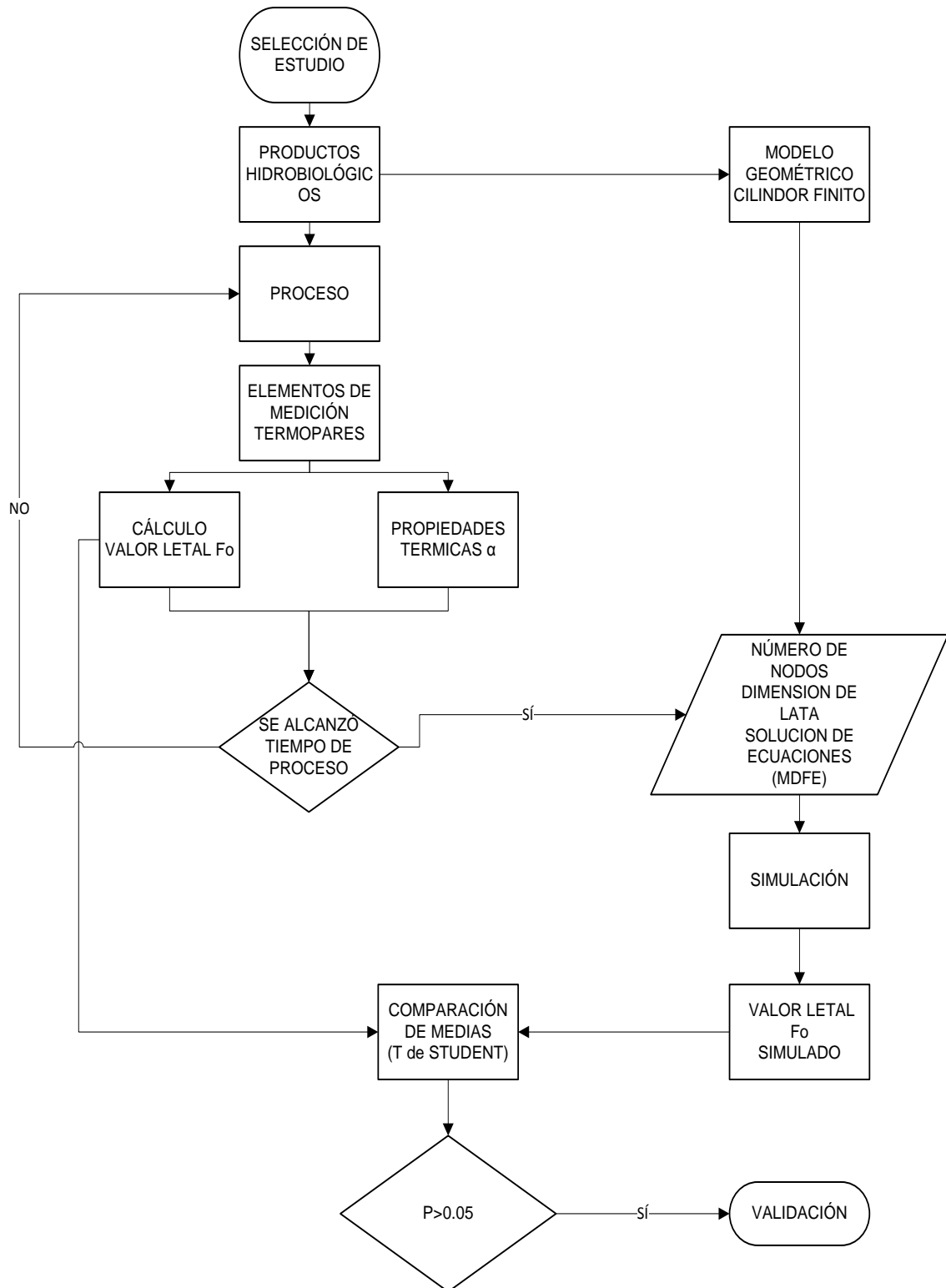


Figura 22: Diagrama de la validación de valores letales experimentales y simulados mediante la prueba t student.

CAPÍTULO VI

CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

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%.

Los rendimientos en la etapa de desvainado de alverjas y pelado de zanahorias son de 42% y 77% respectivamente.

El valor de la pendiente promedio de la recta en la conserva de bonito en aceite, agua y sal es de 25.25 min y en la conserva de bonito con alverja y zanahoria en aceite, agua y sal es de 23.47.

La difusividad térmica promedio 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 $1.607 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ y $1.729 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ 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.

6.2. Recomendaciones

Se tendrá en cuenta para las siguientes investigaciones acondicionar el sensor antes del envasado para no perder la hermeticidad y tener un registro de temperaturas en tiempos reales.

Si desea trabajar con productos en líquido de gobierno se tendrá que acondicionar de forma que el producto sea lo más compacto posible formando un sólido y con la mínima cantidad de líquido, además de que el sensor se ingrese en la parte sólida y tratar en lo posible que no le cubra la parte acuosa.

Realizar investigaciones en tratamientos térmicos, en diseño. Modelamiento y simulación con otros métodos numéricos más complejos, para predecir con exactitud los tiempos y temperaturas óptimas.

Referencias

- Abril Requena, J., & Gómez Ochoa de Alda, J. J. (Setiembre de 2004). *Acyja*. Recuperado el 26 de Mayo de 2016, de Acyja: http://www.acyja.com/documentos/Comunicaciones_Congresos/Comunicaciones/Cesia_2004/ACP-12.PDF
- Alais, C. (2003). Actividad del agua. En C. Alais, *Ciencia de la leche Principios de técnica lechera* (págs. 285 - 287). Barcelona: Reverté, S.A.
- Alvarado Orozco, J. M., Martínez González, G., Botello Alvarez, J. E., & Jiménez Islas, H. (22 de Enero de 2015). *Researchgate*. Obtenido de Researchgate: https://www.researchgate.net/publication/271198438_LATAFIMP_SIMULADOR_DE_LA_DINAMICA_DE_LA_ESTERILIZACION_DE_ALIMENTOS_LIQUIDOS_EN_LATAS
- Amerling, C. (2001). *books.google*. Recuperado el 20 de Octubre de 2016, de books.google: <https://books.google.com.pe/books?id=9NweMkWe9VEC&pg=PR4&lpg=PR4&dq=Tecnolog%C3%ADa+de+la+carne:+antolog%C3%ADa&source=bl&ots=LP5y4HwEtS&sig=SPCGTu8bs5sx3QYL4v2RR3q2B4M&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwjXzNLshOrPAhUMFz4KHeuTAelQ6AEITAC#v=onepage&q=Tecnolog%C3%A>
- Bedolla Bernal, S., Dueñas Gallegos, C., Esquivel Ibarra, I., Favela Torres, T., Guerrero Huerta, R., Mendoza Madrid, E., . . . Trujillo Castillo, M. (2004). *Books Google*. Obtenido de Books Google: <https://books.google.com.pe/books?id=V2lqmVapJWkC&pg=PA55&dq=ph+en+los+alimentos&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwjFioyovprPAhVJmh4KHVGvCz0Q6AEIGjAA#v=onepage&q=ph%20en%20los%20alimentos&f=true>
- Bendezu, J. (Enero de 2015). *academia.edu*. Obtenido de academia.edu: www.academia.edu/6411076/Esterilización_de_conservas_de_pescado_por_computadora
- Betta, G., Rinaldi, M., Barbanti, D., & Massini, R. (2009). *Scienc Direct*. Recuperado el 26 de Mayo de 2016, de Science Direct: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0260877408003889>
- Bown, G. (2004). Modelling techniques for predicting lethal heat. En P. Richardson, *Improving the thermal* (págs. 109-114). Cambridge: Woodhead Publishing Limited.
- Casp Vanaclocha, A., & Abril Requena, J. (2003). *Procesos de Conservación de Alimentos*. Madrid: Aedos S.A.
- Cengel, Y. A. (2007). *Transferencia de Calor y Masa*. México D.F: McGraw-Hill Interamericana.
- Chavarrías, M. (16 de 10 de 2013). *EROSKI CONSUMER*. Recuperado el 02 de 05 de 2016, de EROSKI CONSUMER: <http://www.consumer.es/seguridad-alimentaria/ciencia-y-tecnologia/2013/10/16/218321.php>

- Collinao Robles, E. A. (2003). *cybertesis.uach*. Recuperado el 07 de Julio de 2016, de cybertesis.uach: [cybertesis.uach: cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2003/bmfccic699s/doc/bmfccic699s.pdf](http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2003/bmfccic699s/doc/bmfccic699s.pdf)
- Concurso.cnice. (2005). *concurso.cnice*. Recuperado el 03 de Junio de 2016, de concurso.cnice: http://concurso.cnice.mec.es/cnice2005/93_iniciacion_interactiva_materia/curso/materiales/propiedades/temperatura.htm
- Corporación Universitaria Empresarial Alexander Von Humboldt. (15 de Enero de 2012). *emaze*. Recuperado el 03 de Junio de 2016, de emaze: <https://www.emaze.com/@ALIRFCZF/ENLATADOS.pptx>
- Cruz Jimenez, M. M. (Octubre de 2014). *ptolomeo*. Obtenido de ptolomeo: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/7145/DISE%C3%91O%20SUSTENTABLE%20PARA%20UNA%20AUTOCLAVE.pdf?sequence=1>
- Definición ABC. (2012). *Definición ABC*. Recuperado el 03 de Junio de 2016, de Definición ABC: <http://www.definicionabc.com/tecnologia/simulador.php>
- Domínguez Hernández, E. (18 de Agosto de 2011). *Avalon Cuautitlan*. Recuperado el 24 de Mayo de 2016, de Avalon Cuautitlan: <http://avalon.cuautitlan2.unam.mx/biblioteca/tesis/1031.pdf>
- Elías Peñafiel, C., Morales Soriano, E., & García Torres, S. M. (2014). *Manual de Tratamiento Térmico de Alimentos*. Lima: Fondo Editorial.
- EROSKI CONSUMER. (26 de Setiembre de 2003). *EROSKI CONSUMER*. Recuperado el 25 de Mayo de 2016, de EROSKI CONSUMER: <http://www.consumer.es/seguridad-alimentaria/sociedad-y-consumo/2003/09/26/8513.php>
- FAO. (2007). *Fao*. Recuperado el 03 de Junio de 2016, de Fao: <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:ywww.fao.org/docrep/014/am401s/am401s07.pdf+&cd=1&hl=es-419&ct=clnk&gl=pe>
- FAO. (15 de Febrero de 2012). *FAO*. Obtenido de FAO: <http://www.fao.org/docrep/010/ai407e/AI407E22.htm>
- FDA. (2014). *FDA-USA.com*. Obtenido de FDA-USA.com: <http://www.fda-usa.com/es/content/fdausa/low-acid-canned-foods-lacf-acidified-foods-af.html>
- Gobierno Bolivariano de Venezuela. (2008). *Red Escolar Nacional*. Recuperado el 29 de Agosto de 2016, de Red Escolar Nacional: <http://www.rena.edu.ve/cuartaEtapa/metodologia/Tema4.html>
- Grau de Marín, C. (1987). Calidad Bacterianas del Atún Enlatado. *FONAIAP DIVULGA*, 24.
- Incropera, F. P. (1999). *Fundamentos de transferencia de calor*. Naucalpan de Juárez: Prentice Hall Hispanoamericana, S.A.

- Kiziltas, S., Erdogdu, F., & Koray Palazoglu, T. (10 de Marzo de 2009). *Science Direct*. Recuperado el 26 de Mayo de 2016, de Science Direct: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0260877409005494>
- Lander. (2016). *Landersimulation.com*. Recuperado el 6 de Julio de 2016, de Landersimulation.com: <http://www.landersimulation.com/formacion-con-simulacion/el-mundo-en-movimiento/historia-de-la-simulacion/>
- Martínez Olmedo, E. (Abril de 2013). *Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo*. Obtenido de Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo: http://www.uaeh.edu.mx/docencia/VI_Lectura/maestria/documentos/LECT85.pdf
- Martinez, R. (03 de Setiembre de 2012). Recuperado el 03 de Junio de 2016, de <https://prezi.com/nsrlstktgcwb/difusividad-termica/>
- Miranda Zamora, W. R., & Teixeira, A. A. (2012). *Principios matemáticos del proceso térmico de los alimentos*. Madrid: Acrinsa.
- Mohamed, I. O. (2003). *Journal of Foog Engineering*. Recuperado el 25 de Mayo de 2016, de Journal of Foog Engineering: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0260877403000517>
- Palazzesi, A. (08 de Mayo de 2010). *Neoteo*. Obtenido de Neoteo: <http://www.neoteo.com/el-origen-de-los-alimentos-enlatados>
- Panizo, A., Gallardo, J. M., & López Benito, M. (1980). *Estabilidad de las conservas de moluscos al natural*. Barcelona: Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
- Pce-Ibérica. (Enero de 2015). *pce-iberica.es*. Obtenido de pce-iberica.es: <http://www.pce-iberica.es/medidor-detalles-tecnicos/unidades-temperatura.htm>
- Pérez Aparicio, J., Rodríguez Partida, V., & Toledano Medina, M. Á. (7 de Julio de 2002). *Junta de Andalucía*. Recuperado el 25 de Mayo de 2016, de Junta de Andalucía: https://www.google.com.pe/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwi0ks_ZjfbMAhVCNz4KHQC_Dd8QFggaMAA&url=http%3A%2F%2Fwww.juntadeandalucia.es%2Fagriculturaypesca%2Fifapa%2F-%2Faction%2F90004fc0-93fe-11df-8d8b-f26108bf46ad%2F5747
- Propectiva 2020. (Abril de 2015). *Prospectiva2020.com*. Obtenido de Prospectiva2020.com: http://www.prospectiva2020.com/sites/default/files/report/files/86_i2020_alimentos_pr ocesados_bbaa_lima_web.pdf
- Quimicaweb.net. (2010). *quimicaweb.net*. Recuperado el 03 de Junio de 2016, de quimicaweb.net: http://www.quimicaweb.net/grupo_trabajo_ccnn_2/tema3/tema3.htm
- QuimiNet.com. (13 de Diciembre de 2011). *QuimiNet.com*. Recuperado el 03 de Junio de 2016, de QuimiNet.com: <http://www.quiminet.com/articulos/autoclave-industrial-funcionamiento-y-tipos-2651729.htm>

- QuimiNet.com. (03 de Junio de 2016). *QuimiNet.com*. Recuperado el 19 de Mayo de 2006, de QuimiNet.com: <http://www.quiminet.com/articulos/que-es-un-alimento-enlatado-8305.htm>
- Rahman, S. (1995). *Food Properties Handbook*. New York: CRC PRESS. Obtenido de https://books.google.com.pe/books?id=DAcD4Mi9K-AC&printsec=frontcover&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false
- Shafiur Rahman, M., & Said Al-Saidi, G. (2009). Thermal Diffusivity of Foods: Measurement, Data, and Prediction. En M. Shafiur Rahman, & G. Said Al-Saidi, *Food Properties Handbook* (pág. 675). New York: CRC Press.
- Singh, R. P., & Heldman, D. R. (2009). Mecanismos de Tranferencia de Calor. En R. P. Singh, & D. R. Heldman, *Introducción a la Ingeniería de los Alimentos* (pág. 192). Florida: Acribia, S.A.
- Singh, R. Paul; Heldman, Dennis R.;. (1998). *Introducción a la ingeniería de los alimentos*. Zaragoza: Acribia S.A.
- Teixeira, A. A., & Shoemaker, C. F. (1989). *Computerized Food Processing Operations*. New York: Van Nostrand Reinhold.
- Vázquez-Aguilar, M. (2007). *Universidad de las Américas de Puebla*. Recuperado el 25 de Mayo de 2016, de Universidad de las Américas de Puebla: [http://www.udlap.mx/WP/tsia/files/No1-Vol-1/TSIA-1\(1\)-Vazquez-Aguilar-2007.pdf](http://www.udlap.mx/WP/tsia/files/No1-Vol-1/TSIA-1(1)-Vazquez-Aguilar-2007.pdf)

Anexos



Figura 23: Terminal pesquero
"Ecopinsa"



Figura 24: bonito (*sarda sarda*)



Figura 25: Lavado y desinfección de
Planta Piloto USS



Figura 26: Materiales y equipos



Figura 27: Recepción de bonito



Figura 28: Pesado de bonito



Figura 29: Corte de bonito



Figura 30: Eviscerado



Figura 31: Lavado de bonito



Figura 32: Oreado

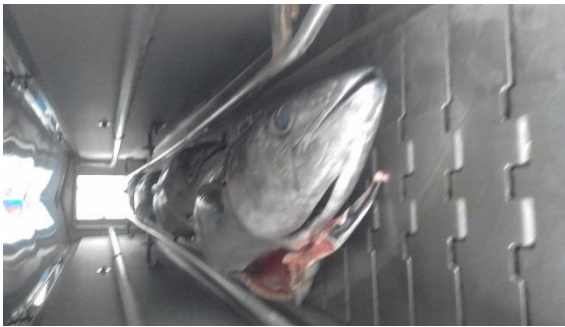


Figura 33: Inicio de cocción



Figura 34: Cocción



Figura 35: salida de cocción de bonito



Figura 36: Enfriado



Figura 37: Enfriado



Figura 38: Corte sagital



Figura 39: Descabezado



Figura 40: Cortes de bonito



Figura 41: Pesado inicial de alverjas



Figura 42: Lavado



Figura 43: Desinfección



Figura 44: desvainado



Figura 45: Pesado final de alverjas



Figura 46: Almacenamiento 8 – 10°C



Figura 47: Escaldo de alverjas



Figura 48: Pesado inicial d zanahorias



Figura 49: zanahorias lavadas y desinfectadas



Figura 50: Pesado final de zanahoria



Figura 51: Desinfección de envases



Figura 52: Envasado y pesado de pescado



Figura 53: Envasado y pesado de verduras



Figura 54: Evacuado de envases



Figura 55: Sellado



Figura 56: Ingreso de envases con sensores a la auoclave



Figura 57: Purga del autoclave



Figura 58: Registro de datos

Registros de tiempos y temperaturas en conserva de bonito en aceite, agua y sal.

Tabla 12

Registros de tiempos y temperaturas en el primer ensayo

Tiempo (min)	T°C (retorta)	T°C (Centro Experimental)	T °C (Centro simulado)
0	42.00	32	32.00
1	45.00	35.5	32.00
2	50.00	37	32.00
3	56.50	40	32.00
4	62.00	42	32.12
5	65.50	44.5	32.48
6	70.00	47	33.06
7	75.50	50	33.91
8	81.00	53	35.00
9	86.50	57	36.29
10	91.00	61.5	37.77
11	95.50	65	39.45
12	101.00	68	41.34
13	104.00	72	43.43
14	107.50	74.5	45.70
15	109.50	78	48.12
16	112.00	82	50.70
17	114.00	86.5	53.39
18	115.50	89	56.17
19	116.50	92.5	58.99
20	117.00	95	61.84
21	117.50	97	64.68
22	118.00	98.5	67.51
23	118.50	100	70.28
24	119.00	102	72.98
25	119.50	103.5	75.60
26	120.00	105	78.12
27	120.50	107.5	80.55
28	120.50	109	82.88
29	120.50	111	85.12
30	120.50	112.5	87.26
31	120.50	114	89.32
32	121.00	115	91.27
33	121.00	116	93.12
34	121.00	117	94.87
35	121.50	117.5	96.52
36	121.00	118	98.08
37	121.00	118.5	99.56

38	121.00	119	100.95
39	121.00	119.5	102.28
40	121.00	120	103.51
41	121.00	120	104.67
42	121.00	120	105.76
43	121.00	120	106.77
44	121.00	120	107.72
45	121.00	120	108.61
46	121.00	120	109.45
47	121.00	120	110.22
48	121.00	120	110.95
49	121.00	120	111.63
50	121.00	120	112.27
51	121.00	120	112.86
52	121.00	120	113.41
53	121.00	120	113.93
54	121.00	120	114.41
55	121.00	120	114.86
56	119.00	120	115.28
57	117.00	119.5	115.67
58	114.50	118.5	116.03
59	112.00	117	116.37
60	108.00	115	116.64
61	104.50	111.5	116.82
62	102.00	110	116.89
63	98.00	107	116.84
64	93.00	104	116.63
65	89.00	100	116.26
66	83.00	94.5	115.76
67	79.00	91	115.08
68	73.50	87	114.22
69	69.00	83	113.18
70	62.50	78.5	111.92
71	58.00	74	110.48
72	51.50	70.5	108.83
73	47.50	65.5	107.00
74	42.00	61	104.95
75	37.00	57	102.73
76	34.00	52	100.30
77	31.00	47.5	97.72
78	28.00	44	94.97
79	25.50	42	92.07

Tabla 13*Registros de tiempos y temperaturas en el segundo ensayo.*

Tiempo (min)	T°C (retorta)	T°C (Centro Experimental)	T°C (Centro simulado)
0	41.00	34.5	34.50
1	45.00	37	34.50
2	49.00	39.5	34.50
3	55.00	42	34.50
4	60.50	45	34.65
5	64.00	47	35.13
6	69.50	50	35.80
7	72.00	53	36.80
8	76.50	57	38.05
9	79.00	61	39.50
10	82.00	65	41.22
11	87.50	69	43.03
12	89.00	72.5	45.05
13	95.00	75	47.13
14	98.00	79	49.33
15	100.00	84	51.71
16	104.00	86.5	54.09
17	106.00	92.5	56.70
18	109.00	94	59.32
19	111.00	96	61.99
20	113.50	99	64.75
21	117.00	101	67.48
22	118.00	104	70.26
23	118.50	106	73.00
24	119.00	108	75.75
25	119.50	110	78.53
26	120.00	111	81.23
27	120.00	112	83.85
28	120.00	113	86.35
29	120.50	114	88.73
30	120.50	115	91.01
31	120.50	115.5	93.14
32	121.00	116	95.15
33	121.00	116.5	97.04
34	121.00	117	98.82
35	121.00	117.5	100.47
36	121.00	118.5	102.03
37	121.00	119	103.48
38	121.50	119.5	104.84
39	121.00	120	106.09
40	121.00	120	107.26
41	121.00	120	108.33
42	121.00	120	109.36
43	121.00	120	110.27
44	121.00	120	111.13
45	121.00	120	111.92

46	121.00	120	112.65
47	121.00	120	113.31
48	121.00	120	113.93
49	121.00	120	114.50
50	121.00	120	115.02
51	121.00	120	115.50
52	121.00	120	115.95
53	121.00	120	116.35
54	121.00	120	116.73
55	121.00	120	117.07
56	121.00	120	117.39
57	121.00	120	117.68
58	119.00	120	117.95
59	114.00	119	118.20
60	110.00	118.5	118.42
61	104.50	114	118.63
62	100.50	111	118.73
63	95.00	107	118.59
64	90.00	101.1	118.25
65	86.50	97	117.60
66	81.00	93	116.75
67	77.00	89	115.60
68	74.00	86.5	114.21
69	71.00	83.5	112.64
70	67.00	79	110.81
71	63.50	75	108.82
72	60.00	71.5	106.70
73	57.00	67	104.49
74	54.00	63	102.13
75	51.00	58	99.69
76	45.50	55	97.15
77	41.00	51	94.56
78	39.00	46.5	91.91
79	35.00	44	89.22
80	30.00	42	86.38
81	28.00	41	83.44
82	27.00	40	80.51

Tabla 14*Registros de tiempos y temperaturas en el tercer ensayo.*

Tiempo (min)	T°C (retorta)	T°C (Centro Experimental)	T°C (Centro simulado)
0	41.00	35	35.00
1	45.00	37	35.00
2	49.00	39.5	35.00
3	55.00	43	35.00
4	60.50	45	35.12
5	64.00	47	35.51
6	66.00	50	36.09
7	70.00	53	36.96
8	75.00	57	38.09
9	79.00	59	39.41
10	82.00	62	40.85
11	85.00	66	42.45
12	88.00	69	44.25
13	90.00	73	46.19
14	92.00	76	48.25
15	94.00	78	50.40
16	96.50	81	52.63
17	98.00	85	54.90
18	100.00	88	57.19
19	102.00	92	59.48
20	105.00	95	61.80
21	108.00	96.5	64.10
22	110.00	98.5	66.39
23	112.00	100.5	68.67
24	114.00	102	70.98
25	115.00	103.5	73.32
26	116.00	105	75.65
27	117.00	106.5	77.98
28	118.00	109	80.30
29	119.00	111	82.57
30	120.00	112.5	84.78
31	120.00	114	86.93
32	120.50	115	89.01
33	120.50	116	91.03
34	120.50	117	92.99
35	120.50	118	94.85
36	121.00	118.5	96.62
37	121.50	119	98.30
38	121.00	119.5	99.88
39	121.50	120	101.36
40	121.00	120	102.77
41	121.00	120	104.10
42	121.00	120	105.33

43	121.00	120	106.51
44	121.00	120	107.58
45	121.00	120	108.58
46	121.00	120	109.51
47	121.00	120	110.37
48	121.00	120	111.17
49	121.00	120	111.91
50	121.00	120	112.60
51	121.00	120	113.24
52	121.00	120	113.83
53	121.00	120	114.37
54	121.00	120	114.88
55	121.00	120	115.35
56	121.00	120	115.78
57	121.00	120	116.18
58	120.00	120	116.55
59	119.00	120	116.89
60	117.00	120	117.20
61	113.00	119	117.50
62	109.00	118	117.73
63	105.00	116.5	117.90
64	102.00	114	117.96
65	98.00	110	117.84
66	95.00	105	117.53
67	90.00	99	117.01
68	86.00	95	116.32
69	82.00	90	115.44
70	77.50	88	114.40
71	72.00	85	113.14
72	68.00	81	111.71
73	62.00	79	110.10
74	55.00	72	108.31
75	50.00	66	106.31
76	43.00	60	104.15
77	38.00	57	101.77
78	35.00	55	99.13
79	30.00	51.5	96.33
80	28.00	47.5	93.26
81	27.00	46	90.05
82	26.00	45	86.75

Registros de tiempos y temperaturas en conserva de bonito con alverjas y zanahorias en aceite, agua y sal.

Tabla 15

Registros de tiempos y temperaturas en el primer ensayo.

Tiempo (min)	T°C(retorta)	T°C (Centro Experimental)	T °C (Centro simulado)
0	45.00	37	37.00
1	53.00	40	37.00
2	60.00	44	37.00
3	67.00	48	37.00
4	72.00	54	37.19
5	75.00	58.5	37.94
6	80.00	61.5	39.00
7	84.00	64.5	40.48
8	88.00	70	42.20
9	91.00	75.5	44.11
10	94.00	80	46.25
11	97.00	85	48.53
12	99.50	87	50.98
13	101.00	90	53.50
14	103.50	91.5	56.11
15	105.00	93	58.76
16	107.00	94	61.45
17	108.00	95.5	64.10
18	109.00	97	66.78
19	110.00	99	69.39
20	111.00	101	71.99
21	112.50	102.5	74.50
22	113.00	105	76.94
23	115.00	107	79.30
24	117.00	108.5	81.58
25	119.00	110	83.79
26	119.50	112	85.91
27	120.00	113	88.00
28	120.00	114	90.06
29	120.50	115	92.10
30	120.50	116.5	94.05
31	120.50	117.5	95.94
32	121.00	118	97.71
33	121.00	119	99.40
34	121.00	120	100.98
35	121.00	120.5	102.46
36	121.00	121	103.86

37	121.00	121	105.17
38	121.00	121	106.39
39	121.00	121	107.52
40	121.00	121	108.58
41	121.00	121	109.55
42	121.00	121	110.45
43	121.00	121	111.29
44	121.00	121	112.06
45	121.00	121	112.77
46	121.00	121	113.43
47	121.00	121	114.04
48	121.00	121	114.60
49	121.00	121	115.11
50	121.00	121	115.59
51	121.00	121	116.02
52	121.00	121	116.43
53	121.00	121	116.80
54	121.00	121	117.14
55	113.00	118	117.45
56	107.00	114	117.74
57	101.00	109	118.00
58	95.00	103.5	118.25
59	88.00	97	118.08
60	82.50	93	117.67
61	77.00	86.5	116.88
62	70.50	81	115.79
63	64.00	77	114.32
64	60.00	73	112.57
65	54.50	69	110.54
66	50.00	64	108.20
67	47.50	60.5	105.59
68	44.00	55.5	102.82
69	41.00	52	99.83
70	39.00	48.5	96.70
71	37.00	45	93.53
72	34.00	43	90.28
73	32.00	42.1	87.03
74	30.00	41	83.79
75	28.00	40	80.61

Tabla 16*Registros de tiempos y temperaturas en el segundo ensayo.*

Tiempo (min)	T°C(retorta)	T°C (Centro Experimental)	T °C (Centro simulado)
0	47.00	37.5	37.50
1	54.00	39	37.50
2	59.50	42	37.50
3	64.00	45	37.50
4	69.00	50	37.76
5	74.50	55	38.60
6	78.00	61	39.67
7	81.00	65	41.06
8	84.00	68	42.70
9	87.00	72	44.62
10	90.00	76.5	46.68
11	93.00	80	48.88
12	96.50	83	51.17
13	99.50	85.5	53.54
14	101.00	88	55.99
15	103.00	91.5	58.49
16	104.00	94	61.09
17	105.50	97	63.70
18	108.00	100	66.32
19	110.50	103	68.89
20	113.00	105	71.42
21	115.00	107.5	73.87
22	116.50	109	76.35
23	118.50	111	78.77
24	120.00	112	81.25
25	120.00	114	83.64
26	121.00	117	86.05
27	121.00	120	88.37
28	121.00	120	90.70
29	121.00	120	92.83
30	121.00	120	94.98
31	121.00	120	96.91
32	121.00	120.3	98.80
33	121.00	120.3	100.49
34	121.00	120.5	102.14
35	121.00	120.5	103.59
36	121.00	120.5	105.03
37	121.00	120.5	106.26

38	121.00	120.5	107.50
39	121.00	120.5	108.55
40	121.00	120.5	109.62
41	121.00	120.5	110.50
42	121.00	120.5	111.41
43	121.00	120.5	112.15
44	121.00	120.5	112.94
45	121.00	120.5	113.54
46	121.00	120.5	114.23
47	121.00	120.5	114.72
48	121.00	120.5	115.32
49	121.00	120.5	115.72
50	121.00	120.5	116.23
51	117.00	120	116.55
52	110.00	116.5	117.01
53	105.00	112	117.26
54	100.00	105.5	117.66
55	95.50	100	117.63
56	90.00	95.5	117.44
57	85.00	91	116.78
58	80.00	87	116.01
59	77.00	83	114.78
60	73.00	78	113.47
61	68.00	74.5	111.68
62	64.00	70	109.89
63	59.00	65.5	107.71
64	55.00	61.5	105.62
65	50.00	58	103.07
66	48.00	55	100.67
67	44.00	53	97.78
68	43.00	50	95.11
69	40.00	48	91.93
70	37.00	46.5	89.14
71	35.50	44	85.85
72	33.00	43	83.06
73	31.00	42	79.81
74	29.00	41.5	77.01
75	27.00	40	73.83

Tabla 17*Registros de tiempos y temperaturas en el tercer ensayo.*

Tiempo (min)	T °C(retorta)	T °C (Centro)	T°C (Centro) Experimental
0	45.00	36.00	36
1	49.00	36.00	38
2	53.00	36.00	41
3	55.00	36.00	44
4	63.00	36.28	48
5	69.00	37.00	52
6	73.00	37.88	57
7	79.00	38.94	62
8	83.00	40.46	65.5
9	88.00	42.21	73
10	92.00	44.20	78
11	95.00	46.48	82
12	99.00	48.89	84.5
13	103.50	51.55	88
14	106.50	54.30	91
15	109.00	57.15	93
16	113.00	60.09	95.5
17	115.00	63.17	98
18	117.00	66.24	102.5
19	118.00	69.35	105
20	119.00	72.52	107.5
21	120.50	75.62	109
22	120.50	78.69	111
23	120.50	81.65	112.5
24	121.00	84.50	114
25	121.00	87.27	115
26	121.00	89.83	117
27	121.00	92.29	119
28	121.00	94.55	120
29	121.00	96.71	120
30	121.00	98.66	120.3
31	121.00	100.53	120.3
32	121.00	102.19	120.3
33	121.00	103.80	120.3
34	121.00	105.19	120.3
35	121.00	106.58	120.3
36	121.00	107.74	120.3

37	121.00	108.93	120.5
38	121.00	109.88	120.5
39	121.00	110.92	120.5
40	121.00	111.69	120.5
41	121.00	112.60	120.5
42	121.00	113.20	120.5
43	121.00	114.01	120.5
44	121.00	114.46	120.5
45	121.00	115.19	120.5
46	121.00	115.51	120.5
47	121.00	116.19	120.5
48	121.00	116.37	120.5
49	121.00	117.04	120.5
50	116.00	117.09	120
51	110.00	117.75	116
52	105.00	117.68	110.5
53	101.00	118.37	105
54	96.00	117.83	101.5
55	89.00	118.00	95.5
56	82.50	116.75	90
57	78.00	116.49	86
58	75.00	114.57	80.5
59	68.00	113.78	75.5
60	62.50	110.98	70
61	58.50	109.83	65.5
62	53.50	106.48	61
63	50.00	105.06	57
64	46.50	100.94	54.5
65	42.50	99.48	52.5
66	39.00	94.69	50
67	37.00	93.36	48.5
68	36.00	88.04	47.5
69	35.00	87.00	46.5
70	34.00	81.08	45
71	33.00	80.61	43.5
72	32.00	74.24	42
73	30.00	74.66	41.5
74	27.00	67.78	40

Curvas de penetración de calor conserva de bonito en aceite, agua y sal.

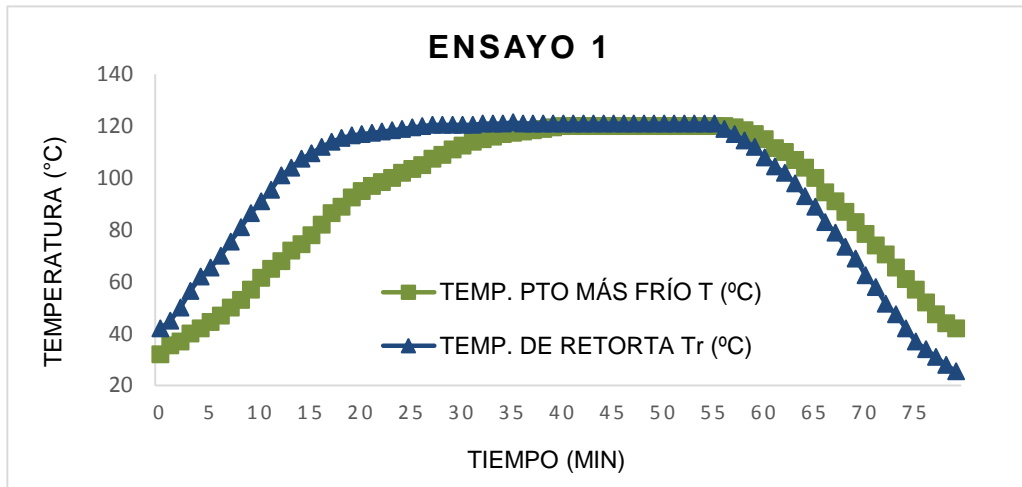


Figura 59: Curva de penetración en el primer ensayo.

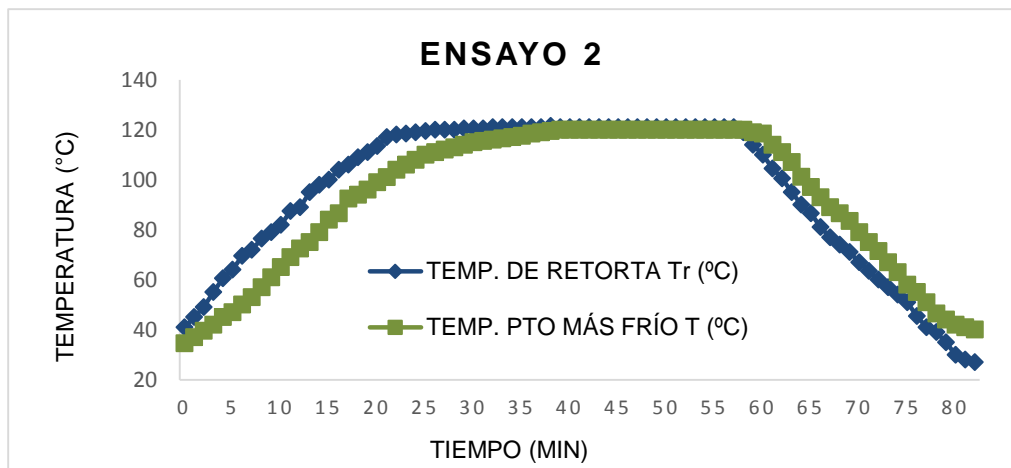


Figura 60: Curva de penetración en el segundo ensayo.

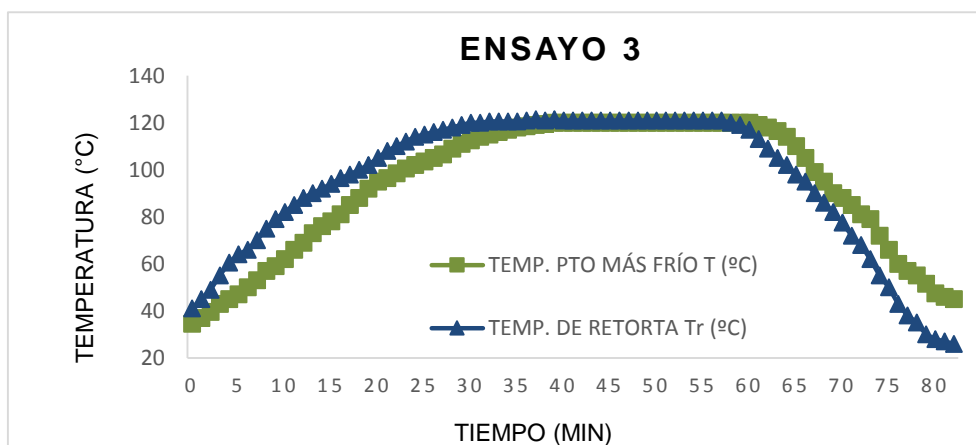


Figura 61: Curva de penetración en el tercer ensayo.

Curva de penetración de calor conserva de bonito con alverja y zanahoria en aceite, agua y sal.

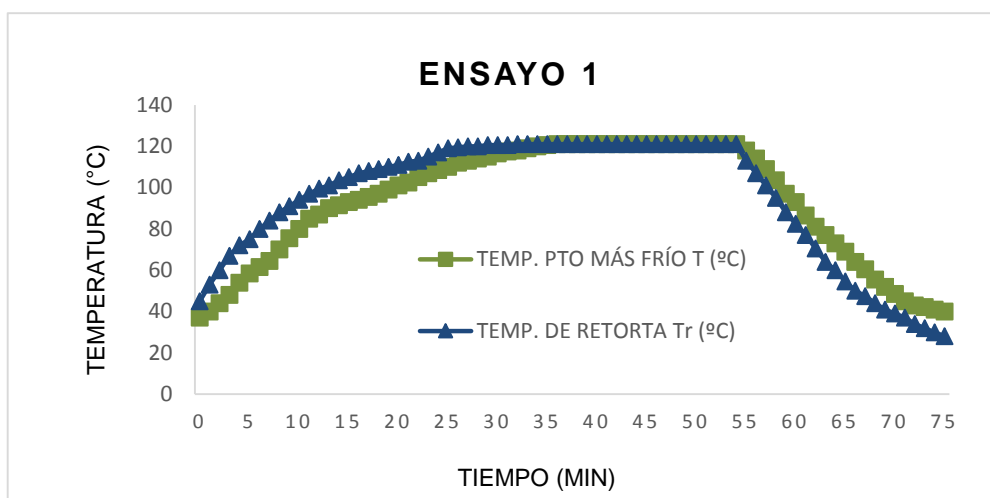


Figura 62: curva de penetración en el primer ensayo.

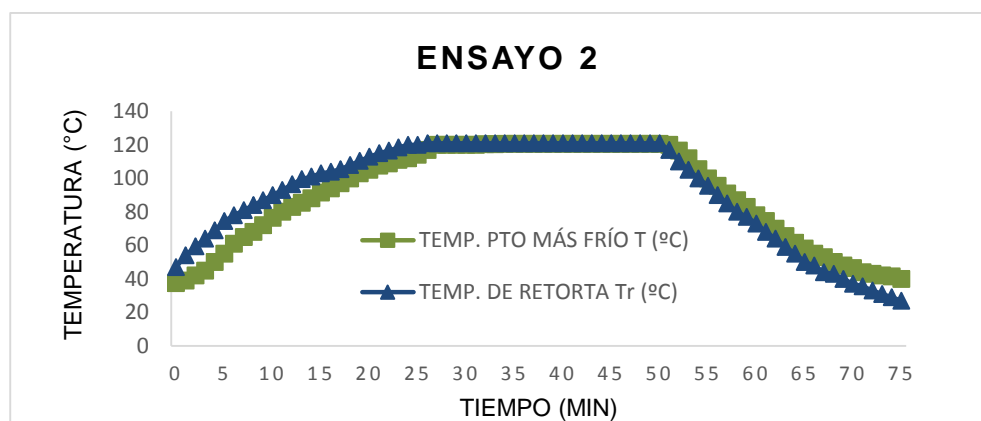


Figura 63: curva de penetración en el segundo ensayo.

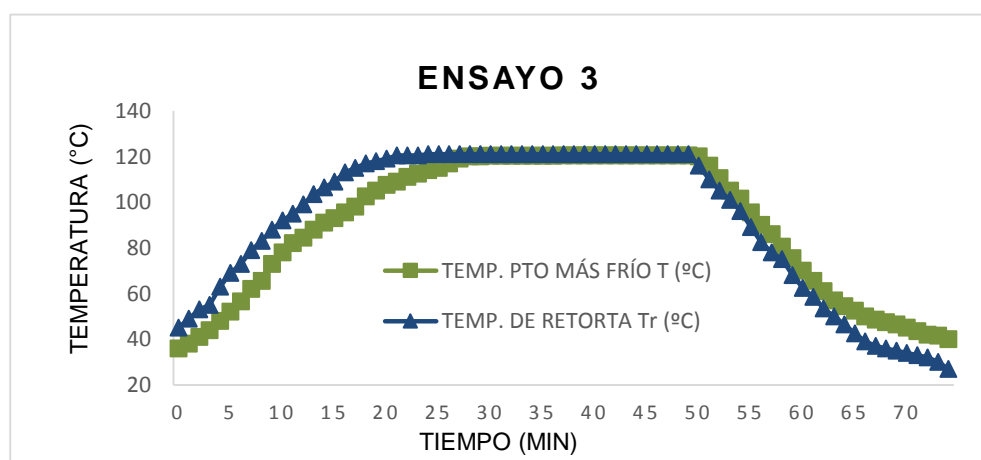


Figura 64: curva de penetración en el tercer ensayo.

Pendiente de la recta de conserva de bonito en aceite, agua y sal.

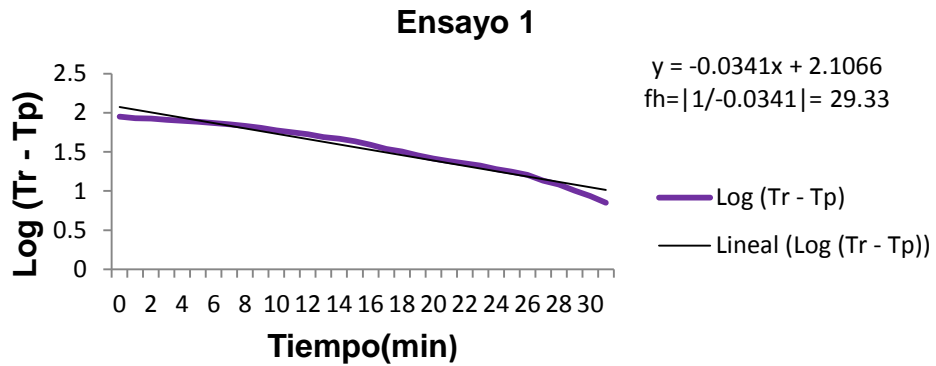


Figura 65: Factor de la pendiente de la recta en el primer ensayo

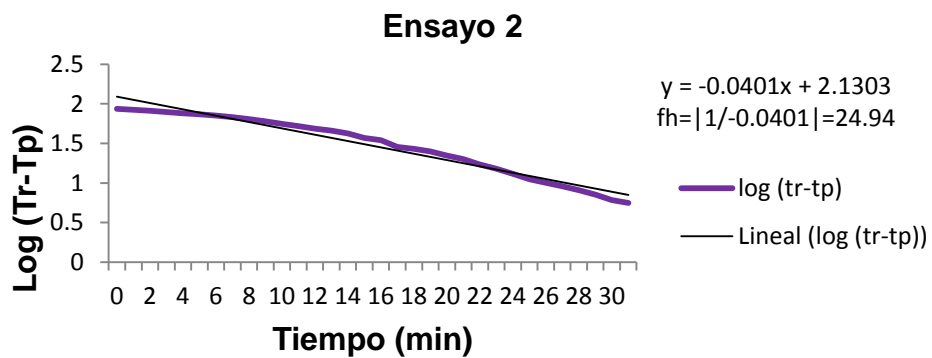


Figura 66: Factor de la pendiente de la recta en el segundo ensayo

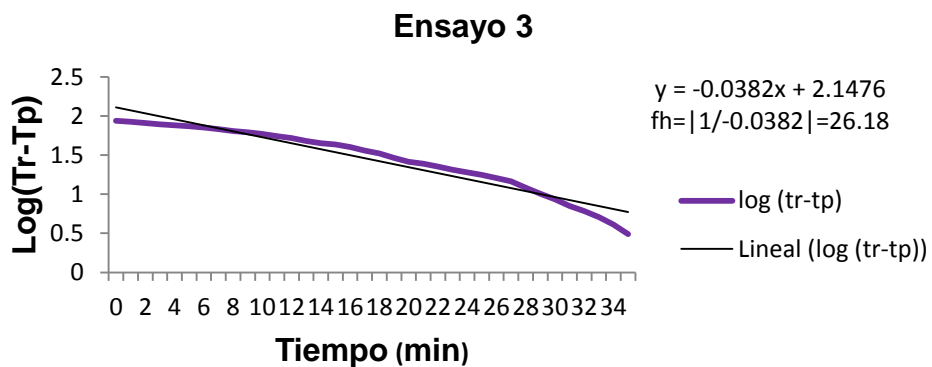


Figura 67: Factor de la pendiente de la recta en el tercer ensayo

Pendiente de la recta de la conserva de bonito con alverja y zanahoria en aceite, agua y sal.

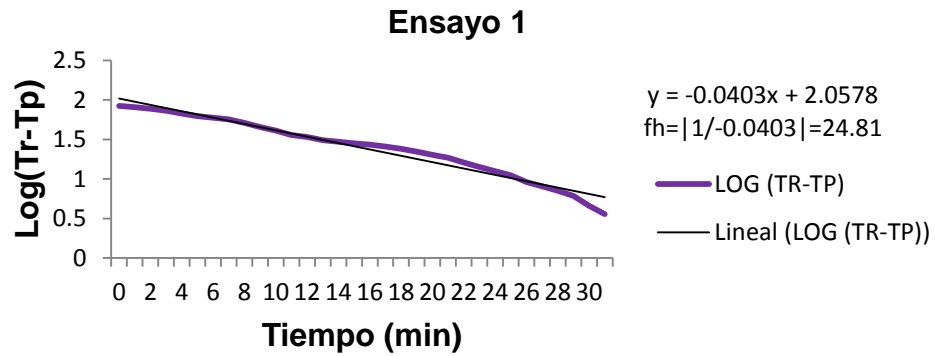


Figura 68: Factor de la pendiente de la recta en el tercer ensayo.

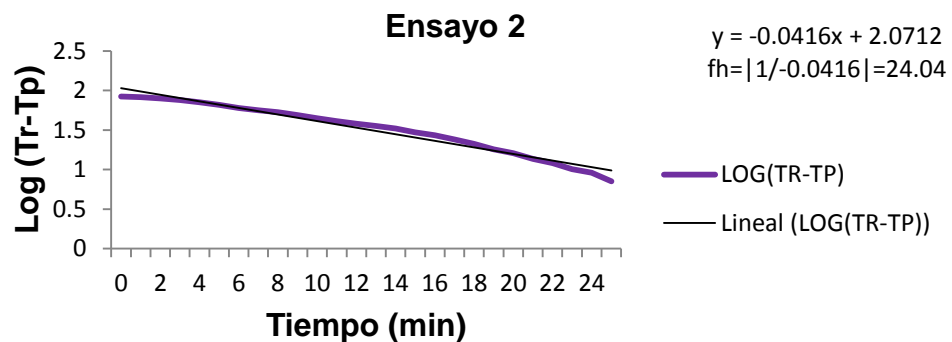


Figura 69: Factor de la pendiente de la recta en el tercer ensayo.

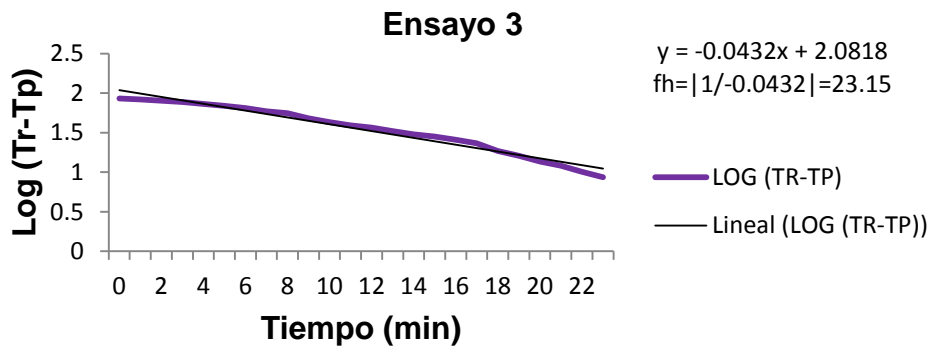


Figura 70: Factor de la pendiente de la recta en el tercer ensayo.

Simulación de la curva de penetración de calor conserva de bonito aceite

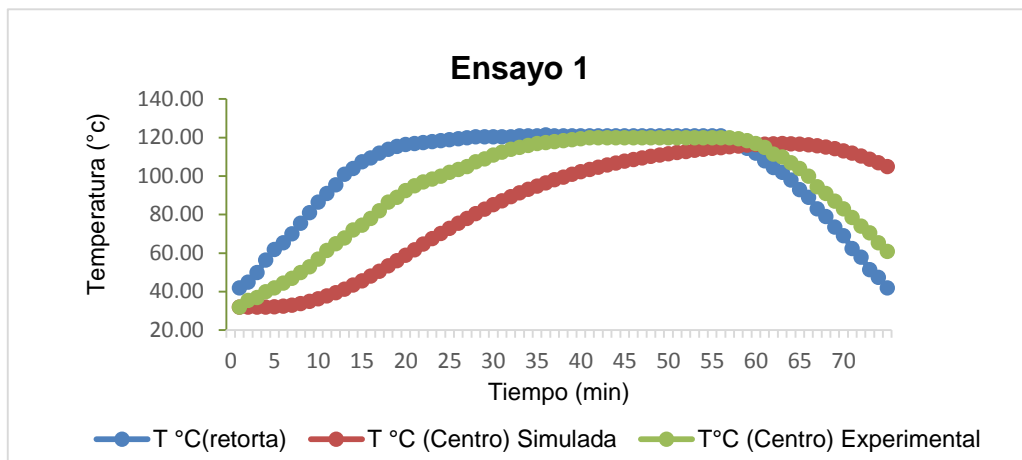


Figura 71: Simulación de la curva de penetración del producto en el primer ensayo.

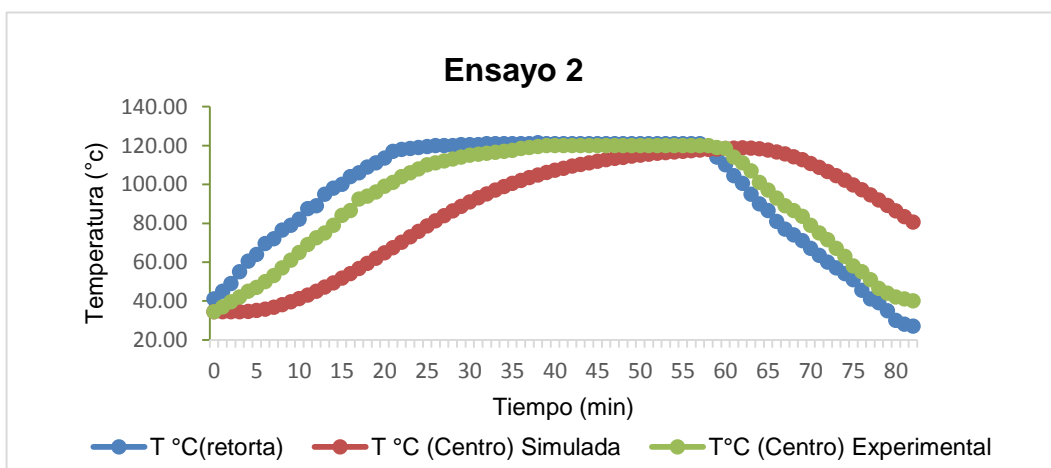


Figura 72: Simulación de la curva de penetración del producto en el segundo ensayo.

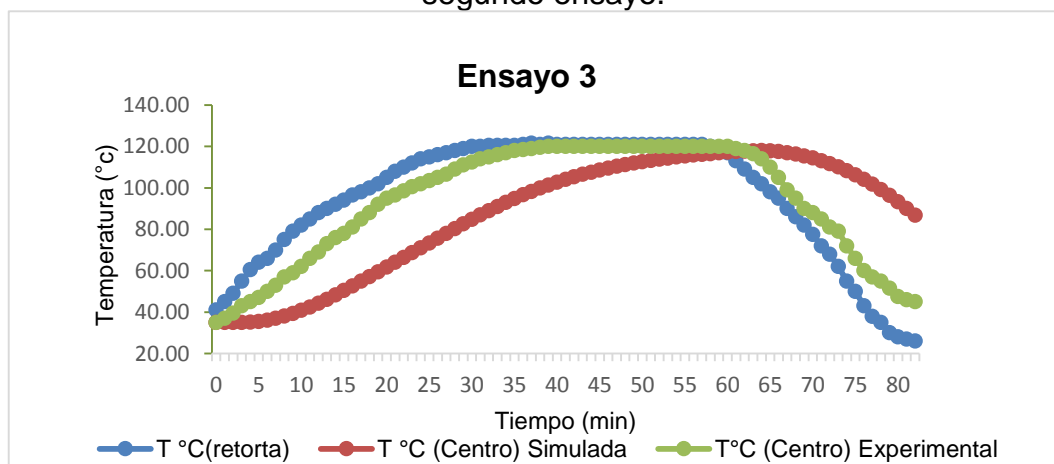


Figura 73: Simulación de la curva de penetración del producto en el tercer ensayo.

Simulación de la curva de penetración de calor conserva de bonito con alverja y zanahoria en aceite en aceite, agua y sal.

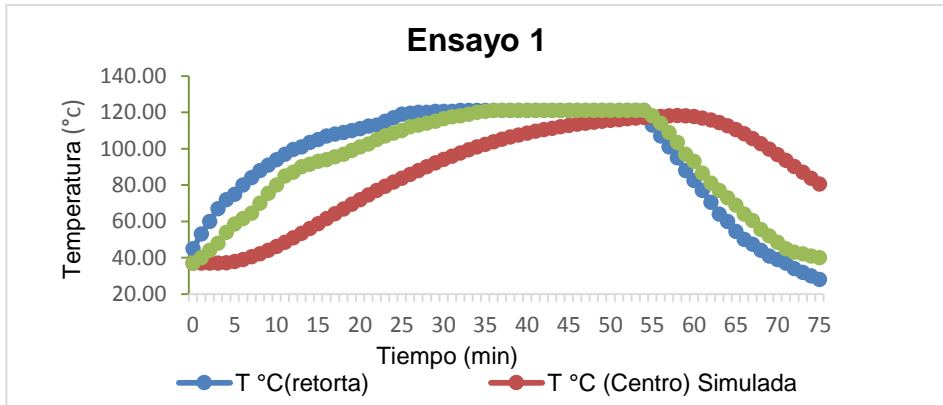


Figura 74: Simulación de la curva de penetración del producto en el primer ensayo.

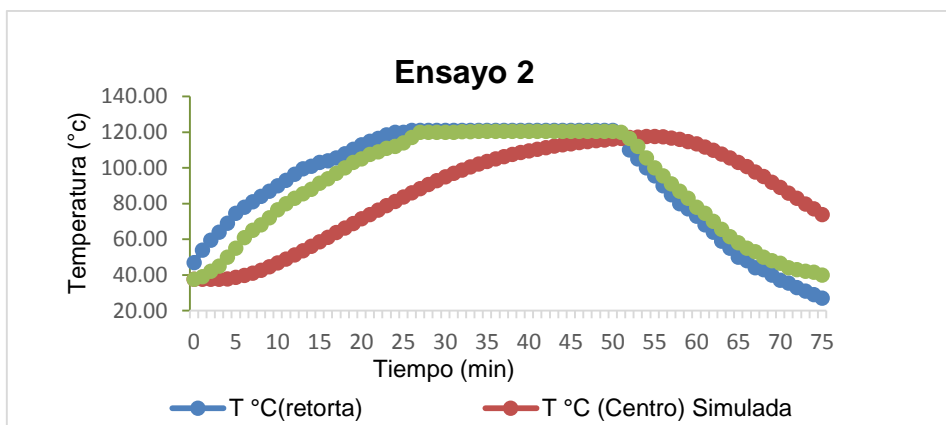


Figura 75: Simulación de la curva de penetración del producto en el primer ensayo.

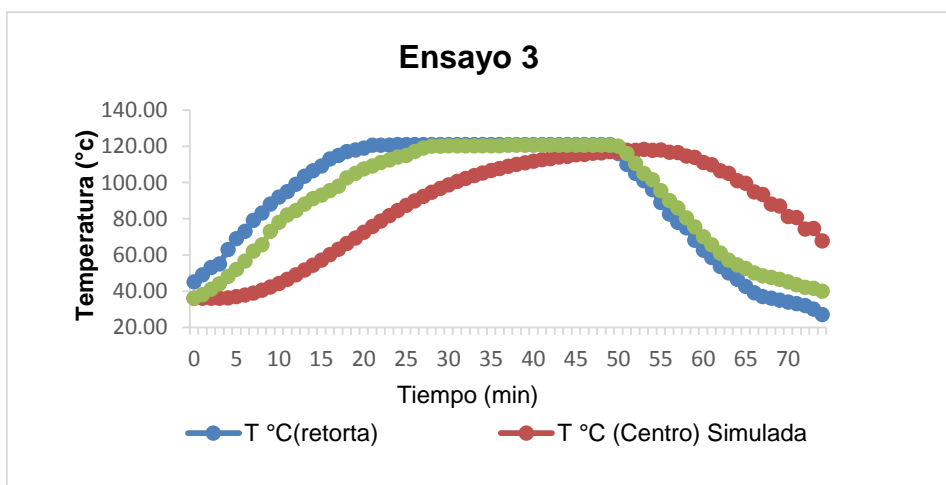


Figura 76: Simulación de la curva de penetración del producto en el tercer ensayo.

Tabla 18

Tabla de los valores de letalidad de las corridas experimentales de las conservas.

Conservas		Fo Exp (min)	DIFUSIVIDAD TÉRMICA (m ² /s)	Fo Sim (min)
Bonito en aceite, agua y sal.	Ensayo I	19.67	1.38*10 ⁻⁷	6.34
	Ensayo II	21.67	1.63*10 ⁻⁷	9.54
	Ensayo III	22.73	1.55*10 ⁻⁷	8.03
Promedio		21.36	7.97	1.52*10 ⁻⁷
Desviación		±1.55	±1.60	±1.24*10 ⁻⁸
Bonito, alverja, zanahoria en aceite, agua y sal.	Ensayo I	23.83	1.64*10 ⁻⁷	7.38
	Ensayo II	22.60	1.69*10 ⁻⁷	6.12
	Ensayo III	21.75	1.75*10 ⁻⁷	6.99
Promedio		22.73	6.83	1.69*10 ⁻⁷
Desviación		±1.05	±0.65	±5.90*10 ⁻⁹

FUENTE: Elaboración Propia.

CÓDIGOS BASIC

Private Sub CommandButton1_Click()

Dim T(50, 50, 50)

T0 = Cells(14, 5)

Tref = Cells(15, 5)

zvalue = Cells(16, 5)

Dif = Cells(17, 5)

L = Cells(18, 5)

D = Cells(19, 5)

At = Cells(20, 5)

nr = 5

ny = 5

tp = Cells(21, 5)

Ar = (D / 2) / (nr - 1)

Ay = (L / 2) / (ny - 1)

Fr = (Dif * At * 60) / (Ar) ^ 2

Fy = (Dif * At * 60) / (Ay) ^ 2

Fry = (Fr * Ar) / D

'nodo exterior

For i = 0 To tp

Cells(29 + i, 15) = i

Cells(29, 16) = (Cells(29, 4) + T0) / 2

Cells(30 + i - 1, 16) = Cells(30 + i - 1, 4)

Next i

'nodo internos condicion inicial

For i = 0 To 8

Cells(29, 17 + i) = T0

Next i

'nodo horizontal condicion inicial

For i = 0 To 2

Cells(29, 26 + i) = T0

Next i

'nodo vertical condicion inicial

For i = 0 To 2

Cells(29, 29 + i) = T0

Next i

'nodo central condicion inicial

Cells(29, 32) = T0

For i = 0 To tp - 1

'definicion de los nodos

ne = Cells(29 + i, 16)
n7 = Cells(29 + i, 17)
n8 = Cells(29 + i, 18)
n9 = Cells(29 + i, 19)
n12 = Cells(29 + i, 20)
n13 = Cells(29 + i, 21)
n14 = Cells(29 + i, 22)
n17 = Cells(29 + i, 23)
n18 = Cells(29 + i, 24)
n19 = Cells(29 + i, 25)
n22 = Cells(29 + i, 26)
n23 = Cells(29 + i, 27)
n24 = Cells(29 + i, 28)
n10 = Cells(29 + i, 29)
n15 = Cells(29 + i, 30)
n20 = Cells(29 + i, 31)
nce = Cells(29 + i, 32)

'--nodos interiores en el tiempo t--

'nodo7t

Cells(30 + i, 17) = n7 + Fr * (ne - 2 * n7 + n8) + Fry * (ne - n8) + Fy * (ne - 2 * n7 + n12)

'nodo8t

Cells(30 + i, 18) = n8 + Fr * (n7 - 2 * n8 + n9) + Fry * (n7 - n9) + Fy * (ne - 2 * n8 + n13)

'nodo9t

Cells(30 + i, 19) = n9 + Fr * (n8 - 2 * n9 + n10) + Fry * (n8 - n10) + Fy * (ne - 2 * n9 + n14)

'nodo12t

Cells(30 + i, 20) = n12 + Fr * (ne - 2 * n12 + n13) + Fry * (ne - n13) + Fy * (n7 - 2 * n12 + n17)

'nodo13t

Cells(30 + i, 21) = n13 + Fr * (n12 - 2 * n13 + n14) + Fry * (n12 - n14) + Fy * (n8 - 2 * n13 + n18)

'nodo14t

$$\text{Cells}(30 + i, 22) = n14 + Fr * (n13 - 2 * n14 + n15) + Fry * (n13 - n15) + Fy * (n9 - 2 * n14 + n19)$$

'nodo17t

$$\text{Cells}(30 + i, 23) = n17 + Fr * (ne - 2 * n17 + n18) + Fry * (ne - n18) + Fy * (n12 - 2 * n17 + n22)$$

'nodo18t

$$\text{Cells}(30 + i, 24) = n18 + Fr * (n17 - 2 * n18 + n19) + Fry * (n17 - n19) + Fy * (n13 - 2 * n18 + n23)$$

'nodo19t

$$\text{Cells}(30 + i, 25) = n19 + Fr * (n18 - 2 * n19 + n20) + Fry * (n18 - n20) + Fy * (n14 - 2 * n19 + n24)$$

'--nodos horizontales en el tiempo t--

$$\text{Cells}(30 + i, 26) = n22 + Fr * (ne - 2 * n22 + n23) + Fry * (ne - n23) + 2 * Fy * (n17 - n22)$$

$$\text{Cells}(30 + i, 27) = n23 + Fr * (n22 - 2 * n23 + n24) + Fry * (n22 - n24) + 2 * Fy * (n18 - n23)$$

$$\text{Cells}(30 + i, 28) = n24 + Fr * (n23 - 2 * n24 + nce) + Fry * (n23 - nce) + 2 * Fy * (n19 - n24)$$

'--nodos verticales en el tiempo t--

$$\text{Cells}(30 + i, 29) = n10 + 4 * Fr * (n9 - n10) + Fy * (ne - 2 * n10 + n15)$$

$$\text{Cells}(30 + i, 30) = n15 + 4 * Fr * (n14 - n15) + Fy * (n10 - 2 * n15 + n20)$$

$$\text{Cells}(30 + i, 31) = n20 + 4 * Fr * (n19 - n20) + Fy * (n15 - 2 * n20 + nce)$$

'--nodos CENTRAL en el tiempo t--

$$\text{Cells}(30 + i, 32) = nce + 4 * Fr * (n24 - nce) + 2 * Fy * (n20 - nce)$$

Next i

'ploteando datos autoclave, centro y letalidad

For i = 0 To tp

$$\text{Cells}(29 + i, 9) = \text{Cells}(29 + i, 3)$$

$$\text{Cells}(29 + i, 10) = \text{Cells}(29 + i, 4)$$

$$\text{Cells}(29 + i, 11) = \text{Cells}(29 + i, 32)$$

'calculo de la letalidad

```
Cells(29 + i, 12) = (10) ^ ((Cells(29 + i, 11) - Tref) / zvalue)
```

```
Next i
```

```
End Sub
```

```
Private Sub CommandButton2_Click()
```

```
tp = Cells(21, 5)
```

```
For i = 0 To tp
```

```
Cells(29 + i, 9) = ""
```

```
Cells(29 + i, 10) = ""
```

```
Cells(29 + i, 11) = ""
```

```
Cells(29 + i, 12) = ""
```

```
Cells(29 + i, 15) = ""
```

```
Cells(29 + i, 16) = ""
```

```
Cells(29 + i, 17) = ""
```

```
Cells(29 + i, 18) = ""
```

```
Cells(29 + i, 19) = ""
```

```
Cells(29 + i, 20) = ""
```

```
Cells(29 + i, 21) = ""
```

```
Cells(29 + i, 22) = ""
```

```
Cells(29 + i, 23) = ""
```

```
Cells(29 + i, 24) = ""
```

```
Cells(29 + i, 25) = ""
```

```
Cells(29 + i, 26) = ""
```

```
Cells(29 + i, 27) = ""
```

```
Cells(29 + i, 28) = ""
```

```
Cells(29 + i, 29) = ""
```

```
Cells(29 + i, 30) = ""
```

```
Cells(29 + i, 31) = ""
```

```
Cells(29 + i, 32) = ""
```

```
Next i
```

```
End Sub
```

```
Private Sub CommandButton2_DbClick(ByVal Cancel As  
MSForms.ReturnBoolean)
```

```
End Sub
```

```
Private Sub CommandButton2_Error(ByVal Number As Integer, ByVal Description  
As MSForms.ReturnString, ByVal SCode As Long, ByVal Source As String, ByVal  
HelpFile As String, ByVal HelpContext As Long, ByVal CancelDisplay As  
MSForms.ReturnBoolean)
```

End Sub

Private Sub CommandButton2_GotFocus()

End Sub

Private Sub CommandButton2_KeyDown (ByVal KeyCode As
MSForms.ReturnInteger, ByVal Shift As Integer)

End Sub

Private Sub Worksheet_SelectionChange(ByVal Target As Range)

End Sub