

UNIVERSIDAD AUSTRAL DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
ESCUELA DE INGENIERIA EN ALIMENTOS

**Evaluación de Tratamientos Térmicos de Jurel
(*Trachurus symmetricus murphyi*) Envasado al
Vacío en Bolsas Esterilizables a Nivel Industrial**

Tesis presentada como parte de
los requisitos para optar al grado
de Licenciado en Ciencias de los
Alimentos.

PATRICIO ANDRES ACEVEDO SANTANA

Valdivia – Chile

2008

PROFESOR PATROCINANTE

Elton Francisco Morales Blancas

Ingeniero en Industrias Alimentarias, M. Sc
Instituto de Ciencia y Tecnología de los Alimentos

CO-PATROCINANTE

Carlos Cornejo Fernández.

Ingeniero en Alimentos
Universidad Católica de Valparaíso
Jefe de Planta Productos Especiales
Pesquera San José S.A.

PROFESOR INFORMANTE

Dr. Kong Shun AH-Hen

Ingeniero en Alimentos, Dipl.-Ing., Dr.-Ing.
Instituto de Ciencia y Tecnología de los Alimentos

DEDICATORIA

*Porque con tu inmenso amor desinteresado me enseñaste tantas cosas
y a pesar de no ser tu hijo, me trataste siempre como uno.
Este pequeño trabajo esta dedicado a ti
para dejar registro de mi admiración
y porque en gran parte soy lo que soy por ti....
te agradeceré siempre.....
Muchas gracias Abuelita Ester.*

*A mis padres (Mario Acevedo S., Heradia Santana O.)
y a mi hermano (Mario) quienes siempre me apoyaron
en todo momento, dando aliento ante las adversidades,
no solo en la tesis ,sino también en esta etapa de mi vida
Los quiero mucho....muchas gracias.*

AGRADECIMIENTOS

- ❖ La concepción y desarrollo de esta investigación fue posible gracias al financiamiento obtenido a través del proyecto PEF S2007-16, donde el profesor Elton Morales fue guía, maestro, manteniendo siempre un ojo crítico en el desarrollo y ejecución de la investigación. Desarrollando en mi nuevas habilidades para enfrentar la vida profesional.
- ❖ Agradecer a Don Sergio Lecaros Menéndez por la gran oportunidad de trabajar en la Planta San José, en donde tuve la oportunidad de conocer el rubro pesquero y desarrollar mi trabajo en forma cabal, con todas las facilidades para el éxito de mi tesis de grado.
- ❖ A Don Antonio Caram quien me abrió las puertas de la planta de Coronel, le doy mis sinceros agradecimientos por todas las facilidades brindadas para desarrollar mi trabajo en la planta.
- ❖ A Don Carlos Cornejo Fernández quien me acogió de excelente manera, desde el primer minuto en su espacio, ha sido un gran maestro, teniendo siempre una muy buena disposición a mis dudas, confianza en mi trabajo y que a pesar de no conocerme siempre mantuvo su amabilidad y atención al buen desarrollo de los resultados.
- ❖ A la señora Ana Maria Vidal, quien siempre fue muy amable manteniéndose preocupada más allá de su labor, brindando tranquilidad y dando las condiciones más favorables para mi estadía y trabajo en planta.
- ❖ A todos quienes tuve el agrado de conocer, quienes siempre tuvieron para mi cordialidad, paciencia, atención y respeto por mi investigación, desde los encargados de los turnos de producción (Don Miguel, Don Ángel, Don Samuel, Don Segundo), los operadores del autoclave (Don José, Don Juan Civilo, Don Leonel), para todas las personas de la línea de producción, y las personas de mantención de la planta, mis más sinceros agradecimientos por su paciencia y su colaboración.
- ❖ A mis padres quienes siempre me apoyaron y tuvieron paciencia para conseguir este objetivo.
- ❖ A Rene y Lore por su apoyo, amistad, y guía en la aplicación de la metodología.
- ❖ Miguel Escobar, amigo, gracias por tu amistad, tu apoyo y compañía en planta, en una ciudad y tierras que no conocía.

ÍNDICE DE MATERIAS

Capítulo		Página
1	INTRODUCCIÓN	1
2	REVISION BIBLIOGRÁFICA	4
2.1	Desarrollo de los envases flexibles	4
2.1.1	Nace la bolsa esterilizable	5
2.1.2	Definición	5
2.1.3	Ventajas del envasado en bolsas esterilizables	6
2.1.4	Desventajas del uso de bolsa esterilizable	7
2.1.5	Composición de las bolsas	8
2.1.6	Características del material y especificaciones	9
2.1.7	Una mirada al futuro en el uso de bolsas esterilizables	10
2.2	Procesamiento térmico en bolsas esterilizables	12
2.2.1	Factor crítico	13
2.2.2	Esterilidad comercial	15
2.2.3	Desviaciones de proceso	15
2.2.4	Proceso formulado o proceso establecido	15
2.3	Elaboración de conservas de jurel en bolsas esterilizables	16
2.3.1	Sistemas de esterilización de envases flexibles	19
2.3.2	Autoclaves que utilizan agua como medio calefactor	20
2.3.3	Autoclaves que utilizan mezcla vapor/aire	23
2.4	Control de calidad en pescados	26
2.4.1	Alteración del pescado	26
2.4.2	<i>Clostridium botulinum</i>	28

2.5	Evaluación de tratamientos térmicos	30
2.5.1	Estudio de distribución de temperatura	32
2.5.2	Estudio de penetración de calor	32
2.5.3	Autoridad de proceso	32
2.5.4	Parámetros de resistencia térmica	33
2.5.5	Desarrollo del programa de tratamiento térmico	34
2.5.6	Determinación del valor F en el diseño de programas de tratamientos térmicos	35
2.6	Métodos de cálculo en la determinación de tiempos de proceso	39
2.7	Simulación de tratamientos térmicos en bolsas esterilizables utilizando métodos numéricos	42
2.8	Variables relacionadas con la velocidad de transferencia de calor y parámetros de simulación de tratamientos térmicos	48
2.8.1	Propiedades termofísicas	48
2.8.1.1	Densidad (ρ)	49
2.8.1.2	Conductividad térmica (k)	49
2.8.1.3	Calor específico (C_p)	49
2.8.1.4	Difusividad térmica (α)	49
2.8.1.5	Coefficiente global de transferencia de calor (U)	50
2.9	NURBS (Non – Uniform Rational B – Splines)	50
2.10	Simulación de procesos	50
2.10.1	Captura de datos	53
2.10.2	Pre-procesamiento	53
2.10.3	Segmentación y adecuación de superficie	54
2.10.4	Creación del modelo de CAD	54
2.10.5	Ingeniería asistida por computador (CAE)	54
2.11	Jurel	57

3	MATERIAL Y MÉTODO	59
3.1	Evaluación de la distribución de temperaturas en el autoclave	60
3.1.1	Configuración del Data-Logger	63
3.1.2	Calibración de termocuplas	66
3.1.3	Registro de temperaturas	66
3.2	Penetración de calor en las muestras de jurel envasados al vacío en bolsas esterilizables	68
3.2.1	Materia prima	68
3.2.1.1	Evaluación de la materia prima	68
3.2.1.2	Selección y preparación de la materia prima	68
3.2.2	Configuración del Data-Logger y calibración de termocuplas	69
3.2.3	Inserción de termocuplas	69
3.2.4	Sistema de envasado y sellado	70
3.2.5	Tratamientos térmicos aplicados	77
3.2.6	Determinación experimental del coeficiente total de transferencia de calor	79
3.3	Ubicación espacial de las termocuplas en el producto	83
3.4	Modelación matemática del proceso de transferencia de calor	83
3.4.1	Ecuaciones de gobierno	85
3.4.1.1	Condiciones iniciales	85
3.4.1.2	Condiciones de borde considerando un dominio 3D	87
3.5	Simulación de procesos térmicos de productos de formas complejas	89
3.5.1	Obtención del modelo digital	89
3.5.1.1	Trazado de mallas	90
3.5.1.2	Captura de puntos y generación de las superficies digitalizadas	90

3.5.1.3	Modelado geométrico	92
3.5.2	Análisis y simulación del proceso térmico en ALGOR	92
3.5.2.1	Elección del escenario de diseño	95
3.5.2.2	Generación de la malla	95
3.5.2.3	Determinación de parámetros de simulación	95
3.5.2.4	Definición de los elementos	95
3.5.2.5	Especificación del material de los elementos	98
3.5.2.6	Ingreso de parámetros de tiempo y temperatura inicial	100
3.5.2.7	Especificación de las curvas de carga aplicadas en la superficie del producto	101
3.5.2.8	Análisis Numérico	103
3.5.3	Revisión de resultados	104
3.6	Validación de resultados simulados	105
3.7	Evaluación de tratamientos térmicos	106
4	PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	109
4.1	Estudio de distribución de temperatura en el autoclave	109
4.2	Curvas experimentales de los tratamientos térmicos aplicados	111
4.3	Simulación de los tratamientos térmicos aplicados	111
4.3.1	Modelos digitales 3D	111
4.3.2	Modelos Mallados FEA	119
4.3.3	Diagramas de Contorno	123
4.4	Comparación de perfiles de temperatura experimentales y simulados	123
4.5	Evaluación de los tratamientos térmicos	134
4.5.1	Ubicación del punto de más lento calentamiento/enfriamiento	134
4.5.2	Determinación de los valores de F_0	136
4.5.2.1	Comparación de valores de F_0 experimentales y	136

	simulados	
4.5.2.2	Valores de F_0 por etapas	138
4.5.2.3	Evaluación del error en la determinación de la letalidad del proceso	140
4.6	Determinación del valor F_0 mediante el método fórmula de Ball	141
4.7	Aplicación de la simulación en procesos productivos	142
4.7.1	Evaluación de la reducción de los tiempos de proceso térmico	142
4.7.2	Evaluación del aumento de la productividad	144
5	CONCLUSIONES	149
6	RESUMEN	151
7	BIBLIOGRAFÍA	153
8	ANEXOS	163

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadros		Página
1	Valores empíricos de F_0 para conservas de baja acidez	38
2	Especificaciones de termocuplas Kapton®	65
3	Especificaciones técnicas de las bolsas esterilizables utilizadas en la investigación	73
4	Especificaciones de los cortes de jurel utilizados en las bolsas esterilizables	77
5	Identificación de las cargas y productos evaluados	79
6	Parámetros del modelo comunes en todos los análisis	95
7	Composición química fraccional del jurel (<i>Trachurus murphyi</i>)	99
8	Estadísticas de los modelos digitales de filetes de jurel en bolsas esterilizables	122
9	Estadísticas de los modelos digitales de conos de jurel en bolsas esterilizables	122
10	Coordenadas para los nodos evaluados en las muestras bolsa-filetes de jurel	126
11	Coordenadas para los nodos evaluados en las muestras bolsa-conos de jurel	126
12	Valores de RMSE para las etapas de calentamiento, enfriamiento y global de proceso en las muestras bolsa-filetes	133
13	Valores de RMSE para las etapas de calentamiento, enfriamiento y global de proceso en las muestras bolsa-conos	133
14	Coordenadas del nodo más frío en las muestras bolsa-	135

	filetes de jurel evaluados	
15	Coordenadas correspondientes al nodo más frío en las muestras bolsa conos de jurel evaluados	136
16	Valores de F_0 (min) para el punto de la termocupla y punto más frío de las muestras	137
17	Valores de F_0 (min) por etapas del proceso de esterilización y para los filetes de jurel evaluados	139
18	Valores de F_0 (min) por etapas del proceso esterilización y para los conos de jurel evaluados	139
19	Valores de F_0 (min) para temperaturas con ($T > 100$ °C) y sin ($T < 100$ °C) importancia letal en filetes y conos de jurel	139
20	Valores de letalidad calculadas para los perfiles de temperatura de la termocupla y del punto de más lento calentamiento/enfriamiento	141
21	Valores de F_0 determinados por el método de Ball y el Método General para los tratamientos térmicos realizados	142
22	Valores F_0 obtenidos al reducir el tiempo de operador para las bolsas en filetes y conos	143
23	Producción de bolsas formato filete para los programas de proceso térmico actual y propuesto	145
24	Producción de bolsas formato conos para los programas de proceso térmico actual y propuesto	145
25	Producción combinada de bolsas formatos filetes y conos: Caso A	146
26	Producción combinada de bolsas formatos filetes y conos: Caso B	147
27	Beneficios económicos al seleccionar el programa propuesto	148

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura		Página
1	Curva de penetración de calor en bolsas esterilizables y envases metálicos. Para $F_0 = 5,2$ minutos, envases metálicos: 35 minutos, bolsa esterilizable: 10 minutos	7
2	Composición y propiedades de las bolsas esterilizables	9
3	Presentación de productos en bolsas esterilizables	12
4	Esquema de operaciones para la elaboración de jurel envasado al vacío en bolsas esterilizables	17
5	Esquema de autoclave hidrostático que utiliza agua en forma de cascada	21
6	Esquema de autoclave de inmersión total en agua	22
7	Esquema de funcionamiento de un autoclave horizontal del tipo LAGARDE calentado por mezcla vapor- aire	24
8	Curva típicas de temperatura del autoclave y punto de más lento calentamiento/enfriamiento durante un tratamiento térmico	31
9	Modelo Geométrico 2D y 3D usado por CRISTIANINI y RODRIGUEZ (2002) para el análisis de transferencia de calor en bolsas esterilizables	44
10	Esquema que muestra la forma del alimento original y aproximado, y la ubicación de los elementos de control Geometría de la bolsa esterilizable y rejilla de la malla	45
11	utilizada en la simulación de esterilización térmica de líquidos alimentarios	46

12	Modelo físico, mallado y diagrama de contorno en ALGOR® de filetes de salmón en bolsas esterilizables	48
13	NURBS (Non – Uniform Rational B – Splines)	51
14	Captura de puntos y obtención del modelo digital mediante el Brazo digitalizador Microscribe-G2L™	53
15	Esquema del proceso de discretización de un modelo continuo	56
16	Jurel (<i>Trachurus symmetricus murphyi</i>)	58
17	Dispositivo para el ingreso de termocuplas al interior del autoclave	61
18	Sistema de esterilización. (a) Autoclave Lagarde. (b) Sistema de bandejas y carros. (c) Interior del autoclave (d) Motor del sistema ventilador	62
19	Programa operacional del Autoclave Lagarde	63
20	Registrador de Temperaturas (<i>Data logger</i>) de 12 canales <i>Digi-Sense</i>	64
21	Sistema de adquisición de datos	65
22	Termocuplas del tipo T (Cobre – Constantán)	66
23	Ingreso de carros con termocuplas ubicadas para prueba de distribución de temperatura	67
24	Disposición de termocuplas durante prueba de distribución de temperatura	67
25	Filetes de jurel	70
26	Conos de jurel y posición en bolsa esterilizable	71
27	Filete de jurel envasado al vacío en bolsa esterilizable con dispositivo de cobre y termocupla	72
28	Inserción de termocuplas previo al sellado	72
29	Formato y diseño de las bolsas utilizadas durante la investigación	73
30	Sistema de llenado para filetes con boquilla	74

	dosificadora metálica	
31	Selladora continua HENKOVAC “E – Series”	75
32	Bolsas formato filete después del primer sellado	75
33	Selladora continua CBS-900 LD PLASPAK	76
34	Bolsas selladas y calibradas bajando su temperatura mediante agua con hielo	77
35	Ubicación de las bolsas con termocuplas en bandejas y carros	78
36	Disposición de las bolsas en el autoclave durante las pruebas de penetración de calor	78
37	Cilindro de cobre envasado al vacío en bolsa esterilizable	80
38	Sistema de Rayos X para la ubicación espacial de las termocuplas en los productos	84
39	Toma de Rayos X en vistas superior y lateral de los productos	85
40	Representación de las condiciones de asimetría geométrica y simetría térmica	88
41	Brazo digitalizador Microscribe G2L™	90
41	Captura de puntos	91
43	Modelado 3D en Rhinoceros®	93
44	Modelo digital 3D en Software CAD Rhinoceros®	94
45	Elección del tipo de Análisis de Transferencia de Calor en ALGOR®	95
46	Generación de la malla para el dominio 3D en ALGOR®	97
47	Definición de los elementos para el análisis de conducción de calor	98
48	Propiedades termofísicas del material de los elementos	99
49	Ingreso de parámetros de tiempo y temperatura inicial	100

50	Asignación de curvas de carga sobre las superficies	101
51	Curva de carga para el coeficiente total de transferencia de calor (U) en función del tiempo de proceso	102
52	Curva de carga para la temperatura del medio en función del tiempo de proceso	102
53	Modelo mostrando la incorporación de las cargas en la superficie	103
54	Ventana de Análisis	104
55	Distribución de temperatura en el interior del autoclave LAGARDE	110
56	Curvas experimentales correspondientes a la bolsa filete A-I	112
57	Curvas experimentales correspondientes a la bolsa filete B-II	113
58	Curvas experimentales correspondientes a las bolsas filete C-III y D-III	114
59	Curvas experimentales correspondientes a las bolsas cono A-IV y B-IV	115
60	Curvas experimentales correspondientes a la bolsa cono C-V	116
61	Modelo digital 3D de la bolsa filete A-I	117
62	Modelo digital 3D de la bolsa cono B-IV	118
63	Modelo mallado (FEA) de la bolsa filete A-I	120
64	Modelo mallado (FEA) de la bolsa cono B-IV	121
65	Corte longitudinal del diagrama de contorno de la bolsa filete A-I	124
66	Corte longitudinal del diagrama de contorno de la bolsa cono B-IV	125
67	Radiografías mostrando la localización de la	127

	termocupla en la bolsa filete A-I	
68	Localización de la termocupla y nodo más frío en el modelo digital correspondiente a la bolsa filete A-I	128
69	Perfiles de temperaturas para la ubicación de la termocupla y nodo más frío correspondiente al proceso térmico de la bolsa filete A-I	129
70	Radiografías mostrando la localización de la termocupla en la bolsa cono B-IV	130
71	Localización de la termocupla y nodo más frío en el modelo digital correspondiente a la bolsa cono B-IV	131
72	Perfiles de temperaturas para la ubicación de la termocupla y nodo más frío correspondiente al proceso térmico de la bolsa cono B-IV	132

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo		Página
1	Programa operacional autoclave LAGARDE	163
2	Modelos empíricos propuestos por CHOI y OKOS para la predicción de propiedades termofísicas del jurel (<i>Trachurus symmetricus murphyi</i>) en función de la temperatura	165
3	Propiedades termofísicas del jurel (<i>Trachurus symmetricus murphyi</i>) en función de la temperatura generadas con <i>Foodproperty</i> v. 1.0	166
4	Modelos digitales 3D obtenidos en Rhinoceros®	171
5	Modelos digitales con su respectiva malla generada en ALGOR®	175
6	Diagrama de contorno de cada producto simulado en ALGOR®	179
7	Localización de las termocuplas en los filetes y conos de jurel envasados al vacío en bolsas esterilizables	183
8	Ubicación de los nodos correspondientes a la termocupla y al punto de más lento calentamiento/enfriamiento en los modelos de ALGOR®	187
9	Perfiles de temperaturas para la ubicación de la termocupla y nodo más frío correspondiente al proceso térmico de filete y conos de jurel	191
10	Perfil de temperatura, Estudio de Penetración de calor Q-TECH (2007), en filetes de jurel envasados en bolsas esterilizables	197
11	Parámetros de penetración de calor y valores F_0 obtenidos en pruebas desarrolladas por Q-TECH (2007)	196

NOMENCLATURA

Símbolos

C_p	Calor específico (J/kg K)
U	Coeficiente global de transferencia de calor ($W/m^2 K$)
k	Conductividad térmica ($W/m K$)
T	Temperatura ($^{\circ}C$; K)
t	Tiempo (min; s)
V	Volumen (m^3)
x	Coordenada del sistema de coordenadas rectangular
y	Coordenada del sistema de coordenadas rectangular
T_i	Temperatura inicial del producto
RT	Temperatura de autoclave durante el procesamiento
CWT	Temperatura del agua de enfriamiento
j_c	Factor de retraso curva enfriamiento
ρ	Densidad (kg/m^3)
α	Difusividad térmica (m^2/s)

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente los recursos marinos en Chile constituyen un mercado en expansión y existe una clara evolución hacia la elaboración de productos de mayor valor agregado, cada vez más adecuados a las necesidades del consumidor. Para lograr este objetivo la industria busca nuevas alternativas en el desarrollo de productos, optimización de procesos de producción, ahorro de energía y mejoramiento en la calidad del producto final, aumentando la retención de nutrientes y mejorando su presentación. En este sentido una clara tendencia en la industria de alimentos preservados por calor, que está adquiriendo importancia es el reemplazo de envases de vidrio, latas o rígidos en general, por envases flexibles esterilizables.

Los beneficios que propone esta nueva tecnología está en reducir la temperatura y el tiempo de proceso, apuntando a un producto de alta calidad y vida útil durante un tiempo no inferior a dos años. Además, el uso de las bolsas esterilizables involucra un menor peso y volumen, reduciendo los costos en transporte y almacenamiento (BRODY, 2003). El fuerte aumento en la demanda por este tipo de envases se debe principalmente al desarrollo que está experimentando la exportación de productos marinos a mercados como U.S.A., Europa y Japón. El perfeccionamiento en el uso de esta tecnología permitiría mejorar la eficiencia del proceso, y a su vez generar nuevas expectativas de negocio en el mercado internacional.

El jurel es uno de los recursos pelágicos más importante dentro de los desembarques en Chile. Durante marzo del 2007 alcanzó a 350,6 mil toneladas, aportando el 22,7% del desembarque total. El principal aporte se realizó en el área comprendida entre la V y X regiones con 300,1 mil toneladas. (CHILE, SERNAPESCA, 2007).

Dentro de la amplia gama de productos que elabora la Planta Pesquera San José S.A., ubicada en Coronel, VIII región, se envasan cortes de jurel al vacío en bolsas esterilizables, en formatos: cono (Tall), cono pequeño (Buffet), filete y desmenuzado, que cuentan con gran cobertura en el mercado internacional.

Actualmente en las plantas conserveras, la evaluación de los tratamientos térmicos aplicados se realiza en forma netamente empírica, mediante el monitoreo de la cinética de penetración de calor en los productos. Sin embargo, al trabajar con alimentos de formas irregulares y condiciones de proceso variables es prácticamente imposible conocer a priori la ubicación “exacta” del punto de más lento calentamiento/enfriamiento, lo que hace improbable localizar la termocupla en éste punto. El no tener el perfil de temperatura del centro térmico del producto produciría sub-calcular la letalidad del proceso térmico. De lo expuesto se puede desprender que los métodos experimentales para la evaluación de la letalidad de los procesos térmicos, pueden ser adecuadamente complementados por la simulación.

La simulación de procesos térmicos permitiría reducir los ensayos experimentales, permitiendo ahorrar tiempo y dinero. Asimismo, puede ser una herramienta muy eficaz como apoyo para la toma de decisiones en el establecimiento de los factores de seguridad aplicados, mejorando la calidad del producto y aumentando la productividad de la planta.

En el Instituto de Ciencia y Tecnología de Alimentos (ICYTAL), se ha desarrollado una metodología implementada por el laboratorio de digitalización 3D e ingeniería asistida por computador para el procesamiento de alimentos (FoodDigicaelab) que consiste en simular los procesos de conducción de calor de alimentos de formas irregulares complejas, permitiendo reproducir mediante simulación las condiciones operacionales aplicadas en planta. Esta metodología se fundamenta en la aplicación de la Ingeniería reversa y la tecnología CAD/CAE (Computer-Aided Design/Engineering) y permitiría ubicar con mayor

precisión el punto de más lento calentamiento/enfriamiento en productos de formas irregulares.

La hipótesis establecida fue:

- Mediante la digitalización 3D y la simulación asistida por computador es posible reducir los tiempos de esterilización de cortes de jurel envasados en bolsas esterilizables procesados a nivel industrial cumpliendo siempre los requisitos de esterilidad comercial.

Con estos antecedentes, el objetivo general del presente trabajo de investigación fue el siguiente:

- Evaluar los tratamientos térmicos de dos formatos de cortes de jurel (cono y filete) envasados al vacío en bolsas esterilizables actualmente en producción en la Planta de Coronel de Pesquera San José.

Objetivos específicos:

- Determinar experimentalmente la cinética de penetración de calor en los productos evaluados.
- Determinar la ubicación del punto de más lento calentamiento/enfriamiento en los productos evaluados.
- Evaluar la letalidad de los programas de tratamiento térmico actualmente operativos en la planta, utilizando los parámetros de resistencia térmica de las esporas del *Clostridium botulinum*.

2. REVISION BIBLIOGRÁFICA

2.1 Desarrollo de los envases flexibles

Hasta comienzos del siglo veinte, el diseño de envases era definido como un tema determinado por la función. Esta función consistía básicamente en contener, proteger y distribuir los productos. Durante el transcurso de la revolución industrial, los tipos y disponibilidad de los materiales para envasado aumentaron, y la función de los envases desarrollados comenzó a incluir la información nutricional del contenido, así como también la marca del productor (SHELLHAMMER, 2003).

Los primeros intentos por desarrollar envases flexibles, estuvieron basados en el uso de materiales naturales y flexibles, tales como pergamino (pieles de animal), vitelo (piel de terneros o corderos), el papiro, y fibras de plantas tejidas, durante el siglo XIX. El papel de envolver ha servido como material de empaque flexible por siglos; sin embargo, el que primero resistió la posibilidad de impresión fue una envoltura utilizada por un elaborador de papel alemán durante los años cincuenta.

En 1810 se introduce el proceso térmico como una forma de preservación de alimentos, y con esto el crecimiento en la elaboración de envases rígidos elaborados de metal o vidrio (SHELLHAMMER, 2003).

No fue hasta 1930 que los plásticos poliméricos contribuyen significativamente a la industria del envasado. El crecimiento del envasado flexible está ligado directamente al desarrollo de la industria del plástico. Nuevas técnicas en la síntesis de polímeros, junto al perfeccionamiento en la elaboración de láminas, se proyecta hacia una amplia gama de materiales versátiles y convenientes para el desarrollo de envases flexibles, con mejoradas propiedades de barrera

y mecánicas. Es así, como desde la segunda guerra mundial el envasado flexible ha tenido un notable crecimiento en las más variadas industrias.

2.1.1 Nace la bolsa esterilizable. A mediados del siglo XX, la National Aeronautics and Space Administration (NASA), diseñó un envase para ser utilizado durante los viajes espaciales y posteriormente en las raciones alimenticias militares. Este envase resistente al proceso de esterilización es lo que hoy se conoce industrialmente como “Retortable Pouches” o bolsas esterilizables (BRODY, 2003).

La idea de promover este nuevo tipo de envases, era obtener un envase de peso ligero, fácil de empacar, y de vida útil estable, con el principal propósito de sustituir la tradicional lata. Las investigaciones continúan durante los años sesenta; produciéndose en 1965 las primeras bolsas esterilizables comerciables en Italia (CANADA, CANADIAN FOOD INSPECTION AGENCY, 2002).

2.1.2 Definición. La bolsa esterilizable puede definirse como un envase flexible para alimentos esterilizados por calor, capaz de resistir temperaturas de 115 a 130 °C, con fluctuaciones de presión semejantes a las que se desarrollan en la esterilización de envases de vidrio o metálicos (LAMPI, 1981).

Respecto a los principios y regulaciones asociados a las operaciones de elaboración de productos en bolsas esterilizables, estas no difieren en sus aspectos básicos, del envasado convencional en lata o vidrio; sin embargo la implementación del sistema resulta ser mucho más desafiante. La geometría de tales envases puede ser plano, ovalado o cónico truncado o casi cualquier cosa que pueda emerger desde la mente creativa del productor. El material utilizado consiste en una amplia variedad de plásticos. En general el plástico era restrictivo en términos de la temperatura máxima de operación; este envase es capaz de soportar temperaturas de 250 °F, usualmente utilizado como límite superior durante el procesamiento, además, resiste distorsiones térmicas a muy

bajas temperaturas. El sellado hermético de las bolsas se realiza generalmente por la aplicación de calor, por el derretimiento en una de las láminas que componen la bolsa (BRODY, 2003).

2.1.3 Ventajas del envasado en bolsas esterilizables.

Su perfil delgado permite reducir el tiempo de calentamiento, disminuyendo la posibilidad de sobrecocer el producto (FIGURA 1), produciendo un mejor color, mayor firmeza, y menor pérdida de nutrientes. La elaboración tiene requerimientos reducidos de energía al compararlo con la elaboración de conservas en envases metálicos (CANADA, CANADIAN FOOD INSPECTION AGENCY, 2002). La utilización de bolsas presenta las siguientes ventajas:

- La bolsa esterilizable permite una transferencia de calor más rápida en el punto crítico. Durante el proceso, esto permite que se requiera menor tiempo para que las temperaturas letales alcancen el punto crítico del producto, con una mínima sobre-cocción del contenido en las áreas próximas a la periferia.
- Algunas bolsas esterilizables tienen un sistema abre-fácil que elimina los requerimientos para abrir una lata, reduciendo el riesgo de cortes.
- Puede ser etiquetado al imprimir en la lámina, haciéndolo permanente.
- Fácil eliminación del envase utilizado.
- Menor peso y volumen, respecto a los envases tradicionales, con las consiguientes repercusiones económicas en el almacenamiento, transporte y distribución. Este aspecto es particularmente importante en lo que se refiere a los envases vacíos. Por ejemplo un acoplado de 45 pies contiene 200.000 latas de 8 onzas o 2.3 millones de bolsas esterilizables.
- A estas ventajas se suma que la bolsa no contiene barniz interno que pueda migrar hacia el producto.

- Gran variedad de tamaños, formas y composición de los materiales utilizados al servicio del productor.
- Mejoras en la presentación gráfica del producto.

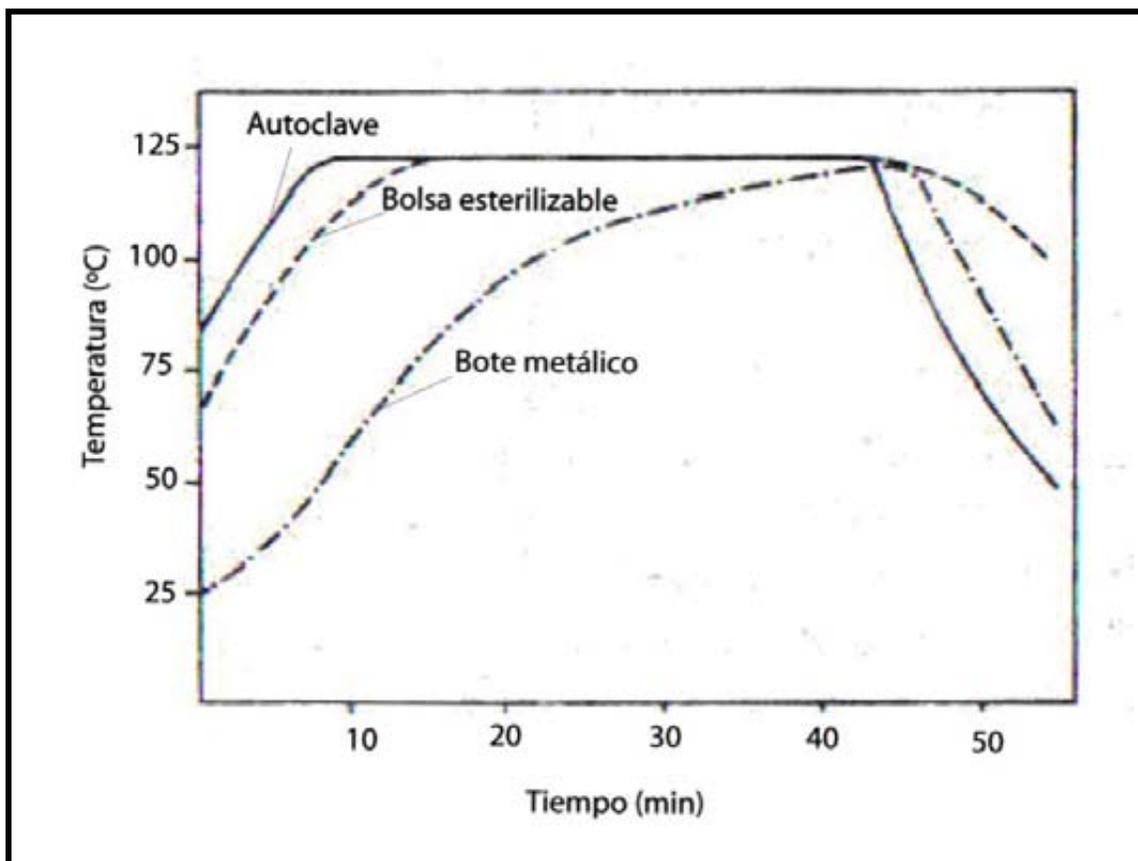


FIGURA 1. Curva de penetración de calor en bolsas esterilizables y envases metálicos. Para $F_0 = 5,2$ minutos, envases metálicos: 35 minutos, bolsa esterilizable: 10 minutos.

FUENTE: LAMPI (1977).

2.1.4 Desventajas del uso de bolsa esterilizable. El primer obstáculo es que los productores a menudo requieren la inversión de un gran capital, para una única maquinaria. Además el proceso de envasado es más lento y más complejo comparado con las líneas de envasado en lata (CANADA, CANADIAN FOOD INSPECTION AGENCY, 2002).

- El proceso térmico es complejo debido al número de parámetros críticos a controlar durante el proceso, los cuales deben ser monitoreados durante la producción, (por ejemplo aire residual, llenado de la bolsa, mezcla de vapor/aire). También la utilización de un sistema de bandejas especiales para el sistema de esterilización es importante, ya que al ser puestas en orden deben proveer un medio de calentamiento óptimo y prevenir el contacto entre bolsas.
- Al ser los envases fácilmente perforables, ello pueden requerir un envase secundario para su distribución.
- Para controlar el proceso se requiere equipos especiales, tales como probadores de explosión, o un probador de tensión para detectar fugas y evaluar la integridad del contenido.

2.1.5 Composición de las bolsas. La mayor parte de los materiales actualmente utilizados son trilaminados, con capa intermedia de aluminio, que aporta gran impermeabilidad a gases, radiaciones y permite alargar la vida útil de los alimentos por periodos superiores a dos años. Se emplean también materiales transparentes sin capa de aluminio, en tales casos el período de conservación no supera los seis meses (CATALA, 1982).

Los polilaminados utilizados para la fabricación de bolsas esterilizables están compuestos generalmente por cuatro capas de láminas: una capa de poliéster hacia el exterior, una segunda capa de nylon, una lámina de aluminio como tercera capa y una última capa de polipropileno al interior (FIGURA 2) (CANADA, CANADIAN FOOD INSPECTION AGENCY, 2002).

Las bolsas se emplean para alimentos de baja y alta acidez, tanto para uso de envasado aséptico como para el uso en autoclaves. Pueden ser fabricadas de poliéster o polipropileno en el exterior, para la durabilidad y polipropileno en el interior, en contacto con el alimento, junto con una barrera al oxígeno entre medio de las dos, que puede ser cloruro de polivilideno (PVDC o SARAN)

EVOH o nylon. El polipropileno puede ser teñido con titanio para restringir el paso de la luz o una capa de aluminio puede reemplazar en muchos casos al PVDC, como barrera frente al oxígeno y la luz. Cada componente realiza una función específica, que es crítica para aumentar la vida útil del producto y la integridad del envase (GAVIN y WEDDIG, 1995).

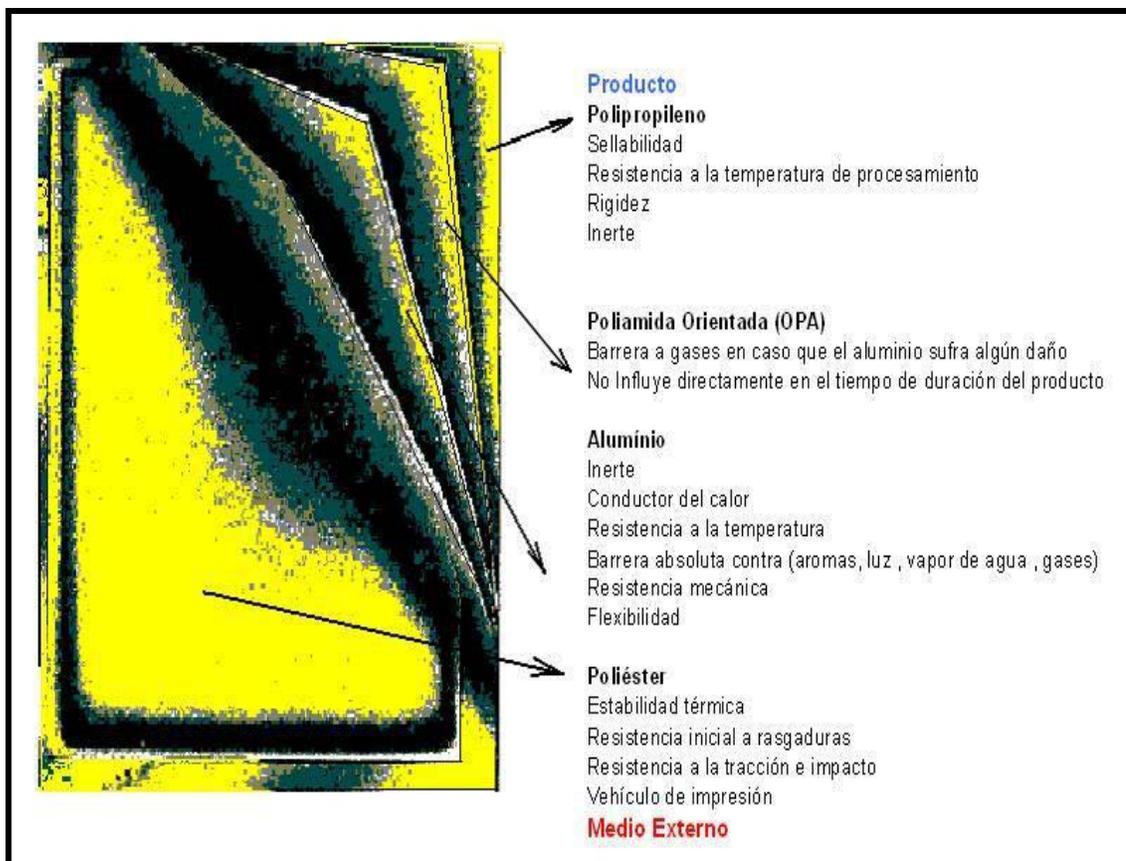


FIGURA 2. Composición y propiedades de las bolsas esterilizables.

FUENTE: CANADA, CANADIAN FOOD INSPECTION AGENCY (CFIA) (2002).

2.1.6 Características del material y especificaciones. La elección de materiales para la elaboración de una bolsa esterilizable es sin duda muy importante. El material debe proteger contra la degradación, los cambios de humedad, la invasión microbiana, el ingreso de oxígeno y las interacciones con el envase (CANADA, CANADIAN FOOD INSPECTION AGENCY, 2002).

El material debe tener una estructura robusta e íntegra y ser capaz de soportar las temperaturas de esterilización tan bien como el manejo abusivo. Esto debe también complementarse con los requerimientos de la regulación vigente. Las características esenciales que debe satisfacer la bolsa esterilizable son:

- Baja permeabilidad a los gases (oxígeno).
- Baja permeabilidad a la Humedad.
- Bajas propiedades higroscópicas.
- Sellado y esterilizado por calor.
- Ser construida con los materiales apropiados (los materiales deben ser aprobados por la CFIA (CANADIAN FOOD INSPECTION AGENCY)).
- Resistencia a la penetración de grasas, aceites y otros componentes del alimento.
- Resistencia física para resistir abusos durante el empaquetado, el tratamiento térmico, el almacenamiento y la distribución (rasgaduras, fatigas impactos y desgaste).
- Ausencia de residuos de solvente. Se requieren láminas de polipropileno, químicamente inertes, esto se logra generando catálisis en ellas, y posteriormente removiendo con solventes, posteriormente la lámina puede ser usada para alimentos.
- Al enlazar los materiales de las láminas, no debe este migrar hacia los alimentos, manteniendo altas propiedades de barrera.

Un productor puede adquirir bolsas esterilizables en diferentes formas. La bolsa puede ser preformada, sellada por sus tres lados o formada en una línea de operación con llenado y sellado combinado en una envasadora.

2.1.7 Una mirada al futuro en el uso de bolsas esterilizables. Los envases flexibles, específicamente las bolsas esterilizables, son envases modernos, ajustados al estilo de vida actual y a los mercados de productos del buen sabor, mejor aspecto, y nutrición de alta calidad. Además de tener un tiempo mínimo

de preparación. Estas eran las principales razones por las que los consumidores preferían a menudo productos congelados a productos en conservas (SOOJIN, 2006).

Los productos en bolsas esterilizables, generalmente disponibles en el mercado al detalle, tienen un precio superior que los productos envasados en latas. A pesar del mayor precio los actuales consumidores parecen estar dispuestos a preferir los productos procesados en bolsas esterilizables, por la comodidad del uso, y una mejor calidad. El mercado actual ofrece diversos productos a sus consumidores en este formato: atún para sándwich, alimentos para mascotas en bolsas. Otros productos del mercado incluyen carne asada en salsa, platos de arroz y vegetales, carnes, caldo, ají, hot dog, empanadas de pollo y lo nuevo en el mercado canadiense, platos de arroz con pasta (FIGURA 3).

El uso de las bolsas esterilizables para los productos procesados tiene un amplio potencial de mercado, constituye una muy buena oportunidad para dar mayor vida útil a los alimentos, aumentando el valor agregado de productos de origen cárnico, marino y agrícola, entregando nuevas formas de presentación. Aprovechando al máximo todos los beneficios de los nuevos envases del siglo veintiuno (BRODY, 2003).

Mientras la inversión inicial para la producción de productos en bolsas es aún relativamente costosa, se espera que esta tecnología de envasado a largo plazo sea menos costosa que las líneas de conservas en lata de alta velocidad. Los avances en el desarrollo de envases flexibles apuntan al desarrollo de bolsas esterilizables convenientes para calentar en un horno de microondas y la técnica óhmica de calentamiento mediante electricidad, también tiene un gran potencial para desarrollar un envase de fácil uso, cuyas principales características son un calentamiento más uniforme y un apilado más eficiente (SOOJIN **et al.**, 2006).



FIGURA 3. Presentación de productos en bolsas esterilizables.

2.2 Procesamiento térmico en bolsas esterilizables

Toda esta tecnología apunta a producir productos seguros y estables en el tiempo. La elaboración de productos en bolsas esterilizables contempla inicialmente una materia prima de alta calidad inicial, que mantiene una alta actividad de agua ($a_w > 0,85$), y una baja acidez ($pH > 4,5$), que es posible de ser procesada y envasada de forma convencional. Sin duda desde el antaño proceso de appertización y su tecnología, se han realizado importantes avances tecnológicos en el desarrollo de la industria conservera (BRODY, 2003).

Los productos alimenticios con $pH > 4,5$ son vulnerables al crecimiento y a la producción de toxinas, a partir de la mayor resistencia al tratamiento térmico de las esporas de microorganismos patógenos. Alimentos con $pH < 4,5$ tales como

frutas y bebidas derivadas de frutas (incluyendo tomate) pueden ser microbiológicamente estables, requiriendo procesos de tiempo y temperatura más cortos que los especificados por la regulación para alimentos de baja acidez. Típicamente en estos casos se realiza un llenado en caliente y un proceso térmico a temperaturas inferiores a 100 °C (212 °F) seguidas por un enfriamiento.

La elaboración de alimentos está sujeta actualmente a ser declarados frente a la Administración de Alimentos y Medicamentos (FDA, Food and Drug Administration) de los Estados Unidos, además de otras regulaciones de vigilancia, para asegurar la seguridad microbiológica, de estos productos. Este proceso consiste en declarar en el caso de la elaboración de productos en bolsas esterilizables; los protocolos de tiempo-temperatura, controles y registros de sellos herméticos; todo esto bajo explícitos exámenes. Esta forma de proceder, tan severa y estricta ha contado con retraso en lo que respecta a la aceptación comercial de la bolsa esterilizables (BRODY, 2003).

Los parámetros de proceso son requeridos por la Administración de Alimentos y medicamentos (FDA) y por la USDA (United States Department Agriculture) aplicados sobre alimentos de baja acidez; los registros deben incluir factores críticos del proceso.

2.2.1 Factor crítico. Significa cualquier propiedad, característica, condición, aspecto u otro parámetro cuya variación puede afectar el proceso formulado y el alcance de la esterilidad comercial. Los factores críticos deben incorporarse a los Programas de Aseguramiento de Calidad de las plantas (CHILE, SERNAPESCA, 2006b).

Los factores críticos deben ser incorporados a los programas de aseguramiento de calidad de las plantas. Durante el establecimiento del proceso de producción, se deben definir los factores críticos durante una

producción determinada y la ocurrencia de desviaciones durante su ejecución. Estos factores críticos en el procesado térmico de las bolsas incluyen: espacio mínimo de cabeza, gas residual, consistencia de los productos, llenado máximo o peso drenado, temperatura inicial, temperatura y tiempo de proceso, distribución de temperatura en el sistema de esterilización, orientación de los envases, sistema de bandejas de procesamiento, cantidad de producto procesado, y materiales a partir de los cuales la bolsa es construida.

Dentro de los factores críticos existentes es el control del espesor del producto y los pesos de llenado, que constituyen parámetros importantes a controlar, ya que influyen directamente en la determinación de los tiempos de proceso, conforme a alcanzar temperaturas letales en el punto crítico del producto (CHILE, SERNAPESCA, 2006b).

Influye también el diseño del sistema de cestas y bandejas para la circulación del medio de calentamiento y la orientación del producto en el sistema de autoclave, para asegurar que todas reciban igual exposición al medio de calentamiento, para ello las bolsas van puestas en raquetas metálicas perforadas en compartimentos individuales, que evitan su apilamiento durante el proceso. A pesar que los materiales de las bolsas han mejorado con los años, éstas todavía requieren un manejo adecuado (MITCHELL, 2002).

Otro parámetro de interés en la elaboración de productos en bolsas es la cantidad de aire en el producto, este no solo puede causar hinchamiento durante el proceso, afectando el espesor, sino también generar una disminución de la penetración del calor en el producto, ya que el aire es un excelente aislante contra el calentamiento.

Las características físicas y químicas del producto, la composición de los ingredientes, el tamaño de partículas, estado físico (fresco, congelado o cocinado), homogeneidad, gravedad específica, sólidos solubles, gas ocluido, y

viscosidad entre otros son importantes para definir la cantidad de calor aplicada. En la conducción del calor en alimentos, variaciones menores en la elaboración no tienen un impacto significativo en la cantidad de calentamiento. En el caso de alimentos con suficiente líquido libre para promover el calentamiento por convección, la conducción de calor puede ser afectado por un incremento en la cantidad de almidón u otros como la cantidad de agua ligada, e ingredientes del alimento (BLAKISTONE, 2003).

El objetivo global de controlar los factores críticos y posibles desviaciones de proceso consiste en estandarizar un programa de tratamiento para un determinado producto, de forma tal de asegurar el cumplimiento de la esterilidad comercial.

2.2.2 Esterilidad comercial. De un alimento térmicamente procesado, implica la inactivación de todos los microorganismos capaces de poner en riesgo la salud pública a una muy baja probabilidad de sobrevivir (TOLEDO, 1991).

2.2.3 Desviaciones de proceso. Significa cualquier variación en el proceso formulado provocado por cambios en las condiciones fijadas para el proceso, como los factores críticos, u otra condición de operación de los equipos involucrados en el proceso de esterilización (CHILE, SERNAPESCA, 2006b).

2.2.4 Proceso formulado o proceso establecido. Proceso necesario para asegurar la destrucción de los microorganismos de interés para la salud pública, establecido por una autoridad de proceso competente, para alcanzar la esterilidad comercial de un producto específico, con los factores críticos asociados a ese producto y a ese proceso (CHILE, SERNAPESCA, 2006b).

2.3 Elaboración de conservas de jurel en bolsas esterilizables

La elaboración de conservas de jurel en bolsas esterilizables se realiza mediante operaciones que no difieren en sus aspectos básicos al sistema de envasado convencional en envases de hojalata o frascos de vidrio. Sin embargo, existen operaciones que requieren un control especial dentro del sistema de producción, como son el llenado y cierre de los envases, además del sistema de esterilización aplicado (FIGURA 4) (MITCHELL, 2002).

El sistema de llenado y sellado se realiza generalmente de forma manual. La elaboración se inicia con la formación de las bolsas a partir del laminado o a partir de envases pre-formados. El sistema de envasado consiste básicamente en dos etapas:

- Preparación y movimiento del alimento a envasar hasta la estación de llenado en la sala de proceso mediante cintas transportadoras.
- Colocación adecuada del jurel en el interior de la bolsa mediante una boquilla dosificadora y la adición de sal.

La condición esencial de esta etapa es que la zona superior del envase donde deberá formarse el cierre final, se mantenga siempre limpia, es por eso que las boquillas dosificadoras deben introducir el producto en el fondo del envase con sistemas que eviten las salpicaduras y las espumas cuando se trate de líquidos. Cabe destacar que las bolsas no se llenan hasta el tope, sino que deja un espacio de cabeza suficiente, que es necesario como zona de expansión de aire residual durante al esterilización (MITCHELL, 2002).

Antes de proceder al cierre de las bolsas es necesario lograr una efectiva eliminación del aire en el interior de las mismas, práctica que es usual en el proceso de enlatado (CATALA, 1982).

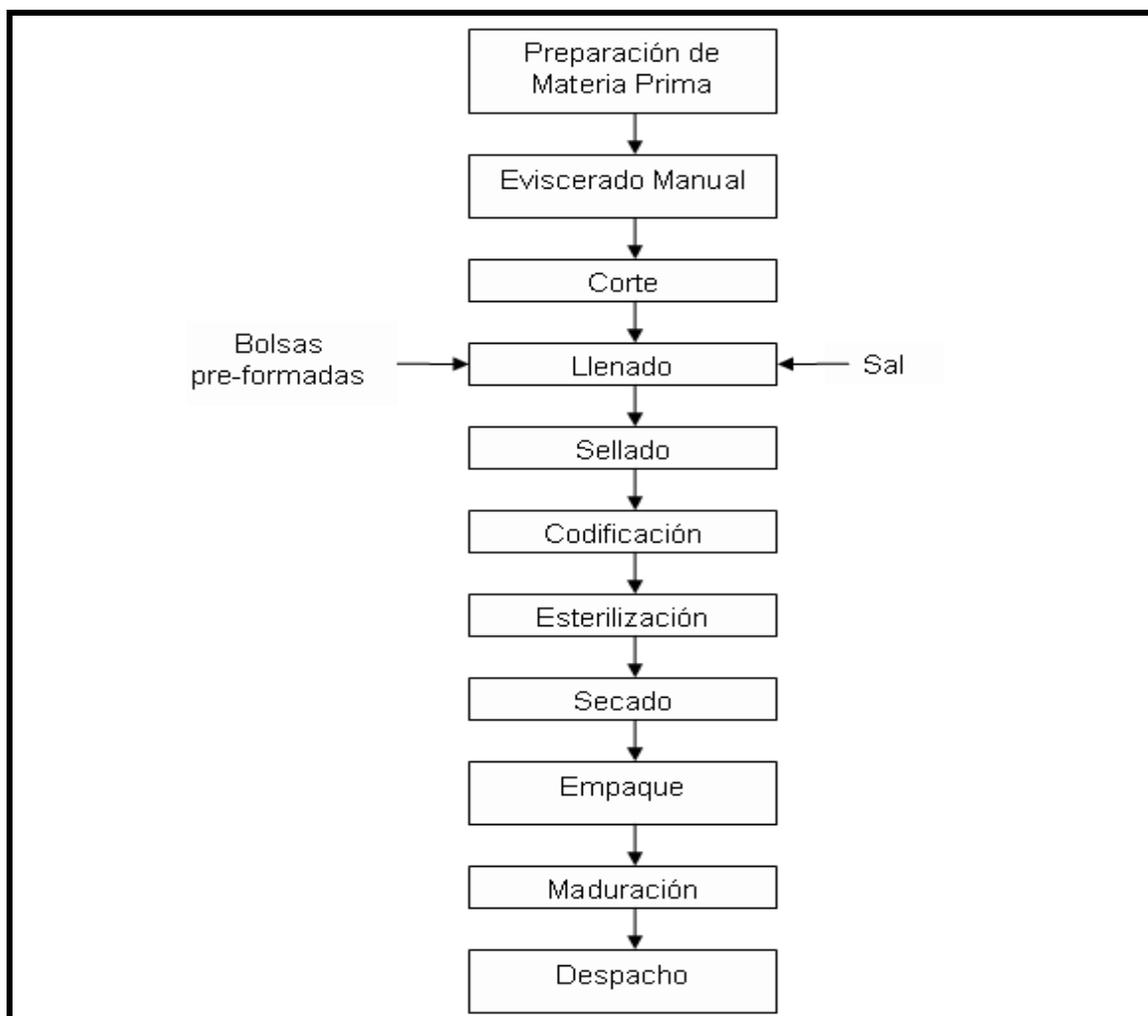


FIGURA 4. Esquema de operaciones para la elaboración de jurel envasado al vacío en bolsas esterilizables.

FUENTE: PESQUERA SAN JOSE - Planta Coronel.

En general, la elección del sistema de eliminación de aire se hace en función del producto a envasar. En el caso de productos sólidos que contiene líquido atrapado es mejor el vacío mecánico, no obstante debe estudiarse la formulación del producto para seleccionar el sistema y los parámetros más adecuados.

El sellado de las bolsas debe cumplir con ciertos requerimientos, entre estos destaca que este cierre debe ser duro y completo (en controles, no se permite

un ancho de sello inferior a 3 cm de espesor), que no contenga humedad, ni producto atrapado, además no presentar arrugas o surcos en el área de cierre y por supuesto prevenir la contaminación microbiológica (CANADA, CANADIAN FOOD INSPECTION AGENCY, 2002).

En la esterilización aplicada a bolsas esterilizables, la sobre-presión aplicada (presión aplicada en exceso, de la ejercida por el medio de calentamiento a la temperatura de proceso) durante el procesamiento debe mantener la integridad de los envases, debido a que la construcción del empaque y el tipo de cierre tienen una resistencia limitada ante la presión interna generada durante el proceso. Al respecto, en literatura especializada (MITCHELL, 2002; NUÑEZ, 2004), se recomienda una sobre-presión de aire de 0,2 a 0,7 kg_f/cm². La aplicación de sobre-presión tiene como objetivos: a) Asegurar la integridad del envase frente a los problemas de expansión térmica del aire residual del producto envasado; b) Mejorar la transmisión de calor; y, c) juega un papel importante en la inmovilización de las bolsas, previniendo la agitación y los movimientos que podrían dañar los cierres (LAMPI, 1977).

Por otra parte, durante la esterilización, es importante ubicar adecuadamente las bolsas en el autoclave, con el fin de asegurar que todas reciban igual exposición al medio calefactor. Las bolsas van puestas en bandejas o raquetas perforadas, en compartimientos individuales, ya que no pueden apilarse. Se ha discutido sobre la conveniencia de mantener las bolsas en posición horizontal o vertical, al parecer no existen diferencias significativas entre ambos sistemas, aunque parece mayor la tendencia a la posición horizontal (CATALA, 1982).

Finalmente al abandonar el sistema de esterilización las bolsas son traspasadas a una cinta transportadora con un sistema de secado por aire, para eliminar el agua sobre las bolsas. Consecutivamente los productos son ubicados en cajas listos para su distribución. Sin embargo, se considera un período de maduración

del producto, con el fin de otorgar características organolépticas más apreciables¹.

2.3.1 Sistemas de esterilización de envases flexibles. El desarrollo de nuevo tipo de envases, como las bolsas esterilizables, bandejas simples o múltiples, envases de plástico rígidos o flexibles, y de hojalata tienen una gran repercusión sobre las técnicas de esterilización, en su forma, volumen, y por su resistencia a los tratamientos térmicos con sobrepresión. Es evidente entonces, que es de suma importancia precisar exactamente para cada formato y material las condiciones correctas de tratamiento (sobrepresión, gradiente térmico, entre otros) con el objetivo de evitar las pérdidas consecuentes a un proceso inadecuado (RODRIGO *et al.*, 1980).

Otro aspecto que cada vez adquiere mayor importancia son los gastos industriales en el consumo energético. El productor de conservas ha de estudiar muy detenidamente este aspecto, para minimizarlo, no olvidando que la operación de esterilización es una de las que más energía consume, por lo que debe analizar detenidamente los equipos y técnicas que permitan un mayor ahorro energético.

En general los autoclaves utilizados para el procesamiento de bolsas esterilizables se basan en los siguientes principios:

- Vapor saturado, vapor sobrecalentado/agua en spray (S/W) o agua en cascada.
- Inmersión total en agua con aire o vapor con sobrepresión.
- Mezcla vapor /aire (S/A).

En lo referente a la utilización de vapor saturado, esta técnica ya no es muy utilizada debido a las precauciones que deben ser tomadas al momento de

¹ CORNEJO C. (2008). Ingeniero en Alimentos. Jefe de planta, productos especiales Pesquera San José. Planta Coronel. Comunicación Personal.

tratar las bolsas en dichos procesos. Si bien es posible la utilización de este tipo de autoclaves, el desarrollo de temperaturas elevadas puede causar problemas en el material plástico (poliéster, polietileno), y si se suma largos tiempos de residencia se pueden producir deformaciones (BLAKISTONE, 2003).

2.3.2 Autoclaves que utilizan agua como medio calefactor. Los autoclaves hidrostáticos utilizan agua en forma de cascada con sobrepresión, estos pueden ser usados para bolsas, aunque no es lo común. Estos autoclaves utilizan agua a alta velocidad para esterilizar conservas de alimentos. Su calentamiento y la esterilización son logrados por un flujo de agua recalentada a alta velocidad sobre las conservas (FIGURA 5). La sobrepresión de aire es factible para envases flexibles y semirígidos, estos necesitan una presión de aire tal que proteja la integridad, tanto del envase como del sello, cuando existan presiones internas excesivas del envase durante el periodo de calentamiento y la fase final de enfriamiento (MITCHELL, 2002).

El agua se calienta en forma externa por medio de un intercambiador de calor y es bombeada a través del sistema sobre el producto. Estos sistemas requieren de una circulación uniforme de agua y requieren de un control muy estricto, dado que las bolsas se calientan rápidamente.

El agua es calentada internamente por medio de distribuidores de vapor. Con una mezcla de vapor/aire que sirve como fuente de sobrepresión (GAVIN y WEDDIG, 1995).

El sistema vapor/agua es particularmente atractivo, ya que no tiene como restricción la aplicación de aire a presión. La transición desde el medio de calentamiento al de enfriamiento, es conveniente, evitando el peligro de generar una presión que pueda afectar la integridad del envase.

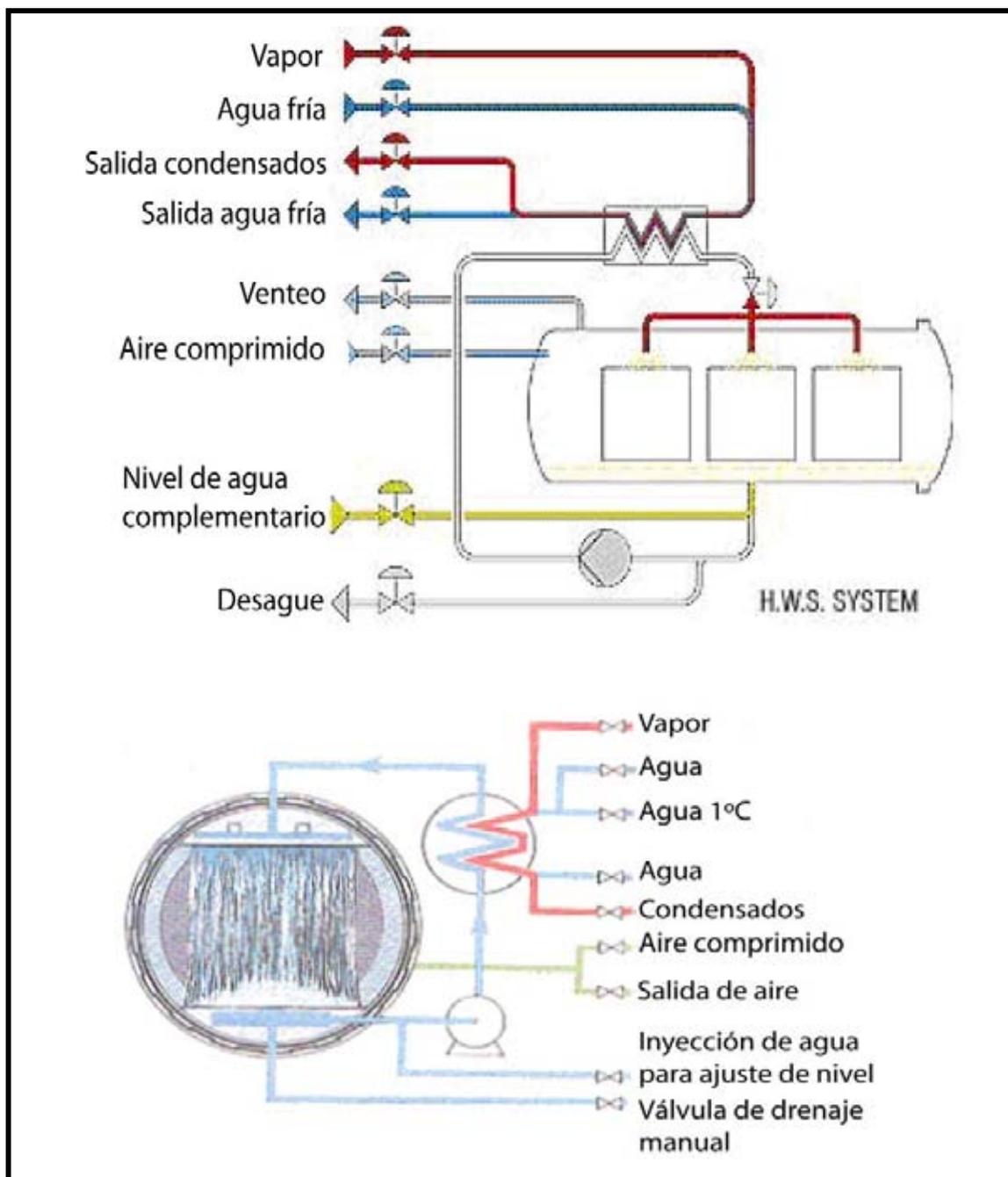


FIGURA 5. Esquema de autoclave hidrostático que utiliza agua en forma de cascada.

FUENTE: <http://www.lagarde-autoclaves.com>.

En autoclaves de inmersión total en agua (FIGURA 6), se utiliza una bomba para circular el agua; esta se calienta mediante un intercambiador de calor externo que utiliza vapor e ingresando por la parte superior del autoclave. El vapor es utilizado también para calentar el agua del tanque del proceso. También es posible la aplicación de sobrepresión, por aire comprimido. Para el control eficaz del proceso son necesarios dos controladores de vapor separados e independientes (GAVIN y WEDDIG,1995).

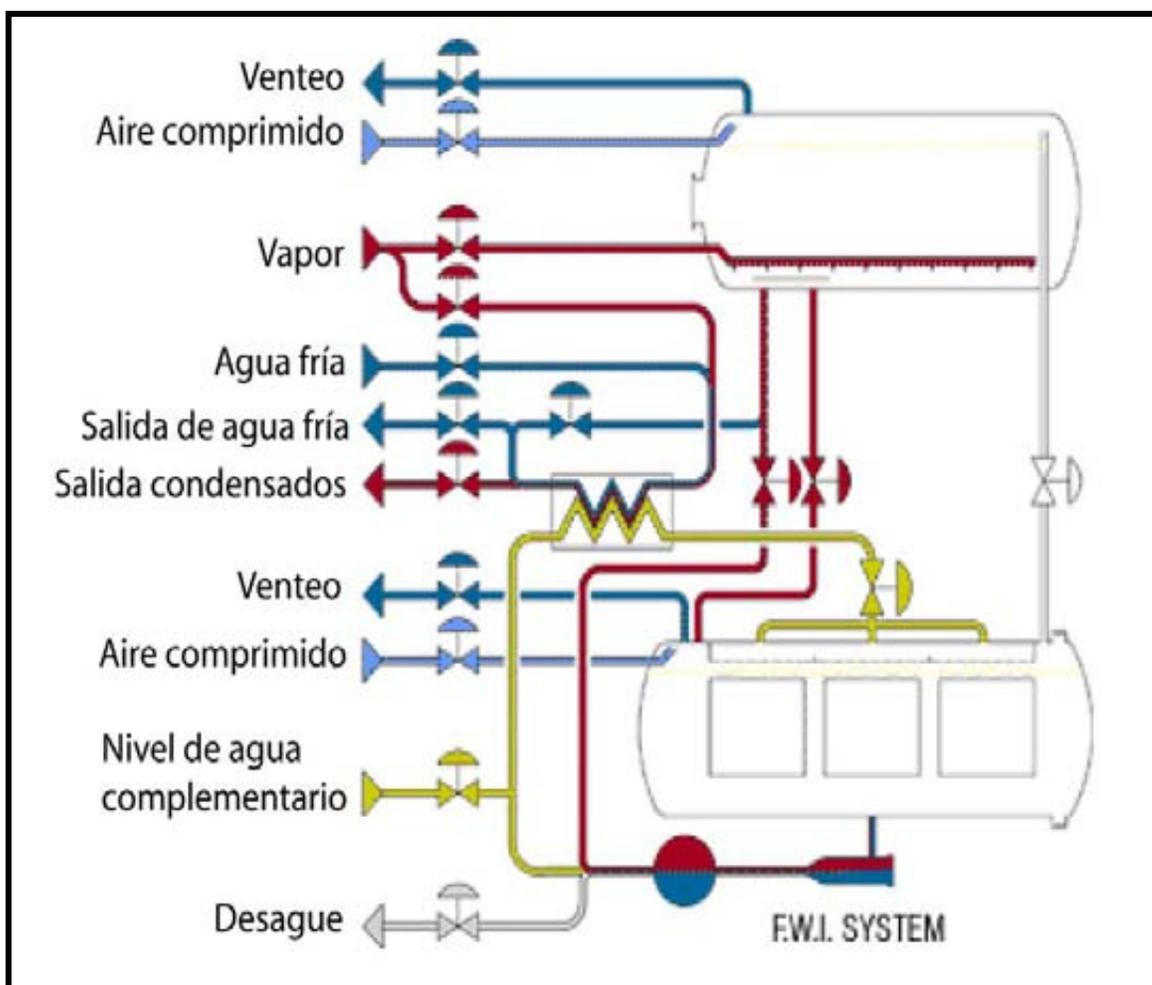


FIGURA 6. Esquema de autoclave de inmersión total en agua.

FUENTE: <http://www.lagarde-autoclaves.com>.

2.3.3 Autoclaves que utilizan mezcla vapor/aire. En la elaboración de productos en bolsas flexibles mediante la utilización de autoclaves que usan mezcla de vapor y aire como medio calefactor, uno de los principales problemas es la sobrepresión necesaria para mantener la integridad del envase que, debido a su construcción y tipo de cierre, tienen una limitada resistencia frente a la presión interna (FIGURA 7). La presión interna en estos envases será mayor que la presión del vapor puro a la temperatura de proceso, cuando el producto alcance una temperatura superior a los 100 °C. Además cuando las bolsas se están enfriando tras el proceso, lo primero que se produce es una brusca reducción de la presión externa hasta alcanzar la presión atmosférica, mientras en el interior de los envases el producto aún se mantiene caliente y su presión, por lo tanto elevada. Para contrarrestar la presión de vapor del interior del envase, debe aplicarse sobrepresión (mantener una presión de recinto superior a la de saturación de vapor a la temperatura de trabajo); esto se puede conseguir con la inyección de aire comprimido, de lo contrario pueden estallar las bolsas al verse superada su resistencia mecánica (GAVIN y WEDDIG, 1995).

Los equipos que disponen de sistemas de inyección de aire comprimido permiten trabajar regulando por separado la presión y la temperatura, y así se podrá mantener en cualquier momento una presión de recinto superior a la de saturación del vapor de agua, por lo que siempre será superior a la del interior del envase. En estas condiciones es posible esterilizar cualquier tipo de envase, sin que su resistencia mecánica sea un factor limitante.

La utilización de autoclaves con sistema de mezcla de vapor/aire para la calefacción presenta además la ventaja de hacer innecesaria la operación de venteo, que es la más crítica en cuanto a la eliminación de aire del interior, esto implica un considerable gasto de vapor que se utiliza para el arrastre al exterior del aire interno (CASP y ABRIL, 1999).

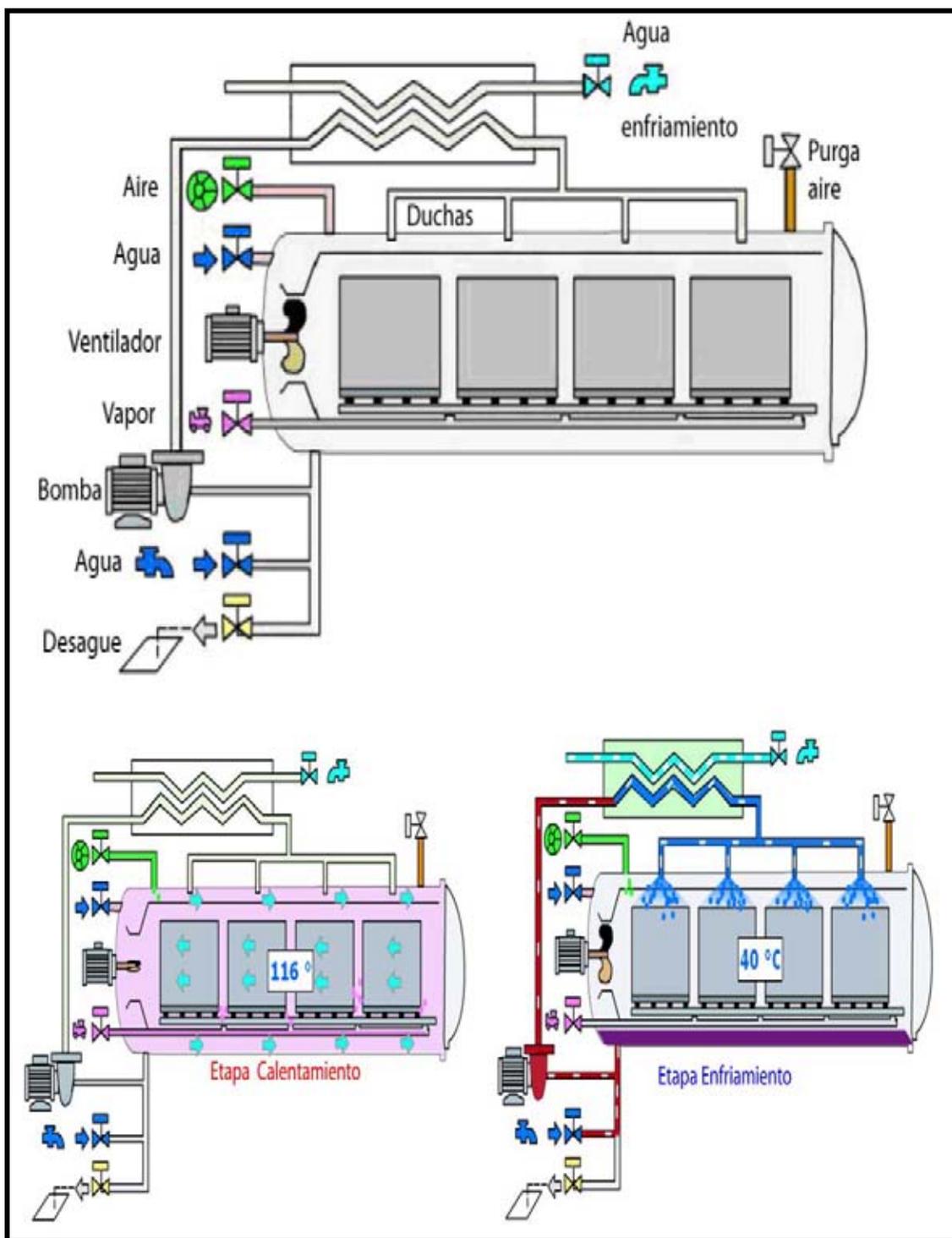


FIGURA 7. Esquema de funcionamiento de un autoclave horizontal del tipo LAGARDE calentado por mezcla vapor- aire.
 FUENTE: <http://www.lagarde-autoclaves.com>.

El problema más importante en la utilización de mezcla vapor-aire para el calentamiento, es que su coeficiente de película es menor que el del vapor de agua saturado, condensándose, y que además es inversamente proporcional a la concentración de aire en la mezcla. Esto último significa, que si se pretende una uniformidad en el tratamiento, se deberá conseguir que la mezcla de vapor-aire sea uniforme en todos los puntos del interior del recinto, evitando la aparición de zonas más frías dentro del mismo. Para conseguir esta homogeneidad se emplean sistemas de convección forzada mediante un potente ventilador que hace circular el fluido calefactor por todo el autoclave. Este ventilador trabaja en aspiración succionando la mezcla aire-vapor del centro del recinto y enviándola al extremo contrario entre los deflectores y la carcasa. Posee también sistema de guías para mover las jaulas por el interior del autoclave y el sistema de duchas para el enfriamiento final. La calefacción se consigue inyectando vapor de agua entre las jaulas, que el potente ventilador instalado se encarga de mezclar con el aire en el interior del recinto. Los condensados producidos durante el calentamiento permanecen en el interior de la carcasa y se emplea para el enfriamiento del producto, pulverizándolos sobre él, después de haber sido enfriados en un intercambiador de calor externo con agua fría. Así la presión durante todo el proceso se mantiene en el nivel deseado por inyección de aire comprimido (CASP y ABRIL, 1999).

En este equipo se puede también conseguir el enfriamiento por inmersión total o parcial en agua fría si es que este sistema se estima más adecuado para el producto tratado. Los autoclaves que utilizan este sistema de calefacción se fabrican también rotatorios, lo que permite la agitación de los envases durante su procesado.

Las regulaciones del FDA no se refieren en forma directa sobre la operación de los autoclaves de vapor/aire, pero en cambio trata estos sistemas bajo el título de "Otros sistemas ". Las regulaciones del Departamento de Agricultura de los

Estados Unidos (USDA) fueron escritas más recientemente y contienen algunos requisitos específicos (GAVIN y WEDDIG, 1995).

Los autoclaves con agitación pueden aumentar la penetración de calor y, por lo tanto aumentar la eficiencia del proceso, sin embargo, las bolsas comúnmente no son agitadas en sistemas vapor/agua, sino que son usualmente usados en modo sin agitación. Los sistemas que controlan la temperatura y la presión durante el calentamiento y el enfriamiento reducen el impacto sobre las bolsas, resultando un mejor control de la letalidad durante la fase de enfriamiento (BLAKISTONE, 2003).

2.4 Control de calidad en pescados

La materia prima utilizada para el proceso debe ser evaluada, cumpliendo todas las condiciones de frescura y calidad para ser parte del proceso de elaboración de bolsas.

En primera instancia se desea controlar un nivel de frescura acorde a la calidad del producto, para ello se examinan los principales parámetros de frescura en el pescado tales como olor, color y firmeza apropiada a la calidad del producto. Esto queda respaldado con el análisis de nitrógeno total volátil (TVN) utilizado muchas veces en la elaboración de productos pesqueros como criterio para verificar el grado de descomposición de la materia prima, para ser destinada al proceso de producción.

2.4.1 Alteración del pescado. Tanto el pescado de agua salada como el pescado de agua dulce contienen niveles relativamente elevados de proteínas y otros constituyentes nitrogenados. El contenido de carbohidratos es cero, mientras el contenido de grasa varía desde valores muy bajos hasta valores bastante elevados, dependiendo de la especie (JAY, 2002).

De especial importancia en el tejido muscular del pescado es la naturaleza de los compuestos nitrogenados. La cantidad de nitrógeno total en el músculo del pescado se encuentra distribuida en dos grupos; estos son el nitrógeno proteico y el nitrógeno no proteico. Entre estos últimos se encuentran aminoácidos libres, bases nitrogenadas volátiles, tales como amoníaco y la trimetilamina, creatinina, las taurinas, las betaínas, ácido úrico, anserina, carnosita, histaminas y cadaverina.

La flora alterante del pescado consta generalmente de bacilos esporógenos Gram negativos de los dos tipos *Pseudomonas* y *Acinetobacter-Moraxella*. Muchas bacterias de la alteración del pescado son capaces de crecer bien entre 0 y 1 °C, e incluso un gran número de *Pseudomonas* son capaces de alterar el pescado a -3 °C aunque a una velocidad lenta.

Los primeros signos de alteración organoléptica se pueden observar examinando las agallas para descubrir la presencia de olores desagradables. Si los pescados que se consumen no son eviscerados inmediatamente, las bacterias intestinales atraviesan las paredes intestinales y penetran en la carne de la cavidad intestinal. Se cree que este proceso es ayudado por la actividad de enzimas proteolíticas, que están en el intestino y pueden ser enzimas naturales propias del intestino de los peces o enzimas de origen bacteriano procedentes del interior del canal intestinal o por ambas (JAY, 2002).

El tejido muscular de los pescados difiere de la carne de los mamíferos, respecto a la autólisis. El tejido muscular del pescado experimenta la autólisis con mayor rapidez siendo las enzimas las que comienzan con la degradación, posteriormente los microorganismos utilizan primeramente los compuestos más sencillos y en el proceso liberan varios compuestos volátiles de olor desagradables como son óxido de trimetilamina, la creatinina, la taurina, la anserina y compuestos afines junto con determinados aminoácidos que disminuyen durante la alteración del pescado, con la producción de

trimetilamina, amoníaco, histamina, sulfuro de hidrógeno, indol, y otros compuestos.

Las histaminas, diaminas y las sustancias volátiles totales se usan como indicadores de la alteración del pescado. La histamina es producida a partir del aminoácido histidina por la histidina descarboxilasa producida por los microorganismos (JAY, 2002).

Los compuestos volátiles totales que son generados durante la alteración del pescado incluyen las bases volátiles totales (TVB), los ácidos volátiles totales (TVA) , las sustancias volátiles totales (TVS), y el nitrógeno total volátil (TVN) , este último incluye el TVB y otros compuestos de nitrógeno que se obtienen por destilación del vapor en las muestras. El TVN es empleado como criterio de calidad aceptable en materias primas para los proceso de producción. Por ejemplo, en Australia y Japón se ha utilizado esta técnica en camarones, donde un nivel máximo de calidad para productos de calidad aceptable es 30 mg de TVN/100 g. En camarones ha sido observada una franca alteración cuando el TVN es superior a 30 mg de N/ 100 g. Este criterio es usado en planta para determinar la aptitud de la materia prima para la elaboración de jurel en bolsas esterilizables.

2.4.2 *Clostridium botulinum*. El botulismo es causado por la especie bacteriana, *Clostridium botulinum*, que corresponde a bacilo Gram positivo, anaerobio y esporógeno, con esporas de forma ovalada a cilíndricas. En base a la especificidad serológicas de sus toxinas, actualmente se han identificado siete tipos: A, B, C, D, E, F y G, de los cuales los tipos A, B, E, F y G producen botulismo en las personas (JAY, 2002).

Cl. botulinum es de gran preocupación en la producción de conservas, en primer lugar porque cuando crece puede producir una toxina o veneno letal y además porque puede aislarse de la tierra o del agua prácticamente en todo el

mundo. Su habilidad de formar esporas le permite sobrevivir a una amplia variedad de condiciones desfavorables, tales como el calor y agentes químicos. El término “botulinum” se deriva del vocablo latín “botulus”, embutido, ya que este microorganismo se aisló por primera vez de un embutido.

Algunas cepas de *Cl. botulinum* que utilizan proteínas, son denominadas putrefactivas (tipos A y G junto con algunas cepas de los tipos B y F), las cuales generan el olor producido durante su crecimiento. Ellas crecen mejor a temperaturas entre 30 y 37 °C, aunque puede haber crecimiento a cualquier temperatura entre 10 y 50 °C. Otras cepas utilizan carbohidratos como azúcares y almidón y no producen olores similares. Algunas de estas cepas están asociadas con ambientes marinos; ellas pueden desarrollarse a temperaturas más bajas, oscilando entre 3,3 y 5 °C. Sus esporas no toleran calentamiento a 100 °C (GAVIN y WEDDIG, 1995).

El pH mínimo que permite el crecimiento del *Cl. botulinum* y la producción de toxina han sido el objeto de muchos estudios. Generalmente se admite que a pH 4,5 o a valores menores no crece, siendo este hecho el que determina la intensidad del tratamiento térmico al que se debe someter los alimentos. Sin embargo, últimamente se han desarrollado estudios que presentan la existencia de la toxina en algunos alimentos muy ácidos enlatados en casa, en presencia de diferentes especies de hongos (GAVIN y WEDDIG, 1995).

Respecto a la distribución del *Cl. botulinum* este microorganismo es indígena de las tierras y de las aguas, por lo tanto sus esporas pueden encontrarse en cualquier parte, y cualquier alimento crudo puede estar contaminado con ellas. Sin embargo, es solamente cuando la forma vegetativa del organismo crece en el alimento que se produce la toxina o veneno. Ciertos tipos de esporas de *Cl. botulinum* son muy resistentes al calor y son capaces de sobrevivir de 5 a 10 horas en agua hirviendo, pero la toxina no es resistente al calor. La toxina puede ser inactivada por temperaturas de ebullición.

2.5 Evaluación de tratamientos térmicos

El éxito de la industria del envasado en conserva descansa en la aplicación acertada de principios integrados que buscan, en primer lugar, abastecer de productos seguros para el consumidor durante toda su vida útil, independiente del área de almacenamiento y sin necesidad de cadenas de refrigeración. En segundo lugar está en ofrecer beneficios nutricionales a quienes los consumen, y generar ventajas comerciales a sus productores (WARNE, 1989).

En el caso de productos pesqueros en conserva, específicamente en alusión al envasado de pescados, productos de baja acidez ($4,5 < \text{pH} < 7,0$), requieren un tratamiento térmico más severo, ya que a pH mayores a 4,5 es posible el desarrollo del microorganismo *Clostridium botulinum*, que si consigue reproducirse puede generar una toxina letal (PÉREZ, 2007).

Los tratamientos térmicos aplicados con el fin de dar estabilidad al producto, es una de las principales preocupaciones de los productores de pescado en conserva, estos deben cerciorarse que el tratamiento térmico aplicado sea suficiente para eliminar todos los microorganismos patógenos responsables de la descomposición; dentro de los cuales el *Cl. botulinum* es el principal microorganismo indicador, utilizado actualmente en las plantas conserveras de Chile para la certificación y validación de los tratamientos térmicos aplicados. Por otro lado los tratamientos térmicos tienen la función no menos importante, en el caso de conservas de productos marinos, de cocinar el pescado y en algunos casos ablandar espinas, procesos indispensables que confieren a los productos pesqueros en conserva sus propiedades organolépticas (WARNE, 1989).

Los principios en la aplicación de tratamientos térmicos se basan en la inactivación de microorganismos por calor, que es una de las operaciones fundamentales en la preservación de alimentos, que han estado vigentes

durante el siglo veinte y aún con repercusiones en el siglo veintiuno (MORALES-BLANCAS y TORRES, 2003a).

En la FIGURA 8, se muestra una curva típica de esterilización de un producto, indicando sus diferentes etapas que la caracterizan como tal (TOLEDO, 1991):

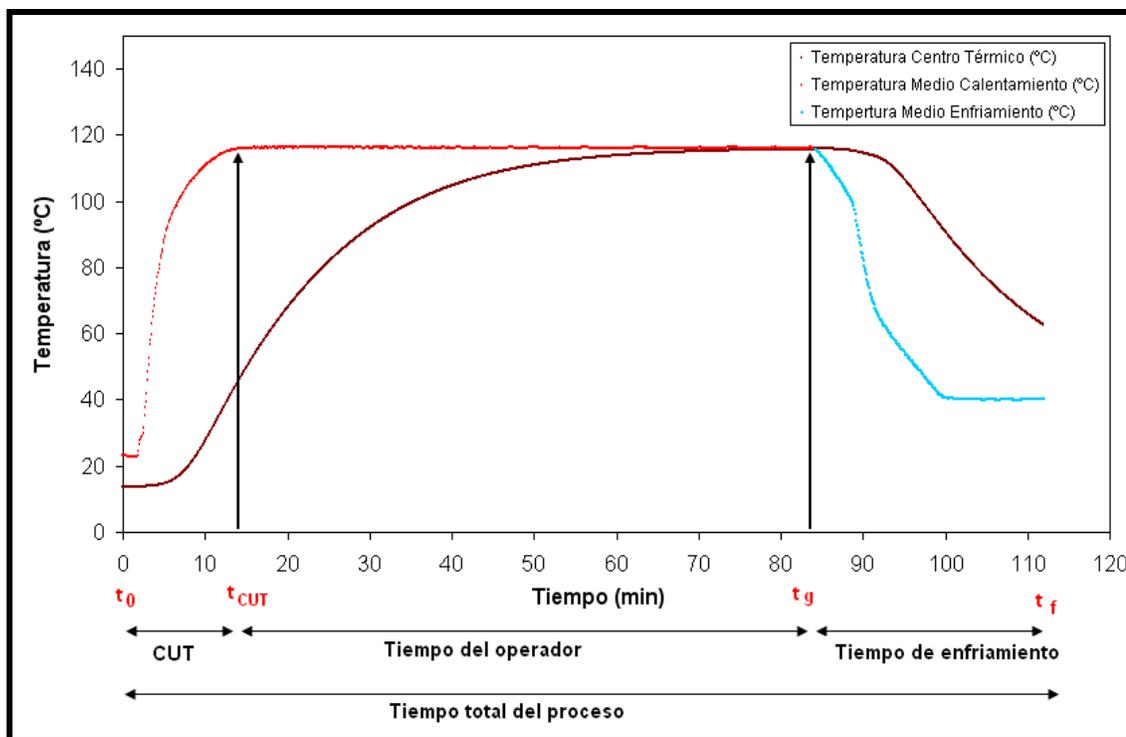


FIGURA 8. Curva típicas de temperatura del autoclave y punto de más lento calentamiento/enfriamiento durante un tratamiento térmico.

- **CUT** (*Come-up time*) o tiempo de elevación de la temperatura, es el tiempo que transcurre desde que comienza la entrada de vapor (t_0) al autoclave cerrado, hasta alcanzar la temperatura de esterilización (t_{cut})
- **Tiempo de esterilización** o **tiempo del operador**, es el tiempo en que el producto se encuentra sometido a la temperatura de esterilización, este periodo finaliza cuando termina la entrada de vapor al autoclave. Va desde el tiempo inicial del operador (t_{cut}) hasta el tiempo final del operador (t_g).

- **Tiempo de enfriamiento**, es el tiempo que demora el producto en bajar su temperatura desde la temperatura final del proceso de esterilización (t_g) hasta una temperatura aproximada de 40 °C.

En Chile los establecimientos que elaboran productos pesqueros cocidos deben presentar ante la oficina de SERNAPESCA de su jurisdicción la Solicitud de Evaluación de Procesos Térmicos que entre sus disposiciones exige un estudio de distribución de temperatura y el de penetración de calor en los productos que sean elaborados, los cuales deben haber sido realizados por una Autoridad de Proceso (CHILE, SERNAPESCA, 2007a).

2.5.1 Estudio de distribución de temperatura. Consiste en la evaluación de la temperatura al interior del autoclave y su distribución. El objetivo de este estudio es identificar la peor situación esperada que puede ocurrir en una producción comercial influenciada por el producto, envase y proceso (CHILE, SERNAPESCA, 2007b).

2.5.2 Estudio de penetración de calor. Consiste en determinar el comportamiento del calentamiento y enfriamiento de un producto y su envase (cuando corresponda) en un sistema específico de calentamiento, para establecer un proceso térmico seguro y evaluar sus desviaciones (CHILE, SERNAPESCA, 2007b).

2.5.3 Autoridad de proceso. Es la persona u organización que posee conocimiento experto en procesos térmicos para alimentos en envases herméticamente sellados, cuenta con el equipamiento y las instalaciones necesarias para hacer tales determinaciones y esta designado por el establecimiento para realizar ciertas funciones descritas en esta norma (CHILE, SERNAPESCA, 2007b).

2.5.4 Parámetros de resistencia térmica. Un aspecto crítico en el proceso térmico es la necesidad de cuantificar los efectos de las temperaturas letales sobre la población microbiana. Cuando las bacterias se someten al calor húmedo a temperaturas letales, se observa un orden logarítmico de muertes, lo que significa que, a una temperatura constante, se destruirá el mismo porcentaje de la población bacteriana en un intervalo de tiempo determinado, esto significa que todas las células tienen una idéntica resistencia térmica y esto es simplemente el cambio que produce una cierta cantidad de calor sobre una célula o espora, generando una determinada cantidad de muertes, independiente del tamaño de la población sobreviviente. De acuerdo a esta premisa surge el término de tiempo de reducción decimal (valor D); que corresponde al tiempo, expresado en minutos para inactivar el 90% de las esporas o células vegetativas de un determinado microorganismo, cuando es expuesto a una temperatura letal constante en un determinado medio (MORALES-BLANCAS y TORRES, 2003b). Consecuentemente, si se representa gráficamente el logaritmo del número de microorganismos sobrevivientes frente al tiempo de exposición a una temperatura constante se obtiene una línea recta conocida como curva de sobrevivencia del microorganismo.

Del mismo modo, la constante de resistencia térmica (valor z) es un parámetro característico del microorganismo indicador seleccionado, y expresa la resistencia térmica de las esporas bacterianas ante un cambio en la temperatura. Está definido como el aumento de temperatura necesario para causar una disminución del 90% en el tiempo de reducción decimal D . Si se representa gráficamente valores logarítmicos de D_T frente a las temperaturas de tratamiento, se obtiene una línea recta, denominada curva de destrucción térmica. El valor z es la inversa de la pendiente de dicha curva.

Otra característica implícita es que, por más reducciones decimales que se produzcan durante un tratamiento térmico, siempre habrá alguna probabilidad

de que sobrevivan esporas. En la práctica, los productores de conservas de pescado se dan por satisfechos si la probabilidad de supervivencia de esporas patógenas es suficientemente remota como para que no signifique ningún riesgo significativo para la salud pública (WARNE, 1989).

2.5.5 Desarrollo del programa de tratamiento térmico. Desde el punto de vista de la prevención del deterioro bacteriano del producto terminado, el productor de pescado en conserva debe tomar en consideración dos factores al seleccionar las condiciones del tratamiento térmico. El primero que corresponde a que el producto no sea una fuente de botulismo para el consumidor, en este caso se habla de cumplir la esterilidad comercial (WARNE, 1989).

En segundo lugar está que el riesgo de deterioro no patógeno se mantenga en niveles comerciales aceptables lo que se conoce como esporulamiento económico, relacionado con la proliferación en el producto de bacterias anaerobias termófilas, tales como *Bacillus Stearothermophilus* (FS 1518) o el anaerobio putrefactivo 3678, que si bien no producen un problema serio como el botulismo, el deterioro provocado por estas bacterias no patógenas, termina por poner en riesgo la rentabilidad y viabilidad comercial de la operación de envasado (WARNE, 1989).

Para la eliminación de los microorganismos termófilos los tratamientos térmicos aplicados tendrían que ser más severos, por lo tanto, al considerar la utilización de estos microorganismos como indicadores para diseñar un programa de tratamiento térmico es necesario tomar en cuenta los costos en la intensificación del tratamiento, los costos en términos de calidad derivados de un procesamiento mas severo, y si es realmente necesaria su eliminación. Esto último aludiendo a que muchas veces no seria necesario, ya que los productos mantienen una alta rotación en el mercado y las temperaturas de almacenamiento normalmente no corresponden al rango en las que puedan proliferar estos microorganismos (55 - 60 °C). Por otro lado, hay que considerar

los riesgos comerciales de un fracaso en el mercado si una espora termófila sobrevive produciendo deterioro en el producto.

De esta forma los Ingenieros de Proceso deben considerar estos aspectos al momento de elaborar programas de tratamientos térmicos que cuantifiquen los niveles máximos tolerables de sobrevivencia de microorganismos en sus alimentos envasados. En otras palabras, se trata de decidir el nivel de seguridad del tratamiento térmico dando como resultado final un proceso térmico formulado que asegure la destrucción de los microorganismos de interés para la salud pública.

El diseño de un programa de tratamiento térmico debe ser establecido por una autoridad de proceso competente reconocidas como tal por las entidades fiscalizadoras de cada país o región.

2.5.6 Determinación del valor F en el diseño de programas de tratamientos térmicos. El conocimiento de las cinéticas de destrucción térmica de las bacterias, generalmente bajo la forma de esporas, ha llevado a la noción del valor esterilizante. Este puede ser considerado como el valor representativo de la eficacia esterilizadora de un tratamiento térmico. El valor F_0 , o tiempo de destrucción térmica (TDT), corresponde al tiempo a una temperatura letal constante T , (asociado a una temperatura de referencia de 250 °F), requerido para inactivar un porcentaje dado de una población microbiana. El valor F es específico para una población microbiana caracterizada por su valor z (MORALES-BLANCAS y TORRES, 2003b).

La determinación del valor esterilizante del proceso ($F_{proceso}$), para garantizar el cumplimiento de la Esterilidad Comercial, se puede obtener por medios experimentales mediante el seguimiento de la cinética de penetración de calor, localizando sensores de temperatura en el punto de más lento calentamiento

en el producto, y su posterior cálculo utilizando los parámetros de resistencia térmica del *Clostridium botulinum*.

Actualmente la letalidad de un proceso térmico calculado en base a los parámetros de resistencia térmica del *Cl. botulinum* es utilizado por las industrias conserveras del país para declarar sus procesos térmicos a la Administración de Alimentos y Medicamentos de los Estados Unidos (*Food and Drug Administration*, FDA) y poder exportar los productos al mercado norteamericano.

Para evaluar los tratamientos térmicos aplicados se requiere conocer a lo largo de un tratamiento térmico, la evolución de las temperaturas y los valores letales que se alcanzan en el producto. Para ello se registran los datos tiempo – temperatura del proceso térmico $T(t)$ entre un tiempo inicial t_0 y un tiempo final t , lo que se conoce como valor esterilizante del proceso $(F_{T_{ref}}^z)_{proceso}$, la cual se calcula, mediante la siguiente ecuación (MORALES-BLANCAS y TORRES, 2003b):

$$(F_{T_{ref}}^z)_{proceso} = \int_{t_0}^t \frac{dt}{10^{(T_{ref}-T(t))/z}} \quad (2.1)$$

Al expresar T_{ref} bajo la denominación de valor F , indica que la integral total evaluada, determina los efectos de todas las combinaciones tiempo - temperatura aplicadas sobre las esporas, haciéndolo equivalente al tiempo en minutos a una única temperatura constante usada como referencia. Comúnmente las temperaturas de referencia son de 250 °F (121,11 °C) para alimentos de baja acidez y de 212 (100 °C) ó 200 °F (93,3 °C) para productos ácidos. Por otra parte, el superíndice z hace referencia a que solo un tipo de

espora es considerada, en este caso el valor z para el *Cl. botulinum* corresponde a 18 °F (10 °C) (MERSON **et al.**,1978).

PFLUG (1987b), sugiere que el modelo logarítmico puede ser usado para el diseño de un tratamiento térmico, determinando un valor de $(F_{T_{ref}}^z)_{requerido}$ que cumpla con respecto a la seguridad que se desea aplicar a la conserva en términos de probabilidad de esporulamiento en el alimento. De esta manera, el tiempo requerido para producir una determinada reducción del número de esporas, $(F_{T_{ref}}^z)_{requerido}$, puede calcularse mediante la ecuación que relaciona el tiempo de reducción decimal (valor $D_{T_{ref}}$) de la especie en cuestión, y el grado de destrucción microbiológica propuesto [número de ciclos logarítmicos reducidos, $\log(N_0/N_s)$]. Así, el valor $(F_{T_{ref}}^z)_{requerido}$ es múltiplo del valor $D_{T_{ref}}$ (MORALES-BLANCAS y TORRES, 2003b), según la ecuación:

$$(F_{T_{ref}}^z)_{requerido} = D_{T_{ref}} (\log N_0 - \log N_s) \quad (2.2)$$

donde:

$D_{T_{ref}}$ Tiempo de reducción decimal expresado en minutos a una temperatura constante de referencia (250 °F).

N_0 Corresponde a la concentración inicial de esporas.

N_s Corresponde a la concentración de esporas sobrevivientes después de la exposición al calor a temperatura constante.

Finalmente, la letalidad del proceso térmico, es la relación del valor F_0 del proceso con el valor de F_0 requerido, para la cumplir con la esterilidad comercial del producto (MERSON **et al.**, 1978), expresado como sigue:

$$LETALIDAD = \frac{(F_{T_{ref}}^z)_{requerido}}{(F_{T_{ref}}^z)_{Requerido}} \quad (2.3)$$

TOWNSEND **et al** (1938) corrigiendo los retrasos (“lag”) de las etapas de calentamiento y enfriamiento correspondiente a los datos de ESTY y MEYER (1922), obtuvieron como resultado una curva de tiempo de muerte térmica (TDT) con un F_0 de 2,45 min y un valor z de 9,8 ° C (17,6° F). Sin embargo, en la industria de conservas de baja acidez, el valor empírico mínimo de F_0 para el *Cl. botulinum* es 3 min. Este valor correspondería a la forma práctica de la aplicación de los datos originales de ESTY y MEYER (1922), el cual no incorporaría los factores de corrección para los retrasos (“lag”) de las etapas de calentamiento y enfriamiento (PFLUG, 1987a) .

En el CUADRO 1, se muestran diferentes valores empíricos de F_0 utilizados por la industria de conservas de baja acidez, según sea los requisitos de salud pública o preservación.

CUADRO 1. Valores empíricos de F_0 para conservas de baja acidez.

Peligro	F_0 (min)
1. Salud pública	3
2. Preservación (Esporulamiento Económico)	
a) Esporas mesófilas	5 – 7
b) Esporas termófilas	
Almacenadas y distribuidas a temperatura media (10^{-3}).	5 – 7
Almacenadas y distribuidas a temperatura alta (10^{-6}).	15 – 21

FUENTE: PFLUG (1987b).

En la práctica, debido a que el pescado y otras materias primas contienen una flora mixta de microorganismos, es necesario entonces para el diseño de los

tratamientos térmicos, comenzar con la situación más adversa o conservadora, esto es suponer la presencia en las materias primas del *Cl. botulinum* y otras bacterias termorresistentes formadoras de esporas (PFLUG, 1987a).

El modelo logarítmico de destrucción que incluye valores de D , z y F fue desarrollado en los primeros 50 años del siglo XX, y desde entonces ha sido aplicada por la industria conservera, dando excelentes resultados. Además, las autoridades de salud pública la validan como la metodología a utilizar para calcular y evaluar los tratamientos térmicos de alimentos (MORALES-BLANCAS y TORRES, 2003b). A pesar del éxito de la aplicación de la teoría mecanística de tratamientos térmicos, han surgido diversas opiniones respecto a que muchas veces las curvas de destrucción microbiana presentan desviaciones respecto al modelo logarítmico de inactivación, en algunas poblaciones microbianas (PELEG, 2006), sin embargo, un modelo alternativo no ha sido aún establecido y aceptado por las agencias de salud pública, y aplicado por la industria de conservas de baja acidez.

2.6 Métodos de cálculo en la determinación de tiempos de proceso.

Como se ha señalado la evaluación y certificación de procesos térmicos se realiza experimentalmente a través del registro tiempo/temperatura, introduciendo termocuplas al interior del producto, siendo procesado bajo las condiciones mas adversas dentro de una producción comercial. Posteriormente se desarrolla la evaluación de los tratamientos térmicos a través de un determinado sistema de cálculo.

El método general es un procedimiento utilizado para integrar el efecto letal de un historial tiempo/temperatura resultante de la aplicación de un proceso térmico en determinadas condiciones de procesamiento. Los principios de este método fueron introducidos por Bigelow, en 1920 utilizando una representación gráfica para llegar al valor de letalidad.

El método general propuesto por Bigelow, se utiliza como referencia por sobre los métodos fórmula. Debe reconocerse, sin embargo, que la principal limitante del método general es que no es útil para la determinación de procesos alternativos para diferentes temperaturas de autoclave y temperatura inicial del producto. Por lo tanto un proceso desarrollado por el método general, depende esencialmente del tipo de producto, contenedores utilizados, así como del sistema y las condiciones estudiadas en el momento de la prueba. Sin embargo, se disponen algunos trabajos para poder ampliar su utilización haciendo frente a sus principales limitaciones (SIMPSON *et al.*, 2003).

Cuando se presente una condición fuera de los límites del método general, frente a lo previsto por los resultados del proceso, esto puede ser una desviación de proceso o la variación de algunos de los parámetros estudiados durante las pruebas experimentales en el producto, esto debe ser dejado en suspenso a menos que una medición directa de la condición planteada, informe que la condición de desviación no influye en la seguridad del producto. En la mayoría de los casos, la condición de desviación debe ser reproducida, o simulada (en condiciones comerciales, y en la unidad comercial), bajo las exigentes condiciones del proceso (PARK, 1996).

El tomar pruebas continuas para asegurar la viabilidad del proceso ante una desviación de algún parámetro no es flexible, es muy costoso, lento, imprevisible, y entregan resultados de limitada aplicación. Por todas las razones anteriormente mencionadas, el USDA y la FDA, no se sienten seguros con el procesador de alimentos sobre la capacidad de controlar estos factores. El procesador de alimentos usando el método general es vulnerable sobre la reglamentación y sobre el control de verificación de procedimientos utilizados para confirmar el logro de letalidades adecuadas al proceso de producción (PARK, 1996).

Actualmente el método fórmula de Ball, desarrollado en 1923 para la evaluación de procesos térmicos, es el procedimiento de cálculo más utilizado en los Estados Unidos. Sin embargo, las dificultades, limitaciones y teoría del método de cálculo no es bien entendido por muchos en la industria conservera. Este procedimiento propone fórmulas que permiten la extrapolación de tiempos de proceso, sin embargo requiere de una medición directa a través de termocuplas y la recolección de datos respectiva.

Los supuestos básicos en el Método de Ball, permiten, en base a datos empíricos, una "estimación" del tiempo de proceso de esterilización. Por desgracia, a menudo estos supuestos sobreestiman la letalidad del proceso y, aunque conservador, no define con precisión la letalidad real.

Los supuestos del método de Ball lo hacen flexible, pero no exacto, dado que contemplan errores en la verdadera letalidad durante el enfriamiento. En el caso de los productos que se calienten por conducción, este método incrementa en un 100% el resultado de la letalidad esperada para el proceso, a menudo inaceptables para la calidad del producto, En bolsas esterilizables y otros recipientes de perfil bajo (bandejas) el uso del método de Ball puede sobreestimar la letalidad del enfriamiento, y por lo tanto, no ser un método adecuado para emplear en determinadas circunstancias (PARK, 1996).

Desde que el método de Ball es aún utilizado por muchos Ingenieros de Procesos Térmicos, hay que tener en consideración los siguientes supuestos:

- El método aplica un valor $j_c = 1,41$. Valor asumido por Ball por conveniencia matemática basado en curvas experimentales desarrolladas en productos envasados en tarros en orden a reducir el trabajo involucrado en la preparación de valores tabulados .
- $f_c = f_h$ (las pendientes de la curva de calentamiento y enfriamiento son iguales).

- $RT - CWT = (m + g) = 180 \text{ }^\circ\text{F}$ (Vapor) ó $130 \text{ }^\circ\text{F}$ (inmersión en agua con sobrepresión).
- Una temperatura constante de la autoclave.
- Una temperatura del agua constante durante el enfriamiento.
- La porción curvilínea de la curva de enfriamiento a $t_c = 0,141 f_c$
- El método sobrestima el valor de F cuando $j_c < 1,41$
- El método subestima el valor F cuando $j_c > 1,41$

Estos puntos deben ser tomados en cuenta, cuando se utilizan por ejemplo bolsas esterilizables y formas rectangulares de alimentos. En estos casos, es recomendable la utilización del método general para determinar la letalidad para las fases de calentamiento y enfriamiento, donde el método de Ball tiende a subestimar el valor F (HOLDSWORTH y SIMPSON, 2007).

2.7 Simulación de tratamientos térmicos en bolsas esterilizables utilizando métodos numéricos

En los últimos años la ingeniería en alimentos se ha instruido bien en el uso de la ingeniería en matemática y los principios científicos de la transferencia de calor, con esto se han desarrollado modelos capaces de simular el proceso de transferencia de calor en alimentos por conducción (SIMPSON **et al.**, 2007).

Estos modelos hacen uso de soluciones numéricas para las ecuaciones matemáticas de transferencia de calor, capaces de predecir con precisión, por ejemplo la falta de temperatura en el enfriamiento interno de un producto, en respuesta a alguna dinámica de temperatura experimentada por el autoclave durante el proceso. Como tales, estos modelos son muy usados en la evaluación rápida de desviaciones de proceso que pueden ocurrir inesperadamente. El aseguramiento de tales modelos es de fundamental importancia y deben responder igualmente bien para un modo de transferencia de calor o el tamaño y forma del envase.

La utilización de métodos numéricos en las investigaciones de transferencia de calor en bolsas esterilizables, ha tenido un incremento conforme a su utilización en la industria alimentaria. Entonces sería de mucha importancia estudiar el comportamiento de dichos envases en el proceso de esterilización comercial en relación a los parámetros utilizados para otros tipos de envases (SIMPSON **et al.**, 2004).

CRISTIANINI y RODRIGUES (2002) compararon tres modelos matemáticos para predecir el perfil de temperatura en la conducción de calor en los alimentos envasados en bolsas esterilizables de tamaño institucional durante el proceso de esterilización transiente. Dos modelos (2D y 3D) fueron construidos mediante la técnica de método de elementos finitos usando el software ANSYS5.2 (Swanson Analysis Systems, Inc.). Las coordenadas de la bolsa fueron utilizadas como datos de entrada para la generación de redes de elementos finitos en 2D y 3D (FIGURA 9) teniendo en cuenta la forma real de la bolsa y el perfil de temperatura de retorta. El tercer modelo utilizó una solución analítica para una solución, mediante ecuaciones de conducción de calor para una placa finita escrito en un programa en lenguaje Pascal. Durante la etapa experimental se envasaron filetes de atún en salmuera y procesados en un autoclave acondicionado para el tratamiento de bolsas mediante la recirculación de agua caliente (121 °C, 20 psi aire superior). El proceso fue diseñado para obtener valores F_0 del orden de los 7 minutos.

El objetivo del trabajo de CRISTIANINI y RODRIGUES (2002) fue comparar que modelos se ajustan de mejor manera a los datos experimentales; en los cuales se instalaron termocuplas en el centro geométrico del producto y a diferentes distancias a partir del centro. Las conclusiones mostraron que la utilización de métodos numéricos, en este caso elementos finitos, entrega soluciones más aproximadas que el modelo de solución analítica empleado, esto se manifestó tanto en la comparación estadística de los modelos usando los perfiles simulados, como también en la evaluación del valor F_0 .

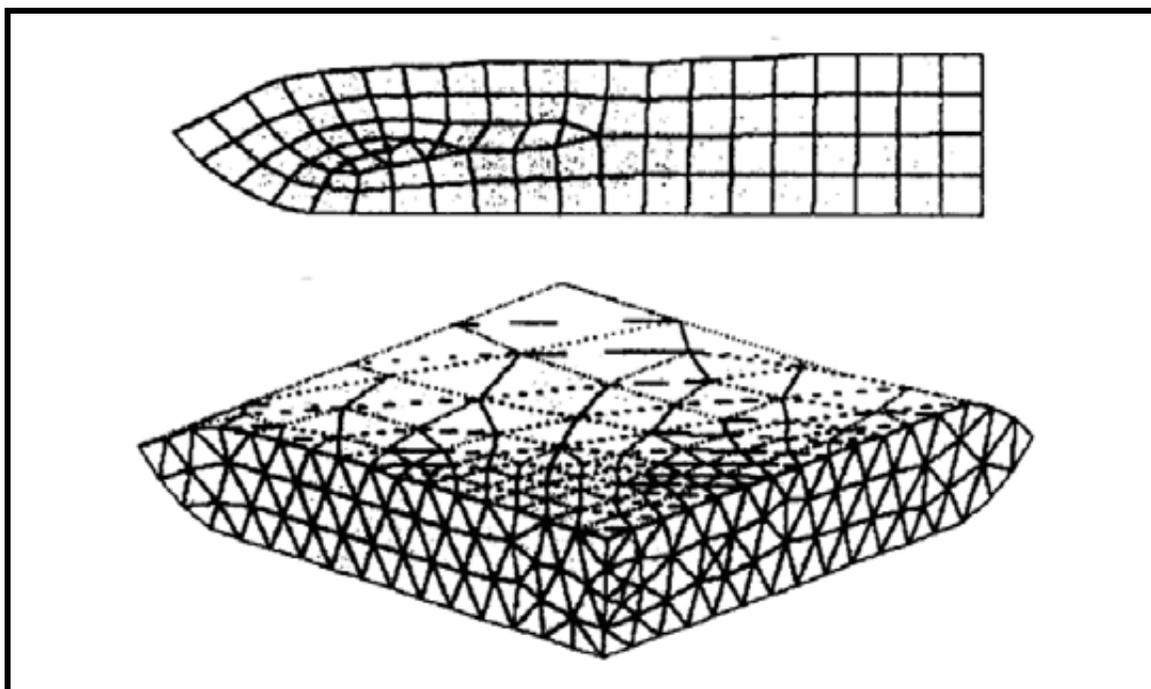


FIGURA 9. Modelo Geométrico 2D y 3D usado por CRISTIANINI y RODRIGUES (2002) para el análisis de transferencia de calor en bolsas esterilizables.

FUENTE: CRISTIANINI Y RODRIGUES (2002).

MITCHELL (2002), estudió la penetración de calor en conos de jurel envasado al vacío en bolsas esterilizables con el objetivo de desarrollar un método de optimización que permita encontrar el perfil óptimo de temperatura para mejorar las diferencias en la calidad encontradas en el producto, al ser expuestos a procesos de temperatura constantes y variables en el autoclave. Los implementos computacionales desarrollados en este trabajo consistieron en la utilización de métodos numéricos, específicamente el método de diferencias finitas, para solucionar el problema matemático involucrado. Las geometrías del alimento original utilizado para la construcción del modelo matemático corresponden a un cono, sin embargo para facilitar la resolución del problema se cambió la forma cónica a otro que tenga un grado de semejanza con la geometría del sólido a modelar, como se puede apreciar en la FIGURA 10.

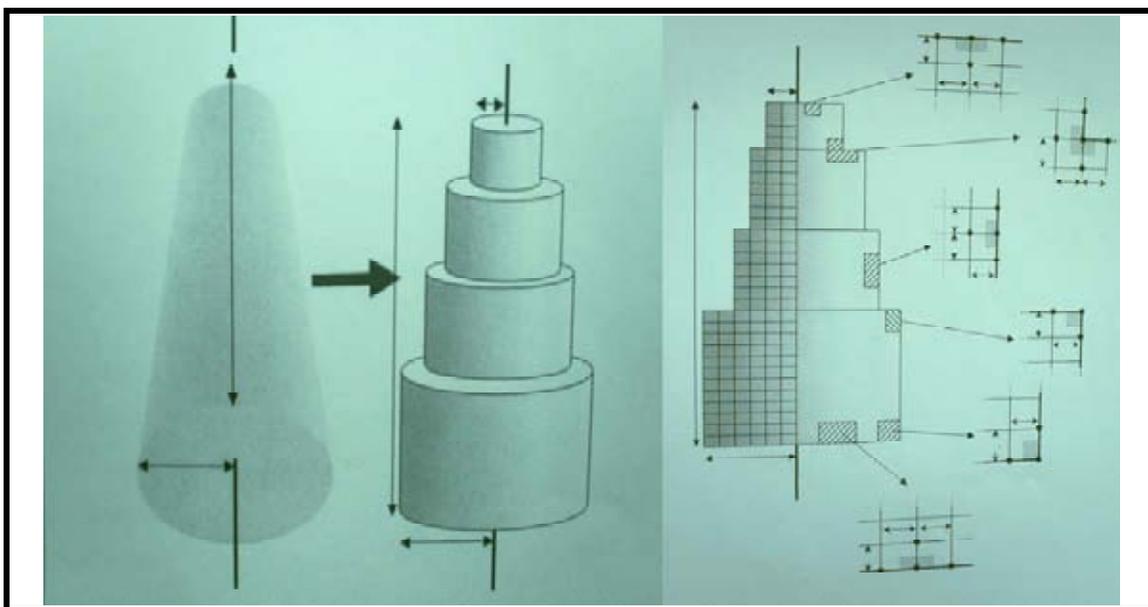


FIGURA 10. Esquema que muestra la forma del alimento original y aproximado, y la ubicación de los elementos de control.

FUENTE: MITCHELL (2002).

GHANI y FARID (2005) analizaron el proceso de esterilización térmica en líquidos alimenticios envasados en bolsas esterilizables en tres dimensiones, para predecir la temperatura transiente, la concentración de bacterias y vitaminas en los perfiles según progresaba el calentamiento. Se simuló la migración de la zona de más lento calentamiento debido a la convección natural en la bolsa esterilizable calentada en todas sus caras. En el modelo líquido (sopa de zanahoria-naranja) sus propiedades fueron asumidas como constantes, excepto la viscosidad (dependiente de la temperatura). Las ecuaciones de gobierno; continuidad, impulso y ecuaciones de energía fueron resueltas numéricamente, junto con el de concentración de bacterias y vitaminas, expresado como reacciones del modelo cinético. Para su resolución se utilizó el código computacional PHOENICS de dinámica de fluidos, este software utiliza el método numérico de volúmenes finitos para la simulación (FIGURA 11).

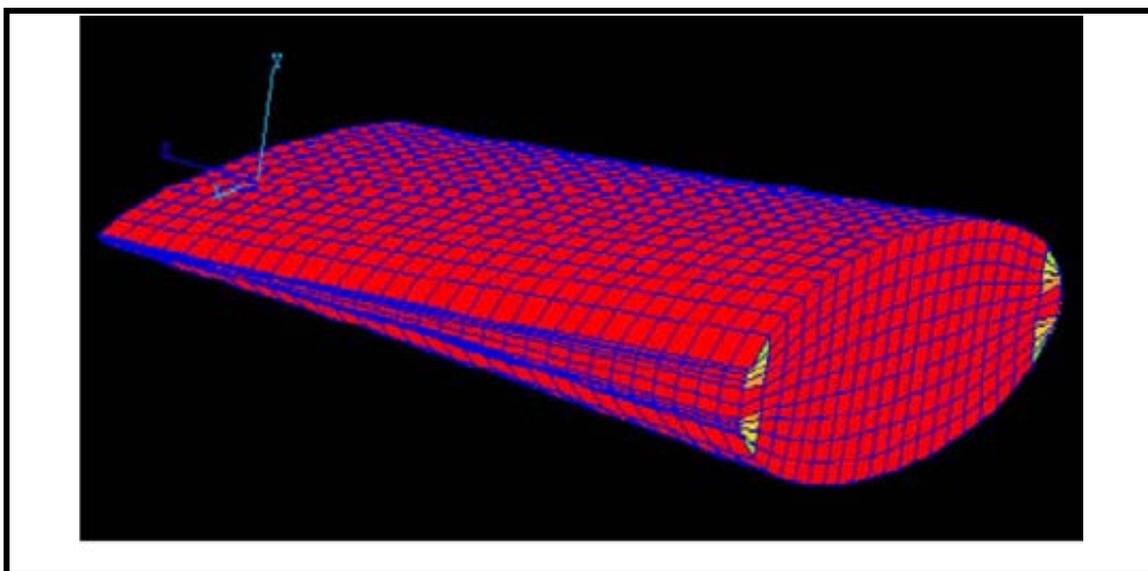


FIGURA 11. Geometría de la bolsa esterilizable y rejilla de la malla utilizada en la simulación de esterilización térmica de líquidos alimentarios.

FUENTE: GHANI y FARID (2005).

La investigación desarrollada por PÉREZ (2007), tuvo como principal objetivo la implementación de una metodología para la simulación del proceso de esterilización de alimentos de formas complejas envasados en bolsas esterilizables. Se evaluaron cortes de jurel (conos, filetes y medallones) envasados al vacío en bolsas esterilizables de tamaño individual a nivel Planta Piloto. Se utilizó un software CAE (Computer-Aided Engineering) diseñado para simular el proceso de conducción de calor en alimentos de formas complejas, basado en el método de elementos finitos (ALGOR®). Para obtener el modelo digital de la forma compleja se utilizaron un brazo digitalizador 3D de precisión (Microscribe-3DL, Immersion) y un software de modelado basado en NURBS (Rhinoceros®), Esta técnica reconstruye superficies 3D directamente de los modelos físicos capturando puntos (x, y, z). La simulación del proceso de esterilización considera condiciones de borde variable, asimetría geométrica y propiedades termofísicas constantes. Entre las ventajas de la simulación están la localización del punto de más lento calentamiento/enfriamiento en los

productos, luego predecir la distribución de temperaturas en dicho punto lo que permite la evaluación de tratamientos térmicos para diversas condiciones operacionales.

Los estudios realizados por NAVARRO (2007) tuvieron como objetivo la evaluación del tratamiento térmico de filetes de salmón envasados al vacío en bolsas esterilizables de tamaño institucional a nivel Planta Piloto, a través de simulaciones computacionales, utilizando el software CAE ALGOR® basado en el método de elementos finitos. Las muestras envasadas al vacío, fueron sometidas a una reconstrucción de superficie utilizando la metodología implementada por PÉREZ (2007). Se evaluó como influyen en la distribución de temperaturas, correspondiente al punto de más lento calentamiento/enfriamiento, las condiciones de asimetría geométrica y térmica, y las propiedades termofísicas dependientes de la temperatura. La metodología propuesta esta basada en la ingeniería reversa y tecnología CAD/CAE y puede ser usada como una herramienta de apoyo durante el diseño y optimización de procesos térmicos de alimentos envasados al vacío en bolsas esterilizables de tamaño institucional (FIGURA 12).

La aplicación de métodos numéricos para la resolución de problemas de transferencia de calor ha encontrado una amplia variedad de aplicaciones. Una de las diferencias fundamentales en los trabajos anteriores a los desarrollados por PÉREZ (2007), es establecer un modelo matemático que represente el proceso de esterilización (calentamiento/enfriamiento) de alimentos sólidos envasados al vacío en bolsas esterilizables considerando las formas irregulares complejas que mantiene el producto en el envase; además de considerar el proceso de conducción de calor transiente con propiedades termofísicas variables con la temperatura y sujeto a condiciones de borde (temperatura del medio y coeficiente global de transferencia de calor) variables con el tiempo.



FIGURA 12 Modelo físico, mallado y diagrama de contorno en ALGOR® de filetes de salmón en bolsas esterilizables.

FUENTE: NAVARRO (2007).

Los trabajos de PÉREZ (2007) y NAVARRO (2007) fueron aplicados a nivel Planta Piloto. Sin embargo, la implementación de esta metodología a nivel industrial plantea nuevos retos, en cuanto el considerar productos con diferente forma, cantidad de producto, y parámetros de procesamiento.

2.8 Variables relacionadas con la velocidad de transferencia de calor y parámetros de simulación de tratamientos térmicos

2.8.1 Propiedades termofísicas. Constituyen las propiedades de los alimentos que están involucradas en la velocidad de transferencia de calor, en el producto. Estos parámetros constituyen condiciones de entrada para el cálculo de tiempos de proceso en el software de simulación numérica.

2.8.1.1 Densidad (ρ). La densidad de un cuerpo o de una sustancia es su masa (cantidad de materia que contiene un cuerpo) por unidad de volumen e indica la organización de la materia en un cuerpo, es así como los cuerpos con estructura molecular más compacta tienen mayor densidad (NAVARRO, 2007). Esta propiedad tiene una directa relación con su contenido de agua, al estar definida como la masa de las partículas dividida por su volumen, lo que muestra que cualquier variación en su contenido, provocará un cambio en la magnitud de ésta (RODRIGUEZ, 2005).

2.8.1.2 Conductividad térmica (k). La conductividad térmica de un producto es una medida de la velocidad de transmisión del calor a través de una unidad de espesor de ese material cuando existe una gradiente de una unidad de temperatura entre sus extremos (SINGH y HELDMAN, 1993).

La conductividad térmica de un alimento depende de la temperatura, habiendo una estrecha relación entre el contenido de agua y esta propiedad, excepto para aquellos productos vegetales considerablemente menos densos que el agua (RODRIGUEZ, 2005).

2.8.1.3 Calor específico (C_p). El Calor específico es la cantidad de calor ganada o perdida por una unidad de peso de producto para provocar un determinado incremento de temperatura, produciendo un cambio en su calor sensible. El valor de calor específico depende de la composición, humedad, temperatura y presión. En los procesos en los que hay cambio de fase, se utiliza un calor específico aparente, el que se obtiene sumando al calor sensible el calor de cambio de fase (SINGH y HELDMAN, 1993).

2.8.1.4 Difusividad térmica (α). El significado físico de esta propiedad es determinada como la habilidad que posee el material para conducir el calor a moléculas adyacentes (SINGH, 1982), y su expresión matemática guarda relación directa con las tres propiedades mencionadas anteriormente.

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad (2.4)$$

2.8.1.5 Coeficiente global de transferencia de calor (U). El coeficiente de transferencia de calor es el parámetro que representa la resistencia a la transferencia de calor, entre el fluido de calentamiento o enfriamiento y la superficie del alimento; por ello, controla la velocidad de intercambio de calor entre el medio y el producto (DIAZ, 2000).

Para el caso de los alimentos envasados en bolsas esterilizables se utiliza el coeficiente global de transferencia de calor (U) debido a la existencia de una resistencia adicional a la transferencia de calor dada por el envase (PÉREZ, 2007).

2.9 NURBS (Non – Uniform Rational B – Splines)

Estas curvas son representaciones matemáticas de geometrías 3D capaces de describir cualquier forma con precisión, desde simples líneas en 2D hasta formas irregulares complejas en 3D (FIGURA 13). Una curva NURBS se define mediante tres elementos: puntos de control, grados y nodos. Si se modifica cualquiera de estos elementos, cambia la forma de la curva NURBS (RHINOCEROS, 2001).

2.10 Simulación de procesos

Los avances en el conocimiento en áreas específicas de las ciencias e ingeniería, así como el desarrollo matemático y computacional, han apoyado en los últimos años al entendimiento de muchos procesos de transformación de alimentos. Muchos de los conceptos de la ingeniería química y de fenómenos de transporte han sido de gran utilidad para describir cuantitativamente procedimientos cuyo origen era más bien descriptivo. En el caso específico del tratamiento térmico de alimentos, las nuevas orientaciones en mejora de calidad

y reducción de gastos energéticos han motivado a empresas y centros de investigación al desarrollo de estudios detallados de los fenómenos que controlan la transferencia de calor, la destrucción de microorganismos y a manejar en forma más efectiva los cambios de calidad de los productos (WELTI **et al.**, 2005).

En este sentido, hoy en día la simulación es considerada una de las más grandes herramientas de la ingeniería encontrando aplicación funcional en variados campos del conocimiento como son: procesos químicos, procesos de transferencia de calor, la construcción de puentes y maquetas, juguetes, y entrenamiento virtual entre otros (RODRÍGUEZ, 2005).

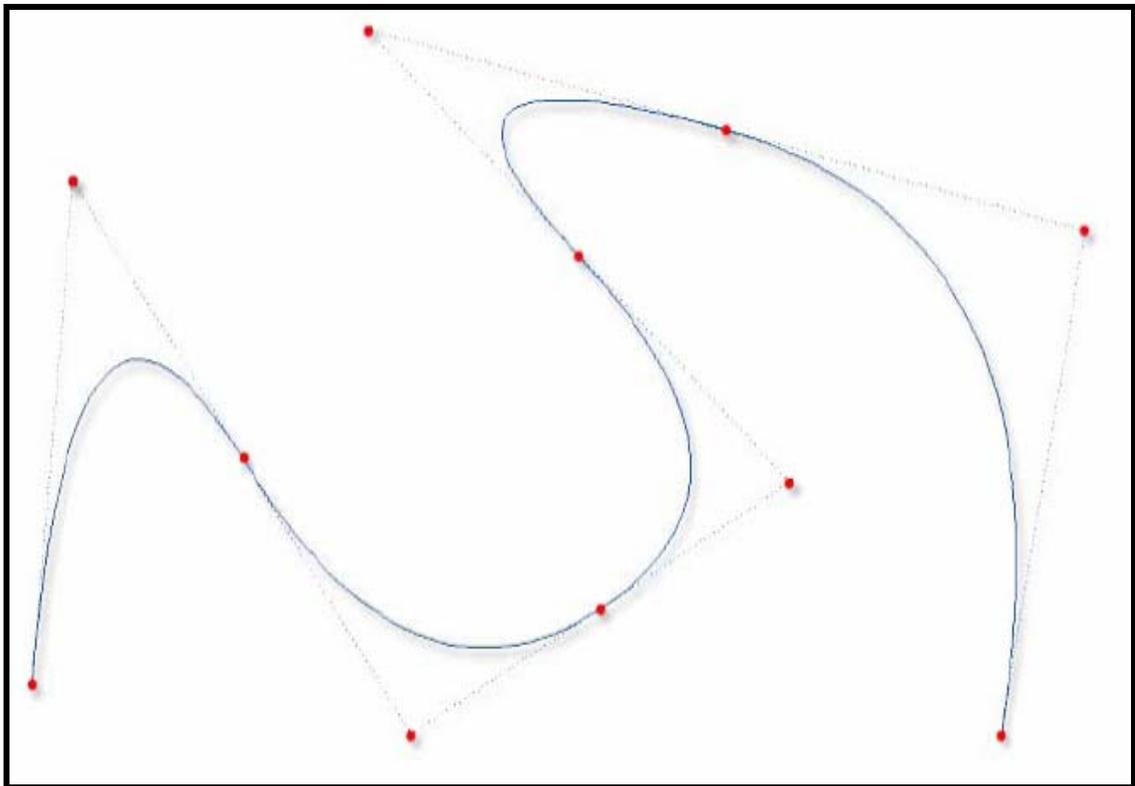


FIGURA 13. NURBS (Non – Uniform Rational B – Splines).

La simulación de procesos se basa en la representación de un proceso físico, mediante la creación de un modelo que lo hace más simple, permitiendo analizar sus características y resultados.

En este caso la representación matemática de un proceso físico continuo como son el flujo de fluidos, el campo eléctrico en un circuito, y en nuestro caso la transferencia de calor son desarrolladas en un determinado número de ecuaciones de gobierno, que son expresiones de conservación de la energía junto a condiciones de frontera que son las condiciones límites a las cuales se someterán los bordes físicos del modelo.

Los sistemas CAD (Computer-Aided-Design, Diseño asistido por computador) son una combinación de hardware y software que permite diseñar modelos en 3D de forma fácil, dando la posibilidad de modelar, crear o ver sin siquiera tomarse el tiempo de fabricar un prototipo físico.

Lo que se busca en la aplicación del software CAD es reproducir con exactitud la complejidad de un objeto del mundo real, en este caso los cortes de jurel envasados al vacío en bolsas esterilizables.

Para lograr este objetivo se ha recurrido a la obtención de manera digital de la forma física exacta del objeto, mediante la llamada Ingeniería Reversa, que se define como un proceso que consiste en la obtención de datos numéricos tridimensionales de un objeto, que permitirán la creación de formas geométricas en un sistema de Diseño Asistido por Computador (CAD) y, por último el modelado del diseño a fin de obtener la estructura idéntica al original o un molde para generar el objeto original (PEREZ, 2007).

La Ingeniería Reversa se vale de una serie de etapas interdependientes: captura de puntos, pre-procesamiento, segmentación y adecuación de superficie y creación del modelo CAD. Cada etapa está construida de la

información desarrollada en la etapa anterior. Cada una de estas etapas se explicará resumidamente (RODRÍGUEZ, 2005).

2.10.1 Captura de datos. Se realiza mediante la interacción con la superficie o volumen del objeto en estudio, para ello existen métodos sin contacto y métodos táctiles o de contacto. Se utilizó este último método en la investigación, en que la superficie del objeto es tocada usando una sonda en el extremo de un brazo robótico (FIGURA 14).



FIGURA 14. Captura de puntos y obtención del modelo digital mediante el Brazo digitalizador Microscribe-G2LTM.

2.10.2 Pre-procesamiento. Este procedimiento entrega como resultado una conexión de puntos que forman un conjunto de datos, resultando una unión entre los puntos de manera de generar una estructura ordenada para el establecimiento de la superficie.

2.10.3 Segmentación y adecuación de superficie. Una vez ordenado el conjunto de puntos, se procede a una segmentación que los divide en subconjuntos donde cada subdivisión incluye aquellos puntos que contienen los datos que forman la superficie del modelo.

2.10.4 Creación del modelo de CAD. Una vez obtenido el modelo digital del objeto, que corresponde a su superficie limitada por todos aquellos puntos capturados, es posible realizar análisis programados o los objetivos estimados para su creación.

2.10.5 Ingeniería asistida por computador (CAE). Se denomina de esta forma al conjunto de programas informáticos que permiten analizar y simular los diseños de ingeniería realizados con el computador, o creados de otro modo e introducidos en el computador, para valorar sus características, propiedades, viabilidad y rentabilidad (FLAHERTY, 2000).

Es así como el CAE tiene la facultad de combinar información geométrica con la información funcional de cálculos matemáticos para realizar cálculos de ingeniería. A través de esta herramienta el ingeniero tiene el poder sobre la modificación no sólo del modelo, sino también sobre las variables y su influencia sobre los procesos, optimizando su desarrollo y consecuentes costos de fabricación y de reducir al máximo las pruebas para la obtención del producto deseado.

Uno de los métodos numéricos más utilizados en software del tipo CAE es el método de elementos finitos (FEM). Esta técnica computacional consiste en obtener soluciones aproximadas a los problemas gobernados por ecuaciones diferenciales parciales presentes en aplicaciones de ingeniería y científicas. Más bien aproxima directamente la solución de ecuaciones diferenciales parciales, ejemplos son el método de diferencias finitas y el método de volúmenes finitos, que utilizan problemas con variación dentro de la integral de

una ecuación diferencial aplicada sobre el dominio. Este dominio es dividido en un número de subdominios llamados elementos finitos y la solución de las ecuaciones parciales es aproximada por una función polinomial simple aplicada en cada elemento. Estos polinomios constituyen piezas unidas para la aproximación de la solución con un apropiado grado de uniformidad sobre el dominio completo. Una vez que esto ha sido realizado la variación de la integral es evaluada como una suma de contribuciones a partir de cada elemento finito. El resultado es un sistema algebraico para la aproximación de la solución, teniendo un tamaño finito más manejable que las infinitas dimensiones de las ecuaciones diferenciales parciales (FLAHERTY, 2000).

En esencia se trata de una técnica que sustituye el problema diferencial por otro algebraico, aproximadamente equivalente, para el cual se conocen técnicas generales de resolución. Para ello hace uso de la "discretización" o subdivisión de una región sobre la cual están definidas las ecuaciones en formas geométricas simples denominadas elementos finitos (FIGURA 15). Las propiedades materiales y relaciones gobernantes en estos elementos se expresan en función de los valores desconocidos en las "esquinas" de los elementos o nodos.

Una de las ventajas de este método es su facilidad de implementación en un programa computacional, que a su vez es una condición básica para su utilización ya que para el tratamiento de un problema en particular debe efectuarse un número muy elevado de operaciones para resolver sistemas algebraicos del orden de cientos o miles de ecuaciones. No obstante, esta cantidad no es una limitación con las computadoras estándar de hoy.

Las ideas básicas de este método se originaron en el análisis estructural de la industria aeronáutica en la década del '50. En la década del '60 el método fue generalizado para la solución aproximada de problemas de análisis de tensión, flujo de fluidos y transferencia de calor. El primer libro sobre elementos finitos

fue publicado en 1967 por Zienkiewicz y Cheung. En la década del '70 el método fue extendido al análisis de problemas no lineales de la mecánica del continuo. Hoy el método permite resolver prácticamente cualquier situación física que pueda formularse mediante un sistema de ecuaciones diferenciales (RODRÍGUEZ, 2005).

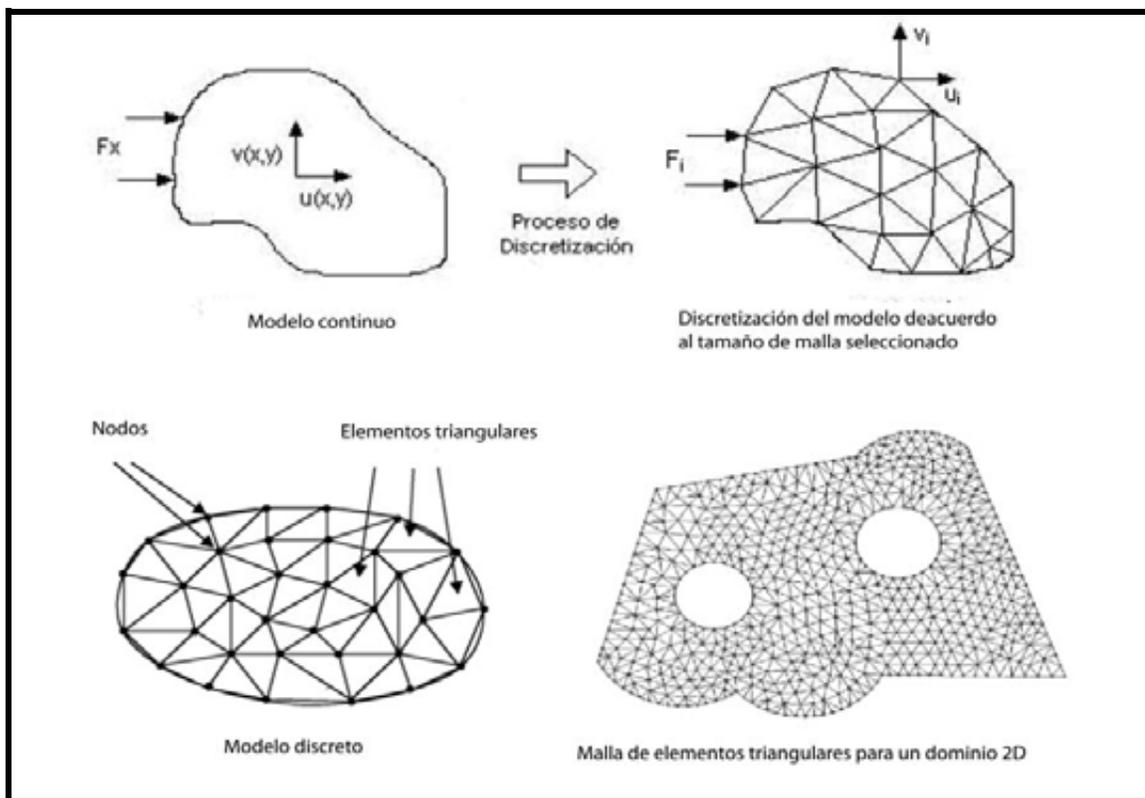


FIGURA 15. Esquema del proceso de discretización de un modelo continuo.

FUENTE: LIU (2003).

El proceso computacional del método consiste básicamente en tres pasos (KARDESTUNCER y NORRIE, 1987; BARTON y RAJAN, 2000):

Pre-procesamiento, o preparación del modelo, que involucra la generación de la geometría, malla y los elementos (DATTA, 1998) y se especifican los datos para el análisis, que incluye, tipo de análisis, tipo de elementos (Bricks, Tetraédricos,

Rod, Plate), definición de elementos, propiedades del material, cargas y parámetros de análisis (ALGOR, 2007) y se le dicen al computador la ecuaciones de gobierno, condiciones de fronteras, propiedades y métodos de solución a utilizarse.

Procesamiento en el cual el computador resuelve el problema en un tiempo determinado y con un gasto computacional determinado.

Post-procesamiento, o revisión de los resultados, que involucra visualizar la solución, usando contornos en color o sombreados, diagramas de contorno, cortes sobre el modelo, listados de máximo y mínimo, archivos de imágenes y la creación de películas sobre los acontecimientos virtuales (ALGOR, 2007).

2.11 Jurel

El jurel (FIGURA 16) es un pez pelágico migratorio de amplia distribución, que habita en la región costera y oceánica del Océano Pacífico Sur, encontrándose desde las islas Galápagos por el norte, hasta la región austral de Chile por el sur y desde las costas de Sudamérica hasta las aguas costeras de Nueva Zelanda y Tasmania. Esta área de distribución es conocida como el “cinturón del jurel del Pacífico Sur” (CHILE, SERVICIO NACIONAL DE PESCA, 2008).

Nombre común (Chile): jurel.

Nombre científico: *Trachurus symmetricus murphyi*

Familia: Carangidae.

Nombre internacional: Jack Mackerel

El jurel se encuentra actualmente declarado en plena explotación entre la I y la X regiones, correspondiendo esta macro área a las unidades de pesqueras de I-II, III-IV, V-IX y X regiones.

El desembarque total de jurel acumulado a mayo del 2007 alcanzó a 672,7 mil toneladas, aportando el 3,1% del desembarque total. El principal aporte se realizó en el área comprendida entre la V y X regiones con 514,1 mil toneladas. En segundo lugar se ubican los desembarques realizados en las regiones I y II con 104,2 mil toneladas.

Finalmente en las regiones III y IV se registran 54,5 mil toneladas, un 49,0% superior a lo registrado a mayo de 2006.

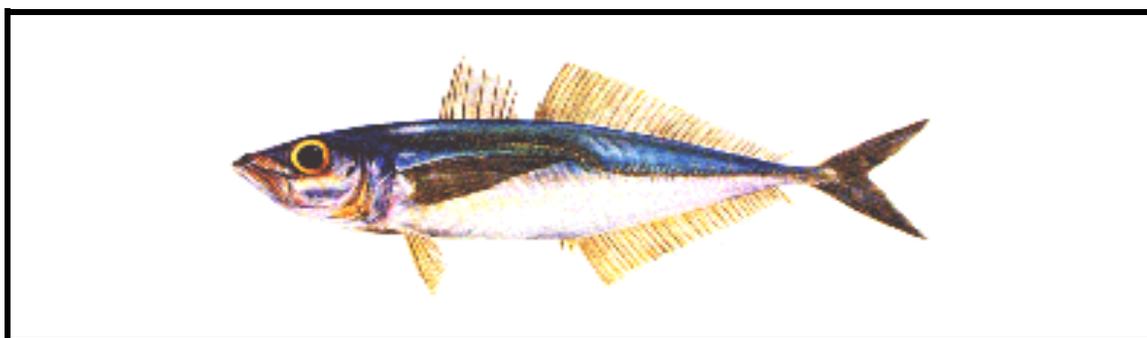


FIGURA 16. Jurel (*Trachurus symmetricus murphyi*).

3. MATERIAL Y MÉTODO

La parte experimental de la presente investigación fue desarrollado en la Pesquera San José S.A. localizada en la ciudad de Coronel, VIII región. En esta etapa el objetivo fue registrar los datos correspondientes a la cinética de penetración de calor en los productos seleccionados y evaluar los tratamientos térmicos aplicados en Planta. Para el logro de los objetivos planteados, fue necesario un entrenamiento en el proceso de elaboración de los productos y en el funcionamiento del autoclave.

La digitalización, modelado y simulación de tratamientos térmicos se realizó en el Laboratorio de Digitalización 3D e Ingeniería Asistida por Computador para el Procesamiento y Preservación de Alimentos (FoodDigiCAELab, <http://www.fooddigicaelab.uach.cl>), adscrita al Instituto de Ciencia y Tecnología de Alimentos (ICYTAL), perteneciente a la Universidad Austral de Chile.

El desarrollo de la investigación contempló las siguientes etapas:

Etapas Experimentales - Pesquera San José, Planta Coronel.

- Evaluación de la distribución de temperaturas en el autoclave.
- Evaluación, selección y preparación de la materia prima.
- Monitoreo de la penetración de calor en muestras de jurel envasado al vacío en bolsas esterilizables.
- Determinación del coeficiente global de transferencia de calor.

Parte Simulación de Procesos - Laboratorio FoodDigiCAELab

- Digitalización y modelado 3D del producto elaborado en planta

- Simulación computacional de los tratamientos térmicos para cada una de las muestras seleccionadas.
- Localización de las termocuplas en el producto.
- Validación y evaluación de tratamiento térmicos
- Ajuste de curvas simuladas y experimentales
- Comparación de resultados experimentales y simulados
- Evaluación de los tratamientos térmicos aplicados

3.1 Evaluación de la distribución de temperaturas en el autoclave.

El objetivo de esta prueba fue determinar la existencia de la zona más fría del autoclave o que presente un mayor retardo en alcanzar la temperatura de operación. Para ingresar las termocuplas al autoclave se requirió la fabricación de un dispositivo (FIGURA 17) que permitiera mantener la seguridad ante la presión ejercida durante el proceso y proteger las termocuplas durante el registro de datos.

Idealmente se requiere llevar el autoclave hasta la temperatura de procesamiento tan rápido como sea posible, lograr la estabilidad y mantenerla dentro de la temperatura de procesamiento al interior de la carga o por encima de la misma, con un mínimo de diferencia entre la temperatura más alta y la más baja.

El proceso de esterilización de los productos se realiza actualmente en la planta en autoclave horizontal estático, del tipo LAGARDE (FIGURA 18). Este autoclave opera con una mezcla vapor/aire (80%/20%), con circulación forzada por medio de un potente ventilador y un controlador de presión y temperatura. Sus dimensiones externas son: diámetro 1,43 m y largo de 5,18 m.



FIGURA 17. Dispositivo para el ingreso de termocuplas al interior del autoclave.

Este autoclave consta de 5 carros, cada uno equipado con 20 bandejas de dimensiones 80 x 80 cm, acopladas verticalmente, la altura de cada bandeja es de 4,4 cm. La capacidad de carga del sistema es de 2.000 bolsas esterilizables.

Para la evaluación de temperaturas fue necesario la instalación del equipo de registro de datos, junto al autoclave, y posteriormente la preparación y calibración de termocuplas.

En la FIGURA 19 se muestran las gráficas del programa de operación típica del autoclave LAGARDE donde se exponen la temperatura y la presión aplicadas (ANEXO 1).

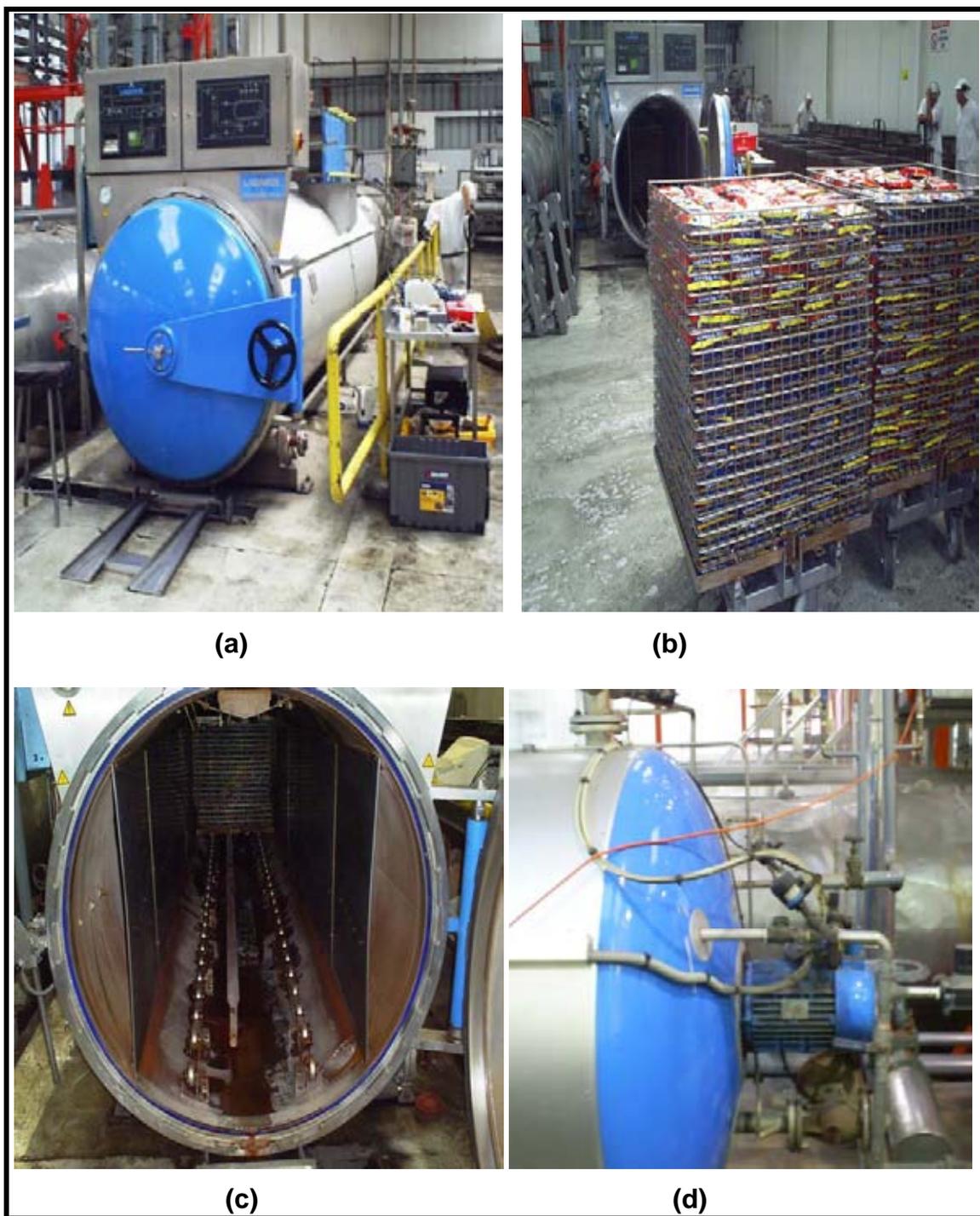


FIGURA 18. Sistema de esterilización. (a) Autoclave Lagarde. (b) Sistema de bandejas y carros. (c) Interior del autoclave (d) Motor del sistema ventilador.

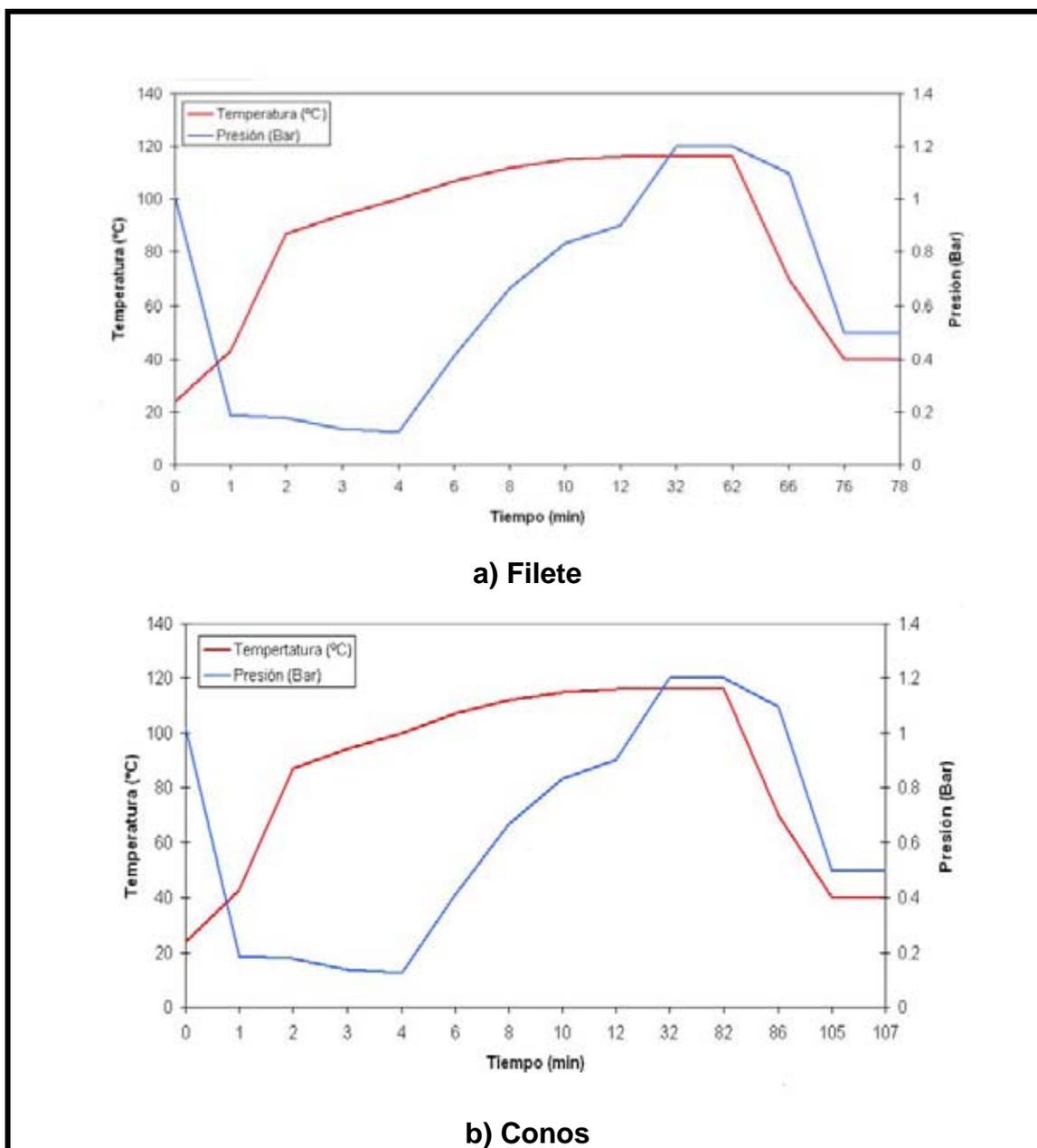


FIGURA 19. Programa operacional del Autoclave Lagarde.

FUENTE: Datos pesquera San José, elaboración propia.

3.1.1 Configuración del Data-Logger. El sistema de adquisición de datos de temperatura utilizado, estuvo compuesto de un Data Logger, Digi Sense “12 – Channel Scanning Thermocouple Thermometer” (Barnant Co., Barrington, IL,

USA), (FIGURA 20). El Data Logger consta de doce canales disponibles, a los que se conectan las termocuplas mediante miniconectores. Este sistema se configuró para registrar datos de temperatura en un intervalo de tiempo de 5 segundos. Para la captura de datos a un PC, se utilizó el software ScanLink2© (Barnant Co., Barrington, IL, USA). El computador utilizado fue un Intel® Pentium® 3, de 500 MHz, 256 MB de RAM, sistema operativo Microsoft® Windows® XP Profesional, puerto serial RS – 232 (conexión *Data logger*). En la FIGURA 21 se muestra el sistema de adquisición de datos completo.



FIGURA 20. Registrador de Temperaturas (*Data logger*) de 12 canales *Digi-Sense*.

Se utilizaron termocuplas del tipo T (Cobre – Constantán), flexibles y Kapton® de calibre 30 (FIGURA 22), de características detalladas en el CUADRO 1. Las termocuplas fueron conectadas mediante miniconectores al equipo de registro de temperaturas *Digi - Sense*.



FIGURA 21. Sistema de adquisición de datos.

CUADRO 2. Especificaciones de termocuplas Kapton®.

Tipo	T (cobre – Constantán)
Rango de Temperatura	-418 a 759 °F (-250 a 404 °C)
Diámetro	0,010" (0,508 mm)
Longitud de Cable para experimentos	4 m
Conexiones	Mini-conector
Empalme	Expuesto
Tiempo de Respuesta	5 s

FUENTE: Catálogo Cole-Parmer (2005/06)².

² REICHMANN W. Y CIA. Ltda. 2005 - 2006. Catalogo Cole-Parmer



FIGURA 22. Termocuplas del tipo T (Cobre – Constantán).

3.1.2 Calibración de termocuplas. Luego de conectadas al Data Logger, las termocuplas fueron calibradas mediante el método de puntos fijos, que consistió en sumergir las termocuplas en agua destilada en ebullición (100 °C), y luego en una mezcla de agua destilada y hielo (0 °C) a condiciones de presión atmosférica correspondiente a nivel del mar (NICHOLAS y WHITE, 1994).

3.1.3 Registro de temperaturas. La medición de la distribución de temperaturas se obtuvo instalando termocuplas en los carros a lo largo del autoclave (FIGURA 23 y 24). Esta parte experimental se realizó para el caso de un programa de tratamiento térmico bajo las condiciones más adversas que se anticiparon se presentaría durante una producción comercial normal, la que se encuentra influenciada por el producto, el envase y los tiempos de proceso aplicados.



FIGURA 23. Ingreso de carros con termocuplas ubicadas para prueba de distribución de temperatura.

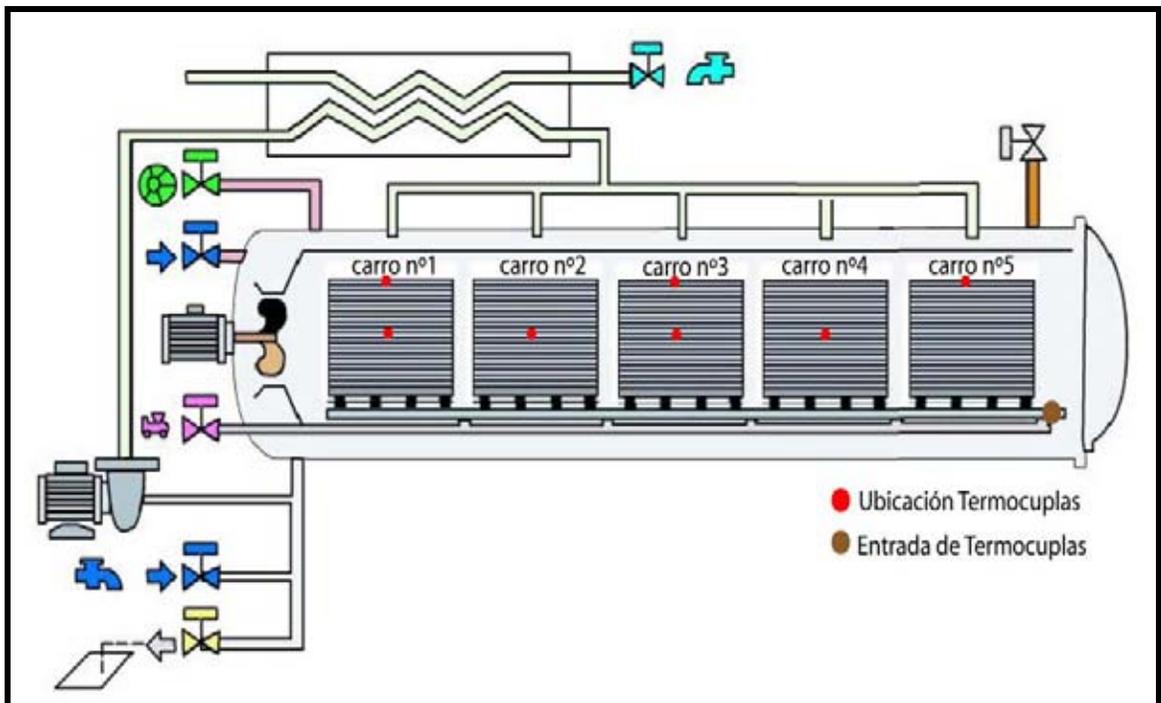


FIGURA 24. Disposición de termocuplas durante prueba de distribución de temperatura.

3.2 Penetración de calor en las muestras de jurel envasados al vacío en bolsas esterilizables

Con un conocimiento claro sobre el funcionamiento del autoclave y las condiciones de procesamiento, se comenzaron a realizar pruebas de penetración de calor en los productos para evaluar los procesos térmicos programados por la planta, en términos de letalidad total. Para ello, los productos fueron preparados como parte de la línea de producción, contemplando las variables que afectan el proceso térmico.

3.2.1 Materia prima. Para el desarrollo de las pruebas experimentales, se utilizaron cortes de jurel (*Trachurus symmetricus murphyi*) crudos, con piel y espinas, en formato conos y filetes, los cuales fueron obtenidos de la línea de producción de la planta.

3.2.1.1 Evaluación de la materia prima. La materia prima (jurel) que se utilizó para el proceso de elaboración, debe tener como principal requisito un determinado grado de frescura. Al momento de su captura, la materia prima se conserva mediante el sistema de refrigeración RSW (Refrigerated Sea Water), es decir, agua de mar enfriada. El RSW consiste básicamente en almacenar la captura en bodega con agua de mar refrigerada a ± 0 °C. El tiempo de almacenamiento a partir de la captura debe ser inferior a 70 horas para ser considerada como materia prima en la producción de jurel en bolsas esterilizables. Adicionalmente, la materia prima antes de ser procesada es examinada en cuanto a los parámetros de frescura en el pescado, tales como olor, color, y firmeza. También se realiza el análisis de nitrógeno total volátil (TVN) de acuerdo a los estándares de Pesquera San José.

3.2.1.2 Selección y preparación de la materia prima. Los jureles destinados a la producción son transportados mediante una cinta, en donde son cortados de cabeza y cola; a continuación, son eviscerados mecánicamente, antes de

ser llevados al estanque alimentador, ubicado en la sala de proceso. En este lugar, los jureles son transportados mediante una cinta transportadora, en donde se repasa el eviscerado y se realizan los cortes conforme al producto elaborado, verificando el peso correspondiente al formato del envase. La preparación de la materia prima fue realizado por operarios de la sección en forma manual.

De los formatos elaborados por la planta cono, cono pequeño (Buffet), filete y desmenuzado se consideró para la investigación evaluar los tratamientos térmicos aplicados en los formatos de cono y filete, ya que son los más solicitados para la producción comercial de la planta.

En el caso de los filetes (FIGURA 25), el corte aplicado se realizó sobre jureles de mayor tamaño (500 - 900 g), que son muy grandes para ser empleados en la elaboración de conos y cono pequeño (Buffet). El corte se obtuvo al seccionar los costados laterales del esquelón, con el fin de obtener un corte con la menor cantidad de espinas y mejor rendimiento. Los conos (FIGURA 26) fueron cortados a partir de jureles medianos (200 - 300 g), de forma tal de obtener el peso correspondiente al formato del producto.

3.2.2 Configuración del Data-Logger y calibración de termocuplas. Se realizó el mismo procedimiento descrito en la sección 3.1.1 y 3.1.2.

3.2.3 Inserción de termocuplas. La inserción de las termocuplas (tipo T, calibre 30) al interior de las bolsas se realizó mediante un dispositivo de bronce (FIGURA 27), la cual mediante una empaquetadura de goma se pudo conseguir la hermeticidad necesaria para mantener el vacío generado durante el proceso de sellado.

Los sensores de temperatura fueron localizados en el centro correspondiente al espesor máximo del producto (FIGURA 28), de acuerdo a consideraciones

propias. En el caso de los conos la inserción se realizó en el cono ubicado en el centro de la bolsa esterilizable (FIGURA 26).

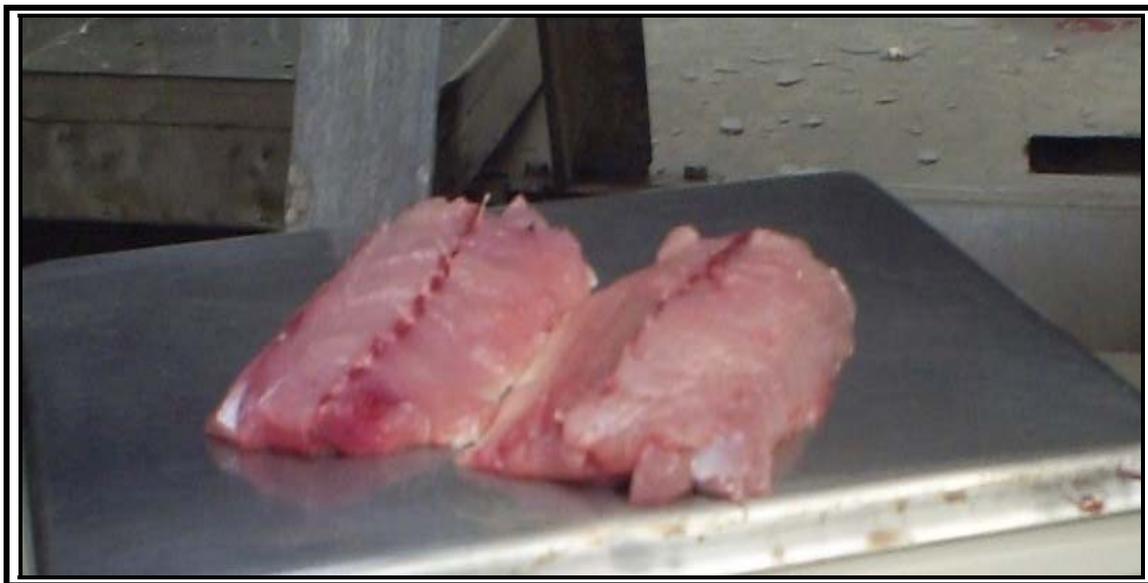


FIGURA 25. Filetes de jurel.

3.2.4 Sistema de envasado y sellado. Durante la investigación, los productos se envasaron en bolsas flexibles polilaminadas, utilizadas por Pesquera San José en su línea de producción. Las bolsas provinieron de la empresas ALUSA S.A. para el formato filetes, y PLASPAK Ltda., en el caso del formato conos (FIGURA 29). Estas bolsas están compuestas en general por los siguientes materiales: Poliéster, Aluminio, Poliamida orientada y Polipropileno (CUADRO 3).

Para el llenado manual de las bolsas se utilizaron boquillas dosificadoras de metal, que permiten introducir los filetes de jurel en el envase, evitando salpicaduras y suciedad en la zona de sellado (FIGURA 30), posteriormente se agregó una pastilla de sal de 1 g con la finalidad de potenciar los atributos sensoriales del producto.



FIGURA 26. Conos de jurel y posición en bolsa esterilizable.



FIGURA 27. Filete de jurel envasado al vacío en bolsa esterilizable con dispositivo de cobre y termocupla.



FIGURA 28. Inserción de termocuplas previo al sellado.



FIGURA 29. Formato y diseño de las bolsas utilizadas durante la investigación.

CUADRO 3. Especificaciones técnicas de las bolsas esterilizables utilizadas en la investigación.

Producto	PLASPAK Cono	ALUSA Filete
Peso Unitario (g)	9,32	8,23
Alto total bolsa (mm)	200	200
Dimensiones (mm)	170 x 200	150 x 200
Resistencia de sello	6 kg/15 mm	6 kg/15 mm
Control de explosión retortable	18 PSI/30 s	18 PSI/30 s
Composición Estructural		
Poliéster (PET) micrones		12
Aluminio (ALU) micrones		(8-9)
Poliamida orientada (OPA) micrones		(12-15)
Polipropileno (CPP) micrones		100

FUENTE: ALUSA (2007); PLASPAK (2007).



FIGURA 30. Sistema de llenado para filetes con boquilla dosificadora metálica.

Después del llenado manual, las bolsas fueron selladas al vacío mediante el equipo HENKOVAC modelo E-series (FIGURA 31). Este equipo genera vacío mecánico, para la eliminación del aire en su interior y posteriormente el sellado de las bolsas esterilizables por derretimiento de algunas de sus capas constituyentes (FIGURA 32). Los tiempos de sellado en esta máquina para el caso de conos y filetes, oscilaron entre 1,7 a 1,8 segundos. El vacío mecánico generado para los productos fue de 58 mbar para el caso de los conos y de 45 mbar para el caso de filetes. Las diferencias en el grado de vacío aplicado se deberían fundamentalmente por la constitución del producto.

Posteriormente, se aplicó un doble sellado, por seguridad, y codificado de las bolsas, para su reconocimiento, esto se realizó mediante la selladora continua CBS-900 LD PLASPAK (FIGURA 33).



FIGURA 31. Selladora continua HENKOVAC “E – Series”.



FIGURA 32. Bolsas formato filete después del primer sellado.

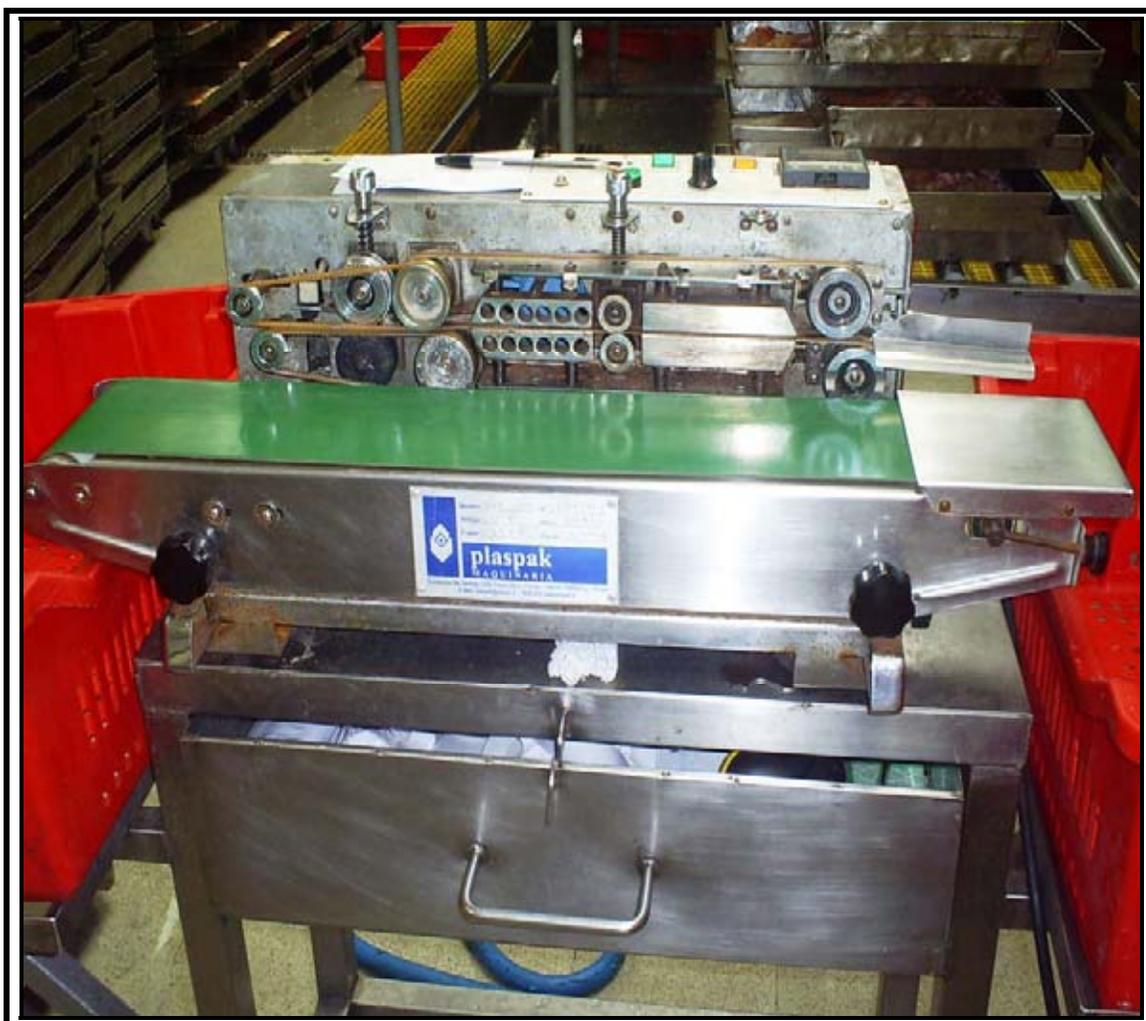


FIGURA 33. Selladora continua CBS-900 LD PLASPAK.

Posteriormente, las bolsas selladas pasaron por un calibrador, que tiene como propósito asegurar que los trozos envasados no sobrepasen el espesor máximo del formato seleccionado (CUADRO 4). Al pasar por el calibrador las bolsas caen a un estanque con agua potable y hielo, con la finalidad de disminuir su temperatura por debajo de 10 °C, retardando de esta manera el posible desarrollo microbiano (FIGURA 34).

CUADRO 4. Especificaciones de los cortes de jurel utilizados en las bolsas esterilizables.

Formato	Cantidad de trozos	Peso bruto (g)	Espesor máximo (cm)
Cono	3 conos	345 – 370	3,5
Filete	1 ó 2 filetes	145 – 160	2



FIGURA 34. Bolsas selladas y calibradas bajando su temperatura mediante agua con hielo.

3.2.5 Tratamientos térmicos aplicados. Las bolsas con termocuplas fueron ubicadas en los carros del autoclave en forma horizontal, en las zonas establecidas previamente como de más lento calentamiento/enfriamiento, para el registro de los datos de penetración de calor (FIGURA 35). Las bolsas fueron marcadas con códigos indicando el formato, muestra y la bandeja donde fueron ubicadas durante el procesamiento (FIGURA 36).



FIGURA 35. Ubicación de las bolsas con termocuplas en bandejas y carros.

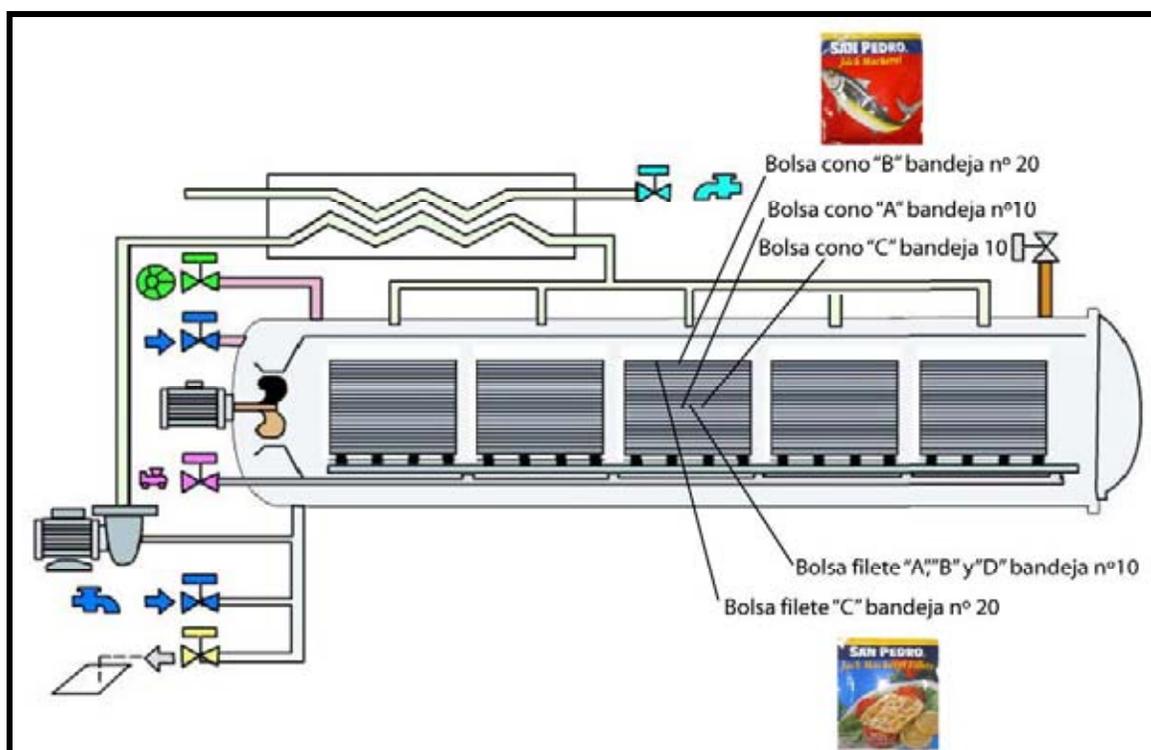


FIGURA 36. Disposición de las bolsas en el autoclave durante las pruebas de penetración de calor.

Luego de terminado la carga del autoclave se seleccionó el programa de tratamiento térmico para el formato respectivo. El programa aplicado actualmente en la Planta, comprende un tiempo de elevación (CUT) de 12 min, y temperatura de proceso de 116 °C con tiempos de operador de cincuenta minutos en el caso de los filetes, y setenta minutos en el caso de conos. Los tiempos de enfriamiento aplicados, fueron de dieciséis minutos para filetes y veinticinco para conos, respectivamente.

Se realizaron pruebas de penetración de calor en diferentes cargas (lotes) de autoclave. Para el caso de filetes se identificaron como carga I, II y III, mientras que para el caso de conos se realizaron dos cargas designadas como IV y V (CUADRO 5).

CUADRO 5. Identificación de las cargas y productos evaluados.

Código	Carga	Producto
A-I	I	Bolsa Filete A
B-II	II	Bolsa Filete B
C-III	III	Bolsa Filete C
D-III	III	Bolsa Filete D
A-IV	IV	Bolsa Cono A
B-IV	IV	Bolsa Cono B
C-V	V	Bolsa Cono C

3.2.6 Determinación experimental del coeficiente total de transferencia de calor. Para el caso de los alimentos envasados en bolsas esterilizables se utilizó el concepto de coeficiente total de transferencia de calor (U) debido a la existencia de una resistencia adicional a la transferencia de calor dada por el envase polilaminado (PEREZ, 2007).

El coeficiente de transferencia de calor es necesario conocer cuando se quiere

describir en forma apropiada la cinética de penetración de calor durante los procesos térmicos. Para determinar el coeficiente total de transferencia de calor se utilizaron objetos de cobre de propiedades conocidas y de geometrías semejantes al formato del producto. Se utilizó una rodaja para el caso de filetes y un cilindro para representar los conos envasados al vacío (FIGURA 37). Los objetos de cobre fueron envasados, y sellados en bolsas esterilizables del formato correspondiente, e instalados en las bandejas del autoclave. Posteriormente, se registró la historia tiempo-temperatura de los objetos de cobre envasados en bolsas esterilizables durante los tratamientos térmicos evaluados. A partir de esta información se podrá estimar los valores del coeficiente total de transferencia de calor durante el tiempo de proceso.



FIGURA 37. Cilindro de cobre envasado al vacío en bolsa esterilizable.

Por otro lado, con el propósito de determinar la influencia del jugo, liberado por las cortes de jurel durante el tratamiento térmico, en la magnitud del coeficiente total de transferencia de calor se procedió a realizar ensayos experimentales de la misma forma descrito en el párrafo anterior, pero con la adición de 80 ml del jugosón obtenido al abrir bolsas tratadas térmicamente de la producción comercial. Esta cantidad de jugosón que se genera durante el proceso de esterilización fue obtenida al establecer un promedio del líquido generado post-proceso de varias muestras analizadas.

De los ensayos realizados se observó que el jugosón generado durante la aplicación del tratamiento térmico no tiene influencia relevante en la penetración del calor en los productos, ya que los perfiles de temperatura de los objetos de cobre no mostraron diferencias en alcanzar la temperatura de autoclave. De esta forma se mantiene que la transferencia de calor en los productos ocurre exclusivamente por conducción.

Para la captura de los datos tiempo-temperatura se utilizaron los siguientes materiales:

- Cilindro y rodaja de cobre macizo (99% de pureza).
- Termocuplas flexibles del tipo T, Physitemp© con aislamiento Kapton©, calibre 30 y una velocidad de respuesta de 0,05 segundos.
- Silicona sellante a altas temperatura RTV.
- Registrador de temperaturas (*Data logger*) de 12 canales. Digi-Sense “12 – Channel Scanning Thermocouple Thermometer” (Barnant Co., Barrington, IL, USA).

Para la determinación del coeficiente total de transferencia de calor (U) se utilizó la siguiente expresión que involucra todas las resistencias térmicas, desde el medio circundante hasta el material alimenticio (SIMPSON **et al.**, 2004):

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h} + \frac{e_p}{K_p} \quad (3.1)$$

donde:

- U Coeficiente global de transferencia de calor ($W/m^2 K$).
 h Coeficiente convectivo de transferencia de calor ($W/m^2 K$).
 e_p Espesor del material (m).
 k_p Conductividad del material ($W/m K$).

El coeficiente global de transferencia de calor (U) se determinó para cada intervalo de tiempo mediante la siguiente ecuación:

$$U = - \left[\left(\frac{C_p \cdot \rho \cdot V}{A \cdot t} \right) \cdot \ln \left(\frac{T_\infty - T}{T_\infty - T_0} \right) \right] \quad (3.2)$$

donde:

- T_∞ Temperatura del medio ($^{\circ}C$)
 T Temperatura en el tiempo t ($^{\circ}C$)
 T_0 Temperatura inicial en el intervalo evaluado ($^{\circ}C$)
 C_p Calor específico ($J/kg K$)
 ρ Densidad (kg/m^3)
 V Volumen (m^3)
 A Área (m^2)
 t Tiempo de intervalo (s)

A partir de la aplicación de la Ecuación (3.9) se obtuvieron valores del coeficiente U en función del tiempo para las etapas correspondientes al CUT y enfriamiento. Para la etapa de temperatura de autoclave constante ($116^{\circ}C$) el valor de U sería constante. De esta forma se obtuvieron las curvas de distribución del coeficiente U para cada tratamiento térmico aplicado.

3.3 Ubicación espacial de las termocuplas en el producto

La determinación de la ubicación espacial de la termocupla en el producto durante el tratamiento térmico es necesaria para la validación de los resultados simulados con los experimentales. Para este efecto, se utilizó el sistema de Rayos X (FIGURA 38) disponible en el Hospital Veterinario de la Facultad de Ciencias Veterinarias de la Universidad Austral de Chile. Este sistema está compuesto por el equipo de Rayos X modelo DXD – 350 II (General Electric Co., Connecticut, USA) y una Reveladora automática de películas radiológicas DAITO modelo XP 1000 (DAITO Co., Japón).

Para determinar las coordenadas (x, y, z) del punto extremo soldado de las termocuplas se tomaron radiografías en dos posiciones: *vista superior* (FIGURA 39a) para representar el plano XY , y *vista lateral* (FIGURA 39b) para representar el plano XZ . Las imágenes radiográficas fueron tomadas a escala 1:1 con respecto al tamaño de las muestras obteniéndose de esta forma las coordenadas (x, y) y (x, z) según la vista utilizada.

3.4 Modelación matemática del proceso de transferencia de calor

El modelo matemático a utilizar para la representación del proceso de esterilización de cortes de jurel envasados al vacío, considera el proceso de transferencia de calor por conducción en dominios de forma irregular compleja con propiedades termofísicas variables con la temperatura y sujeto a condiciones convectivas variables. Para establecer la solución numérica del modelo matemático a utilizar, se tendrá en cuenta los siguientes supuestos:

- El producto (cortes de jurel) se consideró como un sólido de composición uniforme e isotrópica.

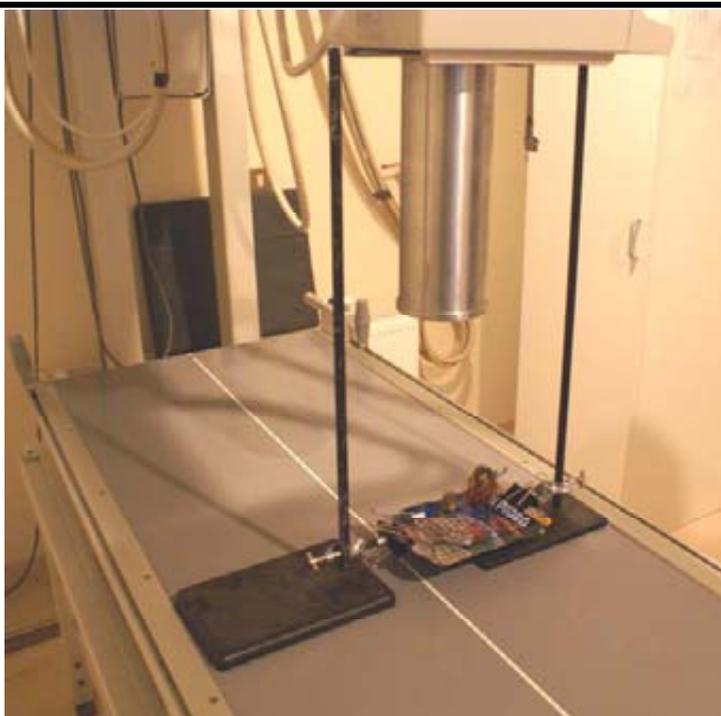


(a) Equipo de Rayos X modelo DXD – 350 II General Electric

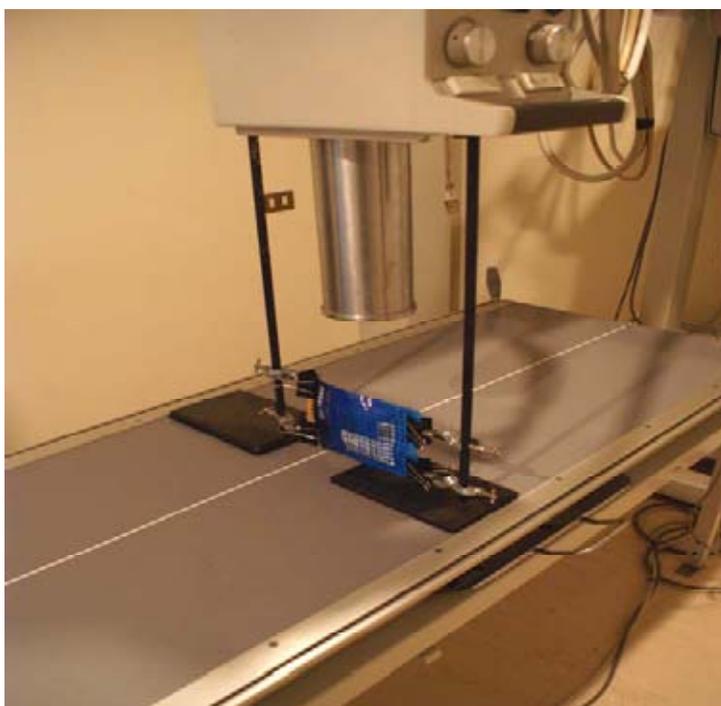


(b) Equipo Revelador modelo XP 1000 DAITO

FIGURA 38. Sistema de Rayos X para la ubicación espacial de las termocupas en los productos.



(a) Vista superior



(b) Vista lateral

FIGURA 39. Toma de Rayos X en vistas superior y lateral de los productos.

- La transferencia de calor al interior del alimento se realiza exclusivamente por conducción, desde que no se añade líquido de cobertura a la conserva.
- Las bolsas poseen un alto grado de vacío, lo cual indica que no es un factor crítico que afecte la transferencia de calor por conducción durante el proceso.
- Las condiciones del medio, temperatura y coeficiente global de transferencia de calor (U) son variables en el tiempo.
- La variación de volumen y de área superficial son despreciables por efecto del tratamiento térmico.
- Las propiedades termofísicas, conductividad térmica (k) y calor específico (Cp) del producto son variables con la temperatura. Otra propiedad de interés, la densidad (ρ) del producto es considerado constante desde que el cambio de volumen del producto es despreciable.

3.4.1 Ecuaciones de gobierno. La ecuación tridimensional general que representa la transferencia de calor por conducción en el interior del alimento sólido isotrópico, con propiedades termofísicas que dependen de la temperatura expresada en coordenadas rectangulares, puede ser descrita como sigue:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right) = C(T) \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.3)$$

$C(T) = \rho \cdot Cp(T)$, el calor específico volumétrico ($J/m^3 K$).

Para completar el modelo matemático se requiere indicar la condición inicial y condiciones de borde para el dominio irregular complejo.

3.4.1.1 Condiciones iniciales. La ecuación (3.4) indica que la temperatura inicial es uniforme en todos los puntos (nodos) del dominio, en tanto que la

ecuación (3.5) muestra que la temperatura inicial de cada nodo del dominio para la etapa de enfriamiento es la condición alcanzada al finalizar la etapa de calentamiento (tiempo t_g).

$$\text{Etapa de calentamiento: } T(x, y, z, 0) = T_{in}; \text{ para todo } x, y, z, t = 0 \quad (3.4)$$

$$\text{Etapa de enfriamiento: } T_{in}(x, y, z, t_g) = T_g(x, y, z); \text{ para todo } x, y, z, t = t_g \quad (3.5)$$

3.4.1.2 Condiciones de borde considerando un dominio 3D.

Etapa de calentamiento:

$$k \cdot \frac{\partial T}{\partial n}(x, y, z, t) = U_1(t) \cdot [Ta_1(t) - T_s]_{x, y, z, \text{ sobre la superficie límite } S1; t > 0} \quad (3.6)$$

$$k \cdot \frac{\partial T}{\partial n}(x, y, z, t) = U_2(t) \cdot [Ta_2(t) - T_s]_{x, y, z, \text{ sobre la superficie límite } S2; t > 0} \quad (3.7)$$

Etapa de enfriamiento:

$$k \cdot \frac{\partial T}{\partial n}(x, y, z, t) = U_3(t) \cdot [Ta_3(t) - T_s]_{x, y, z, \text{ sobre la superficie límite } S1; t > 0} \quad (3.8)$$

$$k \cdot \frac{\partial T}{\partial n}(x, y, z, t) = U_4(t) \cdot [Ta_4(t) - T_s]_{x, y, z, \text{ sobre la superficie límite } S2; t > 0} \quad (3.9)$$

Siendo U el coeficiente global de transferencia de calor, que involucra al coeficiente convectivo de transferencia de calor y a la resistencia térmica por conducción del envase flexible; T_a es la temperatura del medio; T_s es la temperatura de la superficie del material; S es la porción de la superficie límite expuesta a las condiciones de frontera; $\frac{\partial T}{\partial n}$ es la gradiente de temperatura normal a la superficie.

Las ecuaciones (3.6 a 3.9) representan las condiciones operacionales a las cuales fue sometido el producto durante todas las etapas del proceso térmico

(calentamiento y enfriamiento). El dominio irregular complejo descrito por las superficies S_1 y S_2 (FIGURA 40) representa las condiciones de asimetría geométrica. La simetría térmica es representada cuando las curvas de la temperatura del medio y del coeficiente total de transferencia de calor que se aplican a las dos superficies de la bolsa son las mismas tanto para la etapa de calentamiento [$Ta_1(t)=Ta_2(t)$; $U_1(t)=U_2(t)$] como enfriamiento [$Ta_3(t)=Ta_4(t)$; $U_3(t)=U_4(t)$].

Las condiciones de simetría térmica fueron verificadas experimentalmente al colocar sensores de temperatura en la periferia de las dos superficies de las bolsas durante su procesamiento. Los registros no mostraron diferencias importantes en los perfiles de temperatura de las superficies de las bolsas, es decir, las condiciones de calentamiento/enfriamiento se pueden considerar semejantes en ambas caras del dominio.

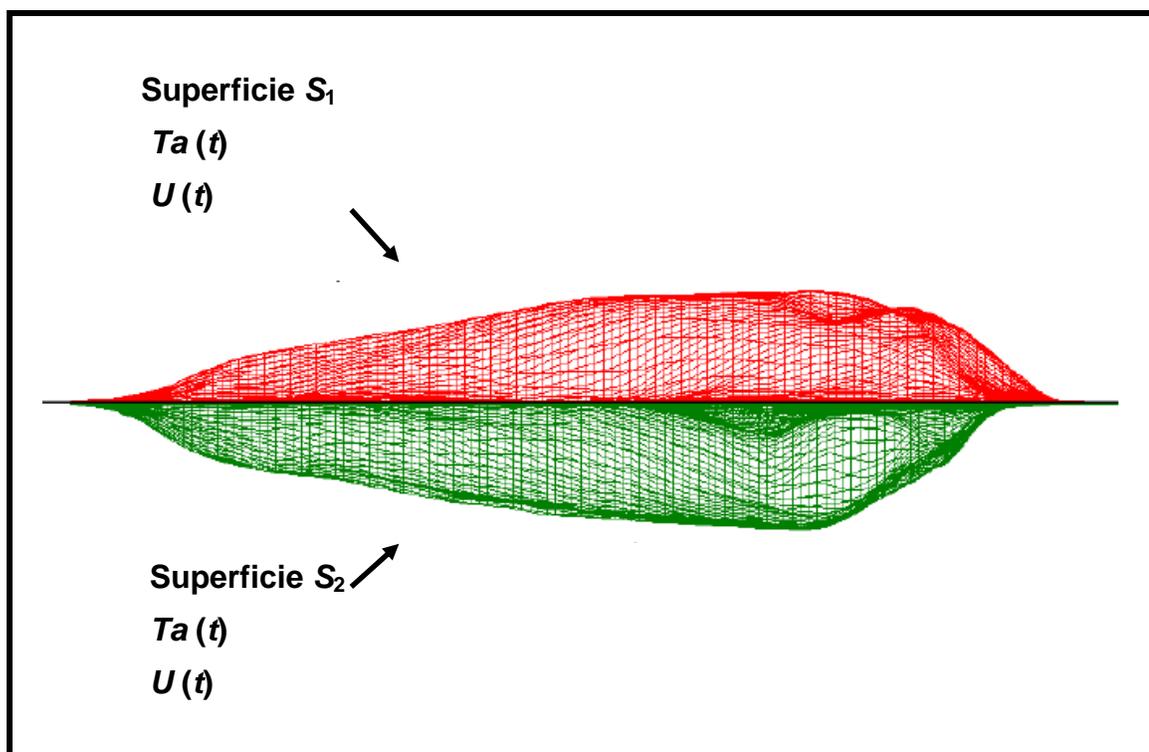


FIGURA 40. Representación de las condiciones de asimetría geométrica y simetría térmica.

3.5 Simulación de procesos térmicos de productos de formas complejas

Las etapas necesarias para lograr simular los procesos térmicos de los cortes de jurel envasados al vacío en bolsas esterilizables se describen en esta sección.

3.5.1 Obtención del modelo digital. Los cortes de jurel al ser envasados al vacío en las bolsas esterilizables toman la forma irregular compleja del producto como se muestra en la FIGURA 29. Para obtener los modelos digitales de los modelos físicos se utilizó una de las metodologías implementada por PINO (2004) conocida como *Reconstrucción de Superficies a partir de una Malla de Puntos*, el cual se basa en los principios de ingeniería reversa (digitalización 3D) y modelado 3D (tecnología CAD, Computer-Aided Design).

El sistema de modelado y digitalización 3D utilizado se compone de las siguientes partes (FOODIGICAE LAB, 2007):

- Brazo de digitalización 3D MicroScribe-G2L™ (Immersion, Co., San José, CA, USA) (FIGURA 41).
- Plataforma de digitalización de madera utilizado como soporte para los modelos físicos.
- Computador tipo PC, procesador Intel® Pentium® 4 de 3.0 Ghz, 2 Gb de RAM, Tarjeta de Video NVIDIA® GeForce FX 5550 de 256 Mb, sistema operativo Microsoft® Windows® XP profesional, Service Pack 2, puerto serial RS – 232 (conexión brazo de digitalización).
- Software de diseño y modelación 3D de curvas NURBS (Non – Uniform Rational B – Spline) Rhinoceros® 3.0 SR5 (Robert McNeel & Associates, Seattle, WA USA).
- Otros materiales: regla de plástico flexible, rotuladores permanentes y masilla adhesiva removible.



FIGURA 41. Brazo digitalizador Microscribe G2LTM.

Las etapas necesarias para la obtención de los modelos digitales se detallan seguidamente.

3.5.1.1 Trazado de mallas. Consistió en establecer una malla o matriz sobre el modelo físico, con el objeto de orientar la captura de puntos durante la digitalización. Para el trazado de la malla, que se extendió por toda la superficie, se utilizaron rotuladores permanentes y una regla flexible para evitar dañar el modelo físico biológico. El tamaño de malla utilizado fue de 10 mm aproximadamente. De acuerdo a los trabajos de PEREZ (2007) y ALARCON (2008) con un tamaño de malla promedio de 1 cm² (10 x 10 mm) se logran capturar con bastante precisión los detalles del modelo físico, en este caso los cortes (filetes o conos) de jurel en bolsas esterilizables.

3.5.1.2 Captura de puntos y generación de las superficies digitalizadas. En esta etapa la ubicación espacial de cada punto, correspondiente a la malla trazada sobre el modelo físico, es capturada mediante el brazo digitalizador *MicroScribe G2L* y el software CAD Rhinoceros (FIGURA 42).

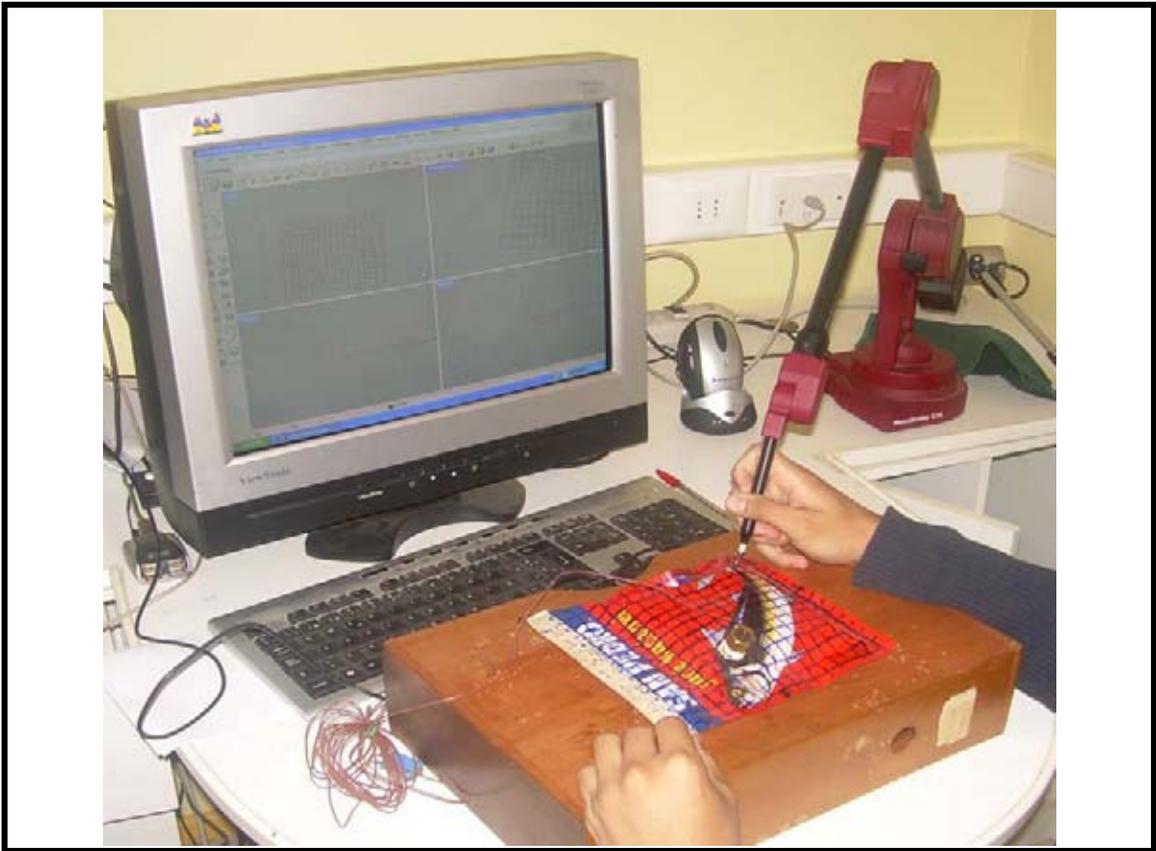


FIGURA 42. Captura de puntos.

En primer lugar, como se muestra en la FIGURA 42, el modelo físico se fijó sobre la plataforma de madera montada a su vez sobre el mesón de trabajo mediante pedazos de masilla adhesiva removible. El uso de la plataforma y mesón de digitalización permite que el modelo físico pueda ubicarse a una distancia accesible para la punta del brazo digitalizador.

Una vez que el digitalizador y *Rhino* establezcan comunicación se selecciona el método de captura de datos POINT GRID (Malla de Puntos). Seguidamente se requiere la definición del tamaño de la malla trazado sobre la superficie del modelo físico (número de filas y columnas). La coordenada (x , y , z) de cada punto se ingresó localizando la punta fina del digitalizador sobre cada intersección de la malla o matriz. La digitalización se realiza hasta capturar

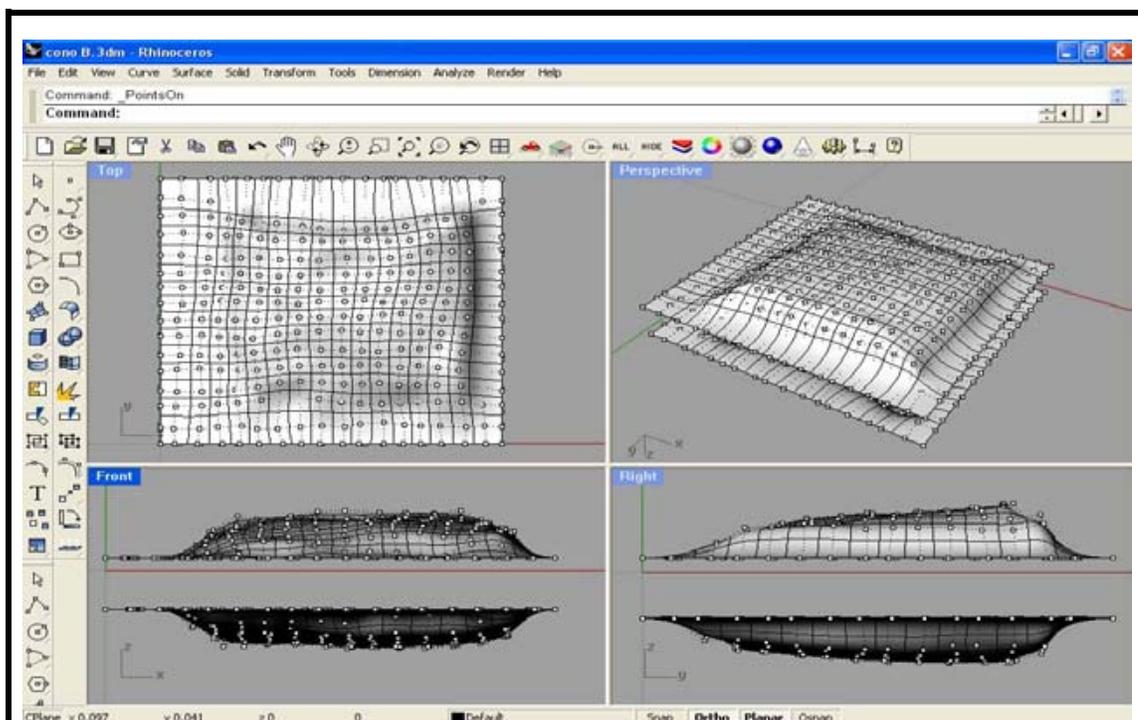
todos los puntos de la malla obteniéndose una nube de puntos. Al capturar la coordenada del último punto, *Rhino* genera automáticamente una superficie a partir de la nube de puntos y muestra su representación geométrica digital en base a curvas NURBS (*Non Uniform Rational B-Splines*) (FIGURA 43).

3.5.1.3 Modelado geométrico. Una vez obtenida las superficies digitales, correspondientes a cada cara o lado de la bolsa esterilizable, fue necesario importar una de las caras sobre el archivo de la otra, de tal forma de tenerlas en un mismo escenario para su modelado y unión en un sólido digital reconocible por el software ALGOR®.

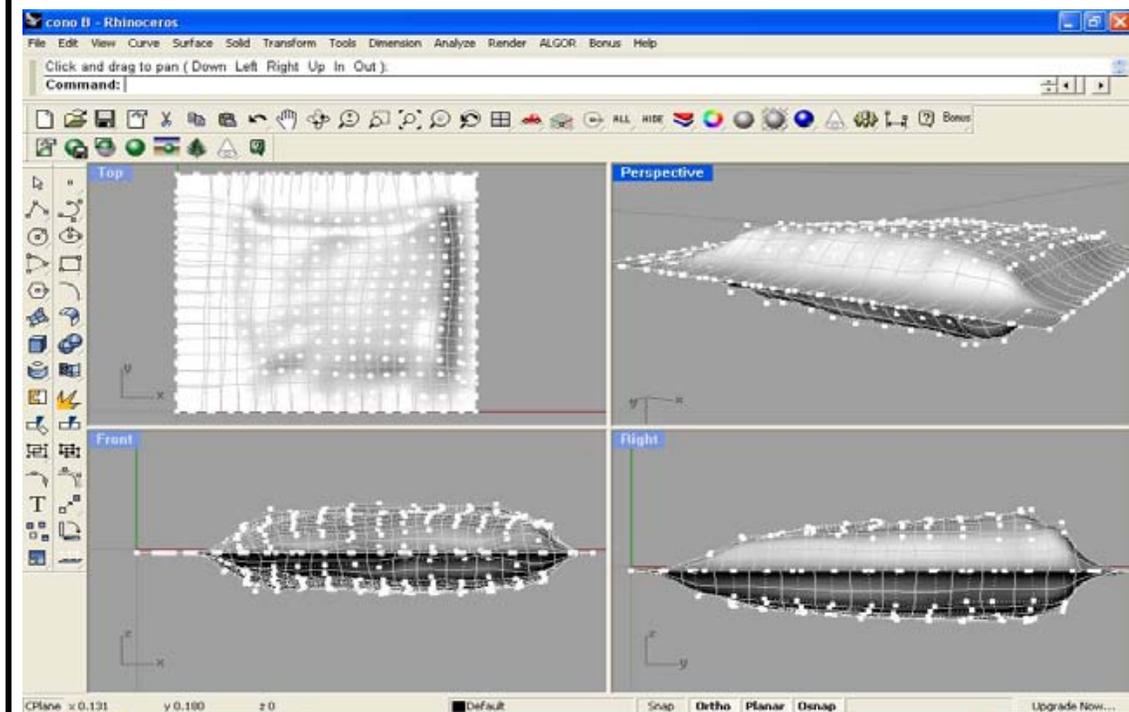
La modelación de las superficies se realizó a través de la opción *Puntos de Control* de *Rhinoceros*®. El manejo de los puntos de control permite suavizar bordes y juntar (“cerrar”) digitalmente las dos superficies, obteniendo como resultado un modelo digital sólido idéntico al modelo físico (FIGURA 44).

Se prestó atención especial durante el modelado en cuanto al espesor de los jureles envasados y la longitud de las bolsas flexibles. Estas características son importantes al momento de simular el producto, ya que se requiere someter a simulación los modelos digitales con la mayor exactitud posible respecto al modelo físico, para evaluar efectivamente los tratamientos térmicos. Además, *Rhino* permite calcular con bastante exactitud el área superficial y el volumen de cualquier modelo digital, y por su gran versatilidad permite ser exportado a cualquier software CAE con objetivos específicos.

3.5.2 Análisis y simulación del proceso térmico en ALGOR. Una vez obtenido el modelo digital 3D del producto en el software (CAD) *Rhinoceros*®, éste es importado directamente por el Software ALGOR®. En este punto se está listo para realizar las simulaciones del proceso térmico de esterilización reproduciendo las condiciones operacionales de la Planta de San José.



(a) Representación digital de las superficies



(b) Unión de las superficies y afinamiento de detalles

FIGURA 43. Modelado 3D en Rhinoceros®.

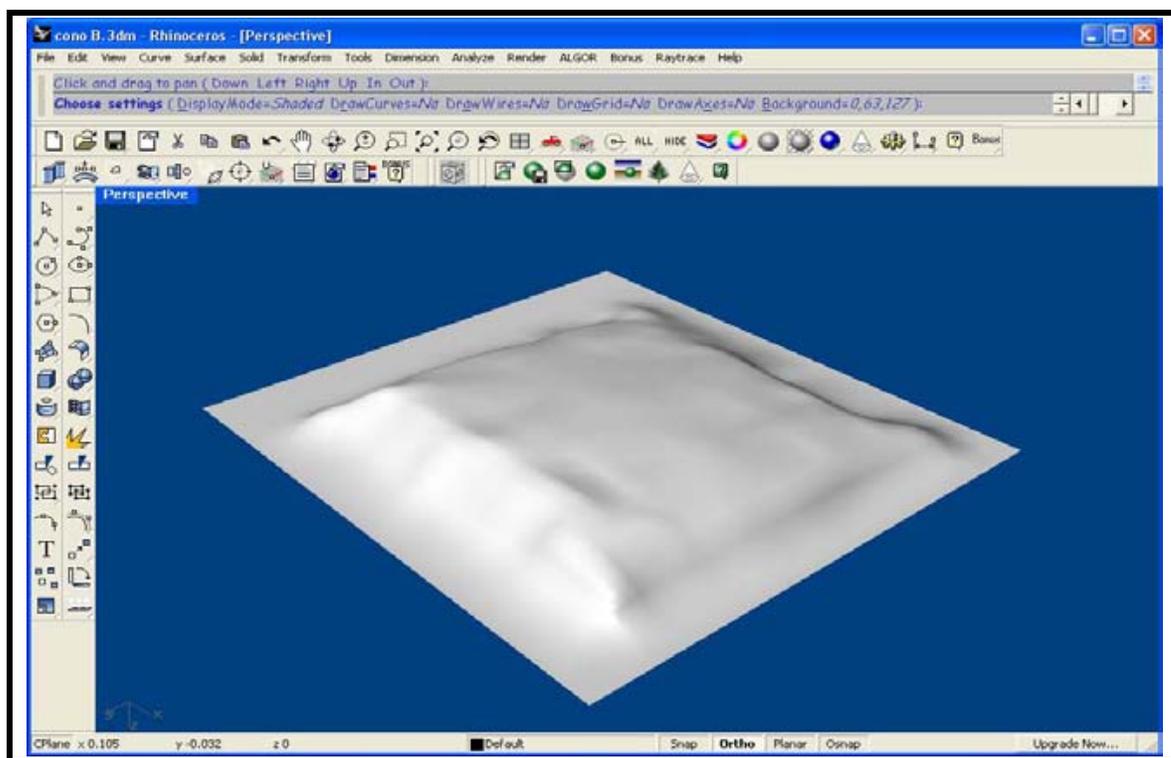


FIGURA 44. Modelo digital 3D en Software CAD Rhinoceros®.

El sistema de simulación de transferencia de calor por conducción está compuesto por las siguientes partes (FOODDIGICAE LAB, 2007):

- Computador tipo PC, procesador Intel® Pentium® 4 de 3.2 GHz, 2 Gb de RAM, Tarjeta de Video NVIDIA® GeForce FX 5550 de 256 Mb, sistema operativo Microsoft® Windows® XP profesional, Service Pack 2, con sistema de almacenamiento extra (500 Gb).
- Software *on – line* de predicción de propiedades termofísicas FoodProperty® v1.0, basado en los modelos de Composición Proximal y Solución Binaria. Disponible en el sitio Web <http://www.wamfoodlab.uach.cl>.
- Software de análisis y simulación por Método de Elementos Finitos ALGOR® v20.1 SP1 (ALGOR Inc., Pittsburg, PA, USA), utilizando el módulo “Professional Heat Transfer Core Package” con capacidad para importar modelos creados en Rhinoceros v3.0 SR5®.

3.5.2.1 Elección del escenario de diseño. Una vez abierto el modelo *CAD* en ALGOR, éste solicita definir un *Escenario de Diseño*, es decir, se debe elegir un tipo de análisis de Transferencia de Calor que para el caso de la presente investigación fue “*Transient Heat Transfer*” (Transferencia de Calor Transiente) (FIGURA 45).

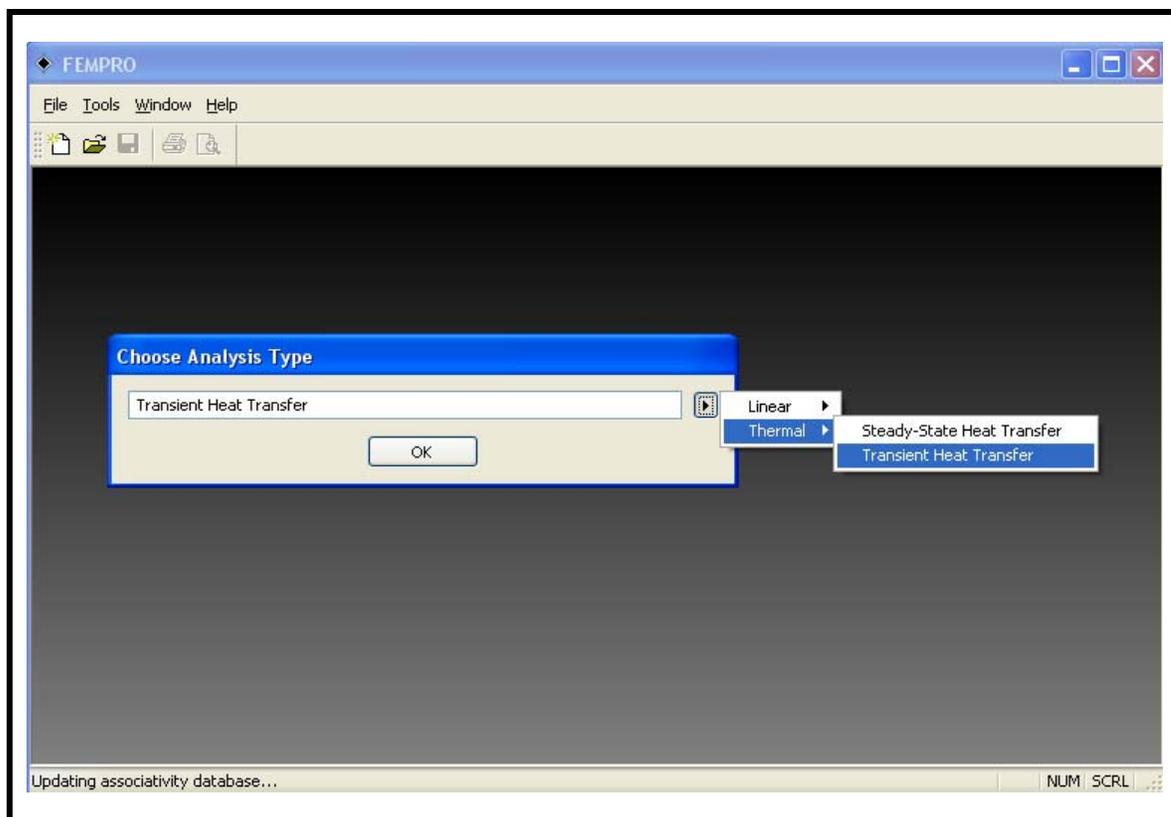


FIGURA 45. Elección del tipo de Análisis de Transferencia de Calor en ALGOR® .

3.5.2.2 Generación de la malla. Para el Análisis de Elementos Finitos es necesario realizar un mallado (meshing) para discretizar el dominio 3D. La generación de la malla en ALGOR, se realizó definiendo el tamaño que se desea tengan los elementos. Para el desarrollo de la investigación se utilizó un tamaño por lado de cada elemento de 3 mm (FIGURA 46a), como resultado de un estudio de convergencia numérica desarrollada por PEREZ (2007) para productos de tamaño y formas similares. En la FIGURA 46b se observa el

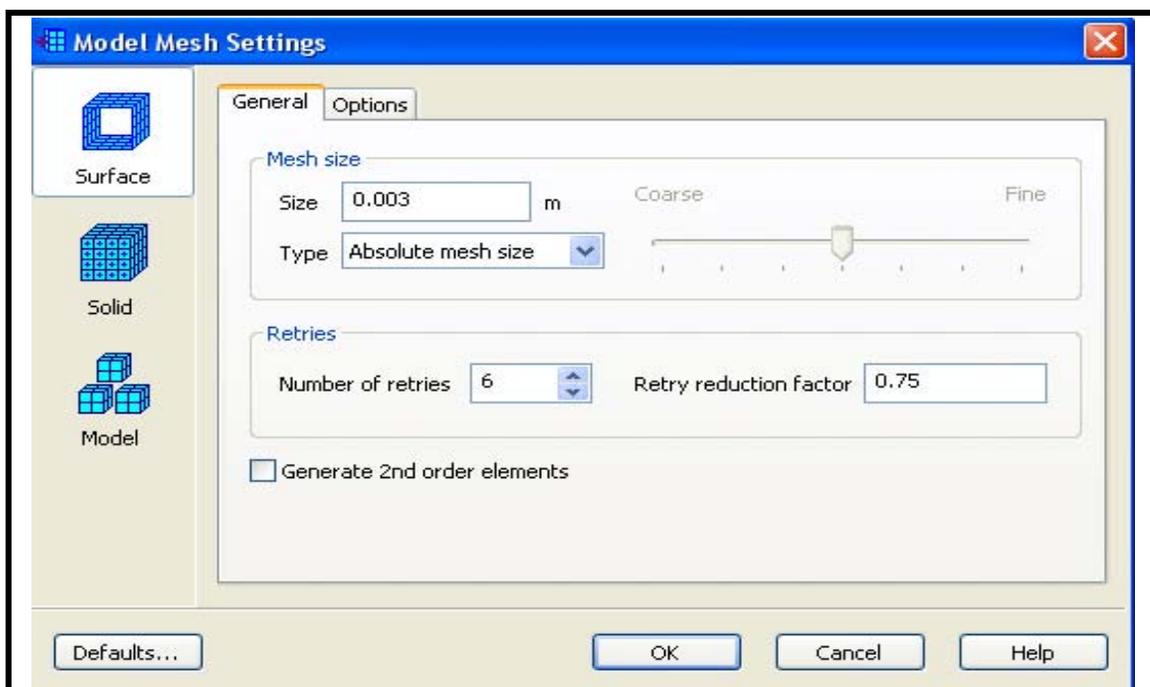
dominio mallado en forma aproximada al tamaño definido.

3.5.2.3 Determinación de parámetros de simulación. Consistió en establecer los parámetros de entrada que son requeridos por el software de simulación ALGOR® para la ejecución de la simulación numérica. El objetivo es obtener una serie de parámetros de simulación que permitan obtener resultados confiables y reproducibles en los modelos 3D evaluados (CUADRO 6).

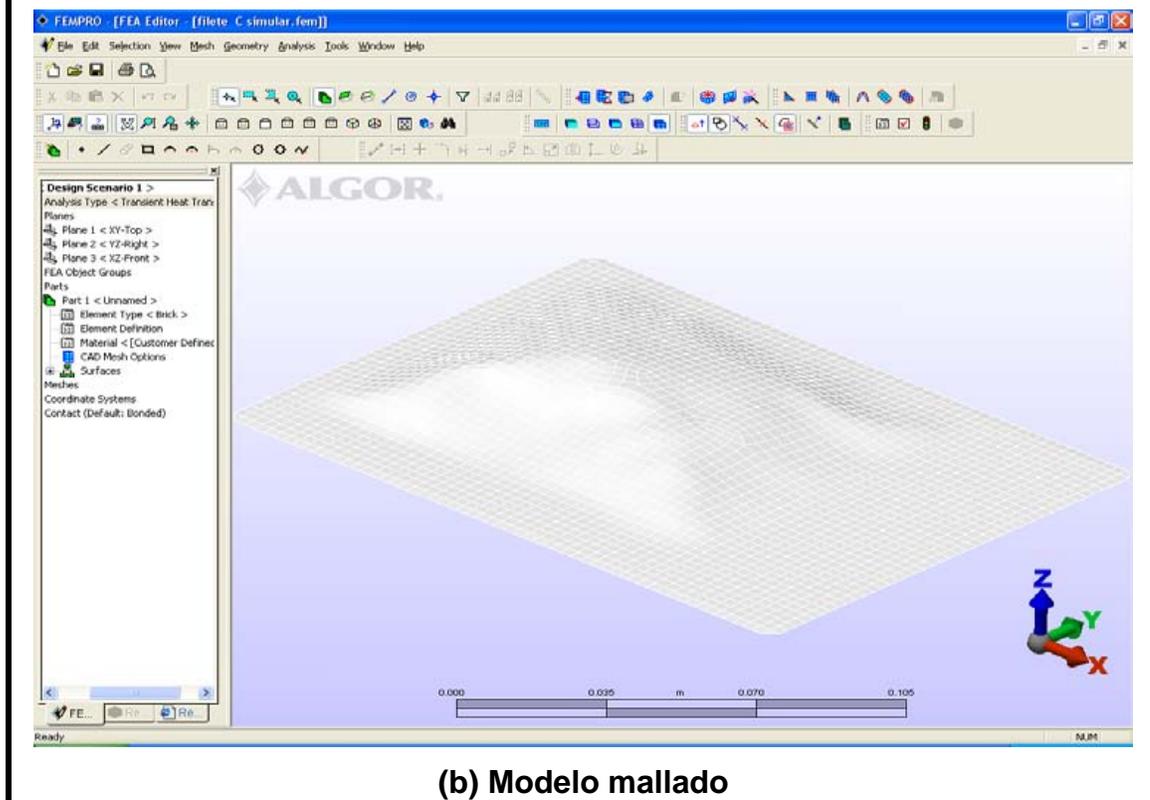
CUADRO 6. Parámetros del modelo comunes en todos los análisis.

Nombre de modelo	Bolsa esterilizable
Temperatura nodal por defecto (inicial)	Entre 10 a 16 °C
Tipo de elementos	Ladrillo (Brick)
Modelo del material	Ortotrópico
Densidad másica (100 °C)	1017,0 kg/m ³
Conductividad térmica	Variable J/(s °C m ²)
Calor específico	Variable J/(kg °C)
Coeficiente convectivo global	Variable con el tiempo
Tiempo de elevación (CUT)	720 s ~12 min
Temperatura de esterilización	116 +/-0,5 °C
Tiempo de proceso	82 min formato filete 112 min formato conos

3.5.2.4 Definición de los elementos. Después del mallado del dominio es necesario definir el modelo del material para el análisis de conducción de calor. ALGOR tiene la opción cálculo con elementos isotrópicos u ortotrópicos. De acuerdo a los supuestos del modelo matemático los cortes de jurel son considerados isotrópicos y sus propiedades termofísicas (k y C_p) son variables con la temperatura. ALGOR® no permite trabajar para el caso de propiedades térmicas dependientes de la temperatura con productos isotrópicos, pero si lo permite para el caso de productos ortotrópicos.



(a) Ingreso del tamaño de los elementos



(b) Modelo mallado

FIGURA 46. Generación de la malla para el dominio 3D en ALGOR®.

Entonces, desde que la Ortotropía se refiere a la variación de la conductividad térmica de acuerdo a la dirección de la conducción de calor ($k_x \neq k_y \neq k_z$), se puede forzar isotropía considerando igual magnitud en los valores de conductividad térmica ($k_x = k_y = k_z$). Así, en esta etapa se seleccionó la opción de Ortotropía en la definición de los elementos del dominio (FIGURA 47).

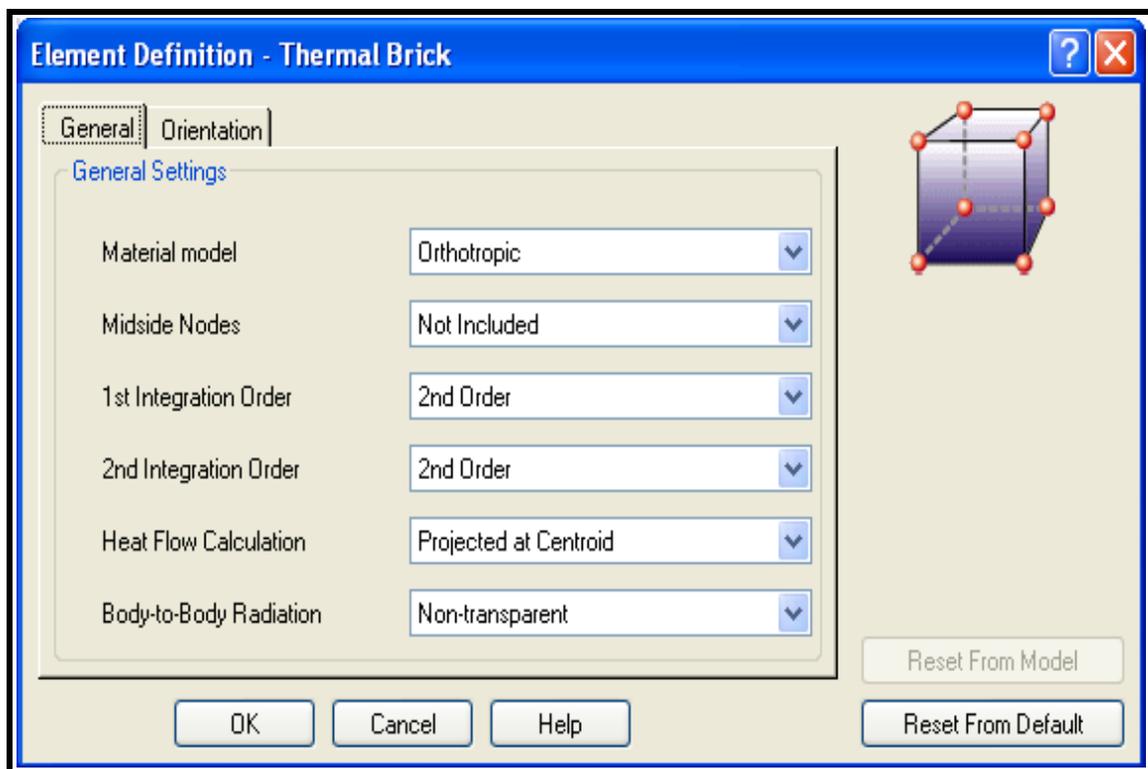


FIGURA 47. Definición de los elementos para el análisis de conducción de calor.

3.5.2.5 Especificación del material de los elementos. En esta parte se requiere del ingreso de las propiedades termofísicas, densidad (ρ), calor específico (C_p) y conductividad térmica (k), siendo las dos últimas dependientes de la temperatura.

Las propiedades termofísicas del jurel fueron obtenidas a partir de la composición proximal mostrada en el CUADRO 7 y utilizando el software *FoodProperty* v. 1.0. Este software utiliza los modelos de predicción de CHOI y

OKOS (1986) que se muestran en el ANEXO 2. Los valores de las propiedades termofísicas para el rango de temperaturas experimentada por el producto durante el proceso térmico se muestran en el ANEXO 3. Las propiedades requeridas se ingresaron mediante una matriz de datos como se muestra en la FIGURA 48.

CUADRO 7. Composición química fraccional del jurel (*Trachurus murphyi*).

Composición	Porcentaje (% p/p)
Agua	73,0
Proteínas	21,9
Lípidos	3,8
Carbohidratos	0,1
Cenizas	1,2

FUENTE: SCHMIDT y HEBBEL (1990).

Element Material Specification - Temperature Dependent Orthotropic Thermal Brick

Material: [Customer Defined] Lock Properties

Mass density: 1017 kg/m³

Material Properties versus Temperature Data

Temperature	Kr	Ks	Kt	Specific Heat
112	0.575	0.575	0.575	3658.1
113	0.576	0.576	0.576	3659.2
114	0.576	0.576	0.576	3660.2
115	0.576	0.576	0.576	3661.3
116	0.576	0.576	0.576	3662.4
117	0.576	0.576	0.576	3663.5

Buttons: Add Row, Delete Row, Sort, View plot..., Import, Export, OK, Cancel, Help, Previous Apply, Reset From Default

FIGURA 48. Propiedades termofísicas del material de los elementos.

3.5.2.6 Ingreso de parámetros de tiempo y temperatura inicial. En esta etapa se especificó la cantidad de pasos de tiempo que serán ejecutados (Steps), el tiempo total del análisis (Time). Esto determina el tamaño de cada paso (en segundos) del proceso simulado. Se definió el intervalo de salida de los resultados (Output interval), (FIGURA 49).

La cantidad de pasos de tiempo que serán ejecutados se obtiene del cociente entre el tiempo total y el tamaño de los pasos seleccionado. En la presente investigación para el caso de un producto a ser sometido a un tiempo de proceso térmico total de 4918 s para un incremento de tiempo de 2 s el número de pasos (steps) para el cálculo numérico fue 2459.

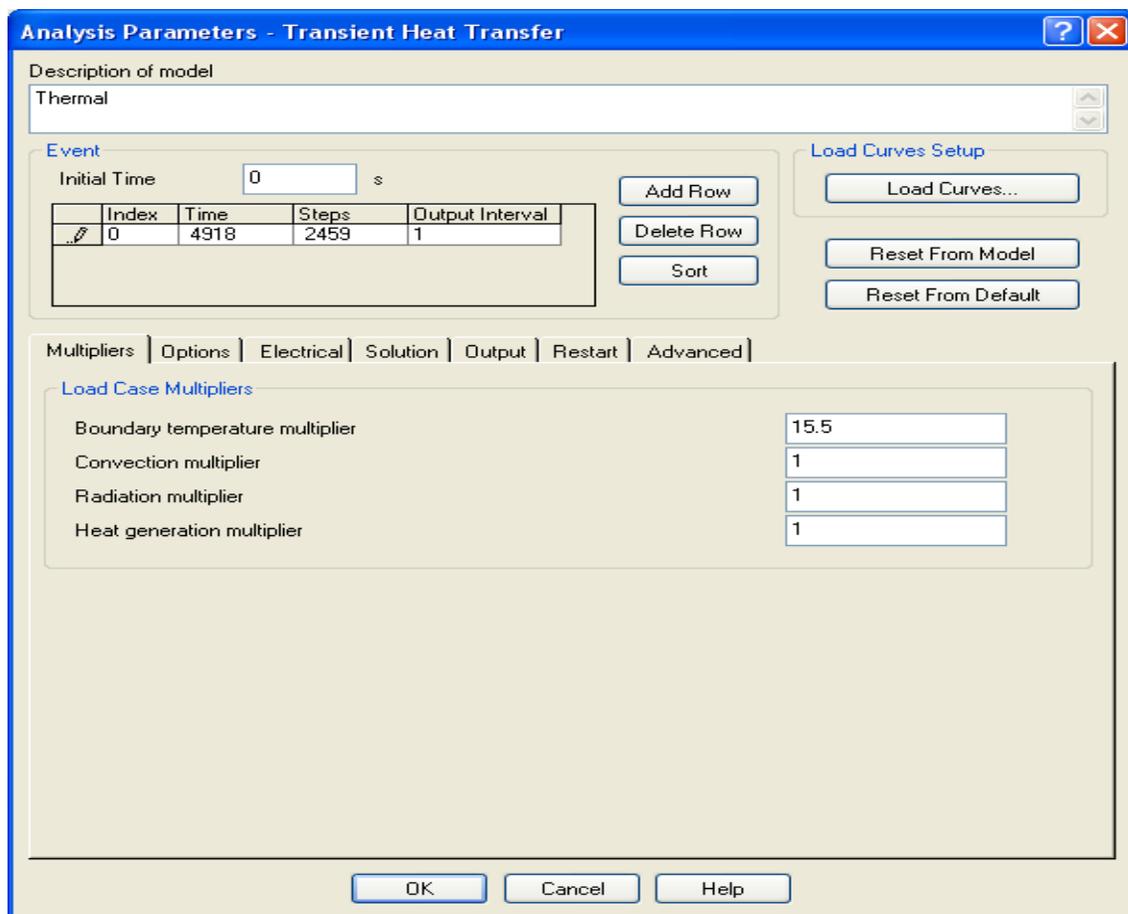


FIGURA 49. Ingreso de parámetros de tiempo y temperatura inicial.

La temperatura inicial del producto se considera uniforme para todos nodos del dominio 3D. En el caso de la FIGURA 49 se ingresó un valor de 15,5 °C.

3.5.2.7 Especificación de las curvas de carga aplicadas en la superficie del producto. El coeficiente total de transferencia de calor (U) y la temperatura del medio (T_a) son funciones de la temperatura. Para ingresar la variación de estos parámetros durante todo el proceso de calentamiento/enfriamiento se definieron dos curvas de carga (FIGURA 50). El “Load Curve 1” corresponde al coeficiente $U(t)$ (FIGURA 51) y el “Load Curve 2” corresponde a la temperatura del medio, $T_a(t)$ (FIGURA 52). Para ingresar los valores de los parámetros evaluados en función del tiempo se selecciona en cada caso la opción “View/Edit Load Curve”.

Dado que a la magnitud de los parámetros U y T_a se les asignaron un valor de “1”(FIGURA 50), la variable **factor** de las curvas de carga sería la magnitud real del coeficiente U y temperatura del medio según corresponda.

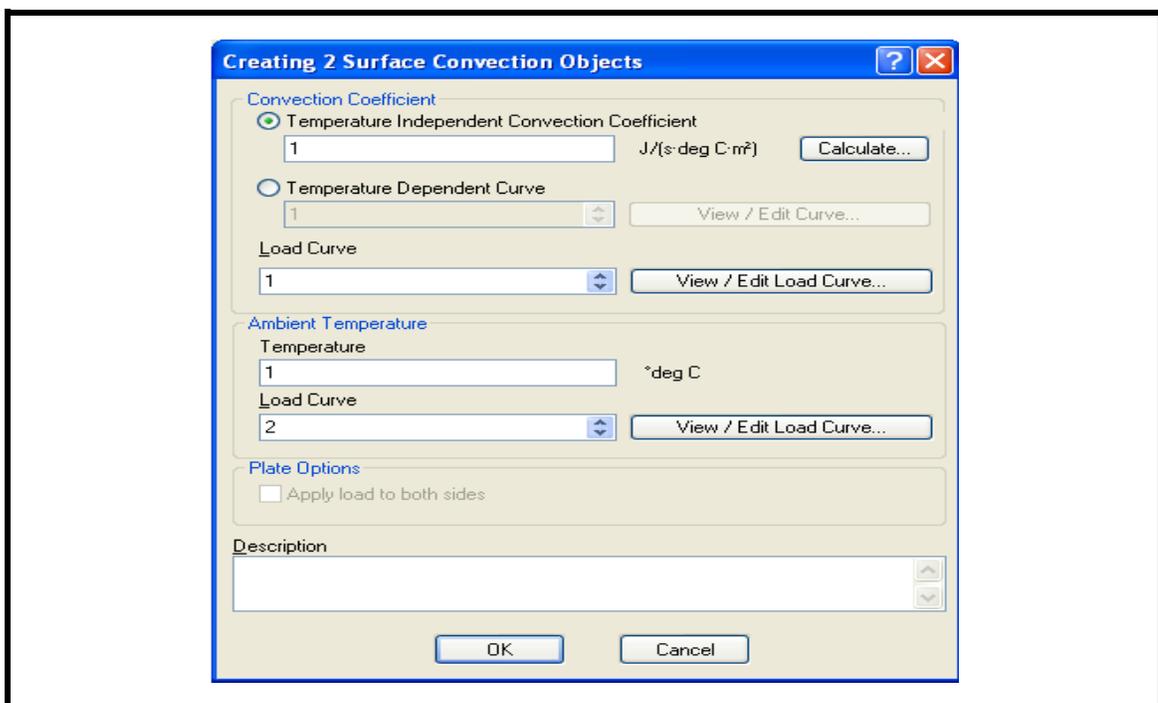


FIGURA 50. Asignación de curvas de carga sobre las superficies.

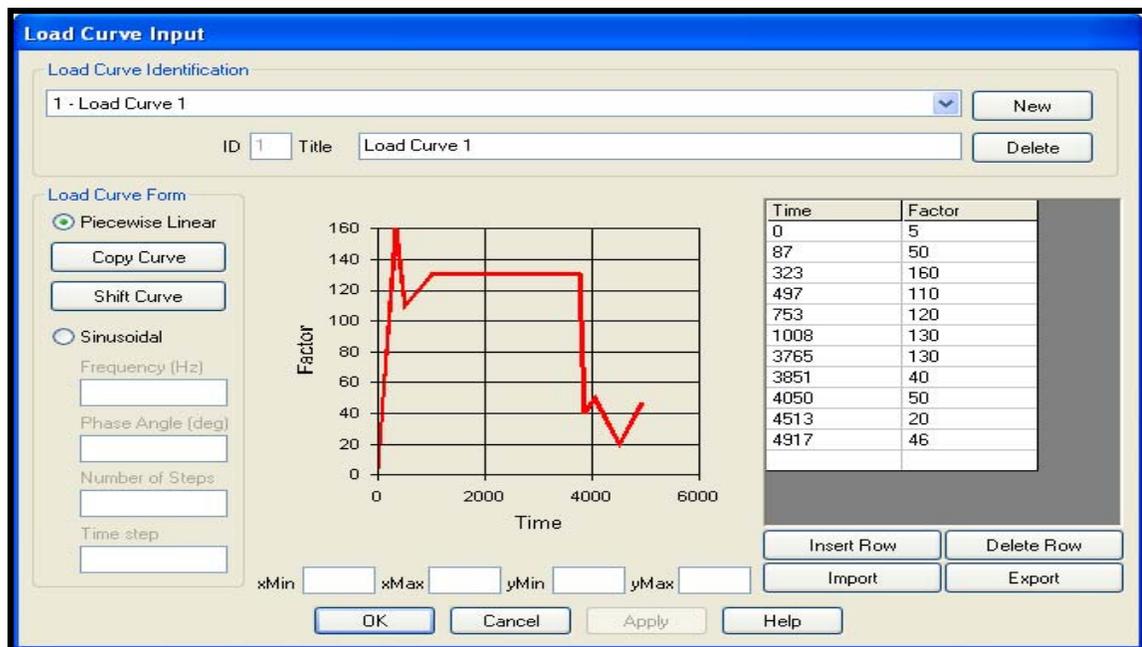


FIGURA 51. Curva de carga para el coeficiente total de transferencia de calor (U) en función del tiempo de proceso.

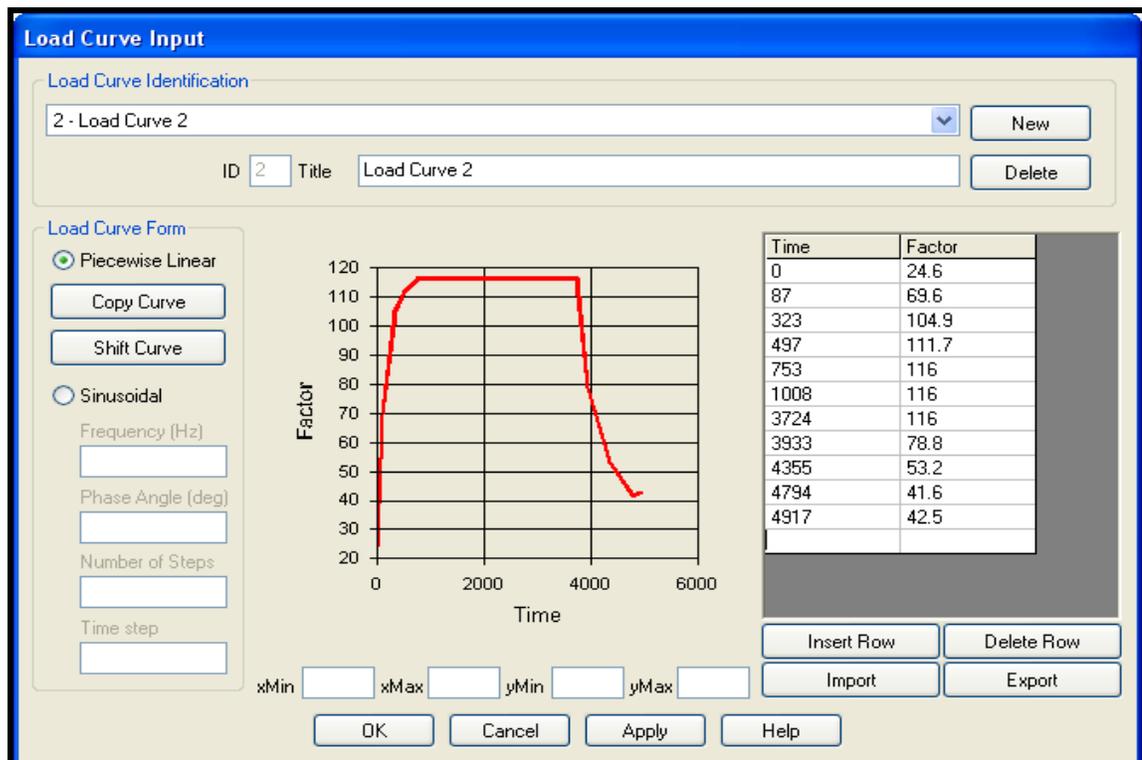


FIGURA 52. Curva de carga para la temperatura del medio en función del tiempo de proceso.

En la FIGURA 53 se aprecia la forma en que ALGOR muestra que las curvas de carga fueron agregadas a las superficies en contacto con el medio de calentamiento/enfriamiento.

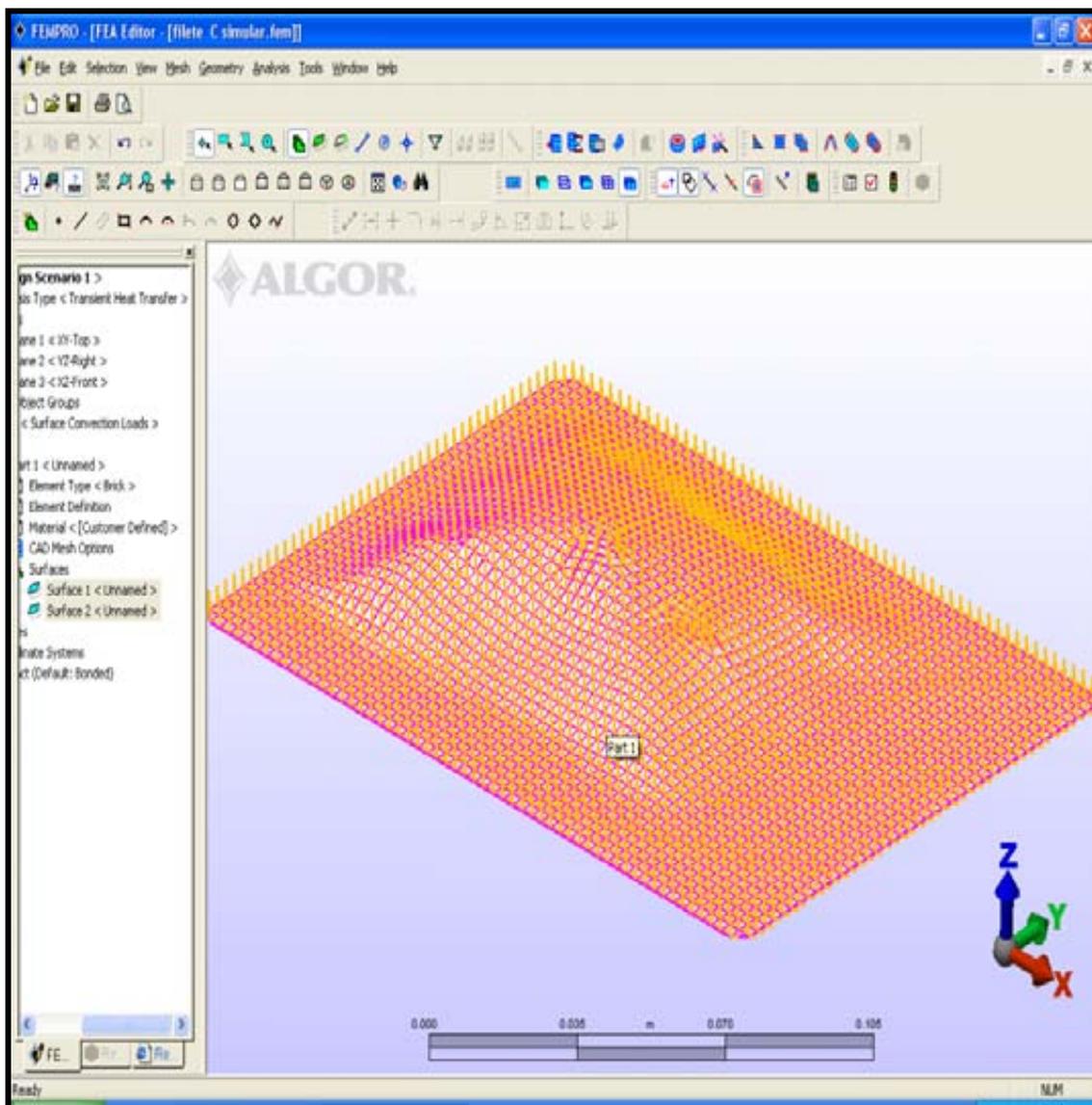


FIGURA 53. Modelo mostrando la incorporación de las cargas en la superficie.

3.5.2.8 Análisis Numérico. Durante el proceso de análisis, ALGOR® muestra una ventana indicando los pasos acumulados de cálculo, el tiempo que lleva

analizando, el gasto computacional en términos de espacio de disco duro ocupado, etc. Esta ventana se puede apreciar en la FIGURA 54.

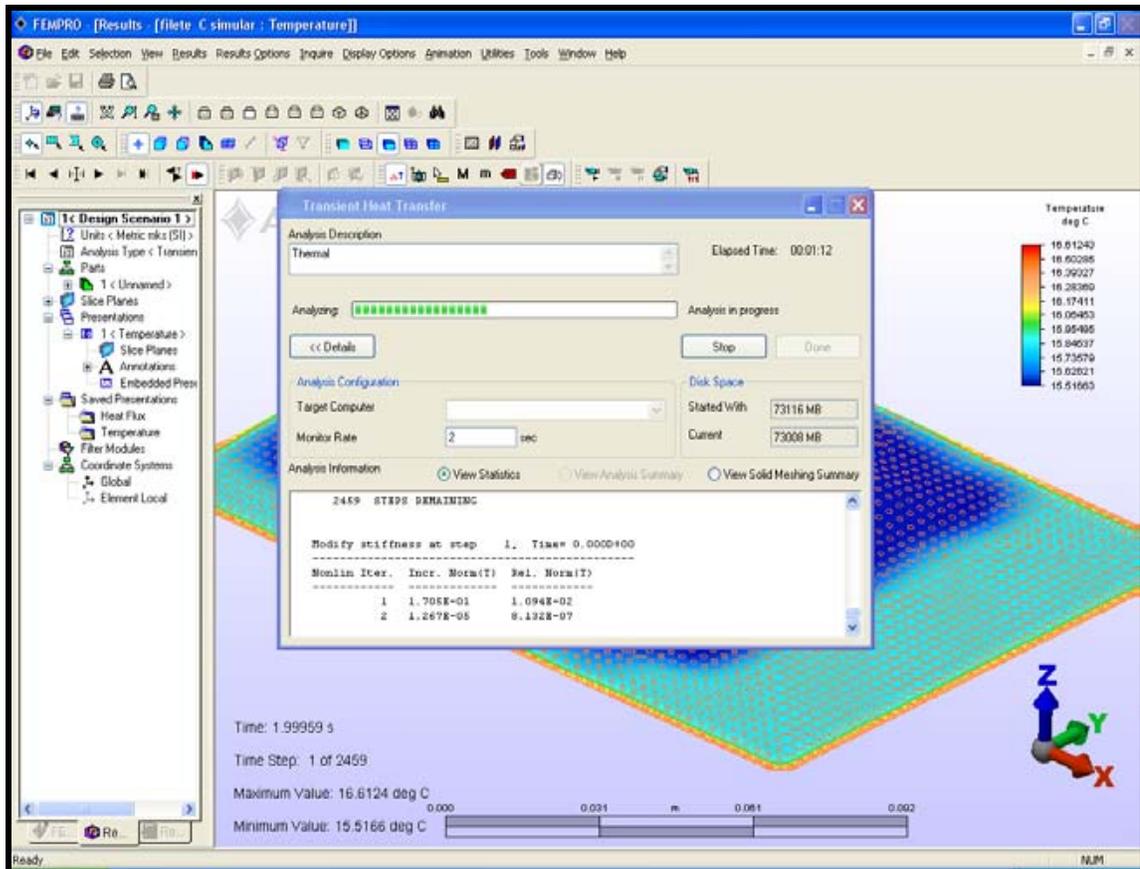


FIGURA 54. Ventana de Análisis.

3.5.3 Revisión de resultados. Una vez terminada la simulación y para la obtención de los perfiles de temperaturas, se siguieron los siguientes pasos:

- Búsqueda del nodo más frío del modelo digital simulado. Para realizar este paso se exportaron desde ALGOR® a Microsoft® Excel (en archivos de extensión *.csv) la historia tiempo-temperatura para todos los nodos del dominio correspondiente a la etapa de tiempo de operador. El intervalo para la exportación de los datos debe ser el adecuado para identificar el nodo más frío

- Perfil de temperatura del nodo más frío. Una vez obtenido el nodo más frío, se exportaron desde ALGOR® a Microsoft® Excel (en un archivo de extensión *.dat) la historia tiempo-temperatura para todo el tiempo de proceso (calentamiento/enfriamiento) correspondientes al nodo más frío. De esta forma se obtiene la gráfica de la curva simulada del proceso para el punto de mas lento calentamiento/enfriamiento.

3.6 Validación de resultados simulados

El ajuste entre las curvas experimentales y las curvas simuladas, fue expresado mediante el valor RMSE (Root Mean Square Error, Raíz Cuadrada del Error Cuadrático Medio), el cual puede ser presentado en forma absoluta (°C) o en porcentaje (%) mediante las siguientes ecuaciones:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_i^n (T_i - T_i^*)^2}{N}} \quad (3.10)$$

$$\%RMSE = \sqrt{\frac{\sum_i^N \left[\frac{(T_i - T_i^*)}{T_i} \right]^2}{N}} \quad (3.11)$$

donde N es el número total de puntos o número total de temperaturas experimentales, T_i son las temperaturas experimentales y T_i^* son las temperaturas obtenidas mediante simulación.

En todos los casos los valores RMSE (°C) y RMSE (%) para la etapa de calentamiento serán determinados hasta el momento que el producto finaliza el tiempo del operador. Para evaluar la etapa de enfriamiento, se considera desde

que se comienza a enfriar el producto hasta el final del proceso. Además se adoptó un valor máximo de 5 % para el valor de RMSE (%) como criterio para evaluar el grado de concordancia entre los perfiles de temperatura experimentales y simulados (CALIFANO, 1981; CLELAND y EARLE, 1984; ZHANG y CAVALIERI, 1991; MORALES– BLANCAS *et al.*, 1999).

3.7 Evaluación de tratamientos térmicos

La letalidad de los tratamientos térmicos aplicados se evaluó calculando los valores F_0 de proceso mediante la Ecuación (2.1). Para este efecto, se utilizó el perfil de temperaturas del punto de más lento calentamiento/enfriamiento de cada muestra analizada. La determinación del punto más lento calentamiento/enfriamiento, a partir de las simulaciones, se realizó siguiendo la metodología implementada por PEREZ (2007).

Evaluando el proceso térmico por etapas (CUT, tiempo del operador, y tiempo de enfriamiento) se obtiene la siguiente ecuación (PEREZ, 2007; NAVARRO, 2007):

$$\left(F_{T_{ref}}^z\right)_{proceso} = \int_{t_0}^{t_{cur}} \frac{dt}{10^{(T_{ref}-T(t))/z}} + \int_{t_{cur}}^{t_{enf}} \frac{dt}{10^{(T_{ref}-T(t))/z}} + \int_{t_{enf}}^{t_f} \frac{dt}{10^{(T_{ref}-T(t))/z}} + \int_{t_{<100^{\circ}C}}^{t_f} \frac{dt}{10^{(T_{ref}-T(t))/z}} \quad (3.12)$$

y, evaluando el tratamiento térmico para las temperaturas sin ($T < 100^{\circ}C$) y con importancia letal ($T > 100^{\circ}C$) se obtiene la siguiente ecuación:

$$\left(F_{T_{ref}}^z\right)_{proceso} = \int_{t_0}^{t_{<100^{\circ}C}} \frac{dt}{10^{(T_{ref}-T(t))/z}} + \int_{t_{>100^{\circ}C}}^{t_g} \frac{dt}{10^{(T_{ref}-T(t))/z}} + \int_{t_g}^{t_{>100^{\circ}C}} \frac{dt}{10^{(T_{ref}-T(t))/z}} + \int_{t_{<100^{\circ}C}}^{t_f} \frac{dt}{10^{(T_{ref}-T(t))/z}} \quad (3.13)$$

donde:

t_0 Tiempo inicial del proceso (min)

t_{CUT}	Tiempo de elevación de la temperatura (min)
t_{Operador}	Tiempo del Operador (min)
t_{Enf}	Tiempo de inicio del enfriamiento (min)
t_f	Tiempo final del proceso de esterilización (min)
t_g	Tiempo final a la temperatura de esterilización e inicio del enfriamiento (min)
$t_{T < 100^\circ\text{C}}$	Tiempo en que el producto alcanza los 100°C (min)
$t_{T > 100^\circ\text{C}}$	Tiempo en que el producto sobrepasa los 100°C (min)
t_f	Tiempo final del proceso de esterilización (min)

Para resolver las Ecuaciones (3.12) y (3.13) se utilizó el método de integración numérica de Trapecio (CHAPRA y CANALE, 1988).

Actualmente, la FDA exige que los tratamientos térmicos aplicados en conservas de pescados deben tener un valor de F_0 superior a 4 minutos y en conservas de mariscos superior a 5 minutos, como valor declarado y verificado por la autoridad acreditada en tratamientos térmicos³ (QTECH, 2004).

Por otro lado, la Pesquera San José S.A. tiene acreditado ante la FDA tratamientos térmicos con un valor de $(F_0)_{\text{proceso}} = 4,5$ para los productos y formatos de exportación evaluados en la presente investigación. Entonces, considerando que el valor de $(F_0)_{\text{requerido}}$ mínimo es 3.0 considerando al *Cl. botulinum* como microorganismo indicador para garantizar el cumplimiento de la Esterilidad Comercial (PFLUG, 1987b) se desprende que el factor de seguridad de los tratamientos térmicos aplicados es del 50% (Letalidad = 1,5). Esto fue establecido ante posibles desviaciones de proceso, como un retardo en el tiempo de elevación (CUT) programado y una posible oscilación de la

³ MONJE M. (2008). Ingeniero en Alimentos, QTECH. Encargada de certificación de procesos térmicos, zona Sur. Comunicación Personal.

temperatura de esterilización durante el proceso, entre otros. Además, como fue señalado anteriormente en el pescado se observa una flora mixta, en donde existen microorganismos mesófilos que aunque no son patógenos son más termorresistentes que el *Cl. botulinum*. Por otra parte existen microorganismos del tipo termófilo, que aunque la esterilización no los elimina en su totalidad, si reducen su número y de esta forma ayuda a la estabilidad microbiológica durante el almacenamiento. Esto último es conocido como esporulamiento económico, que pueden generar problemas organolépticos afectando la calidad del producto.

4. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados del estudio del proceso de esterilización de jureles envasados al vacío en bolsas esterilizables a nivel industrial realizados en las instalaciones de la empresa San José S.A. - Planta Coronel.

4.1 Estudio de distribución de temperatura en el autoclave

El estudio de distribución de temperatura resulta ser muy útil para identificar el estado real en que está operando el autoclave respecto al flujo de vapor, el estado del sistema de ventilación y el de enfriamiento. Además, permite determinar la ubicación de las zonas de más lento calentamiento dentro del autoclave, permitiendo evaluar la uniformidad del medio de calentamiento, y el funcionamiento correcto de los instrumentos de medición de temperatura y cartas de registro.

De acuerdo al diseño del autoclave LAGARDE el vapor ingresa por la parte inferior, es así que las termocuplas se localizaron en las posiciones correspondientes a las bandejas central (nº10) y superior (nº20) para todos los carros distribuidos a lo largo del autoclave (FIGURA 24). De acuerdo a la experiencia la zona mas fría se localizaría entre las bandejas mencionadas.

El registro de distribución de calor en el autoclave LAGARDE se muestra en la FIGURA 55. Las curvas no muestran diferencias sustanciales a lo largo del autoclave para temperaturas superiores a 100 °C, consideradas de importancia letal para los microorganismos a eliminar. Por lo tanto, el diseño y funcionamiento del autoclave LAGARDE permitiría una circulación uniforme de la mezcla aire/vapor.

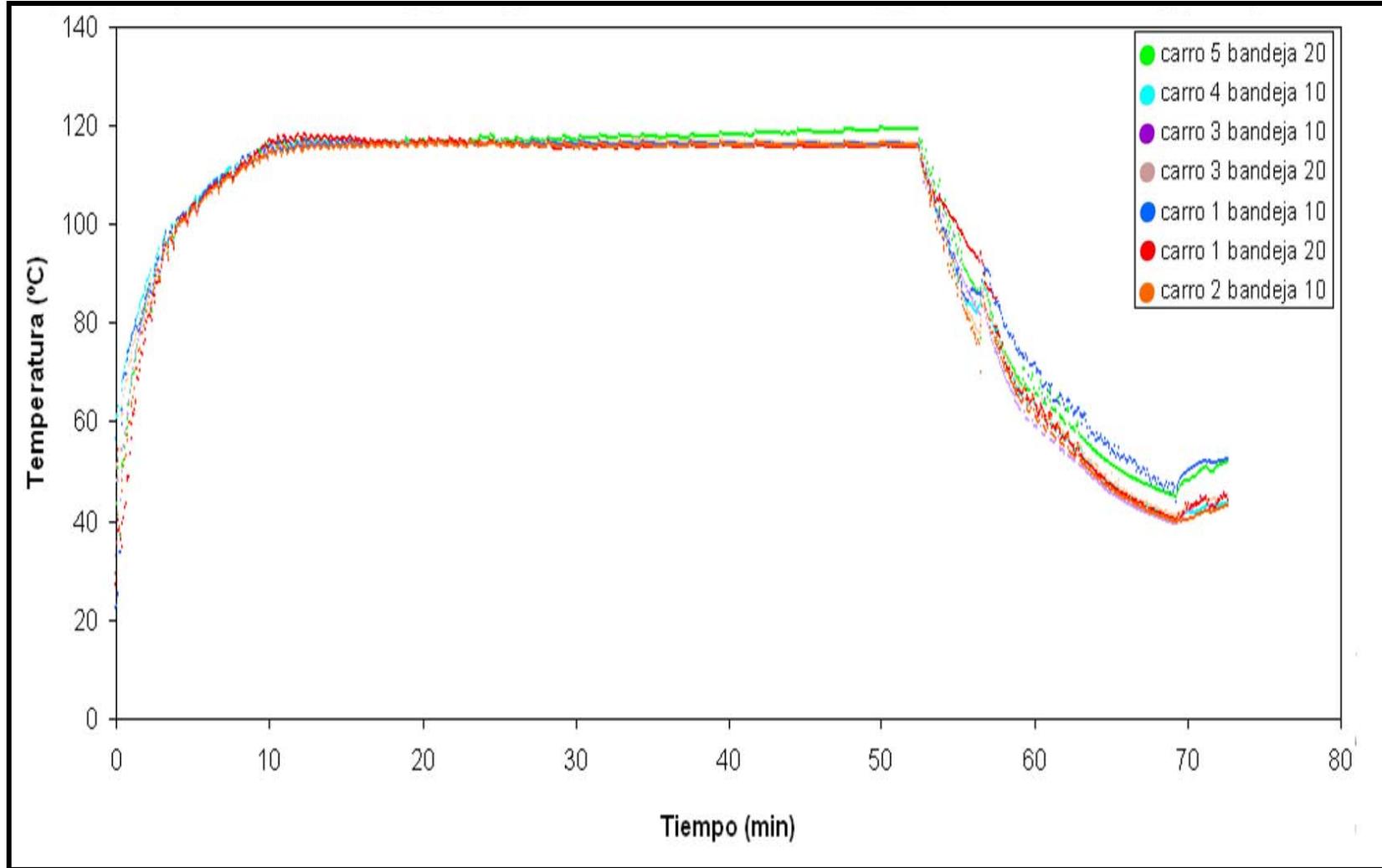


FIGURA 55. Distribución de temperatura en el interior del autoclave LAGARDE.

4.2 Curvas experimentales de los tratamientos térmicos aplicados

Estudios realizados por QTECH (2004) en la misma planta, autoclave, y para los mismos productos y formatos mostraron que la zona de mas lento calentamiento fue el correspondiente al carro n°3. Además, de acuerdo a los resultados y criterios expuestos en la sección 4.1 las bolsas con termocuplas se colocaron en las bandejas central (n°10) y superior (n°20), (FIGURA 36).

En las FIGURAS 56, 57, 58, 59 y 60 se presentan los perfiles de temperatura obtenidos de pruebas de penetración de calor para los formatos conos y filetes. Los productos fueron elaborados con las especificaciones que se muestran en el CUADRO 4, declaradas frente a la FDA en conjunto con los procedimientos de elaboración y controles en línea. De los perfiles de temperatura presentados para el caso de conos, la muestra codificada como C-V fue descartado del estudio, debido a que la temperatura inicial del producto fue superior a lo establecido por el manual de procedimientos de la Planta ($T_i < 10 \text{ }^\circ\text{C}$) para la elaboración de jurel en bolsas esterilizables.

Los sensores de temperatura fueron localizados en el interior del producto, en la parte de mayor espesor, así como también dentro del autoclave para registrar las temperaturas del medio de calentamiento/enfriamiento.

4.3 Simulación de los tratamientos térmicos aplicados

4.3.1 Modelos digitales 3D. Después de la etapa de pruebas de penetración de calor en planta, las muestras fueron trasladadas al Laboratorio de Digitalización 3D e Ingeniería Asistida por Computador para el Procesamiento de Alimentos (FoodDigiCAELab), donde fueron obtenidos los modelos 3D mediante digitalización y modelado. Los modelos digitales se muestran en las FIGURAS 61 y 62, generados a partir de cada una de las bolsas correspondientes al estudio experimental, los modelos restantes se encuentran en el ANEXO 4.

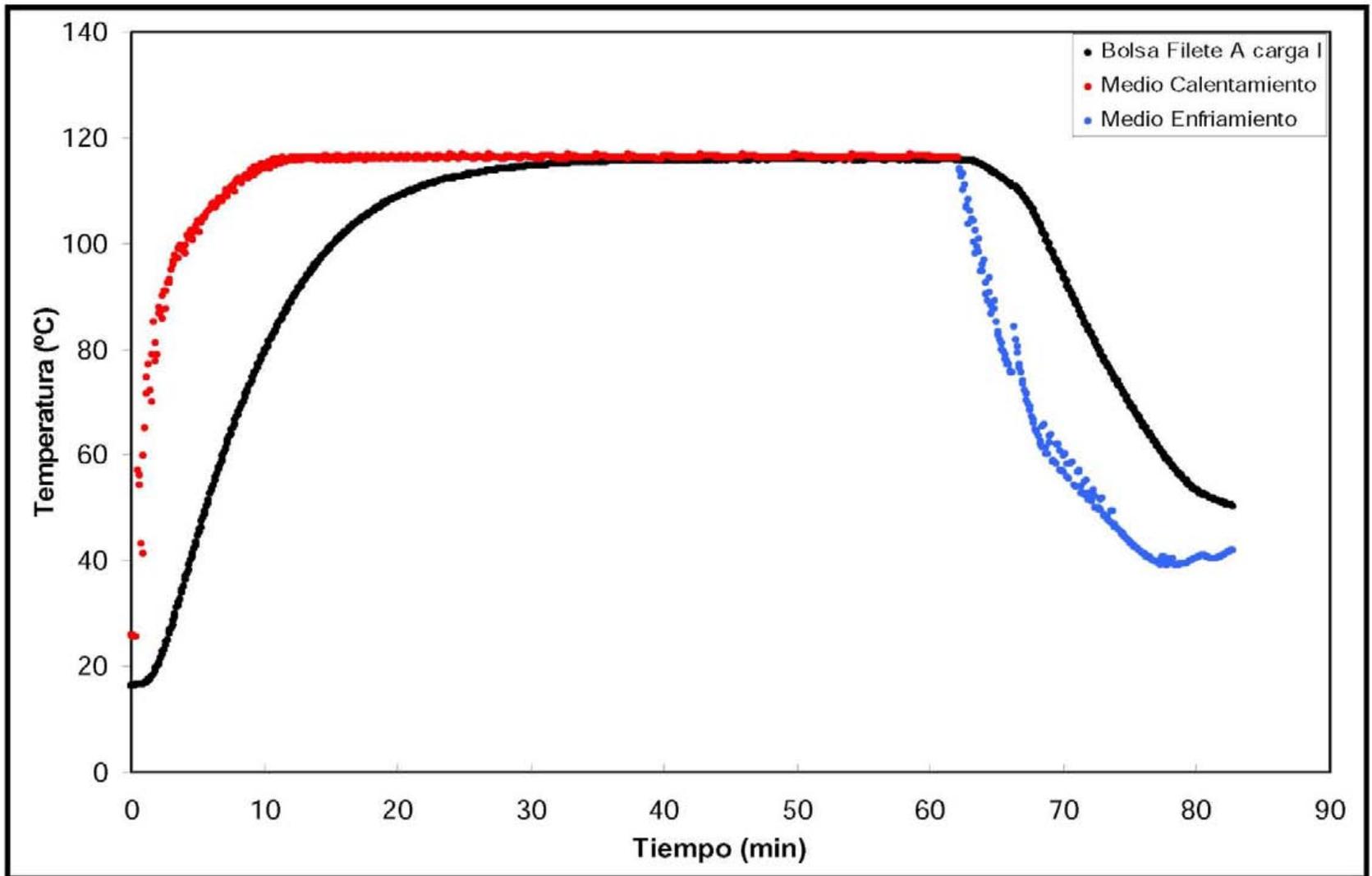


FIGURA 56. Curvas experimentales correspondientes a la bolsa filete A-I.

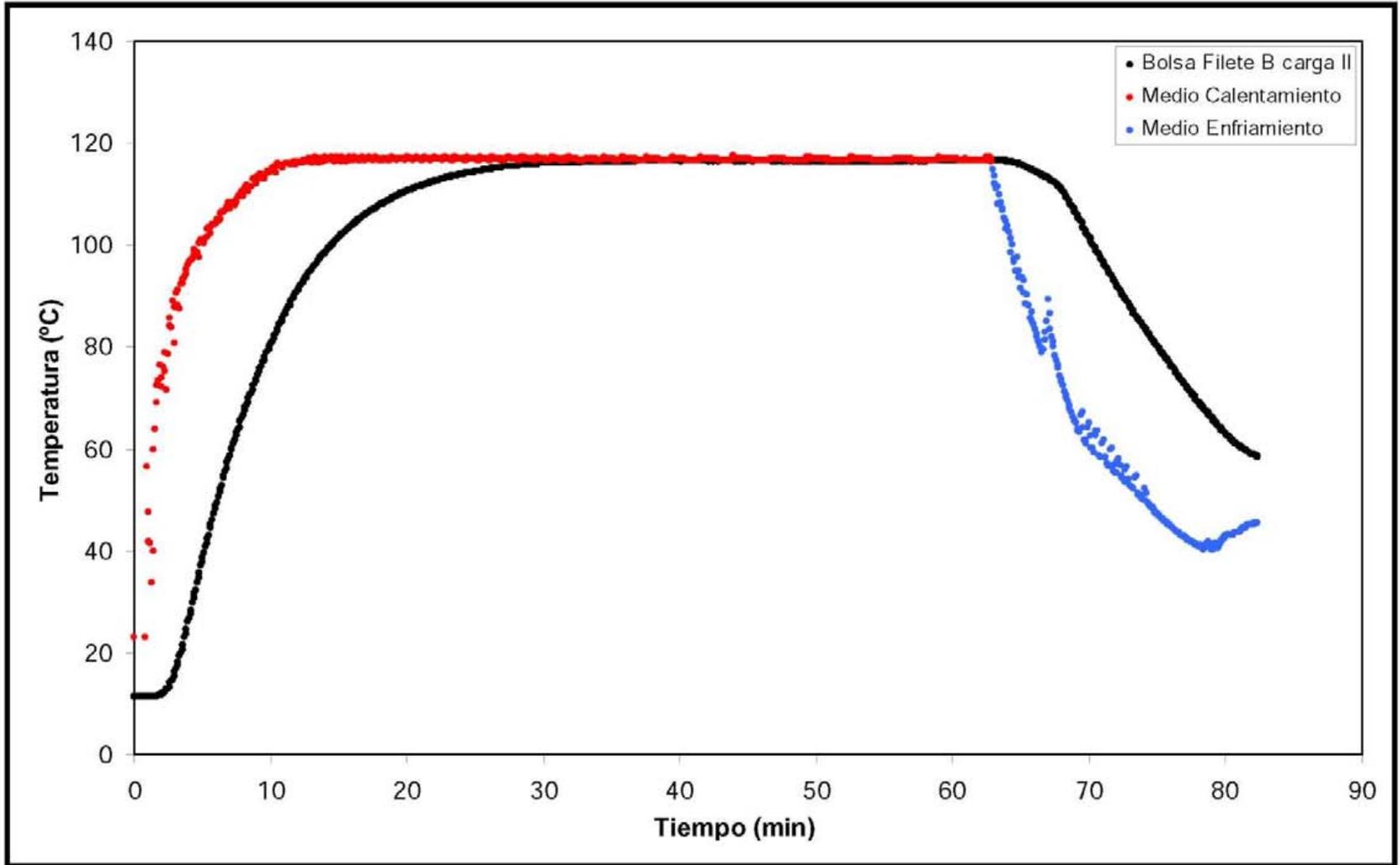


FIGURA 57 Curvas experimentales correspondientes a la bolsa filete B-II.

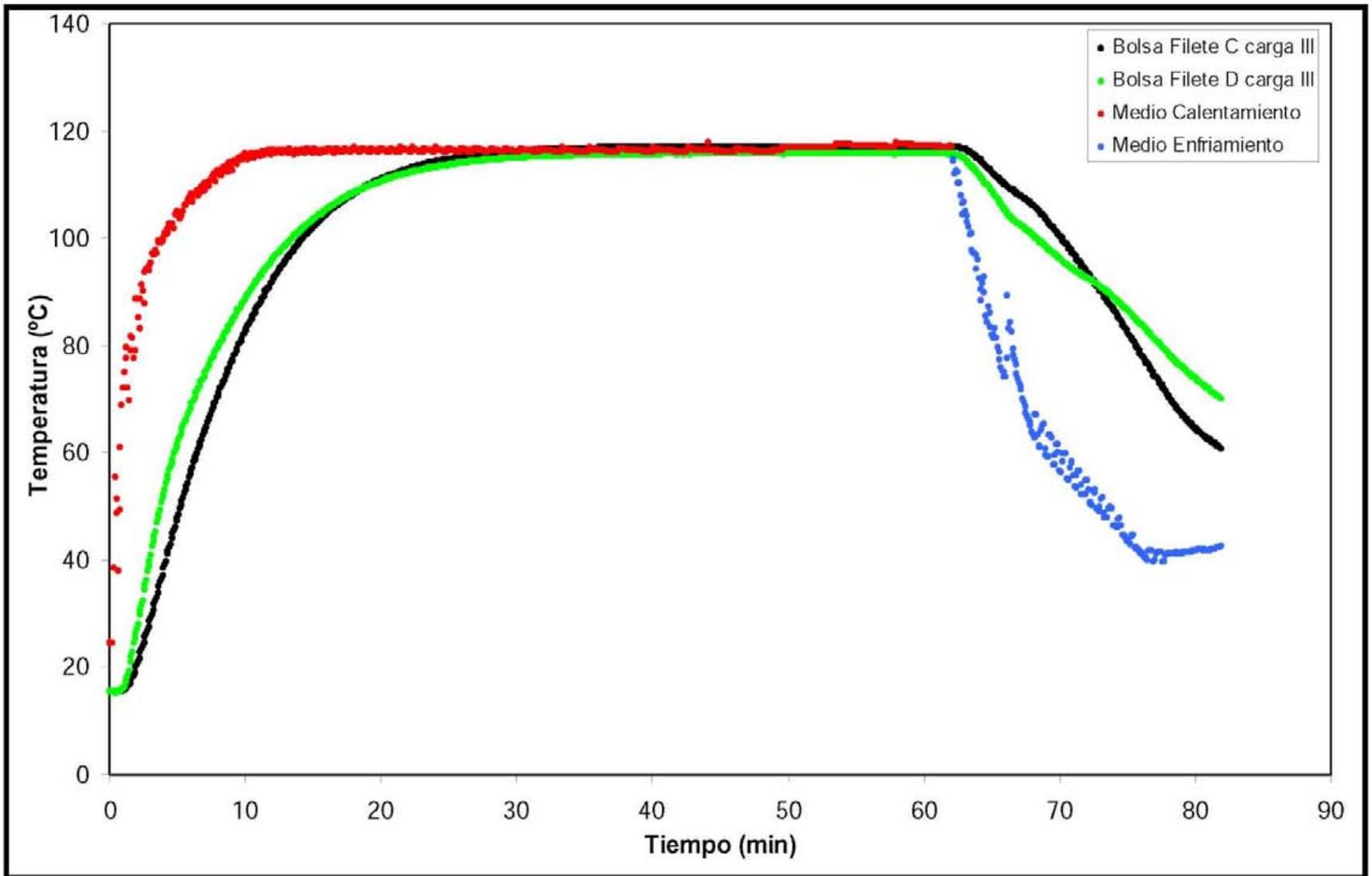


FIGURA 58. Curvas experimentales correspondientes a las bolsas filete C-III y D-III.

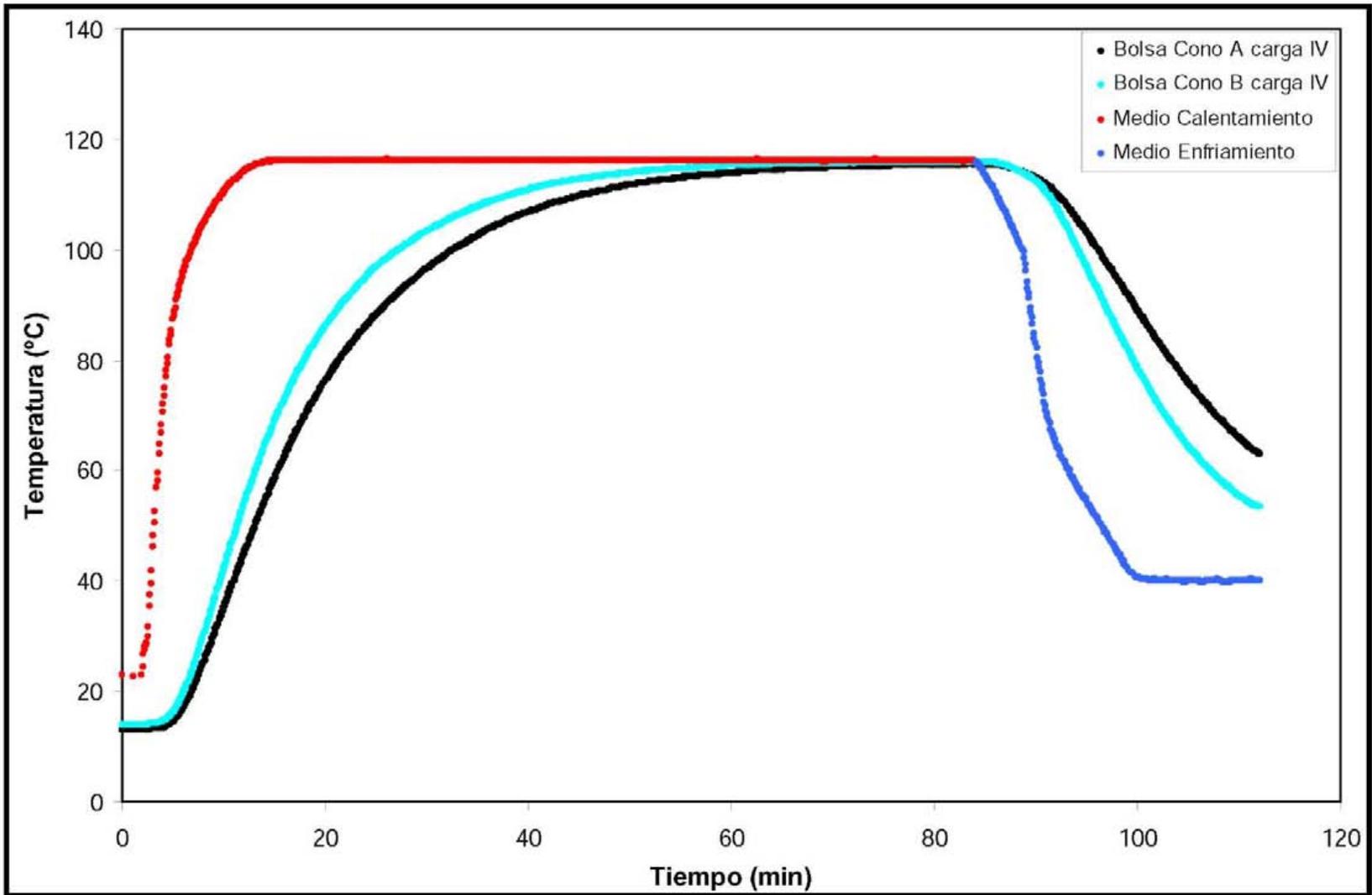


FIGURA 59. Curvas experimentales correspondientes a las bolsas cono A-IV y B-IV.

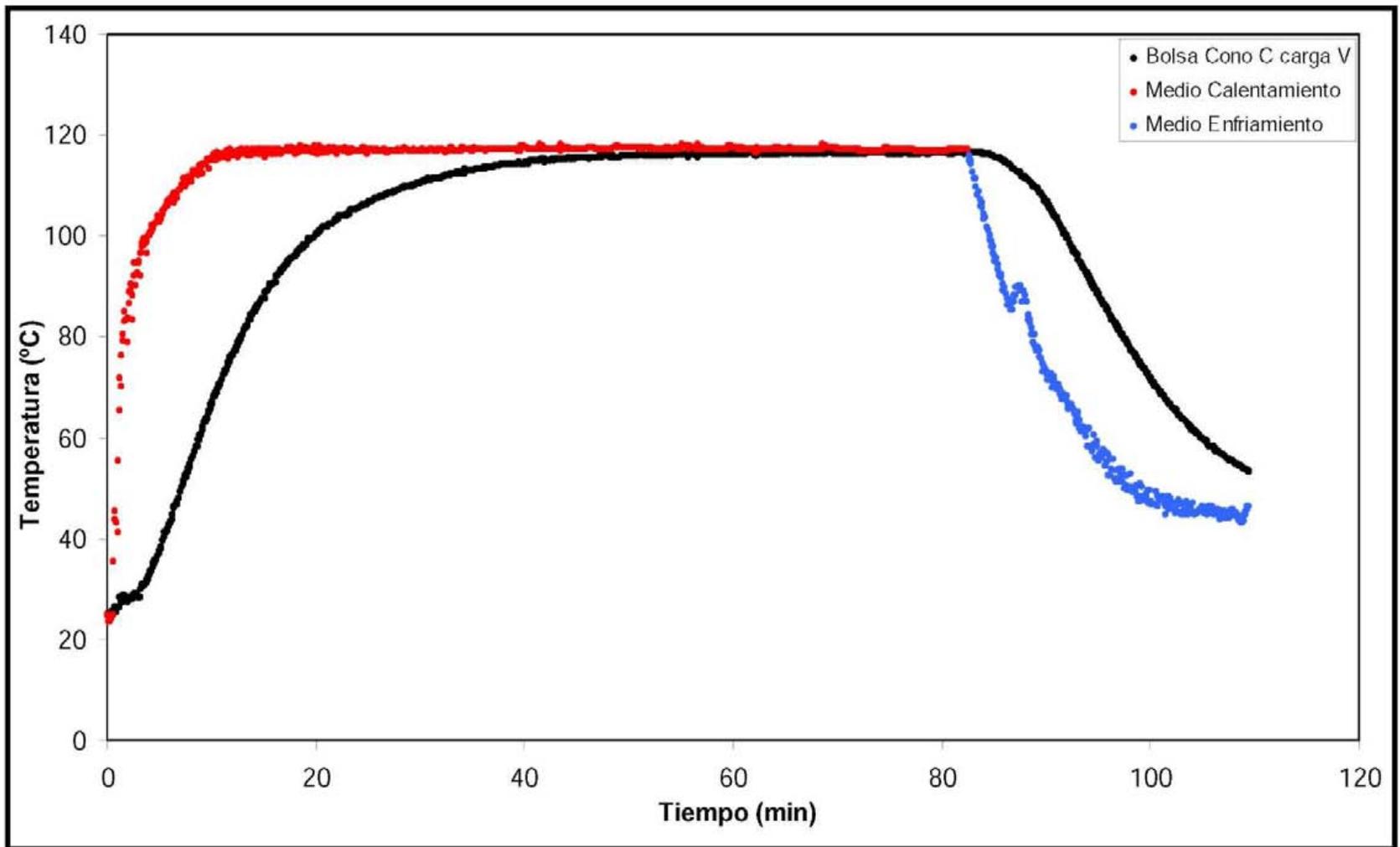


FIGURA 60. Curvas experimentales correspondientes a la bolsa cono C-V.

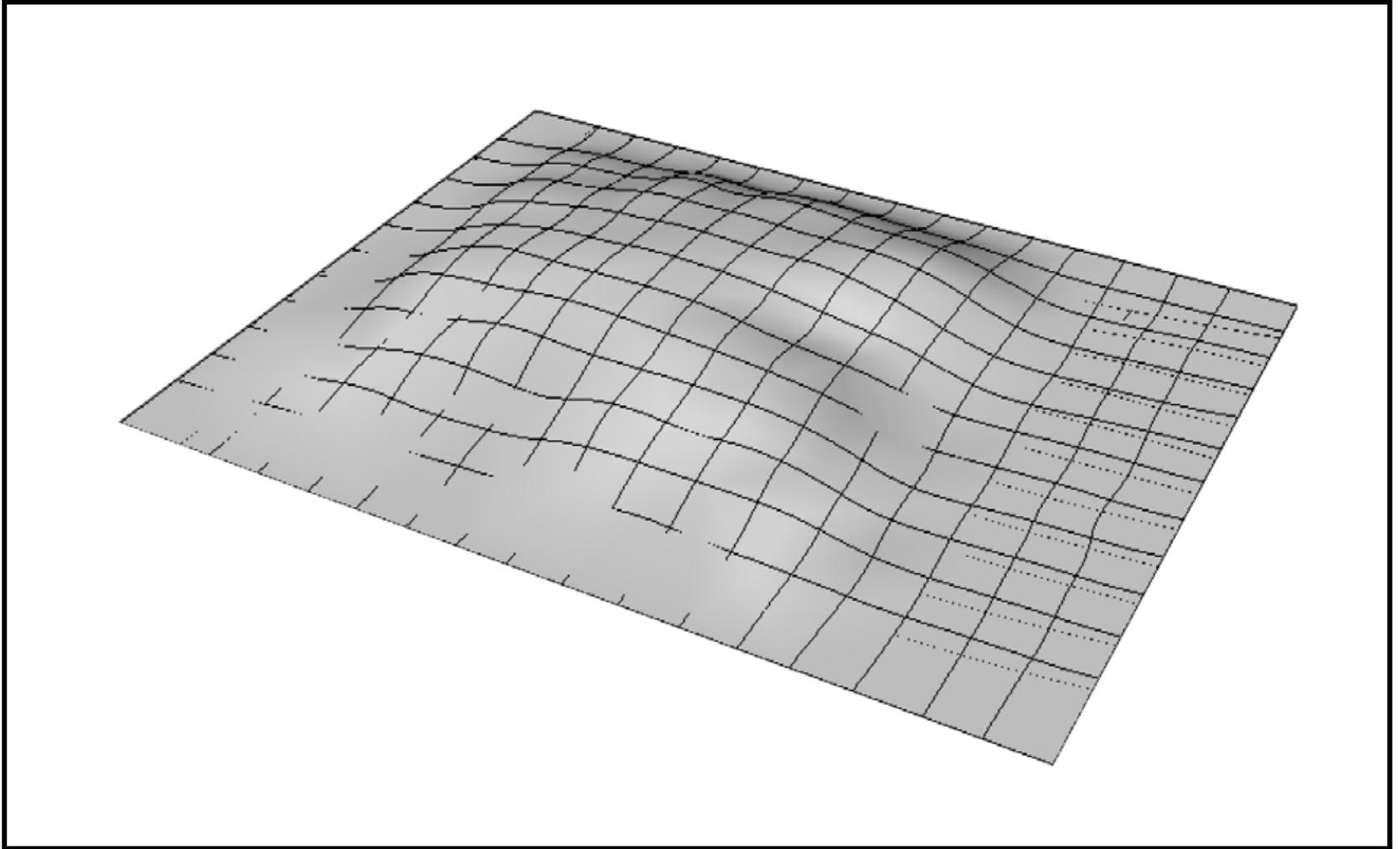


FIGURA 61. Modelo digital 3D de la bolsa filete A-I.

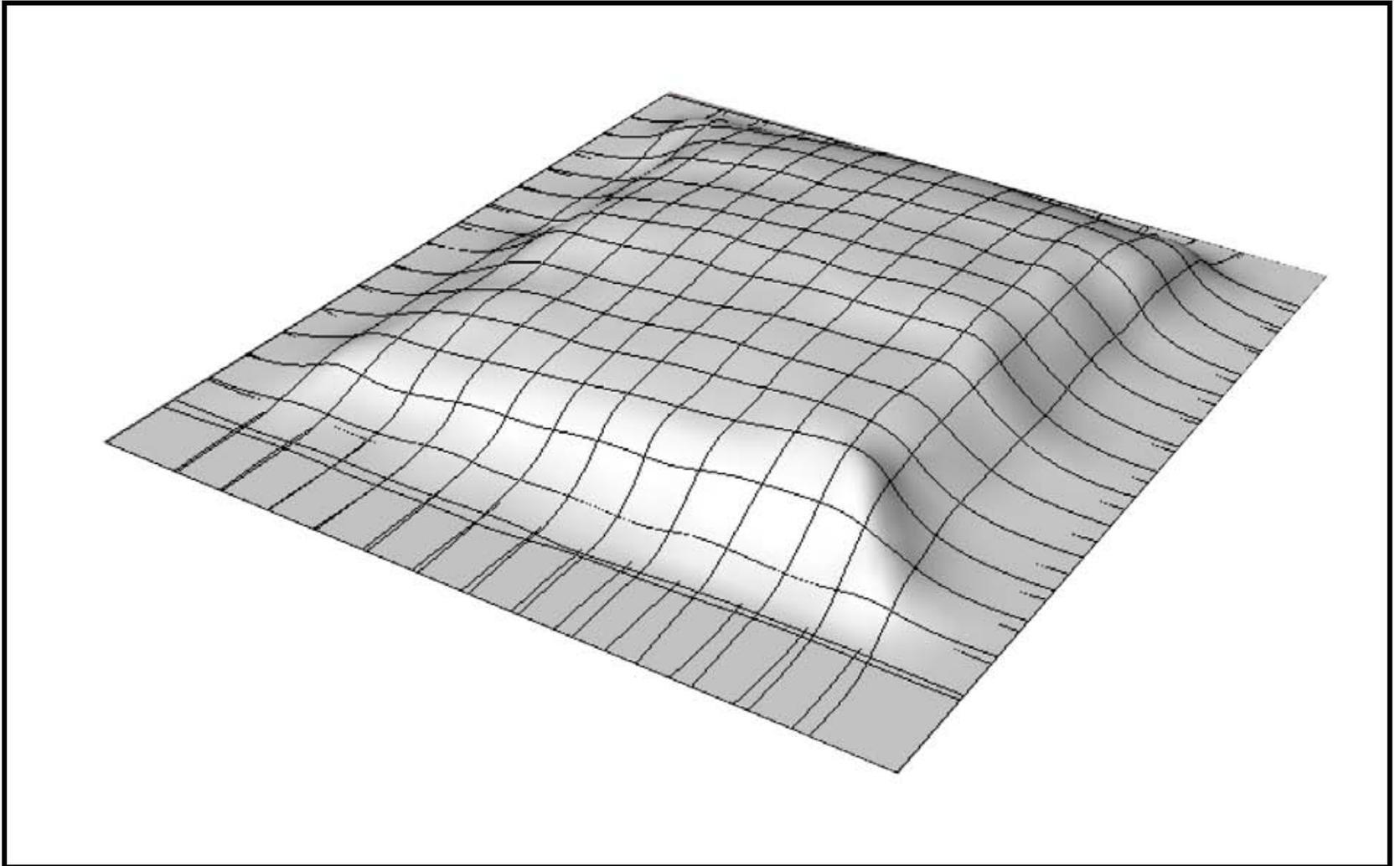


FIGURA 62. Modelo digital 3D de la bolsa cono B-IV.

Los modelos digitales 3D generados en Rhinoceros®, representan “exactamente” al modelo físico. La concepción final del modelo digital permite observar los relieves propios del modelo físico en todos sus ángulos, además de manipular sus contornos y espesores, así como también su ubicación espacial dentro del software, que permite determinar las coordenadas de algún punto del modelo digital con objetivos específicos, como la ubicación espacial de la termocupla durante los ensayos experimentales.

4.3.2 Modelos Mallados FEA. El modelo digital generado en Rhinoceros debe ser un dominio 3D válido para el análisis de elementos finitos con ALGOR®. Mayores detalles de este ítem puede encontrarse en NAVARRO (2007). Este software permite obtener una descripción del comportamiento de la transferencia de calor por conducción durante el tratamiento térmico de productos en bolsas esterilizables.

En las FIGURAS 63 y 64 se muestran los modelos mallados para conos y filetes desarrollados en ALGOR®, respectivamente. Los modelos mallados del resto de las muestras se pueden apreciar en el ANEXO 5.

En el CUADRO 8 y 9 se muestran las estadísticas computacionales para los modelos analizados en ALGOR®, respecto al número de elementos, el número de nodos, volumen, gasto computacional y tiempo de simulación para la ejecución del programa para cada uno de los modelos analizados. Las diferencias observadas se deben principalmente a la complejidad del modelo; cada una de las muestras es una entidad única e irrepetible en cuanto a su forma y volumen, por lo tanto, esto hace variar la cantidad y el tamaño de elementos generados. Esta variación finalmente se refleja en el número de nodos generados y en los tiempos de simulación. Al comparar los resultados entregados, se puede apreciar que en todos los casos los valores de cada ítem son más altos para el caso de conos respecto a los filetes, esto principalmente debido al mayor volumen del producto y a su forma más compleja.

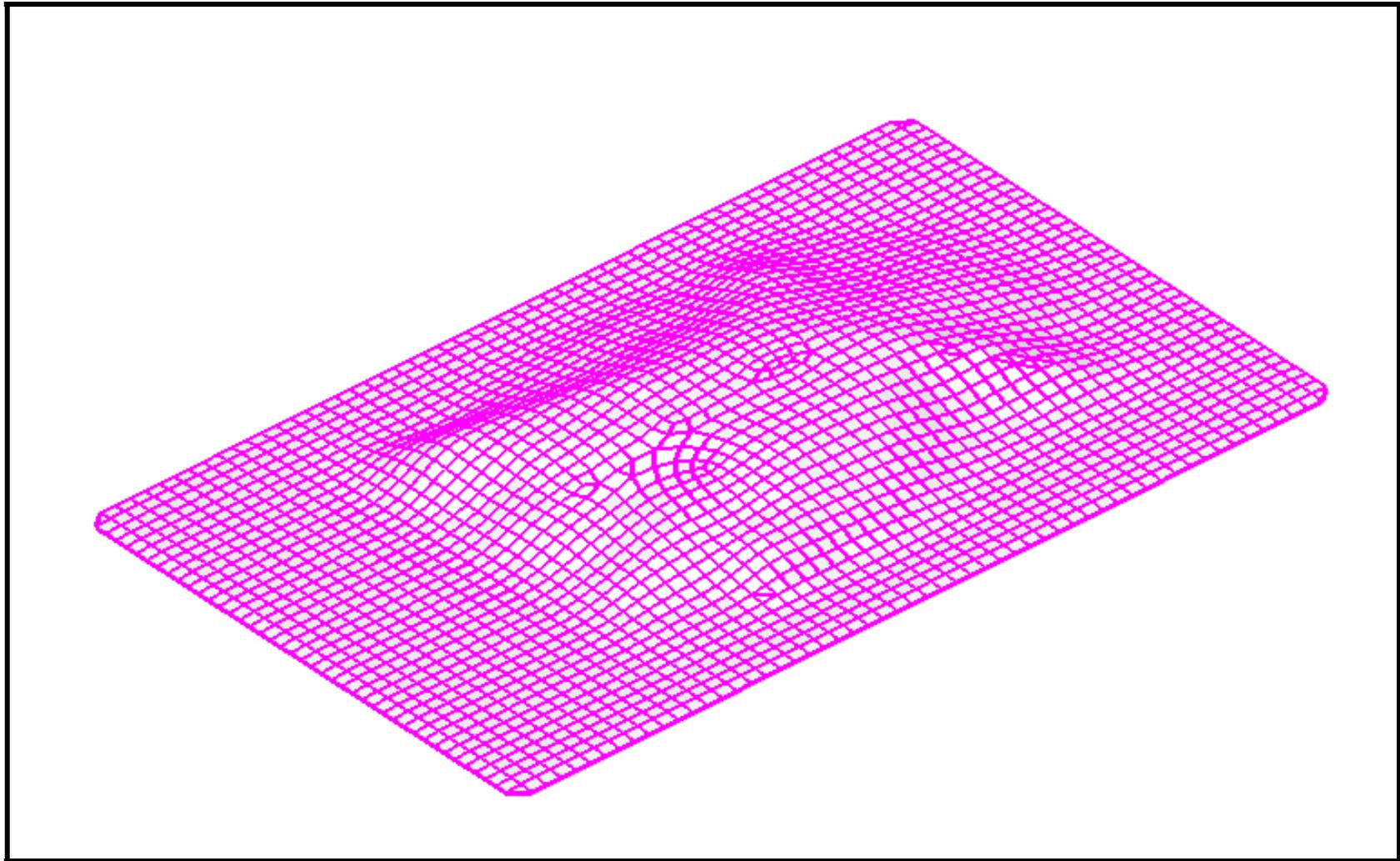


FIGURA 63. Modelo mallado (FEA) de la bolsa filete A-I.

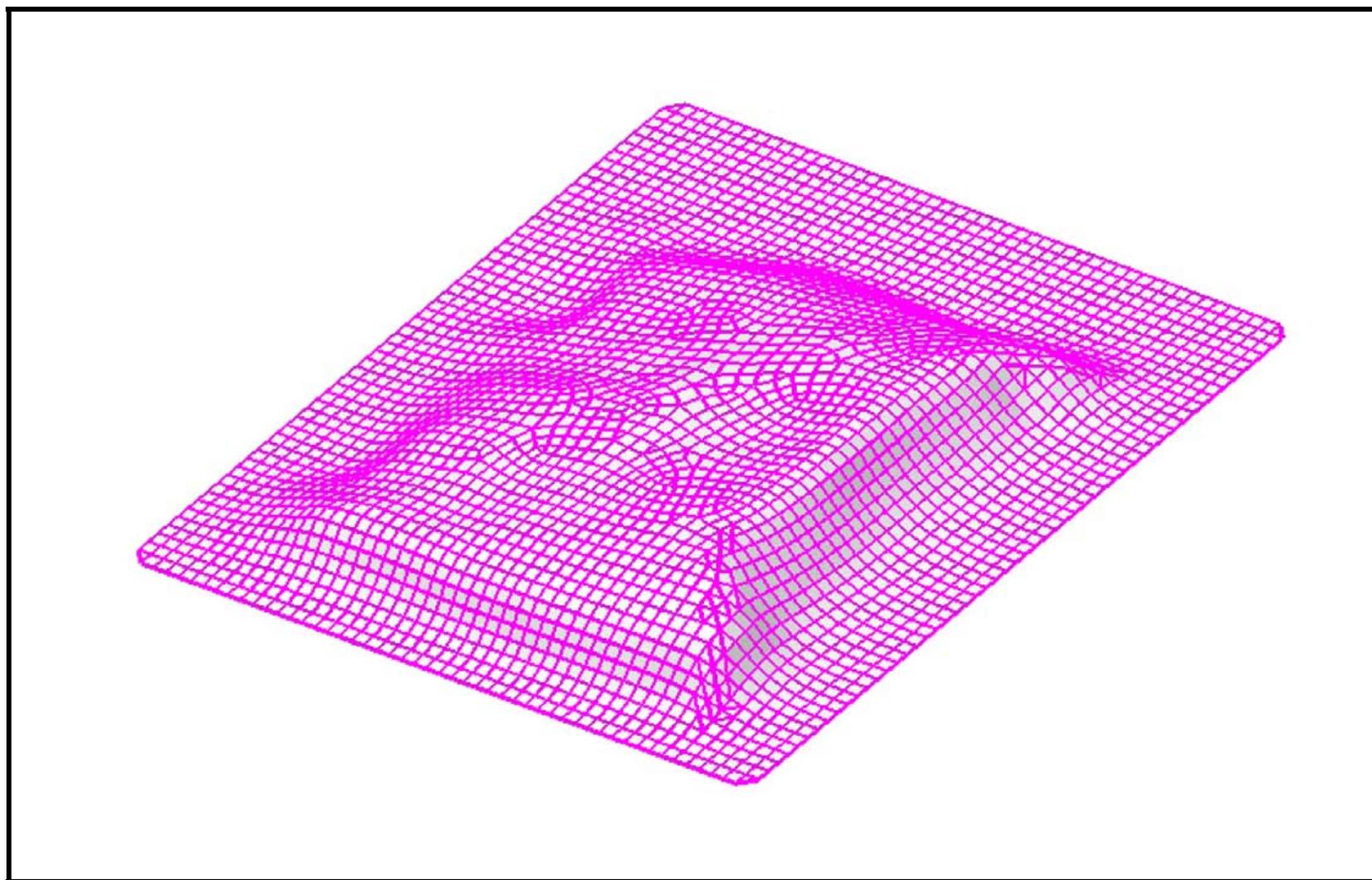


FIGURA 64. Modelo mallado (FEA) de la bolsa cono B-IV.

CUADRO 8. Estadísticas de los modelos digitales de filetes de jurel en bolsas esterilizables.

Item	Filetes de jurel			
	A-I	B-II	C-III	D-III
Número elementos	19.089	28.478	18.405	25.102
Número de nodos	13.099	14.588	14.343	14.935
Volumen (m ³)	0,000111	0,000111	0,000111	0,00013
HDD total (Gb)	2,73	3,63	2,73	3,42
Tiempo simulación (h)	19,98	29,56	17,93	24,09

CUADRO 9. Estadísticas de los modelos digitales de conos de jurel en bolsas esterilizables.

Item	Conos de jurel	
	A-IV	B-IV
Número elementos	23.277	38.283
Número de nodos	15.489	23.292
Volumen (m ³)	0,000338	0,000328
HDD total (Gb)	4,58	7,46
Tiempo simulación (h)	33,08	65,97

4.3.3 Diagramas de Contorno. Al finalizar la simulación del tratamiento térmico con ALGOR®, es posible obtener gran cantidad de información sobre el comportamiento térmico de los productos frente a los parámetros de proceso aplicados. Una manera de visualizar como ocurre la penetración de calor en el producto es mediante el diagrama de contorno en términos de tiempo y de temperatura. Los diagramas de contorno se generan al realizar cortes específicos en el modelo mallado en un determinado plano, como por ejemplo el plano XZ, donde se aprecia la distribución de temperaturas, mediante una escala de colores, para un determinado tiempo dentro del tratamiento térmico aplicado. Además, en el plano XZ puede identificarse la localización del punto de más lento calentamiento/enfriamiento del modelo (FIGURAS 65 y 66). El ANEXO 6 muestra los diagramas de contorno para los modelos restantes estudiados.

4.4 Comparación de perfiles de temperatura experimentales y simulados

La ubicación espacial (coordenadas) de las termocuplas en los productos fue determinada mediante radiografías en los planos bidimensionales XY y XZ, lo que se puede apreciar en las FIGURAS 67 y 70, pertenecientes a bolsas filete A-I y cono B-IV, respectivamente. Para una mejor visualización en 3D, estas coordenadas fueron localizadas en el modelo digital, utilizando el software RHINOCEROS®, lo que se aprecia en los CUADROS 10 y 11.

Posteriormente, las coordenadas encontradas (x , y , z) fueron ubicadas en las simulaciones obtenidas con ALGOR®. De esta forma se identificó el nodo correspondiente a la localización de las termocuplas durante las pruebas experimentales, lo que se observa en las FIGURAS 68 y 71 para las muestras bolsa filete A-I y bolsa cono B-IV.

En los Anexos 7 y 8 se pueden apreciar las radiografías y la ubicación de la termocupla para las bolsas restantes evaluadas.

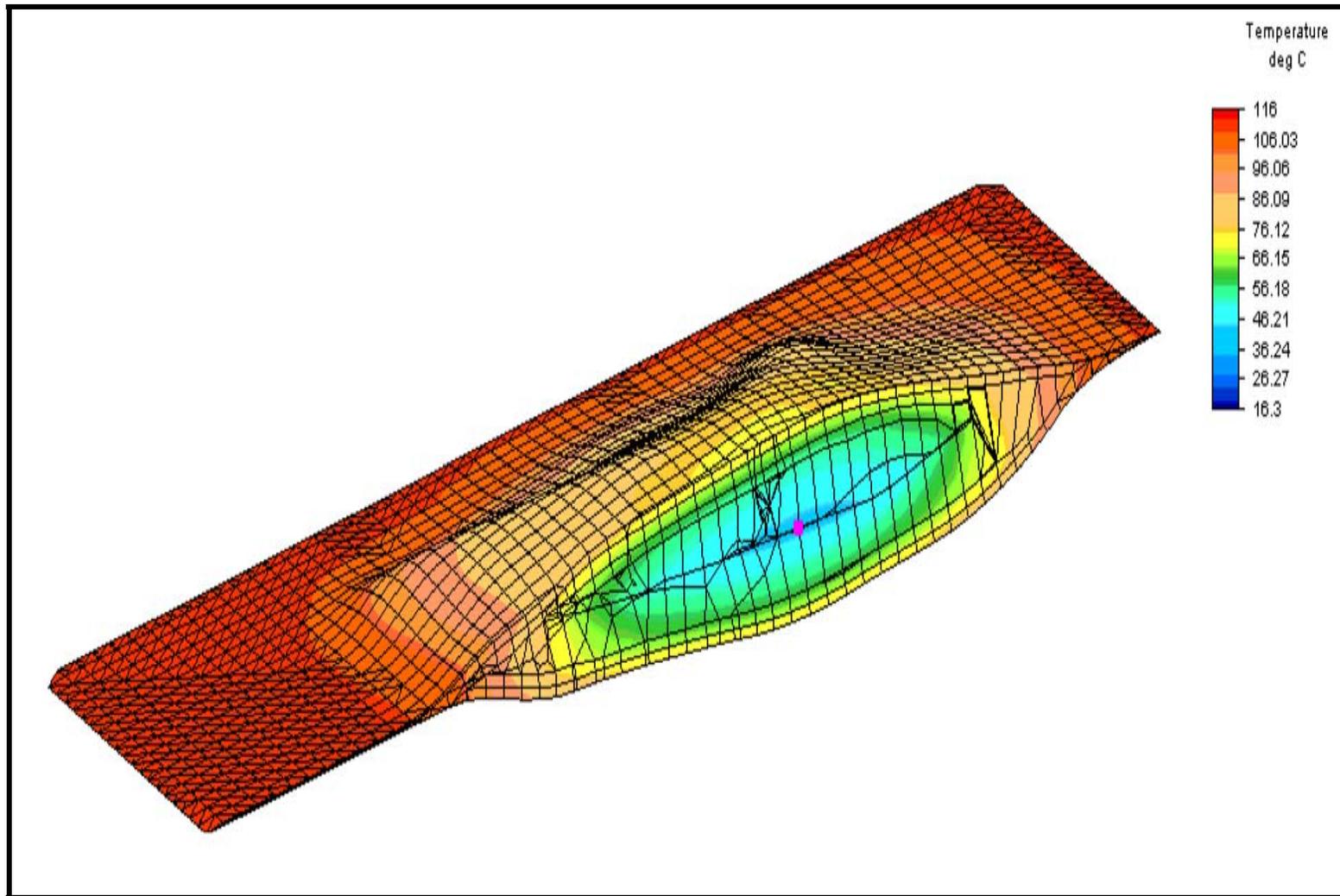


FIGURA 65. Corte longitudinal del diagrama de contorno de la bolsa filete A-I.

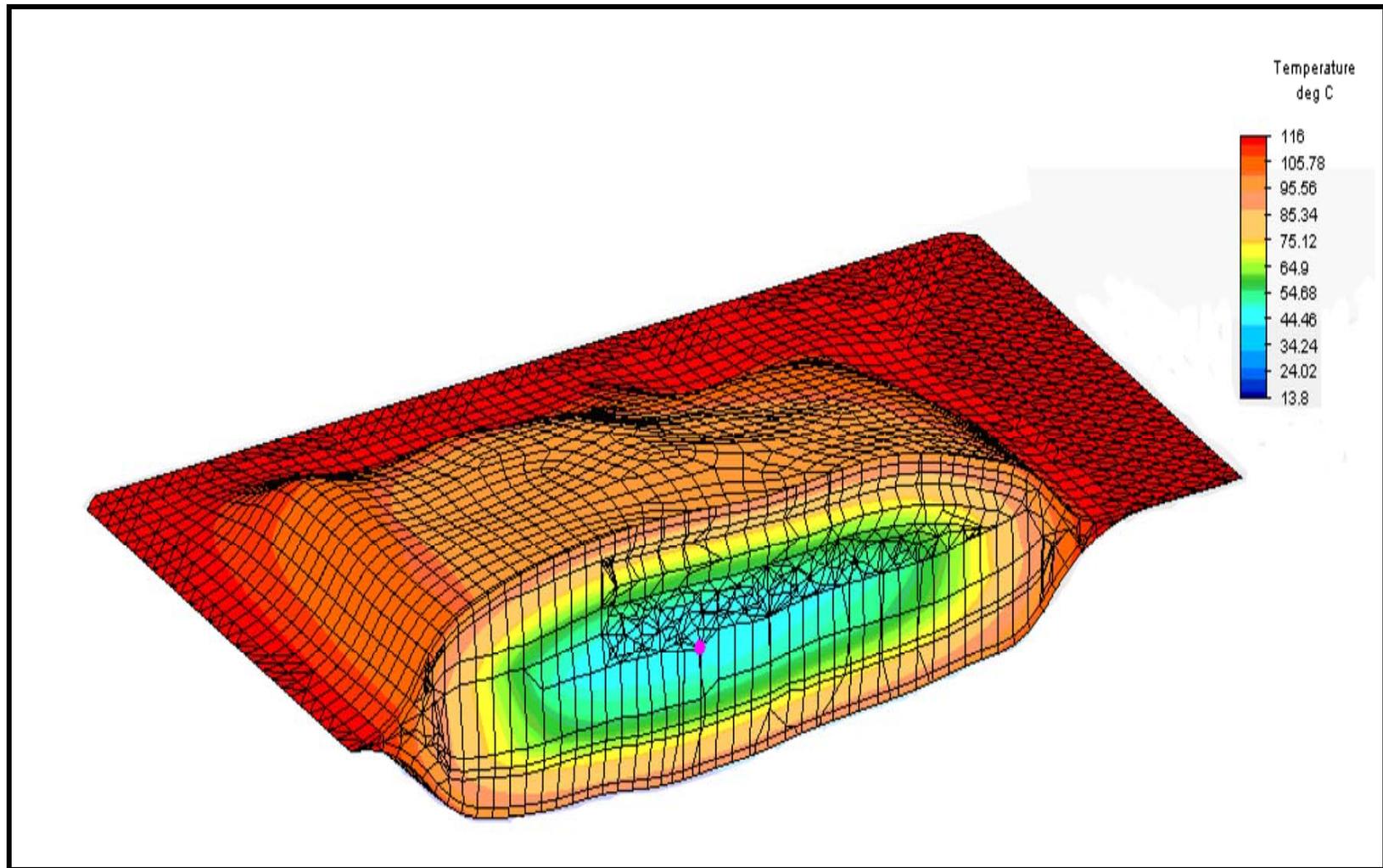


FIGURA 66. Corte longitudinal del diagrama de contorno de la bolsa cono B-IV.

Los perfiles de temperatura experimental y simulado para el nodo (coordenadas x , y , z) correspondiente a la ubicación de la termocupla se aprecian en las FIGURAS 69 y 72, para las muestras bolsa filete A-I y bolsa cono B-IV. En el ANEXO 9 se encuentran las gráficas de las muestras restantes.

CUADRO 10. Coordenadas para los nodos evaluados en las muestras bolsa-filetes de jurel.

Item		Muestra bolsa-filete			
		A-I	B-II	C-III	D-III
Numero de nodo		9.216	10.164	9.676	5.590
Coordenadas del nodo (m)	x	0,0648114	0,0580032	0,0716624	0,0814986
	y	0,0814122	0,0687018	0,0644924	0,0767315
	z	2.77E-03	-1,55E-03	-3,4426E-3	-8.14E-03

CUADRO 11. Coordenadas para los nodos evaluados en las muestras bolsa-conos de jurel.

Item		Muestra bolsa-conos	
		A-IV	B-IV
Numero de nodo		8.587	1.5619
Coordenadas del nodo (m)	x	0,0944899	0,086505
	y	0,0534267	0,0557077
	z	-2.56E-03	-3,56E-03

Para comparar la desviación existente entre curvas simuladas y experimentales para el nodo correspondiente a la localización de la termocupla, se utilizó el estadístico RMSE expresado en términos absolutos ($^{\circ}\text{C}$) y en términos relativos (%), para las etapas de calentamiento, enfriamiento y el proceso global (CUADRO 12 y 13).

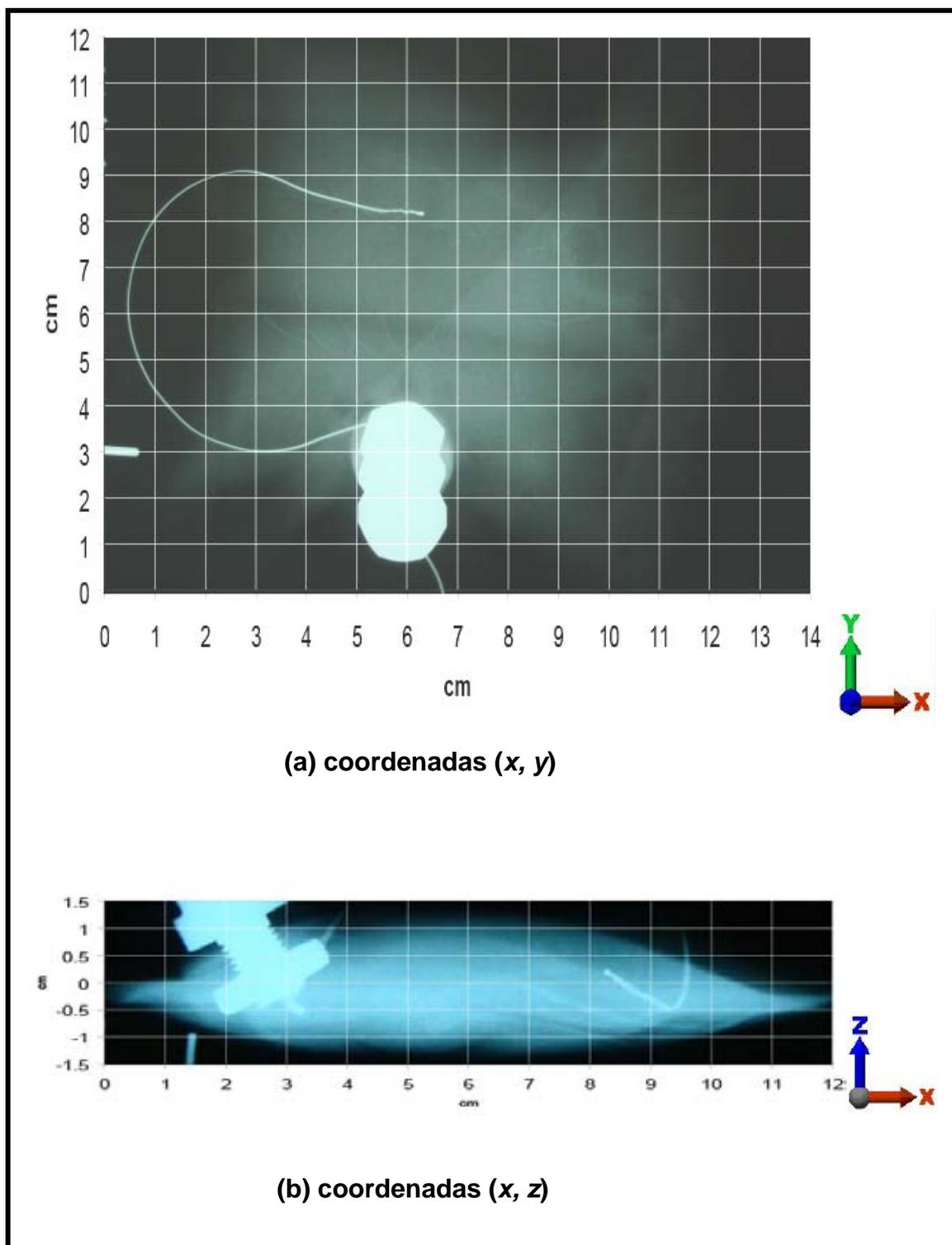


FIGURA 67. Radiografías mostrando la localización de la termocupla en la bolsa filete A-I.

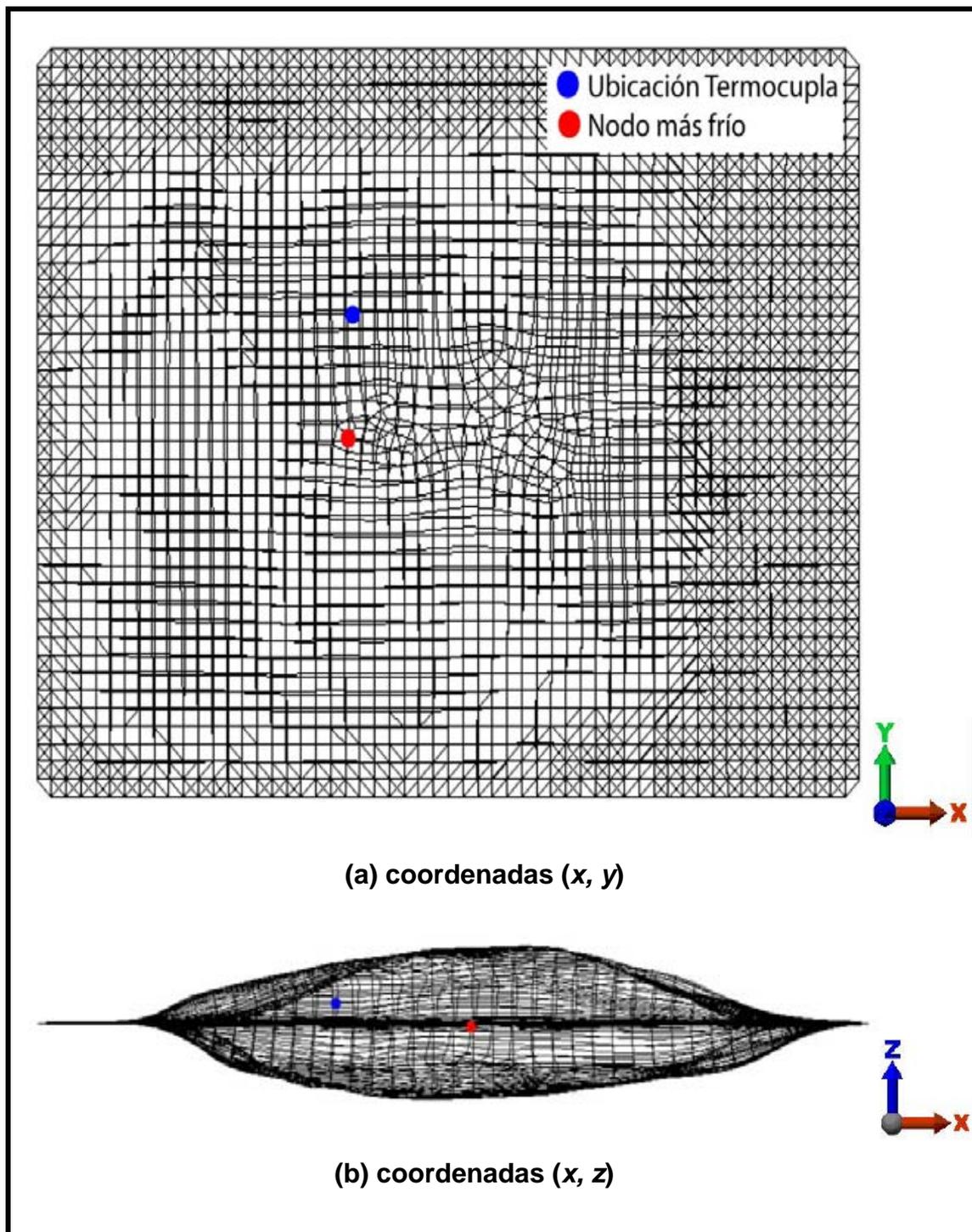


FIGURA 68. Localización de la termocupla y nodo más frío en el modelo digital correspondiente a la bolsa filete A-I.

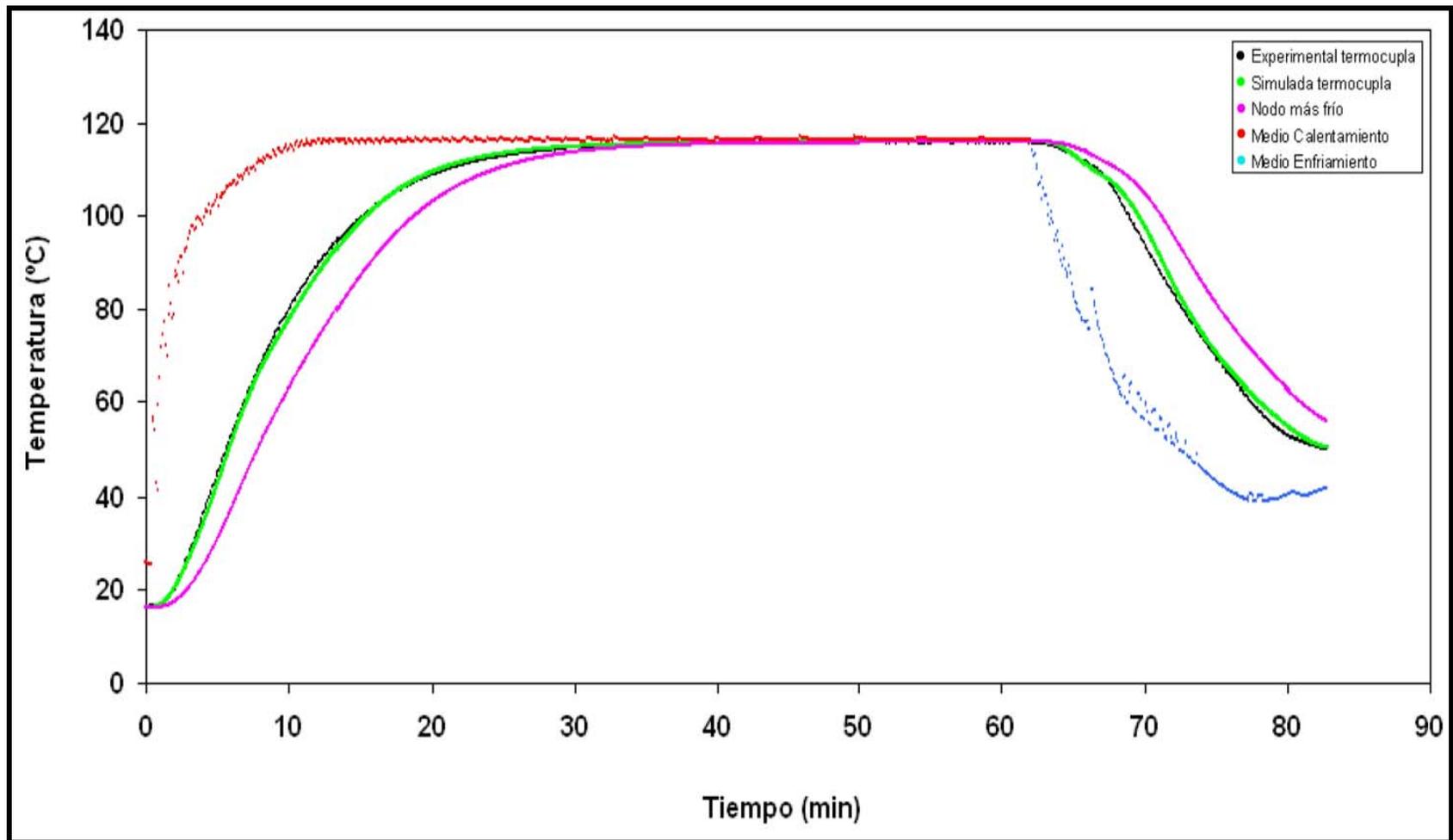


FIGURA 69. Perfiles de temperaturas para la ubicación de la termocupla y nodo más frío correspondiente al proceso térmico de la bolsa filete A-I.

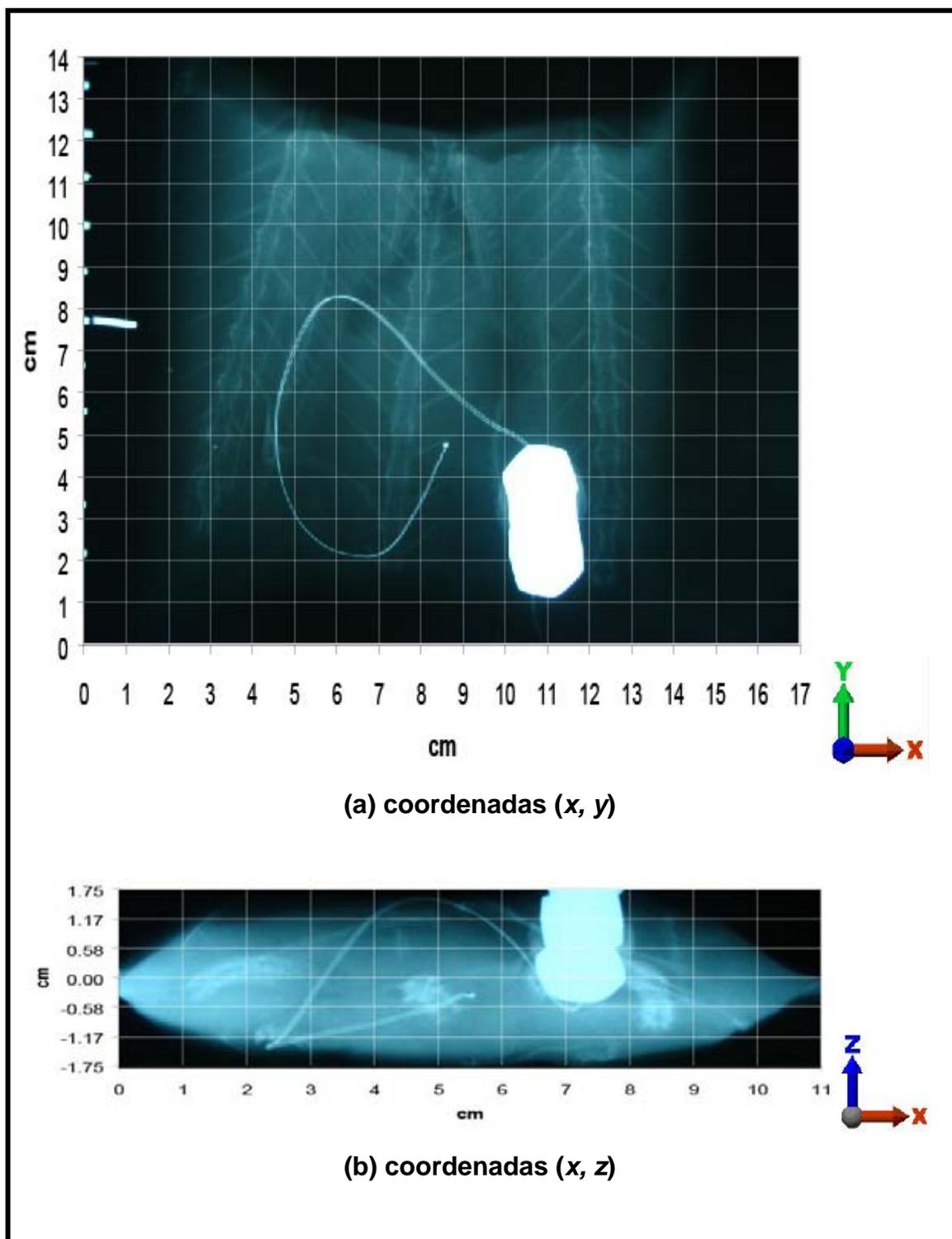


FIGURA 70. Radiografías mostrando la localización de la termocupla en la bolsa como B-IV.

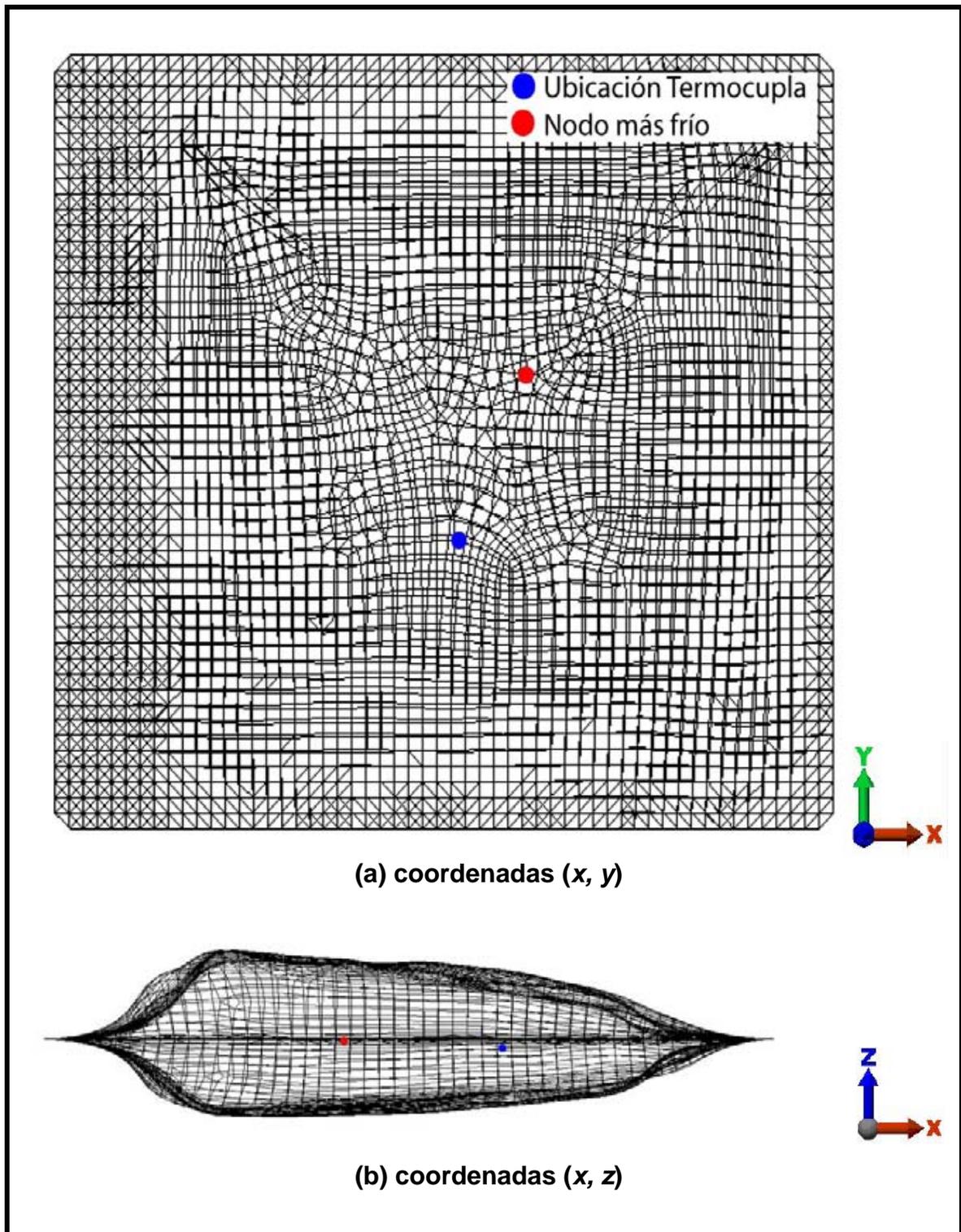


FIGURA 71. Localización de la termocupla y nodo más frío en el modelo digital correspondiente a la bolsa como B-IV.

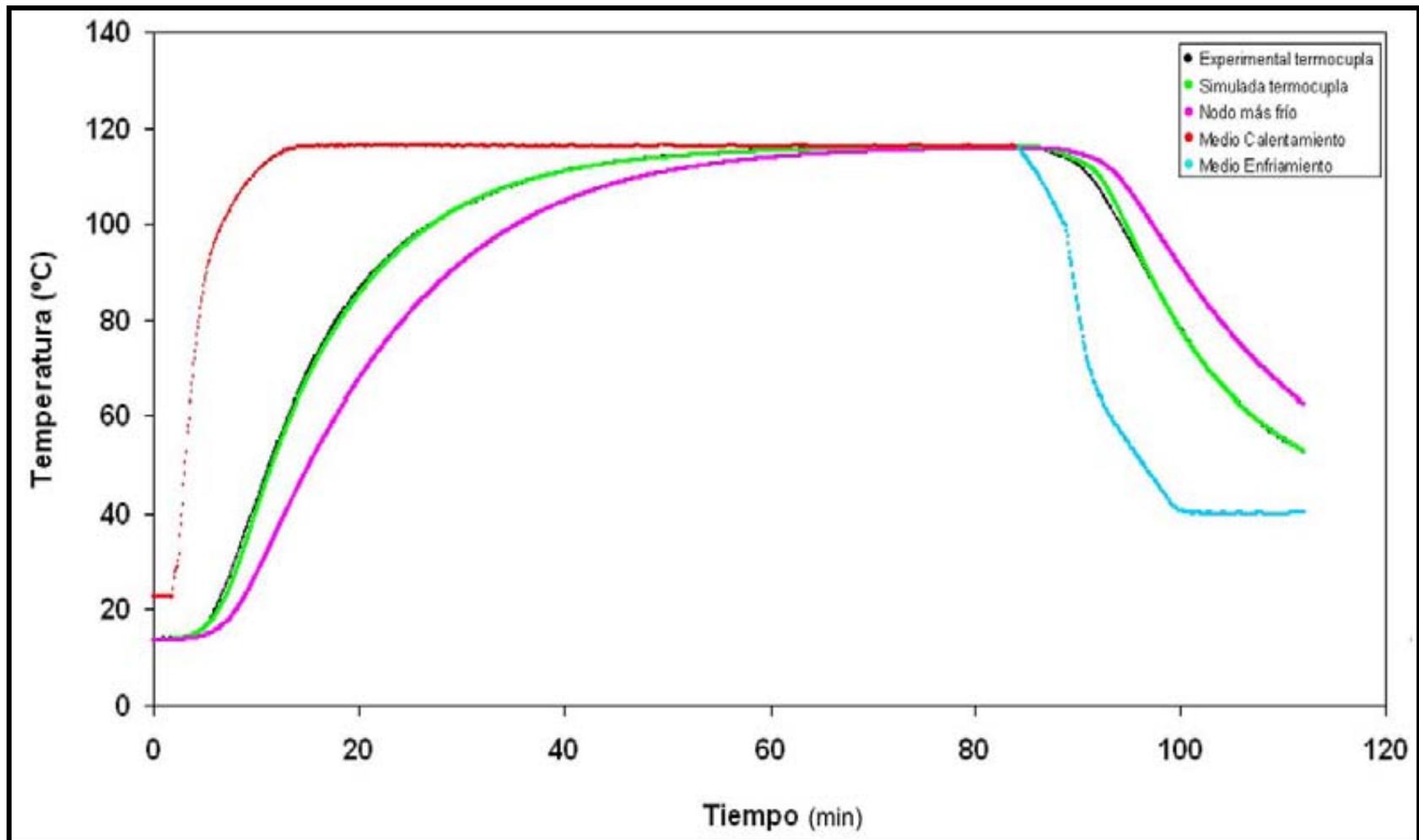


FIGURA 72. Perfiles de temperaturas para la ubicación de la termocupla y nodo más frío correspondiente al proceso térmico de la bolsa como B-IV.

Los valores de RMSE reportados están muy por debajo del criterio ingenieril establecido (<5%), propuesto en anteriores investigaciones desarrolladas en el área (NAVARRO, 2007; ALARCON, 2008), lo que muestra un buen ajuste entre los valores simulados y los experimentales de las pruebas de penetración de calor. El mayor error se obtuvo en la bolsa filete B-II, con un valor de RMSE global de 2,90% (1,29 °C); el menor error corresponde a la bolsa cono A-IV, con un RMSE global de 1,07% (0,58 °C).

CUADRO 12. Valores de RMSE para las etapas de calentamiento, enfriamiento y global de proceso en las muestras bolsa-filetes.

Filetes	Etapa de calentamiento		Etapa de enfriamiento		Global	
	RMSE (°C)	RMSE (%)	RMSE (°C)	RMSE (%)	RMSE (°C)	RMSE (%)
A-I	0,63	1,02	1,62	2,12	0,97	1,37
B-II	1,26	3,17	1,38	1,87	1,29	2,90
C-III	0,60	1,22	0,87	1,20	0,66	1,22
D-III	0,89	2,12	1,08	1,15	0,94	1,94

CUADRO 13. Valores de RMSE para las etapas de calentamiento, enfriamiento y global de proceso en las muestras bolsa-conos.

Conos	Etapa de calentamiento		Etapa de enfriamiento		Global	
	RMSE (°C)	RMSE (%)	RMSE (°C)	RMSE (%)	RMSE (°C)	RMSE (%)
A-IV	0,43	1,08	0,91	1,02	0,58	1,07
B-IV	0,60	1,60	1,00	1,00	0,71	1,48

4.5 Evaluación de los tratamientos térmicos

En esta sección se determinará la letalidad de los tratamientos térmicos evaluados, para tal efecto se requiere encontrar primeramente el punto de más lento calentamiento/enfriamiento.

4.5.1 Ubicación del punto de más lento calentamiento/enfriamiento. En las plantas conserveras, la evaluación de los procesos térmicos se realiza en forma netamente empírica, mediante el monitoreo de la cinética de penetración de calor en los productos. La ubicación del sensor de temperatura en el punto de más lento calentamiento/enfriamiento de un producto no es una tarea fácil, aunque se siguen las siguientes consideraciones prácticas:

- El sensor se ubica en la parte de mayor espesor.
- Posterior a la ubicación del sensor de temperatura, evitar la manipulación del producto en exceso durante el envasado al vacío y sellado correspondiente.

Además de las consideraciones prácticas citadas, en el caso de las bolsas esterilizables con alimentos de formas irregulares complejas y sometidos a condiciones de proceso variables, es extremadamente difícil conocer a priori la ubicación “exacta” del punto de más lento calentamiento/enfriamiento.

En base a lo mencionado sería imposible la inserción de la termocupla en el lugar que corresponda para realizar una medición experimental efectiva sobre la penetración de calor en el producto. Las implicaciones que tiene el no contar con el perfil de tiempo-temperatura del “centro térmico” del producto, resultarían en sobreestimar la letalidad alcanzada por el proceso térmico.

En trabajos reportados sobre tratamientos térmicos de alimentos en bolsas esterilizables se utilizó el centro geométrico para la ubicación de las termocuplas en filetes de atún (CRISTIANINI y RODRIGUES, 2002).

MITCHELL y SIMPSON (2002) ubicaron el sensor en el centro de masa de un cono de jurel. En el caso de empresas certificadoras de procesos térmicos (Q-TECH, 2004) estas declaran la ubicación de sensores de temperatura en el punto correspondiente al centro geométrico del producto.

Recientemente se han reportado trabajos que contemplan la geometría compleja y la existencia de asimetría térmica en el proceso. La metodología implementada por PEREZ (2007) y NAVARRO (2007), consiste en el uso de la ingeniería reversa (digitalización), la tecnología CAD/CAE y el método de Elementos Finitos para simular el proceso de conducción de calor en alimentos envasados al vacío en bolsas esterilizables. Con esta técnica se puede obtener la ubicación “exacta” del punto de más lento calentamiento/enfriamiento de alimentos envasados al vacío en bolsas esterilizables, y el perfil de temperatura correspondiente para la evaluación de los tratamientos térmicos, conforme a la posibilidad de reducir los tiempos de procesamiento para una letalidad preestablecida.

En el CUADRO 14 y 15, se muestran las coordenadas tridimensionales (x, y, z) del punto de más lento calentamiento/enfriamiento para los modelos digitales correspondientes a los filetes y conos analizados.

CUADRO 14. Coordenadas del nodo más frío en las muestras bolsa-filetes de jurel evaluados.

Item		Muestras bolsa Filetes			
		A-I	B-II	C-III	D-III
Numero de nodo		8.338	8.695	9.905	11.901
Coordenadas del nodo (m)	x	0,064	0,0758403	0,006	0,098
	y	0,061	0,0805803	0,068	0,062
	z	-4,85E-04	-6,07E-04	-2,15E-03	-9,85E-04

CUADRO 15. Coordenadas correspondientes al nodo más frío en las muestras bolsa conos de jurel evaluados.

Item		Muestras bolsa conos	
		A-IV	B-IV
Numero de nodo		8.853	17.127
Coordenadas del nodo (m)	x	0,105	0,101
	y	0,079	0,088
	z	3,86E-04	-2,01E-03

Como se puede observar en las FIGURAS 68 y 71, y en ANEXO 8, la ubicación de la termocupla no coincide con el punto de más lento calentamiento/enfriamiento en los productos. Esto se confirma al observar los perfiles de temperatura correspondientes al nodo más frío (NMF) para las bolsas cono B-IV y filete A-I (FIGURAS 69 y 72). Los perfiles de las bolsas restantes, se pueden encontrar en el ANEXO 9.

4.5.2 Determinación de los valores de F_0 . Como fue señalado en la sección 2.5.6, la FDA requiere que los tratamientos térmicos aplicados en conservas de pescado deben tener valor F_0 de proceso superior a 4,0 minutos, como valor declarado y verificado por una autoridad acreditada en tratamientos térmicos. La Planta San José S.A. ha establecido acreditar sus procesos térmicos ante la FDA con valores F_0 de 4,5 minutos, en sus productos y formatos de exportación.

4.5.2.1 Comparación de valores de F_0 experimentales y simulados. Los valores de F_0 obtenidos a partir de los perfiles de temperatura experimental (ubicación termocupla) y simulado (ubicación nodo más frío) se aprecian en el CUADRO 16. En el caso de los filetes no existen mayores diferencias en los valores de F_0 para el nodo termocupla y nodo mas frío, esto se debe principalmente a forma del producto, mayor área superficial de transferencia de

calor y a su menor espesor. En el caso de los conos esta diferencia aumenta, pudiendo explicarse por el mayor espesor y volumen del producto.

Como se puede observar en el CUADRO 16 los valores obtenidos de F_0 en la etapa experimental son ampliamente superiores al valor mínimo establecido por la FDA ($F_0 > 4,0$ min) y por la empresa ($F_0 = 4,5$ min). Sin embargo, como se mencionó en la sección 4.5.1, hay que tener en cuenta que durante las pruebas experimentales el sensor de temperatura no se localizó en el punto más frío del producto, por lo que la evaluación del tratamiento térmico utilizando únicamente estos resultados traería como consecuencia una sobre estimación de los alcances que tiene la aplicación del tratamiento térmico en el producto.

CUADRO 16. Valores de F_0 (min) para el punto de la termocupla y punto más frío de las muestras.

Producto	(F_0) nodo termocupla	(F_0) nodo más frío
Bolsa filete A-I	11,700	11,124
Bolsa filete B-II	15,176	14,373
Bolsa filete C-III	15,871	15,504
Bolsa filete D-III	11,695	10,403
Bolsa cono A-IV	10,069	9,667
Bolsa cono B-IV	13,039	10,642

Por lo tanto, la evaluación de la letalidad de los programas de tratamiento térmico y la posibilidad de reducir tiempos de proceso, en la búsqueda de

mejorar los procesos de producción y calidad del producto, podrían realizarse a partir de la información obtenida del punto de más lento calentamiento/enfriamiento en los productos, datos que son posibles de obtener utilizando la metodología aplicada en la presente investigación.

Los resultados obtenidos concuerdan por los valores de F_0 encontrados en el desarrollo de pruebas preliminares de penetración de calor en los productos de formato conos y filetes, los cuales oscilaron entre 12,8 y 13,7 min.

Los valores F_0 calculados, por medio del Método General Mejorado, a partir de los datos de penetración de calor reportados por QTECH (2007), para cortes de jurel del mismo formato a los evaluados en la presente investigación, oscilaron entre 9,0 y 10 minutos.

4.5.2.2 Valores de F_0 por etapas. En los CUADROS 17 y 18 se reportan los valores F_0 para las distintas etapas del proceso (tiempo de elevación, tiempo de mantenimiento, etapa de enfriamiento. En ellos se puede observar que para la etapa de elevación de temperatura (CUT) los valores de F_0 son cercanos a cero, por lo tanto, su influencia en el tratamiento térmico no es importante. Para toda la etapa del tiempo del operador la letalidad representa un 88% para el caso de filetes y un 79% para conos aproximadamente. Finalmente, el enfriamiento aporta aproximadamente un 12% en la letalidad total para filetes y un 21% en conos. Esto último se podría explicar, por el mayor volumen de los conos, lo que genera mayor lentitud al enfriarse, permaneciendo por más tiempo en el rango de las temperaturas letales ($T > 100$ °C).

Por otro lado, en el CUADRO 19 se reportan los valores de F_0 con importancia letal, esto se verifica cuando las temperaturas en el producto alcanzan valores superiores a los 100 °C (CUADRO 19).

CUADRO 17. Valores de F_0 (min) por etapas del proceso de esterilización y para los filetes de jurel evaluados.

Etapa	Filetes			
	A-I	B-II	C-III	D-III
CUT	1,43E-05	9,77E-05	2,50E-04	9,28E-06
Tiempo del operador	9,77	12,56	14,08	8,97
Tiempo de enfriamiento	1,38	1,81	1,42	1,43
Tiempo total	11,15	14,37	15,50	10,40

CUADRO 18. Valores de F_0 (min) por etapas del proceso de esterilización y para los conos de jurel evaluados.

Etapa	Conos	
	A-IV	B-IV
CUT	8,92E-08	3,23E-08
Tiempo del operador	7,77	8,22
Tiempo de enfriamiento	1,89	2,39
Tiempo total	9,68	10,66

CUADRO 19. Valores de F_0 (min) para temperaturas con ($T > 100$ °C) y sin ($T < 100$ °C) importancia letal en filetes y conos de jurel.

Producto	Calentamiento		Enfriamiento	
	T < 100 °C	T > 100 °C	T > 100 °C	T < 100 °C
A-I	0,0108	9,761	1,371	0,007
B-II	2,05E-10	12,564	0,559	0,011
C-III	0,010	14,188	1,297	0,009
D-III	0,012	9,255	1,119	0,0161
A-IV	0,023	7,955	1,678	0,0109
B-IV	0,022	8,715	1,867	0,0107

Los valores F_0 muestran que a partir de los 100 °C en la etapa de calentamiento, el efecto letal de las temperaturas comienza a tomar importancia, contribuyendo sobre un 80% en la letalidad total alcanzada para el caso de ambos formatos (filete y jurel). Durante el enfriamiento la letalidad alcanzada para temperaturas superiores a 100 °C es de un 10% para filetes y un 14% en conos. Los conos al ser de mayor tamaño se mantendrían por más tiempo a temperaturas letales ($T > 100$ °C). Finalmente, se observa que temperaturas inferiores a 100 °C tiene una importancia inferior al 1% en la letalidad del proceso por lo que se puede considerar sin relevancia para el cálculo del valor F_0 total.

Es indudable señalar que los valores obtenidos tanto de las pruebas experimentales como por simulación, son mayores a lo requerido por la FDA ($F_0 = 4,0$ min). Por tanto, ambos productos actualmente están siendo sobreprocesados, y sería posible reducir los tiempos de tratamiento térmico aumentando la productividad, mejorando la calidad del producto y reduciendo los costos energéticos.

Finalmente, la utilización de esta metodología de simulación como complemento a las evaluaciones experimentales, permitiría evaluar el valor F_0 del proceso, de tal forma que evitaría una sobreestimación de la letalidad del tratamiento térmico aplicado.

4.5.2.3 Evaluación del error en la determinación de la letalidad del proceso. El error asociado a la evaluación de la Letalidad del proceso térmico, calculado mediante la Ecuación (2.3), se muestra en el CUADRO 20. El valor de $(F_0)_{\text{proceso}}$ correspondiente a la ubicación de la termocupla se determinó mediante el perfil de temperaturas experimental, mientras que el $(F_0)_{\text{proceso}}$ del punto más frío se determinó con el perfil de temperaturas simulado. El $(F_0)_{\text{requerido}}$ utilizado fue de 3.0 min (ver sección 3.7).

Como se puede observar el error en la determinación de la Letalidad es relativo y depende de los factores señalados en la sección 4.5.1. El máximo error obtenido fue de un 18.3% en la muestra Cono B-IV. Para reducir el error debe tenerse especial consideración, en la inserción de las termocupas en el producto, que está influenciada por las destrezas propias del especialista al momento de la colocación de los dispositivos en la bolsa vacía, la ubicación de la termocupla en el producto y finalmente la ubicación de las muestras en la bolsa. También debe considerarse el posible desplazamiento de la termocupla en la etapa de sellado, específicamente durante la generación del vacío mecánico.

CUADRO 20. Valores de letalidad calculadas para los perfiles de temperatura de la termocupla y del punto de más lento calentamiento/enfriamiento.

Producto	Letalidad ubicación termocupla	Letalidad Punto más frío	Error determinación letalidad del proceso (%)
Filete A-I	3,90	3,71	4,92
Filete B-II	5,06	4,79	5,29
Filete C-III	5,29	5,17	2,31
Filete D-III	3,90	3,47	11,05
Cono A-IV	3,36	3,22	3,99
Cono B-IV	4,35	3,55	18,38

4.6 Determinación del valor F_0 mediante el método fórmula de Ball

El método de Ball, a pesar de las limitaciones mencionadas en la sección 2.6, es ampliamente utilizado por los profesionales relacionados al área de procesos térmicos de EE.UU y latinoamérica como herramienta para predecir y

evaluar procesos térmicos alternativos a los aplicados por las Plantas Procesadoras de conservas de baja acidez.

En el CUADRO 21 se muestra una comparación entre los valores de F_0 calculado mediante el método de Ball y el Método General Mejorado para las pruebas de penetración de calor experimentales de la presente investigación. Como se puede observar en todos los casos el método de Ball subcalcula la letalidad (F_0) del tratamiento térmico en aproximadamente 25%, respecto al Método General Mejorado. Por lo tanto, en el caso de utilizarlo como herramienta para evaluar procesos térmicos alternativos, para una planta procesadora de productos en bolsas esterilizables, la aplicación de este método sobreestimaría los tiempos de proceso necesarios para alcanzar una letalidad preestablecida.

CUADRO 21. Valores de F_0 determinados por el método de Ball y el Método General para los tratamientos térmicos realizados.

Parámetro	Filete				Cono	
	A-I	B-II	C-III	D-III	A-IV	B-IV
T_{ih} (°F)	61.34	52.34	55.40	55.40	55.76	56.84
T_{ic} (°F)	240.26	240.80	240.26	240.80	239.72	240.80
f_h (min)	19.08	12.92	14.08	14.68	31.35	33.78
j_h	0.60	0.58	0.59	0.43	0.91	0.77
f_c (min)	16.61	23.20	16.18	26.39	42.19	27.70
j_c	1.96	1.40	2.11	1.26	1.44	1.78
F_0 M. Ball	9.14	11.22	11.25	11.64	8.99	8.73
F_0 M. General	11.70	15.18	15,87	11,70	10.07	13.04

Por otro lado, en el ANEXO 10 se muestra en forma gráfica los datos de penetración de calor, recolectados experimentalmente por QTECH (2007), para filetes de jurel en bolsas esterilizables en la Planta San José – Coronel, siendo éstos productos del mismo formato evaluado en la presente investigación. En el Anexo 11 se muestra una comparación de los valores de

F_0 calculados con el Método de Ball y el Método General Mejorado para las pruebas de penetración de calor realizados por QTECH (2007). Los resultados confirman las conclusiones alcanzadas en base a los resultados de la presente investigación, es decir, el Método de Ball subcalcula el valor de F_0 de un proceso térmico y en consecuencia sobreestimaría los tiempos de proceso.

4.7 Aplicación de la simulación en procesos productivos

4.7.1 Evaluación de la reducción de los tiempos de proceso térmico.

Como se puede observar en el CUADRO 16 los valores de F_0 del punto de más lento calentamiento/enfriamiento son muy superiores a lo acreditado por la Planta ante la FDA (F_0 de 4,5 min). Por lo tanto es posible reducir los tiempos de proceso aplicados actualmente.

Las magnitud que podrían reducirse los tiempos de proceso aplicados actualmente, cumpliendo los requerimientos actuales de la planta y de la FDA (Normativa 21 CFR parte 113), se realizó mediante simulaciones, reduciendo el tiempo de operador en 10, 15 y 20 minutos. Los valores de F_0 calculados a partir de la historia tiempo-temperatura para el punto de más lento calentamiento/enfriamiento se presentan en el CUADRO 22.

Como se puede observar al reducir el tiempo del operador en 10, 15 y 20 minutos, los valores de F_0 son mayores a 4,5 minutos, por lo tanto, se cumpliría el criterio de aplicar al tratamiento térmico un factor de seguridad de al menos 50% (Letalidad $\geq 1,5$). Sin embargo, para el caso de una reducción de 20 minutos en el tiempo del operador, los valores de F_0 de las muestras filete D-III y el cono B-IV se encuentran muy cercanos al límite. Es así que, que se recomienda reducir los tiempos de procesos aplicados en 15 minutos para los productos procesados en la Planta de San José sin poner en riesgo el cumplimiento de alcanzar el valor de la Letalidad acreditada ante la FDA para asegurar la esterilidad comercial requerida para su exportación.

CUADRO 22. Valores F_0 obtenidos al reducir el tiempo de operador para las bolsas de filetes y conos.

Producto	Reducción 10 min tiempo del operador	Reducción 15 min tiempo del operador	Reducción 20 min tiempo del operador
Filete A-I	8,15	6,70	5,27
Filete B-II	10,63	8,82	7,03
Filete C-III	11,79	9,87	7,96
Filete D-III	7,46	6,01	4,65
Cono A-IV	6,96	5,69	5,18
Cono B-IV	7,59	6,18	4,85

Nota: Proceso actual Filetes = CUT (12 min) + Tiempo Operador (50 min)
 Proceso actual Conos = CUT (12 min) + Tiempo Operador (70 min)

Por lo tanto, reducir los tiempos de proceso permitiría aumentar la productividad de la planta, es decir, se podría procesar un mayor número de bolsas elaboradas en cada turno. Asimismo, permitiría también utilizar la energía en forma más eficiente y generar así mayores beneficios económicos para la empresa e indirectamente obtener un producto de mejor calidad, más firme que soporte de mejor forma el transporte del producto.

4.7.2 Evaluación del aumento de la productividad. En los CUADROS 23 y 24 presentan una estimación de la producción de bolsas esterilizables en un turno de 8 horas, al reducir el tiempo de proceso en 15 minutos. Los cálculos están basados en los siguientes supuestos:

- Durante el turno se realiza exclusivamente solo dos formatos de producto.
- El procesamiento de bolsas en el autoclave se realiza en forma continua.

Como se puede apreciar, en ambos casos, el número de cargas procesadas aumentaría en un batch, lo que significaría un aumento del 25% en la producción de filetes y un 33% en conos si se elaborarán únicamente un tipo de formato por turno.

CUADRO 23. Producción de bolsas formato filete para los programas de proceso térmico actual y propuesto.

Item	Programa actual 116 °C x 50 min	Programa propuesto 116 °C x 35 min
Temperatura de esterilización (°C)	116	116
Tiempo de carga (min)	8	8
Tiempo CUT (min)	12	12
Tiempo de operador (min)	50	35
Tiempo de enfriamiento (min)	16	16
Tiempo de descarga (min)	8	8
Tiempo total (1 batch) (min)	94	79
Número (n) de batch por turno	4	5
Tiempo total n batch (min)	376	395
Número bolsas procesadas por batch	2000	2000
Numero de bolsas procesadas por turno	8.000	10.000

CUADRO 24. Producción de bolsas formato conos para los programas de proceso térmico actual y propuesto.

Item	Programa actual 116 °C x 70 min	Programa propuesto 116 °C x 55 min
Temperatura de esterilización (°C)	116	116
Tiempo de carga (min)	8	8
Tiempo CUT (min)	12	12
Tiempo de operador (min)	70	55
Tiempo de enfriamiento (min)	25	25
Tiempo de descarga (min)	8	8
Tiempo total (1 carga) (min)	123	108
Número (n) de batch por turno	3	4
Tiempo total n batch (min)	369	432
Número bolsas procesadas por batch	2000	2000
Numero de bolsas procesadas por turno	6.000	8.000

En los CUADROS 25 y 26, se presenta dos casos (Casos A y B) en la cual se estima la producción combinada por turno de bolsas para los formatos filetes y conos). Se comparan el programa actual de procesamiento y el propuesto que involucra una reducción de 15 minutos.

Como se puede apreciar, en ambos casos (A y B), el número de cargas procesadas aumentaría en un batch, al aplicar el Programa de Tratamiento Térmico propuesto, lo que significaría un aumento del 25% en la producción por turno.

CUADRO 25. Producción combinada de bolsas formatos filetes y conos: Caso A.

item	Programa actual	Programa propuesto
Elaboración Filetes	116 °C x 50 min	116 °C x 35 min
Tiempo total (1 batch) (min)	94	79
Número (n) de batch	3	4
Tiempo total n batch (min)	282	316
Número bolsas procesadas por batch	2000	2000
Numero de bolsas filetes procesadas	6000	8000
Elaboración Conos	116 °C x 70 min	116 °C x 55 min
Tiempo total (1 batch) (min)	123	108
Número (n) de batch	1	1
Tiempo total n batch (min)	123	108
Número bolsas procesadas por batch	2000	2000
Numero de bolsas conos procesadas	2000	2000
Elaboración combinada		
Tiempo total de elaboración (min)	405	424
Numero total de bolsas procesadas por turno	8.000	10.000

CUADRO 26. Producción combinada de bolsas formatos filetes y conos: Caso B.

ítem	Programa actual	Programa propuesto
Elaboración Filetes	116 °C x 50 min	116 °C x 35 min
Tiempo total (1 batch) (min)	94	79
Número (n) de batch	2	2
Tiempo total n batch (min)	188	158
Número bolsas procesadas por batch	2000	2000
Numero de bolsas filetes procesadas	4000	4000
Elaboración Conos	116 °C x 70 min	116 °C x 55 min
Tiempo total (1 batch) (min)	123	108
Número (n) de batch	2	3
Tiempo total n batch (min)	246	324
Número bolsas procesadas por batch	2000	2000
Numero de bolsas conos procesadas	4000	6000
Elaboración combinada		
Tiempo total de elaboración (min)	434	482
Numero total de bolsas procesadas por turno	8.000	10.000

Un aumento en la productividad, genera indudablemente beneficios económicos, que se suman a los beneficios señalados en la sección 4.7.1. En el CUADRO 27 se muestran las ventas brutas por turno que se obtendrían al implementar la reducción de 15 minutos en el tiempo de proceso térmico.

La aplicación de la simulación permite mayor seguridad y precisión en la evaluación de tratamientos térmicos, y constituye una herramienta muy versátil para obtener una respuesta tentativa frente a diferentes situaciones que se pueden manifestar en el ámbito industrial. Por ejemplo, si se presentase un cambio en el tamaño o calibre de los productos, mediante la simulación se

podría encontrar los nuevos tiempos de proceso que permita alcanzar la esterilidad comercial. En el caso que se diseñe un nuevo producto, de forma y composición determinada, se puede verificar si los programas de tratamientos térmicos vigentes son seguros para la producción. También es posible simular posibles desviaciones del proceso térmico, para evaluar su influencia en la letalidad y establecer factores de corrección que aseguren el logro de la esterilidad comercial de los procesos aplicados.

CUADRO 27. Beneficios económicos al seleccionar el programa propuesto.

Elaboración producto en bolsa	Programa actual	Programa propuesto
Numero de bolsas procesadas por turno	8.000	10.000
Cajas por turno (24 bolsas/caja)	333	417
Ventas (Precio FOB USD 23/caja)	USD 7.667	USD 9.583
Ventas brutas (pesos chilenos) por turno	\$ 3.850.277*	\$4.812.846*

*Calculado en base al valor promedio del dólar durante el mes de Julio del 2008⁴.

⁴ Servicio de Impuestos internos. www.sii.cl/pagina/valores/dolar/dolar2008.htm

5. CONCLUSIONES

- La aplicación de la metodología basada en la digitalización 3D, la ingeniería reversa, la tecnología CAD/CAE y el método de elementos finitos, permitió evaluar los tratamientos térmicos en dos formatos de cortes de jurel envasados al vacío en bolsas esterilizables a nivel industrial en la Planta de Coronel de Pesquera San José.
- Mediante la simulación 3D de los procesos térmicos es posible determinar el valor F_0 correspondiente al punto de más lento calentamiento/enfriamiento corrigiendo las desviaciones inherentes a la medición de temperaturas con termocuplas. Los valores F_0 obtenidos de forma experimental fueron en todos los casos superiores a los obtenidos mediante simulación. Las diferencias en el cálculo de letalidad oscilaron entre un 2,31% y 18,38% siendo las desviaciones mayores para el caso de productos de formas de mayor complejidad (conos).
- Considerando resultados de los tratamientos térmicos realizados a nivel industrial, estos mostraron un buen ajuste entre los perfiles experimentales y simulados. Los valores para el estadístico RMSE oscilaron entre 1,07% (0,58 °C) y 2,90% (1,29 °C), encontrándose por debajo del criterio ingenieril establecido (< 5%).
- Los valores de F_0 obtenidos tanto en las pruebas experimentales como las obtenidas por simulación son superiores entre 2 y 3 veces a lo requerido por la FDA (>4.0 min) y por la planta (4,5 min). Por lo tanto se podría reducir los tiempos de proceso aplicados actualmente en la Planta.

- Mediante simulación se determinó que los tiempos de proceso podrían ser reducidos en 15 minutos cumpliendo los criterios de esterilidad comercial exigidos por las entidades fiscalizadoras (Normativa FDA 21CFR parte 113). El programa de tratamiento térmico propuesto aumentaría la producción de bolsas esterilizables para la elaboración de formato conos en un 33%, y para el formato filetes en un 25% para un turno de 8 horas.
- Actualmente el método fórmula de Ball, es uno de los más utilizados por los Ingenieros y Autoridades de Proceso para la evaluación de procesos térmicos alternativos. Para los casos evaluados se encontró que el método de Ball subcalcula la letalidad (F_0) del tratamiento térmico en aproximadamente 25%, respecto al Método General Mejorado. Por lo tanto, en el caso de utilizarlo como herramienta para evaluar procesos térmicos alternativos, para una planta procesadora de productos en bolsas esterilizables, la aplicación de este método sobreestimaría los tiempos de proceso necesarios para alcanzar una letalidad preestablecida.
- La aplicación de la simulación 3D de los procesos térmicos presenta gran versatilidad para ser utilizada bajo diversas condiciones de procesamiento a nivel industrial en productos en que la transferencia de calor se verifique preponderantemente por conducción. La información generada en forma experimental puede ser adecuadamente complementada mediante simulación para servir de apoyo en la toma de decisiones durante los diseños de programas de tratamientos térmicos alternativos.

6. RESUMEN

El principal objetivo de la presente investigación fue evaluar la factibilidad de reducir los tiempos de procesos térmicos, cumpliendo los requisitos de esterilidad comercial, de dos formatos de cortes de Jurel (cono y filete) envasados al vacío en bolsas esterilizables, en producción en la Planta de Coronel de Pesquera San José. Para las pruebas experimentales las condiciones operacionales fueron las más adversas en una producción comercial. Los productos una vez tratados térmicamente fueron digitalizados, captura de las coordenadas (x, y, z), usando un brazo robótico de precisión (Microscribe-G2LTM) y un software de modelado 3D basado en NURBS (Non-Uniform Rational B-spline, Rhinoceros®). El proceso térmico se sustenta en un modelo matemático para la conducción de calor, sujeto a condiciones de borde simétricas convectivas y variables con la temperatura. El sistema de ecuaciones fue resuelto usando un software de simulación basado en el Método de Elementos Finitos (ALGOR®). Las curvas simuladas y experimentales mostraron un valor de %RMSE (*Root Mean Square Error*) inferior al 5%. Los valores de F_0 obtenidos tanto en pruebas experimentales como lo obtenido por simulación fueron superiores de 2 a 3 veces a lo requerido por la FDA ($> 4,0$ min) y la planta (4,5 min). Mediante simulación se determinó que los tiempos de proceso podrían ser reducidos en 15 minutos cumpliendo los criterios de esterilidad comercial. Los programas de tratamiento térmico propuesto aumentaría la producción de bolsas esterilizables para el formato cono en un 33%, y para el formato filetes en un 25% para un turno de 8 horas. Finalmente, se demostró que la aplicación de la simulación 3D de los procesos térmicos presenta gran versatilidad y puede servir de apoyo en la toma de decisiones durante el diseño de programas de tratamientos térmicos alternativos.

SUMMARY

The main purpose of this research was to evaluate the feasibility of reducing thermal processing times, satisfying commercial sterility requirements, for two different cuts of Jack Mackerel (cone and fillet) vacuum-packed in retortable pouches manufactured by fishery factory of San José, in Coronel, Chile. For the experimental test operational conditions were the most adverse for a commercial production. The products were heat-treated, and afterwards they were digitized, coordinates (x, y, z), by using a precision robotic arm (MicroScribe-G2LTM) and a 3D modelling software based on NURBS (Non-Uniform Rational B-spline, Rhinoceros®). The thermal process is based on a mathematical model for heat conduction, subject to symmetrical boundary conditions and variable with temperature. The system of equations was solved using a simulation software based on the Finite Element Method (ALGOR®). Simulated and experimental time-temperature curves showed a %RMSE value (Root Mean Square Error) of less than 5%. The values of F_0 obtained by experimentation and simulation were 2 to 3 times great than those required by FDA (>4,0 min) and San José Factory (4,5 min). Through simulation it was found that processing times might be reduced by 15 minutes and would still fulfill the criteria of commercial sterility. The proposed heat treatment programs increase pouch production for cone and fillet format by 33 and 25%, respectively. Thus, it was demonstrated that 3D simulation of thermal processing is quite versatile and it can be used as a tool for decision-making when designing programs of alternative heat treatments.

7. BIBLIOGRAFÍA

- ALARCON L. 2008. Validación microbiológica de procesos térmicos de alimentos de formas complejas envasadas al vacío en bolsas esterilizables. Tesis Lic. Cs. Alim. Valdivia. Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias Agrarias. 184 p.
- ALGOR. 2007. ALGOR User's Guide. ALGOR, Inc.
- ALUSA. 2007. ALUSA S.A. (On line) <<http://www.alusa.cl>> (15 Ago. 2007)
- BARTON, M y RAJAN, S. D. 2000. Finite element primer for Engineers. (On line) Term paper for graduate course CEE598. Arizona State University. <enpub.fulton.asu.edu/structures/FEMPrimer-Part1.ppt> (12 jun. 2007).
- BLAKISTONE B. 2003. Retortable pouch. **In:** Heldman, D.R. (ed.) Encyclopedia of Agricultural, Food, and Biological Engineering. Marcel Dekker. New York, USA. pp: 846- 851.
- BRODY L. 2003. The Return of the Retort Pouch. Food Technology 57(2): 76-79.
- CALIFANO, A. N. 1981. Transferencia de calor y materia durante el escaldado de papas. Tesis de Ph. D. La Plata, Argentina. Universidad Nacional de La Plata. 133 p.
- CANADA, CANADIAN FOOD INSPECTION AGENCY (CFIA-ACIA). 2002. Flexible Retort Pouch Defects. (On line) <<http://www.inspection.gc.ca.>> (5 sept. 2007).

- CHAPRA, S. C. y CANALE, R. P. 1988. Métodos numéricos para ingenieros con aplicaciones en computadoras personales. México, D.F. McGraw Hill. 641 p.
- CASP, A. y ABRIL, J. 1999. Procesos de conservación de alimentos. Madrid, España. Vicente/Mundi Prensa. 479 p.
- CATALA, R. 1982. Bolsas flexibles esterilizables: Características y usos específicos. Revista de Agroquímica y Tecnología de Alimentos (España) 22 (2):163-177.
- CHILE, SERVICIO NACIONAL DE PESCA (SERNAPESCA). 2007a. Programa de Control de Tratamientos Térmicos. Manual de Procedimientos. Sección 2. Procedimientos para la evaluación de los tratamientos térmicos aplicados a productos pesqueros cocidos, destinados a exportación (CTT/MP2/Marzo 2006). Departamento de Sanidad Pesquera. 5 p.
-
- _____ 2007b. Programa de Control de Tratamientos Térmicos. Norma Técnica. Sección 1. Requisitos para la autorización de procedimientos y equipos de plantas elaboradoras de productos pesqueros en conservas para exportación (CTT/NT1/Marzo 2006). Departamento de Sanidad Pesquera. 32 p.
- CHILE, SERVICIO NACIONAL DE PESCA (SERNAPESCA). 2008. Anuarios estadísticos de pesca 2007. (On line). <<http://www.sernapesca.cl>> (05 ene. 2008).
- CHOI, Y. y OKOS, M. R. 1986. Effects of temperature and composition on the thermal properties of foods. **In:** Le Maguer, M. y Jelen, P. (eds.) Food

Engineering and Process Applications. Vol I. Transport Phenomena. Londres, Inglaterra. Elsevier Applied Science Publishers. pp: 93-101.

CLELAND, A. C. y EARLE, R. L. 1984. Assessment of freezing time prediction methods. *Journal of Food Science* 49(4):1034-1042.

CRISTIANINI, M. y RODRIGUES, P. 2002. Thermal process evaluation of retortable pouches filled with conduction heated food. *Journal of Food Process Engineering* 25(5): 395-405.

DATTA, A.K. 1998. Computer-Aided Engineering in food process and product design. *Food Technology* 52(10): 44-52.

DÍAZ, C. 2000. Análisis teórico experimental del coeficiente convectivo de transferencia de calor durante los procesos de hidrocalentamiento e hidrogenfriamiento de alimentos. Tesis Lic. Ing. Alimentos. Valdivia. Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias. 158 p.

ESTY, J. y MEYER, K. 1922. The heat resistance of the spores of *B. botulinum* and allied anaerobes. XI. *Journal of Infectious Diseases* 31:650-663.

FLAHERTY, J. 2000. Finite Element Analysis. Course Notes CSCI-6860/MATH-6860 (On line). Rensselaer Polytechnic Institute. New York, USA. <<http://www.cs.rpi.edu/~flaherje/>> (15 may. 2007)

FOODDIGICAEELAB, 2007. Laboratorio de Digitalización 3D e Ingeniería Asistida por Computador para el Procesamiento y Preservación de Alimentos. (On Line): <<http://fooddigicaelab.uach.cl>> (30 jun. 2007).

GAVIN G. y WEDDIG L. 1995. Alimentos Enlatados: Principios de control del proceso térmico, acidificación y evaluación del cierre de los envases. 6^a ed. Washington D.C. Food Processors Institute - Chapman University. 267 p.

- GHANI, A. A. y FARID, M. 2005. A numerical simulation study on thermal sterilization of food in pouches using computational fluid dynamics (CFD). Association for Computing Machinery New Zealand Bulletin, (On line) 1 (2).
<http://oldwww.acm.org/chapters/acm_nz/bulletin/vol1/issue2/>
- HOLDSWORTH D. y SIMPSON R. 2007. Thermal processing of packaged foods. 2nd ed. New York, USA. Springer. 412 p.
- JAY, J. 2002. Microbiología moderna de los alimentos. 4^a ed. Zaragoza, España. Acribia. 615 p.
- KARDESTUNCER, H. y NORRIE, D.H. 1987. Finite Element Handbook. New York, USA. McGraw-Hill. 1424 p.
- LAMPI, R. 1977. Flexible packaging for thermoprocessed foods. In: Chichester, C.O., Mrak, E.M. y Stewart, G.F. (eds.) Advances in Food Research. Vol. 23. New York, USA. Academic Press. pp: 305-428.
- LAMPI, R. 1981. Retort pouch: The development of a basic packaging concept in today's high technology era. Journal of Food Process Engineering 4 (1): 1 -18.
- LIU, G.R. 2003. Mesh free methods, moving beyond the Finite Element Method. Boca Ratón, Florida, USA. CRC Press LLC. 693 p.
- MERSON, R.L; SINGH, R.P. y CARROAD, P. 1978. An Evaluation of Ball's formula method of thermal process calculations. Food Technology 32 (3): 66-71.
- MITCHELL, M. 2002. Modelación matemática como herramienta para el desarrollo de productos y procesos: Aplicación a la esterilización

comercial del jurel en bolsas esterilizables. Tesis Lic. Ing. Alimentos. Viña del Mar. Universidad Técnica Federico Santa María, Departamento de Procesos Químicos, Biotecnológicos y Ambientales. 95 p.

MOHAN, C.; RAVISHANKAR, C.; BINDU, J.; GEETHALAKSHIMI, V. y SRINIVASA, T. 2006. Effect of thermal process time on quality of “Shrimp Kuruma” in retortable pouches and aluminium cans. *Journal of Food Science* 71(6): 496 – 500.

MORALES-BLANCAS, E.F.; ZUÑIGA, G.M.; CARRASCO, E.R. 1999. Predicción de perfiles de temperatura durante el proceso combinado escaldado-hidrogenfriado de productos vegetales. Caso formas cilíndricas. *Actas XVI Jornadas de Transferencia de Calor y Materia*. Santiago, Chile. pp 12-17.

MORALES-BLANCAS, E. y TORRES, J. 2003a. Thermal resistance constants. **In:** Heldman, D.R. (ed.) *Encyclopedia of Agricultural, Food, and Biological Engineering*. Marcel Dekker. New York, USA. pp: 1030-1037.

_____. 2003b. Determination of thermal resistance parameters. **In:** Heldman, D.R. (ed.) *Encyclopedia of Agricultural, Food, and Biological Engineering*. Marcel Dekker. New York, USA. pp: 1038- 1043.

NAVARRO, R. 2007. Simulación de procesos térmicos de alimentos de formas complejas envasadas al vacío en bolsas esterilizables de tamaño institucional. Tesis Lic. Ing. Alimentos. Valdivia. Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias Agrarias. 166 p.

- NICHOLAS, J. V. y WHITE, D. R. 1994. Traceable temperatures: An introduction to temperature measurement and calibration. Chichester, England. John Wiley & Sons. 358 p.
- NUÑEZ, A. 2004. Desarrollo de productos sobre la base de salmón procesado en bolsas esterilizables: Comparación con producto fresco y esterilizado en envase de hojalata. Tesis Lic. Ing. Alimentos. Viña del Mar. Universidad Técnica Federico Santa María, Departamento de Procesos Químicos, Biotecnológicos y Ambientales. 74 p.
- PARK, D. 1996. Establishing safe thermal processes by calculation method selection. (On line). TechniCAL Company.
<<http://www.tcal.com/library/ProcessesCalculationMethod.html>>
(10 mar. 2008).
- PELEG, M. 2006. It's time to revise thermal processing theories. Food Technology 60(7): 92.
- PEREZ, D. 2007. Simulación de procesos térmicos de alimentos de formas complejas envasadas al vacío en bolsas esterilizables. Tesis Lic. Ing. Alimentos. Valdivia. Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias. 218 p.
- PLASPAK. 2007. Plaspak, Envases Flexibles (On Line)
<<http://www.plaspak.cl/evflexib.htm>> (28 Agosto, 2007)
- PFLUG, I. J. 1987a. Factor important in determining the heat process value, F_T , for low-acid canned foods. Journal of Food Protection 50(6): 528-533.
- PFLUG, I. J. 1987b. Calculating F_T -values for heat preservation of shelf-stable, low-acid canned foods using the straight-line semilogarithmic model. Journal of Food Protection 50(7): 608-615.

- PINO, F. 2004. Obtención de modelos digitales de alimentos de formas irregulares complejas mediante digitalización tridimensional. Tesis Lic. Ing. Alimentos. Valdivia. Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias. 86 p.
- QTECH. 2004. Definición Proceso Térmico: Estudio de penetración de calor en trozos de jurel envasados en bolsas esterilizables. Planta Coronel de Pesquera San José. Coronel, VIII Región. Informe Técnico N° S01604. 4 p.
- QTECH. 2007. Definición Proceso Térmico: Estudio de penetración de calor en filetes de Jurel envasados en bolsas esterilizables. Planta Coronel de Pesquera San José. Coronel, VIII Región. Informe Técnico N° S03607. 52 p.
- RHINOCEROS. 2001. NURBS Modeling for Windows. User's Guide Version 3.0. Seattle, USA. Robert McNeel & Associates. 530 p.
- RODRIGO, M.; LORENZO, P. y SAFÓN, J. 1980. Optimización de las técnicas de esterilización por calor: I. Planteamientos Generales. Revista de Agroquímica y Tecnología de Alimentos (España) 20(2): 149-160.
- RODRIGUEZ, C. 2005. Simulación computacional de procesos de conducción de calor en alimentos de formas irregulares complejas. Tesis Lic. Ing. Alimentos. Valdivia. Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias. 201 p.
- SOOJIN, J.; COX, L. y HUANG, A. 2006. Using the Flexible Retort Pouch to Add value to Agricultural Products. Food Safety and Technology (Online). FST-18. University of Hawaii at Manoa. College of Tropical

Agriculture and Human Resources (CTAHR). Cooperative Extension Service Publications.

<<http://www.ctahr.hawaii.edu/oc/freepubs/pdf/FST-18.pdf>> (20 agos. 2007).

SCHMIDT-HEBBEL, H.; PENNACCHIOTTI, I.; MASSON, L.; MELLA, M. 1990. Tabla de composición química de los alimentos chilenos. 8ª ed. Santiago. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas. 62 p.

SHELLHAMMER T. 2003. Flexible packaging. In: Heldman, D.R. (ed.) Encyclopedia of Agricultural, Food, and Biological Engineering. Marcel Dekker. New York, USA. pp: 333-336.

SIMPSON, R.; ALMONACID, S. y MITCHELL, M. 2004. Mathematical model. development, experimental validation and process optimization: retortable pouches packed with seafood in cone frustum shape. Journal of Food Engineering. 63(2): 153-162.

SIMPSON, R.; TEXEIRA, A. y ALMONACID, S. 2007. Advances with intelligent on-line retort control and automation in thermal processing of canned foods. Food Control 18 (7): 821-833.

SIMPSON, R.; ALMONACID S. y TEXEIRA, A. 2003. Bigelow's general method Revisited: Development of a new calculation technique. Journal of Food Science 68 (4): 1324-1333.

SINGH, R.P. 1982. Thermal diffusivity in food processing. Food Technology 36(2): 86-91.

SINGH, R.P y HELDMAN, D.R. 1993. Introduction to food engineering. 2nd ed. San Diego, USA. Academic Press. 460 p.

- TOLEDO R. 1991. Fundamentals of food process engineering. 2nd. ed. New York, USA. Van Nostrand Reinhold. 602 p.
- TOWNSEND C.; ESTY, J. y BASELT, F. 1938. Heat resistance studies on spores of putrefactive anaerobes in relation to determination of safe process for canned foods. Food Research 3:323-346.
- WARNE, D. 1989. Manual sobre el envasado de pescado en conserva. Documento Técnico de Pesca no. 285. Roma, Italia. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). 75 p.
- WELTI, J.; GÓMEZ, O.; VERGARA, F.; MARIS, S. 2005. Aplicaciones de ingeniería y fenómenos de transporte al estudio de la transferencia convectiva de calor en alimentos envasados. Revista Mexicana de Ingeniería Química (On line) 4: 89-106.
<<http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/pdf/620/62040108.pdf>> (10 feb. 2008).
- ZHANG, Q. y CAVALIERI, R. P. 1991. Thermal Model for Steam Blanching of Green Beans and Determination of Surface Heat Transfer Coefficient. Transactions of the ASAE 34 (1): 182-186.