

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

**Simulación de Procesos Térmicos de Alimentos de
Formas Complejas Envasadas al Vacío en Bolsas
Esterilizables**

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

David Humberto Pérez Quiñones

VALDIVIA – CHILE
2007

PROFESOR PATROCINANTE

Elton Morales-Blancas

Ingeniero en Industrias Alimentarias, M. Sc.
Instituto de Ciencia y tecnología de los Alimentos
Universidad Austral de Chile

PROFESOR CO-PATROCINANTE

Ricardo Simpson Rivera

Ingeniero Civil Bioquímico M. Sc., Ph.D
Departamento de Procesos Químicos Biotecnológicos y Ambientales
Universidad Técnica Federico Santa María

PROFESOR INFORMANTE

Rogelio Moreno Muñoz

Ingeniero Civil Mecánico, M. Sc., Dr.
Instituto de Materiales y Procesos Termomecánicos.
Universidad Austral de Chile

A Maria Quiñones Kukenschoner, mi Madre,
por el amor, valores y educación
que me entregó con tanto
esfuerzo y sacrificio.

A mis Hermanas Patricia y Rudy
por su inmenso amor y preocupación.

A mi Padre Q:E.P.D.

AGRADECIMIENTOS

Al profesor Elton Morales Blancas, patrocinante y guía de la presente tesis, y a los profesores informantes Ricardo Simpson R. y Rogelio Moreno M.

A la dirección de Investigación y Desarrollo (DID) de la Universidad Austral de Chile, a través del Proyecto S-2004-16, por el financiamiento del presente trabajo de tesis.

Al instituto de Ciencia y Tecnología de los Alimentos (ICYTAL) y todo su cuerpo docente por los conocimientos entregados a lo largo de la carrera, así como también a sus funcionarios.

En especial a mis Profesores, Marcia Costa, Carmen Brito, Renate Schoebitz, Fernando Figuerola, Bernardo Carrillo y Fernando Asenjo, por su apoyo y afecto.

A la amistad de las profesoras, Cristina Oporto y Maria Angélica Carrasco, por su apoyo y su formación como profesional

A mis compañeros y amigos; Juan Puentes, Patricio Ramírez, Cesar Ruminot, José Ruiz, Guillermo Rojas, Jose Osorio, como muchos otros que compartimos momentos inolvidables.

Al Sr. Víctor Sepúlveda que con su aprecio, comprensión y apoyo, siempre ha sabido ser un verdadero padre para mí.

INDICE DE MATERIAS

Capítulo		Página
1	INTRODUCCION	1
2	REVISION BIBLIOGRAFICA	5
2.1	Bolsas esterilizables	5
2.1.1	Definición	5
2.1.2	Composición del material de envasado	5
2.1.3	Ventajas del uso de bolsas esterilizables	8
2.1.4	Desventajas	9
2.1.5	Mercados y productos utilizados	10
2.2	Proceso de elaboración de conservas en envases flexibles	11
2.3	Equipos de esterilización de envases flexibles	14
2.3.1	Procesos con vapor saturado	15
2.3.2	Procesos con agua caliente	17
2.3.3	Procesos con mezcla vapor/aire	19
2.3.3.1	Sistemas de reposición de aire	21
2.3.3.2	Sistemas de flujo positivo	21
2.3.3.3	Sistemas de convección forzada	21
2.4	Transferencia de calor asociado a los procesos térmicos	22
2.4.1	Parámetros involucrados en la velocidad de transferencia de calor	22

2.4.4.1	Propiedades termofísicas	22
2.4.1.1.1	Conductividad térmica (k)	22
2.4.1.1.2	Densidad (ρ)	23
2.4.1.1.3	Calor específico (C_p)	23
2.4.1.1.4	Difusividad térmica (α)	23
2.4.1.2	Coeficiente global de transferencia de calor	24
2.5	Tratamiento térmico	25
2.5.1	Evaluación del tratamiento térmico	25
2.5.2	Esterilización comercial	27
2.5.3	Criterios de esterilización	28
2.6	Modelación matemática en alimentos utilizando métodos numéricos	29
2.7	Diseño asistido por computador (CAD)	33
2.7.1	Modelo geométrico	33
2.7.1.1	Figuras geométricas regulares e irregulares complejas	34
2.7.1.2	Ingeniería reversa	34
2.7.1.3	NURBS (Non-Uniform Rational B-Splines)	36
2.7.2	Digitalización 3D	37
2.7.3	Intercambio de datos CAD/CAE	39
2.8	Ingeniería asistida por computador (CAE): simulación de procesos	39
2.8.1	Análisis de elementos finitos	40
2.8.2	Generación de la malla (<i>mesh</i>)	47
2.8.2.1	Técnicas de generación de malla	48
2.8.2.1.1	Mallas estructuradas	49
2.8.2.1.2	Mallas no estructuradas	49
2.8.2.1.3	Mallas adaptativas	50
2.8.2.2	Tipos de elementos en el análisis térmico	52

2.8.2.2.1	Elementos 2D	52
2.8.2.2.2	Elementos ladrillo (<i>Brick</i>)	52
2.8.2.2.3	Elementos tetraédricos (<i>Tetrahedra</i>)	52
2.8.2.2.4	Elementos barra (<i>Rod</i>)	53
2.8.2.2.5	Elementos placa (<i>Plate</i>)	53
2.8.2.2.6	Elementos de frontera (<i>Thermal Boundary</i>)	53
2.8.2.3	Criterios de mallado	54
2.8.3	Modelo del material	55
2.8.3.1	Material isotrópico	55
2.8.3.2	Material anisotrópico	55
2.8.3.3	Material ortotrópico	55
2.8.5	Propiedades del material	56
2.8.6	Método de solución	58
2.8.7	Análisis (Procesamiento)	59
2.8.8	Revisión de resultados (Post-Procesamiento)	60
2.8.9	Confiabilidad de los resultados computacionales	60
2.8.10	Ventajas y desventajas del Método de Elementos Finitos	62
3	MATERIAL Y METODO	65
3.1	Lugar de ejecución	65
3.2	Materiales y equipos	65
3.2.1	Jurel	65
3.2.2	Bolsas esterilizables	68
3.2.3	Sistema de sellado al vacío	68
3.2.4	Sistema de digitalización 3D	69
3.2.5	Sistema de simulación	70
3.2.6	Determinación del coeficiente global de transferencia de calor (<i>U</i>)	71

3.2.7	Sistema de esterilización	72
3.2.8	Sistema de medición de temperaturas	76
3.2.9	Instrumentos de medición de precisión	79
3.2.10	Equipo de rayos X	79
3.3	Metodología	80
3.3.1	Modelo matemático del fenómeno físico	81
3.3.1.1	Ecuación de gobierno	82
3.3.1.2	Condiciones iniciales	83
3.3.1.3	Condiciones de borde considerando asimetría geométrica (dominio irregular 3D) y térmica	83
3.3.2	Experimentación en laboratorio	84
3.3.2.1	Calibración de termocuplas	84
3.3.2.2	Servicios básicos del sistema de esterilización	84
3.3.2.3	Selección y preparación del jurel	85
3.3.2.4	Inserción de las termocuplas	85
3.3.2.5	Sellado al vacío	87
3.3.2.6	Configuración del Data-Logger	87
3.3.2.7	Tratamientos térmicos aplicados	88
3.3.2.8	Sobrepresión durante el procesamiento térmico	88
3.3.2.9	Determinación del coeficiente global de transferencia de calor	90
3.3.2.10	Determinación de la ubicación física de las termocuplas insertadas	94
3.3.3	Simulación de procesos térmicos de alimentos de formas complejas	95
3.3.3.1	Obtención de modelos digitales 3D	95
3.3.3.1.1	Trazado de mallas	95
3.3.3.1.2	Captura de puntos	96
3.3.3.1.3	Generación del modelo digital	98

3.3.3.2	Intercambio CAD/CAE	101
3.3.3.3	Determinación de algunos parámetros de simulación	102
3.3.3.3.1	Pruebas de convergencia numérica	102
3.3.3.3.2	Propiedades termofísicas	106
3.3.3.4	Simulación del proceso térmico en ALGOR®	108
3.3.3.4.1	Definición del sistema de unidades	108
3.3.3.4.2	Elección del escenario del diseño	108
3.3.3.4.3	Generación de la malla	109
3.3.3.4.4	Definición de elementos	111
3.3.3.4.5	Especificación del material de los elementos	112
3.3.3.4.6	Ingreso de los parámetros de tiempo y temperatura nodal	113
3.3.3.4.7	Especificación de las cargas de superficie	115
3.3.3.4.8	Análisis	118
3.3.3.4.9	Revisión de resultados simulados	119
3.3.4	Ajuste entre las curvas simuladas y experimentales	120
3.3.5	Evaluación del tratamiento térmico	121
4	PRESENTACION Y DISCUSION DE RESULTADOS	123
4.1	Asimetría geométrica	123
4.2	Asimetría térmica	128
4.3	Conos de jurel envasados al vacío en bolsas esterilizables	132
4.3.1	Modelo digital 3D	133
4.3.2	Modelo mallado	133
4.3.3	Diagrama de contorno	133
4.3.4	Estadísticas del modelo en ALGOR®	133

4.3.5	Comparación de perfiles de temperatura experimentales y simulación	134
4.3.6	Ubicación del punto más frío	138
4.4	Filetes de jurel envasados al vacío en bolsas esterilizables	146
4.4.1	Modelo digital 3D	146
4.4.2	Modelo mallado	146
4.4.3	Diagramas de contorno	146
4.4.4	Estadísticas de los modelos de ALGOR®	146
4.4.5	Comparación de perfiles de temperatura experimentales y simulados	147
4.4.6	Ubicación del punto más frío	150
4.5	Medallones de jurel envasados al vacío en bolsas esterilizables	159
4.5.1	Modelo digital 3D	159
4.5.2	Modelo mallado	159
4.5.3	Diagramas de contorno	159
4.5.4	Estadísticas del modelo en ALGOR®	160
4.5.5	Comparación de perfiles de perfiles de temperatura experimentales y simulados	160
4.5.6	Ubicación del punto más frío	163
5	CONCLUSIONES	172
6	RESUMEN	174
7	BIBLIOGRAFIA	176
	ANEXOS	188

INDICE DE CUADROS

Cuadros		Página
1	Valores empíricos de F_0 , para conservas de baja acidez	26
2	Especificaciones de las termocuplas Kapton®	76
3	Tamaños de malla elegidos para las pruebas de convergencia	103
4	Parámetros del modelo comunes en todos los análisis	104
5	Resultados de las pruebas de convergencia	105
6	Composición química proximal del jurel	107
7	Propiedades termofísicas del jurel a distintas temperaturas	107
8	Parámetros del evento comunes a todos los análisis en ALGOR®	113
9	Parámetros del producto y del proceso comunes	129
10	Valores del coeficiente global de transferencia de calor en función del tiempo	130
11	Valores del coeficiente global de transferencia de calor variables con el tiempo para condiciones asimétricas	131
12	Estadísticas de los modelos digitales de conos de jurel envasados al vacío en bolsas esterilizables en ALGOR®	134

13	Coordenadas del nodo evaluado para los 3 conos de jurel	135
14	Valores de RMSE por etapas para el proceso de esterilización de conos de jurel	136
15	Valores de RMSE para el proceso de esterilización considerando temperaturas con ($T > 100^{\circ}\text{C}$) y sin ($T < 100^{\circ}\text{C}$) importancia letal en conos de jurel	137
16	Valores de RMSE global para el proceso de esterilización de conos de jurel	137
17	Coordenadas correspondientes al nodo más frío en conos de jurel	137
18	Valores de F_0 (min) para la esterilización de conos de jurel	139
19	Valores de F_0 para el proceso de esterilización considerando temperaturas con ($T > 100^{\circ}\text{C}$) y sin ($T < 100^{\circ}\text{C}$) importancia letal en conos de jurel	139
20	Estadísticas de los modelos digitales de filetes de jurel envasados al vacío en bolsas esterilizables en ALGOR®	147
21	Coordenadas del nodo evaluado para los 3 filetes de jurel	148
22	Valores de RMSE por etapas para el proceso de esterilización de filetes de jurel	149
23	Valores de RMSE para el proceso de esterilización considerando temperaturas con ($T > 100^{\circ}\text{C}$) y sin ($T < 100^{\circ}\text{C}$) importancia letal en filetes de jurel	149
24	Valores de RMSE global para el proceso de esterilización en filetes de jurel	150
25	Coordenada correspondiente al nodo más frío en	150

	filetes de jurel	
26	Valores de F_0 (minutos) para la esterilización de filetes de jurel	151
27	Valores de F_0 para el proceso de esterilización considerando temperaturas con ($T > 100^\circ\text{C}$) y sin ($T < 100^\circ\text{C}$) importancia letal en filetes de jurel	152
28	Estadísticas de los modelos digitales de medallones de jurel envasados al vacío en bolsas esterilizables en ALGOR®	160
29	Coordenadas del nodo evaluado para medallones	161
30	Valores de RMSE por etapas para el proceso de esterilización de medallones de jurel	162
31	Valores de RMSE para el proceso de esterilización considerando temperaturas con ($T > 100^\circ\text{C}$) y sin ($T < 100^\circ\text{C}$) importancia letal en medallones de jurel	163
32	Valores de RMSE global para el proceso de esterilización en medallones de jurel	163
33	Coordenadas correspondiente al nodo más frío en medallones de jurel	164
34	Valores de F_0 (minutos) para la esterilización de medallones de jurel	165
35	Valores de F_0 para el proceso de esterilización considerando temperaturas con ($T > 100^\circ\text{C}$) y sin ($T < 100^\circ\text{C}$) importancia letal en medallones de jurel	165

INDICE DE FIGURAS

Figura		Página
1	Conservas de jurel en bolsas esterilizables	12
2	Esquema de un sistema de esterilización con vapor saturado y aire comprimido	17
3	Proceso de esterilización con agua caliente	19
4	Esquema de un autoclave con vapor saturado y aire comprimido	20
5	Curva típica de esterilización	28
6	Modelo geométrico usado por CRISTIANINI (2002), para el análisis de transferencia de calor en bolsas esterilizables	32
7	Curva NURBS (azul) con sus puntos de control (negro)	37
8	Nodos y elementos en un modelo cilíndrico	42
9	Distribución de temperatura en una aleta uni-dimensional	44
10	Los puntos nodales y los valores asumidos de $T(x)$	44
11	División del dominio en elementos	45
12	Modelos discretos para la distribución de temperatura uni-dimensional	46
13	Concepto de Isotropía y Ortotropía	56
14	Jurel (<i>Trachurus symmetricus murphyi</i>)	66
15	Conos de jurel	66

16	Filetes de jurel	67
17	Medallones o rodajas de jurel	67
18	Bolsas esterilizables o Retortable pouches	69
19	Brazo digitalizador Microscribe-3DL™	70
20	Registrador de temperatura DIGI-SENSE®.	72
21	Autoclave Dixie Canner Equipment modelo RDSW-3	73
22	Sistema de medición de temperatura y presión del autoclave Dixie Canner	74
23	Compresor HYDROVANE 50L	74
24	Componentes del dispositivo de bronce	75
25	Dispositivo de bronce para el paso de termocuplas al interior del autoclave	75
26	Termocuplas tipo T Kapton® calibre 30	77
27	Dispositivo de bronce para el paso de termocuplas al interior de la bolsa esterilizable	78
28	Data Logger marca Digi-Sense de 12 canales	78
29	Equipo de rayos X Modelo DXD – 350 II General Electric	79
30	Reveladora automática Modelo XP 1000 DAITO	80
31	Superficies expuestas el medio de esterilización	82
32	Inserción de termocuplas a los productos evaluados	86
33	Envasado al vacío	87
34	Equipamiento de esterilización y sistema de adquisición de datos	88
35	Bolsas al final del calentamiento sin sobrepresión	89
36	Producto final de un proceso sin sobrepresión	90
37	Objeto de cobre envasado al vacío en bolsas esterilizables	93

38	Valores del coeficiente U en función del tiempo para el caso de conos de jurel	94
39	Trazado de la malla (filas y columnas) sobre la superficie de una bolsa esterilizable	96
40	Plataforma de soporte para la digitalización tridimensional de los trozos de jurel envasados al vacío en bolsas esterilizables	97
41	Captura de los puntos de la malla trazada sobre las bolsas esterilizables con el brazo digitalizador Microscribe-3DL™	98
42	Matriz de puntos 3D de una de las superficies de las bolsas esterilizables capturados con el software Rhinoceros®	99
43	Modelo sólido digital de una bolsa esterilizable	100
44	Modelo sólido digital de la bolsa esterilizable importado en el software ALGOR®	101
45	Definición del sistema de unidades	108
46	Definición del escenario del diseño	109
47	Generación de la densidad de la malla en el modelo	110
48	Malla de superficie de un modelo digital de cono de jurel envasado al vacío en bolsa esterilizable	111
49	Ventana de definición de unidades en ALGOR®	112
50	Propiedades termofísicas del material seleccionado	112
51	Ingreso del tiempo de proceso y paso de tiempo	114
52	Ingreso de la temperatura inicial o nodal del modelo	114
53	Ingreso de los valores de la curva de carga del coeficiente global de transferencia de calor, para el proceso de esterilización de bolsas esterilizables	115
54	Ingreso de los valores de la curva de carga de	116

	temperatura del medio, para el proceso de esterilización de bolsas esterilizables	
55	Asignación de las curvas de cargas al modelo digital	117
56	Modelo digital con cargas listas para el proceso de simulación térmica	118
57	Ventana del análisis del proceso en curso	119
58	Cono de jurel digitalizado (irregular complejo) a partir de una réplica de yeso	125
59	Cono truncado (irregular simple) generado con Rhinoceros®	125
60	Plano XZ, de los modelos: (a) cono jurel (irregular complejo), (b) cono truncado (irregular simple)	126
61	Plano en perspectiva de los modelos: (a) cono jurel (irregular complejo), (b) cono truncado (irregular simple)	127
62	Perfiles simulados de las formas irregular simple (cono truncado) e irregular compleja (cono jurel)	128
63	Curvas simuladas para distintas condiciones de coeficiente global de transferencia de calor	132
64	Modelo digital 3D del cono “1” envasado al vacío en bolsas esterilizables en Rhinoceros®	140
65	Modelo mallado (FEA) del cono “1” envasado al vacío en bolsas esterilizables en ALGOR®	141
66	Corte longitudinal del diagrama de contorno del cono “1” envasado al vacío en bolsas esterilizables en ALGOR®	142
67	Localización de las coordenadas (x,y) de la termocupla insertada en el cono “1”	143

68	Localización de las coordenadas (x,z) de la termocupla, insertada en el cono “1”	144
69	Perfiles de temperaturas experimental y simulado para el proceso térmico del cono “1” envasado al vacío en bolsas esterilizables	145
70	Modelo digital 3D del filete “2” envasado al vacío en bolsas esterilizables en Rhinoceros®	153
71	Modelo mallado (FEA) del filete “2” envasado al vacío en bolsas esterilizables en ALGOR®	154
72	Corte longitudinal del diagrama de contorno del filete “2” envasado al vacío en bolsas esterilizables en ALGOR®	155
73	Localización de la coordenada (x,y) de la termocupla insertada en el filete “2”	156
74	Localización de la coordenada (x,z) de la termocupla insertada en el filete “2”	157
75	Perfiles de temperatura experimental y simulado para el proceso térmico del filete “2” envasado al vacío en bolsas esterilizables	158
76	Modelo digital 3D del medallón “1” envasado al vacío en bolsas esterilizables en Rhinoceros®	166
77	Modelo mallado (FEA) del medallón “1” envasado al vacío en bolsas esterilizables en ALGOR®	167
78	Corte longitudinal del diagrama de contorno del medallón “1” envasado al vacío en bolsas esterilizables en ALGOR®	168
79	Localización de la coordenada (x,y) de la termocupla insertada en el medallón “1”	169
80	Localización de la coordenada (x,z) de la	170

	termocupla insertada en el medallón “1”	
81	Perfiles de temperatura experimental y simulado para el proceso térmico del medallón “1” envasado al vacío en bolsas esterilizables	171

INDICE DE ANEXOS

Anexo		Página
1	Modelos digitales 3D obtenidos en Rhinoceros®	189
2	Modelos digitales con su respectiva malla generada en ALGOR®	192
3	Diagrama de contorno de cada corte de jurel en los tratamientos simulados en ALGOR®	195
4	Validación de la ubicación del nodo evaluado mediante radiografías	201
5	Perfiles de temperatura experimentales y simulados para el proceso térmico de distintos cortes de jurel envasado al vacío en bolsas esterilizables.	213

NOMENCLATURA

Símbolos romanos

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 (°C; K)
t	Tiempo (min; s)
V	Volumen (m ³)
x	Coordenada del sistema de coordenadas rectangular

Símbolos griegos

ρ	Densidad (kg/m ³)
α	Difusividad térmica (m ² /s)

1. INTRODUCCION

En la década de los '50 la National Aeronautics and Space Administration (NASA), diseñó un envase para ser ocupado en las naves 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.

El posicionamiento de estos envases es fuerte en el mercado internacional, siendo pioneros Europa y Japón además de Estados Unidos donde ya son muy conocidos. En tanto en Chile su uso es creciente y ya son varias las industrias que han optado por procesar alimentos en estos envases (Industrias pesqueras, extrusoras y de alimentos para mascotas).

Estos envases novedosos han traído diversos beneficios tanto para la industria como para el consumidor, como por ejemplo: tamaño apropiado para consumidores individuales, es decir, menor peso, facilidad de apertura, baja considerable en el volumen específico, bajos costos de almacenamiento y de transporte. En términos medioambientales provoca un considerable menor volumen de desecho. En términos sensoriales, se ha encontrado que los productos envasados en bolsas esterilizables tienen una mejor textura y color comparado con el clásico envase de hojalata debido a un menor tiempo de tratamiento térmico (50% menos aproximadamente), lo que sin lugar a dudas lleva a un menor gasto energético.

La gran aceptación comercial y reconocida calidad superior de los alimentos envasados al vacío en bolsas esterilizables ha llevado a considerar a este

envase como uno de los más convenientes para conservas de alimentos de baja acidez. Lo anterior ha despertado un interés creciente en aplicar modelos computacionales capaces de simular el proceso de conducción de calor involucrado durante el tratamiento térmico para maximizar la eficiencia energética y optimizar la calidad del producto final.

La gran complejidad de los alimentos en lo que a su forma se refiere y a las condiciones de autoclavado que se observan durante los tratamientos térmicos de alimentos envasados al vacío en bolsas esterilizables, significa que no se puede modelar matemáticamente y obtener una solución sin realizar gruesas simplificaciones al problema físico. Al respecto, en la literatura especializada no se ha encontrado trabajos publicados relacionados al análisis de transferencia de calor en alimentos de forma irregular compleja envasado al vacío en bolsas esterilizables considerando condiciones de asimetría geométrica y térmica. Estas dos últimas condiciones dificultan conocer a priori la ubicación “exacta” del punto de más lento calentamiento/enfriamiento, por lo tanto sería imposible acertar la inserción de una termocupla en el lugar que corresponda para realizar la medición experimental de penetración de calor durante un determinado tratamiento térmico. El no contar con el perfil de temperatura del “centro térmico” produciría subcalcular la letalidad del proceso térmico.

Para la representación y definición de los alimentos de formas irregulares complejas actualmente se cuenta con una metodología integrada denominada Ingeniería Reversa. Una de las técnicas para llevar a cabo esta metodología, que ha logrado una alta masificación en el mundo tecnológico dada su versatilidad, es la digitalización tridimensional (3D). Esta técnica permite acceder a las irregularidades que normalmente presentan los objetos de formas complejas y de esta manera capturar con aceptable precisión la forma tridimensional, obteniéndose finalmente el modelo digital.

La solución al modelo matemático de transferencia de calor por conducción para el caso de dominios irregulares complejos 3D se puede realizar mediante el Método de Elementos Finitos (*en Inglés Finite Element Method, FEM*). El FEM en sí proporciona soluciones aproximadas a los problemas reales de transferencia de calor por conducción planteados mediante las ecuaciones de gobierno, condiciones frontera y condiciones iniciales. Por la complejidad de los modelos matemáticos (asimetría geométrica y térmica) y la cantidad de ecuaciones generadas es imposible la solución manual de éstas. Aquí nacen las aplicaciones de ingeniería asistidas por computador, lo que hoy en día se conoce como CAE (*Computer-Aided Engineering*).

Basándose en los antecedentes citados, la hipótesis fue la siguiente:

- Mediante la aplicación de la Ingeniería Reversa, la tecnología de intercambio de datos CAD/CAE y el Método de los Elementos Finitos (FEM), es posible ubicar adecuadamente el punto de más lento calentamiento/enfriamiento durante el tratamiento térmico de alimentos de formas irregulares complejas, envasados al vacío en bolsas esterilizables.

Para verificar la hipótesis, el objetivo general y objetivos específicos fueron los siguientes:

- Modelar y simular el proceso de conducción de calor en Alimentos envasados al vacío en bolsas esterilizables, considerando formas irregulares complejas involucrando asimetría geométrica y térmica.

Objetivos específicos:

- Capturar la forma real compleja del alimento seleccionado envasado al vacío en bolsas esterilizables mediante digitalización 3D y modelado complementario 3D.

- Simular, utilizando el Método de los Elementos Finitos, el proceso de conducción de calor de los dominios digitalizados considerando condiciones de isotropía y condiciones de borde variables.
- Evaluar la desviación del punto de más lento calentamiento/enfriamiento con respecto a la asimetría geométrica y térmica.
- Comparar los resultados experimentales con los simulados considerando las condiciones típicas de tratamiento térmico en autoclave. El alimento de prueba seleccionado es jurel en tres cortes diferentes: conos truncados, filetes y medallones o corte transversal.

2. REVISION BIBLIOGRAFICA

2.1 Bolsas esterilizables.

2.1.1 Definición: Envase flexible para alimentos esterilizados por calor, capaz de resistir altas temperaturas en el rango de 114 a 130 °C y con fluctuaciones de presión semejantes a las que se desarrollan en la esterilización de envases de vidrio o metálicos (LAMPI, 1977). Según BRODY (2003), son envases esterilizables flexibles usados para reemplazar las clásicas latas y los frascos de vidrio como método de conservación.

Las bolsas esterilizables o (*retortable pouches*) fueron inicialmente desarrolladas en Estados Unidos de Norte América en los años 50 del siglo recién pasado, donde su primera implementación fue en el proyecto “APOLO” de la National Aeronautics and Space Administration (NASA). Solo hasta el año 1960 empezó su uso y comenzó a ser desarrollada por la *Army Natick Research* en conjunto con *Development and Engineering (RD&E) Center* (BLAKISTONE 2003; CLP¹);). Este desarrollo fue justificado por las ventajas de costo, menor peso y facilidad de manipulación que ofrecían frente al envase de hojalata (BRODY, 2003).

2.1.2 Composición del material de envasado. Las bolsas esterilizables, son una combinación de aluminio y plástico que dan las ventajas necesarias para la preservación del alimento (NUÑEZ, 2004). La composición de esta está basada en cuatro láminas, desde el interior al exterior del envase se describen las siguientes:

¹ <http://www.clp.co.il>

- *Polipropileno*: Este material es un buen conductor del calor, flexible, firme y compatible con el alimento, en términos que no provoca reacciones secundarias.
- *Lámina de aluminio*: Una excelente barrera contra la luz, olores, microorganismos, extiende la vida útil de alimentos
- *Nylon*: Abrasión y resistencia
- *Poliéster*: Resistencia a altas temperaturas, dureza y facilidad de impresión.

Las características que estos materiales por separados aportan al conjunto, es que sus materiales flexibles laminados dan mayor firmeza, gran fuerza de tensión e impermeabilidad a los gases y vapor de agua (CFIA-ACIA, 2002).

La función principal de la capa exterior (poliéster) es la de contribuir a la fuerza y resistencia a la formación de agujeros en la bolsa terminada. Resiste el calor durante el proceso de sellado de la bolsa. Finalmente, podría ser impresa si se considera necesario. Se han usado 2 tipos de material: poliéster 12 μm y poliamida de 15 μm . En el caso del nylon, éste suele absorber humedad bajo altas humedades relativas y altas temperaturas. Este hecho reduce su resistencia y por esta razón el poliéster es preferido ampliamente. El aluminio brinda las propiedades de barrera a las bolsas esterilizables. En el caso de productos pesqueros, la barrera contra la transferencia de oxígeno, vapor de agua y luz es imprescindible si consideramos un largo periodo de vida útil. Una capa de aluminio sin agujeros minúsculos sería una barrera perfecta. Sin embargo, las impurezas en el aluminio, los daños causados durante la fabricación, laminación de las bolsas y especialmente la subsiguiente manipulación conducen a la formación de agujeros en el material. A menos que haya mucho maltrato de la bolsa durante y post proceso, los agujeros no presentan un problema en lo que se refiere a las propiedades de barrera del aluminio. Es recomendable el uso de aluminio de 9 a 12 μm de espesor. Las funciones principales de la capa interna en el laminado de bolsas flexibles

esterilizables son permitir el sellado hermético, proteger mecánicamente al aluminio, proteger el producto, contribuir a la durabilidad y fuerza del laminado.

Se han usado 2 tipos de material típicos: polietileno de alta densidad modificado con caucho poliobutileno y prolipropileno copolimerizado con una proporción baja de de polietileno. Los films de propileno usados generalmente de 50 a 100 μm de espesor dependiente de su uso final. Se utiliza una cuarta capa entre el aluminio y la capa interior cuando las tres capas podrían resultar inadecuadas. Por ejemplo es imprescindible su inclusión en bolsas grandes, con productos pesados, duros, o cuando el mismo tiende a debilitar la adhesión entre el aluminio y la capa interna (NUÑEZ, 2004).

En resumen las características que deben poseer las bolsas esterilizables según NUÑEZ (2004) son las siguientes:

- Baja permeabilidad al oxígeno, menor de 15.5 cc/m^2 en 24 h.
- Bajos valores de transmisión de vapor, menor de $0,78 \text{ g/m}^2$ en 24 h.
- Resistente a temperatura entre 0 y $120 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Bajas propiedades hidrofílicas.
- Bajo costo en el material de confección.
- Puede ser sellada a temperatura de trabajo.
- Resistente a la acción de grasas, aceites u otro componente alimenticio.
- Que traspase al mínimo olores y sabores a los alimentos contenidos en ellas.
- Resistente a manejos descuidados.
- Ser agradable para el consumidor.
- Ser capaz de ser utilizada en sistemas de fabricación automáticas.
- Material capaz de ser impreso, para así obtener una buena presentación.

Por lo tanto y en forma general estos envases deberán ser capaces de soportar las temperaturas de esterilización de 114 a 130 °C por hasta 120 minutos, debiendo ser suficientemente fuertes para resistir la manipulación y el abuso durante el proceso de transporte y comercialización subsiguiente (GALLO, 2002).

2.1.3 Ventajas del uso de bolsas esterilizables. El gran éxito tecnológico que ha experimentados la bolsa esterilizable, se debe a sus notables ventajas que aporta al combinar las características tecnológicas a la forma tradicional de enlatado (MITCHELL, 2002).

Se deben destacar claramente las siguientes ventajas, que son de real importancia en ésta nueva tecnología (BRODY, 2003; MERMELSTEIN, 1976).

1. El producto envasado cumple con los requisitos de esterilidad comercial definidos (FDA, 2002), por lo que no necesita refrigeración para su conservación, pudiendo mantenerse más de 2 años a temperatura ambiente.
2. Debido a su forma aplanada representa un menor espesor con respecto a envases tradicionales (cilíndricos en la mayoría de los casos), lo que se traduce en una mayor área de transferencia de calor y a los postre un menor tiempo para alcanzar la temperatura de esterilización en el punto de más lento calentamiento del envase. Lo anterior a la vez desglosa otra serie de ventajas:
 - Mejor calidad con la mayor retención de nutrientes, color, sabor, textura, etc.
 - Mayor homogeneidad al no sufrir el producto un calentamiento excesivo en las zonas más cercanas a la superficie del envase.

- Menor peso y volumen con respecto a los envases tradicionales con las siguientes repercusiones económicas en el almacenamiento, transporte y distribución. Este aspecto es relevante en lo que se refiere a envases vacíos, es decir, un euro vagón (100 m³), puede transportar 5 millones de bolsas retortables vacías, lo que equivale a 25 euro vagones llenos de latas. Esto es calculado en igualdad de volumen a empaquetar.
- Facilidad de apertura y posibilidad de temperar o preparar el alimento envasado para el consumo mediante un simple y rápido calentamiento convectivo de la bolsa.
- Fácil eliminación del envase utilizado.
- Excelente presentación para su comercialización.

2.1.4 Desventajas. El proceso es generalmente más largo en términos de envasado y requiere de mayor mano de obra. Debido a que son menos robustas, las bolsas esterilizables necesitan de mayor protección a través de una bolsa o cartón como empaque secundario. Las operaciones de empaquetado generalmente son más lentas comparadas con una operación similar de conservas de enlatado o congelado (PACKAGING DIGEST, 1998).

Además MERMELSTEIN (1976) y (BRODY, 2003), señala las siguientes desventajas:

- Baja velocidad de trabajo. Los equipos actuales de llenado y sellado trabajan a velocidades de 60 a 120 bolsas por minuto, mientras que las líneas que utilizan envases metálicos llegan a superar las 800 unidades por minuto.
- Elevada inversión en las instalaciones. La inversión general para una línea completa de una nueva planta se estima 10 veces más que para la inversión necesaria para línea completa de envasado en contenedores metálicos.

- Por la flexibilidad de la bolsa pueden presentarse problemas de daño mecánico de los alimentos elaborados. Esto es particularmente grave en productos frágiles y de cierto tamaño, lo que obliga a un trabajo cuidadoso durante la elaboración, así como una protección adicional con un sobre embalaje, que incrementa el costo del producto.

2.1.5 Mercados y productos utilizados. El mercado de los alimentos envasados en bolsas esterilizables abarca tres sectores (CATALA, 1982):

- Alimentación Individual.
- Alimentación institucional.
- Fuerzas Armadas.

Los alimentos que se comercializan en bolsas esterilizables son fundamentalmente los mismos que se usan para envases metálicos, abarcando productos vegetales hasta precocinados, siendo este último tipo de alimento el que más ha despertado interés a nivel industrial para su comercialización, debido a la excelente calidad de sus productos, presentación y comodidad de preparación, lo que permite una fácil y rápida elaboración (MITCHELL, 2002).

El uso de las bolsas esterilizables ha demostrado ser adecuado para una gran variedad de productos, incluyendo frutas, hortalizas, carnes, pescados y productos formulados (LAMPI, 1977).

En las Fuerzas Armadas y en especial en el Ejército es donde la utilización de bolsas esterilizables ya es un hecho, siendo los pioneros en esto las fuerzas armadas de los EE.UU (MITCHELL, 2002).

En Chile ALUSA S.A empresa líder del parking en el continente, fabrica éste tipo de envases. Varias son las empresas como CAROZZI S.A, SAN JOSE S.A

y ALIMENTOS MAR PROFUNDO S.A, que apostaron por este tipo de envases añadiendo un mayor valor agregado a sus productos y poder competir en el gran mercado globalizado de estos días².

Los segmentos de salsas preparadas, pescados, carnes, champiñones y otros ingredientes delicados representan el futuro inmediato de estos empaques. La comida étnica es, así mismo, un nicho que hasta ahora se está desarrollando con líneas de cocina thai y mexicana. En general el retortable está muy de acuerdo con los tiempos modernos. La idea es tener comidas preparadas en una bolsa esterilizable que se pueda meter al microondas y listo.³

2.2 Proceso de elaboración de conservas en envases flexibles.

El envasado de alimentos en bolsas esterilizables, no difiere en relación a un clásico proceso de conservas de hojalata. Existen varias formas de llenado y la selección de la más apropiada, depende de las características físicas y reológicas del producto a envasar (NUÑEZ, 2004).

El proceso de elaboración de conservas en bolsas flexibles esterilizables comprende de una serie de operaciones que se describen brevemente a continuación:

- Llenado.
- Remoción de aire (envasado al vacío).
- Sellado.
- Estibado en bandejas de autoclave.
- Tratamiento térmico.
- Descarga de bandejas.

² www.elempaque.com

³ www.canal13.cl

- Secado.
- Empacado en bolsas secundarias.
- Embalado en empaque de tránsito.
- Control de Calidad.

En la FIGURA 1, se muestran los diferentes formatos de trozos de jurel envasados en bolsas esterilizables por **Pesquera San José S.A** (Planta Coronel, Concepción).



FIGURA 1. Conservas de jurel en bolsas esterilizables.

Dentro de las operaciones de envasado la operación más crítica es la de llenado, ya que es esencial que el producto sea llenado hasta el nivel apropiado sin tener contacto con el área de sellado de la bolsa. Tiene que evitarse un llenado excesivo de la bolsa esterilizable, ya que no solo aumenta el riesgo potencial de un sello contaminado y defectuoso (NUÑEZ, 2004; PLASPAK⁴).

MITCHELL (2002), menciona que como medio de control de la calidad se usa en esta etapa un estricto control de peso, así como también de viscosidades del

⁴ www.plaspak.cl

líquido de cobertura, para conseguir uniformidad en el tratamiento térmico de esterilización.

La eliminación efectiva del aire es una etapa muy relevante, práctica que también es realizada en las conservas de hojalatas. Según MITCHELL (2002) muchos autores mencionan que existen diferencias en el sistema de eliminación de aire o formador de vacío, tratándose de un alimento sólido o líquido. Para alimentos líquidos de baja viscosidad se recomienda la inyección de vapor, como también el vacío mecánico, evitándose la formación de espuma y succión de líquido. En caso de alimentos sólidos que contienen líquido atrapado, la inyección de vapor no consigue una eliminación efectiva con lo que es recomendable un vacío mecánico. Finalmente el cierre hermético se obtiene por termosellado, técnica muy común en el termosoldado de materiales plásticos.

Según NUÑEZ (2004), posterior a la evacuación del aire, se debe obtener niveles de gas residual bajos en el producto por varias razones:

- Estabilidad del producto.
- Evitar la ruptura de la bolsa durante el proceso.
- Asegurar una transferencia de calor predecible y uniforme.

Como se ha visto el sellado es un punto crítico del proceso. Las características del sello realizado en planta determinan en forma fundamental la estabilidad e inocuidad del producto previo al consumo (NUÑEZ, 2004).

El envasado de alimentos en bolsas esterilizables se realiza siguiendo un esquema de operaciones que no difiere en sus aspectos básicos del envasado convencional en envases de hojalata en lo que se refiere en su concepto, pero si incluye algunos aspectos que le son particulares, entre estos, además del sistema de esterilización más adecuado (MITCHELL, 2002).

2.3 Equipos de esterilización de envases flexibles.

Se sabe que los procesos térmicos a sobrepresión son necesarios para esterilizar comercialmente alimentos en envases plásticos, ya sean estos envases flexibles o semirígidos. Las mezclas de vapor/aire e inmersión en agua con sobrepresión son comúnmente utilizados debido a su habilidad para mantener la presión del autoclave en mejor forma que utilizando vapor saturado dentro de los envases durante los procesos térmicos (MITCHELL, 2002).

El tipo de sello en las bolsas esterilizables es definitivamente mucho más delicado que el doble sello del tarro de hojalata, esta razón hace fundamental el control de la presión y la temperatura sea un proceso mucho mas estricto que el convencional de envases de hojalata (NUÑEZ, 2004).

Se sabe que en el periodo de calentamiento, es necesario vencer la tendencia a la expansión de la bolsa producido por los gases y el retardo en la transferencia de calor, y en el caso de la etapa de enfriamiento se debe impedir que las presiones de vapor internas pudieran tender a deformar o hacer estallar los envases. Para el proceso de esterilización se ha llegado al consenso que es necesario realizar un proceso donde se equilibren las presiones internas y externas cuando las temperaturas durante el ciclo de calentamiento superan los 100 °C y cuando baja la temperatura en la etapa de enfriamiento llegando a los mismos 100 °C, para lo cual se debe aplicar **sobrepresión** (MITCHELL, 2002).

Para lo explicado en el párrafo anterior se aplican principalmente 3 técnicas:

- Procesos con vapor saturado.
- Procesos con agua caliente.
- Procesos de mezcla vapor/aire.

2.3.1 Procesos con vapor saturado. Los suministros de vapor para el equipo de autoclavado deben ser los adecuados para llevar a éste a la temperatura de trabajo en un tiempo razonable. El venteo como tal debe cumplir con el objetivo de remover el aire del equipo antes de que comience la medición del tiempo de proceso, en la FIGURA 2 se puede apreciar un esquema clásico de un equipo de esterilización con vapor saturado, que constan fundamentalmente de:

- Una entrada de vapor (1), con un sistema de distribución del mismo en el interior del autoclave (2) que asegure la buena homogeneidad de la temperatura.
- Unos sistemas de purga (3) que consigan evacuar todo el aire existente en el equipo antes de la puesta a presión.
- Un sistema de desagüe (4) para eliminar los condensados y el agua de enfriamiento.
- Un sistema de entrada de agua de enfriamiento (5), cuando este enfriamiento se realice en su interior.
- Unos sistemas de control y medida. Válvula de regulación de vapor (6), termómetro (7) y registro de temperatura (8), válvulas de seguridad, etc.

Esta técnica ya no es utilizada debido a las precauciones que deben ser tomadas al momento de tratar bolsas esterilizables. El desarrollo de altas temperaturas puede causar problemas en el material de envasado pudiendo estas deformarse, producto de largo tiempos de residencia. Para un tratamiento con vapor saturado, el aire debe ser cuidadosamente removido del interior del envase (NUÑEZ, 2004).

Durante la esterilización, es esencial el control del espesor y colocación de las bolsas en el autoclave para asegurar que todas reciban igual exposición al medio de calentamiento, con este fin, las bolsas van montadas en bandejas o raquetas metálicas perforadas, en compartimientos individuales, ya que no

pueden apilarse. Se ha discutido mucho sobre la conveniencia de mantener las bolsas en posición vertical u horizontal durante la esterilización. Al parecer no hay diferencia significativas entre ambos sistemas que son utilizados indistintamente por los diferentes equipos, si bien, en general, parece mayor la tendencia a la posición horizontal (MITCHELL, 2002).

Para la esterilización se usan altas temperaturas que varían entre 114 a 135 °C por tanto a estas temperaturas se aconseja trabajar con una contrapresión de aire fundamentalmente durante el ciclo de enfriamiento de los envases. Por lo tanto es aconsejable usar una sobrepresión que va desde 0,2 a 0,7 kg_f /cm². Esta sobrepresión asegura la integridad del envase frente a los problemas de expansión térmica del aire residual y del producto envasado, por otro lado esta sobrepresión es necesaria para mejorar la transmisión de calor y juega un papel importante en la inmovilización de las bolsas, previniendo la agitación y los movimientos que podría dañar los cierres (LAMPI, 1977).

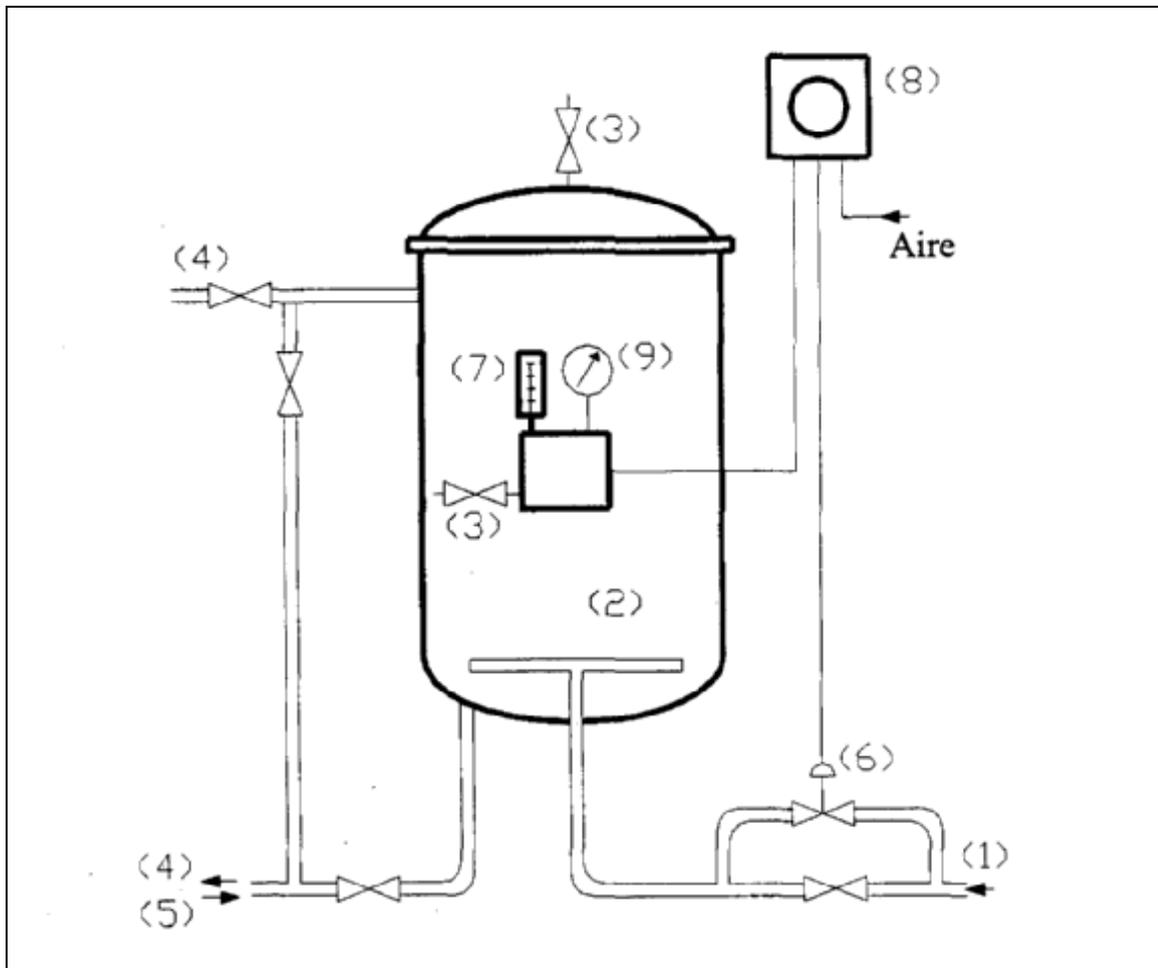


FIGURA 2. Esquema de un sistema de esterilización con vapor saturado y aire comprimido.

FUENTE: CAPS Y ABRIL (1999).

2.3.2 Procesos con agua caliente. Se han desarrollado autoclaves con agua en cascada a alta velocidad utilizando agua recalentada para esterilizar envases de alimentos. Unos de los más conocidos es el "Steriflow". Este tipo de autoclave se basa en la utilización de agua recalentada en cascada diseñada y fabricada por la empresa *Barriquand* de Francia. El calentamiento y enfriamiento se logran por flujo de agua recalentada a alta velocidad sobre los envases como se muestra en la FIGURA 3a y FIGURA 3b. En este caso el ciclo empieza cuando se acciona la bomba y empieza a mover el agua en el interior del equipo, que se va recalentando con vapor en contracorriente. Este proceso

calienta el agua en el interior del equipo que es esparcida en forma de ducha y recolectada por una cañería donde vuelve a ser recalentada, lo que involucra muchísimos ciclos o el tiempo que dure el proceso. Por una salida auxiliar va saliendo los condensando del vapor, en el caso de enfriamiento se usa esta misma cañería para que ingrese el agua de enfriamiento una vez que se ha cortado el ingreso de vapor al sistema. Este tipo de autoclaves tanto verticales como horizontales, que utilizan como medio calefactor agua calentada y control de sobrepresión, habitualmente son utilizando para la esterilización de envases de vidrio, y de bolsas. Se han diseñado distintos sistemas de control y se ha establecido el uso de agua recalentada para acortar el ciclo de calentamiento. Con estos sistemas es necesaria una circulación uniforme de agua y se requiere un control muy estricto dado que las bolsas se calientan rápidamente. En general estos equipos son muy usados en la actualidad para bolsas esterilizables, además cuentan con características tan avanzadas como:

- Temperatura homogénea
- Coeficiente óptimo de transferencia de calor
- Sin choque térmico
- Refrigeración con agua estéril
- Desarrollo del ciclo totalmente automático
- Contrapresión independiente de la temperatura
- Fabricación en acero inoxidable

Lo anterior muestra los beneficios de este tipo de autoclaves con agua recalentada en cascada⁵.

⁵ www.steriflow.com

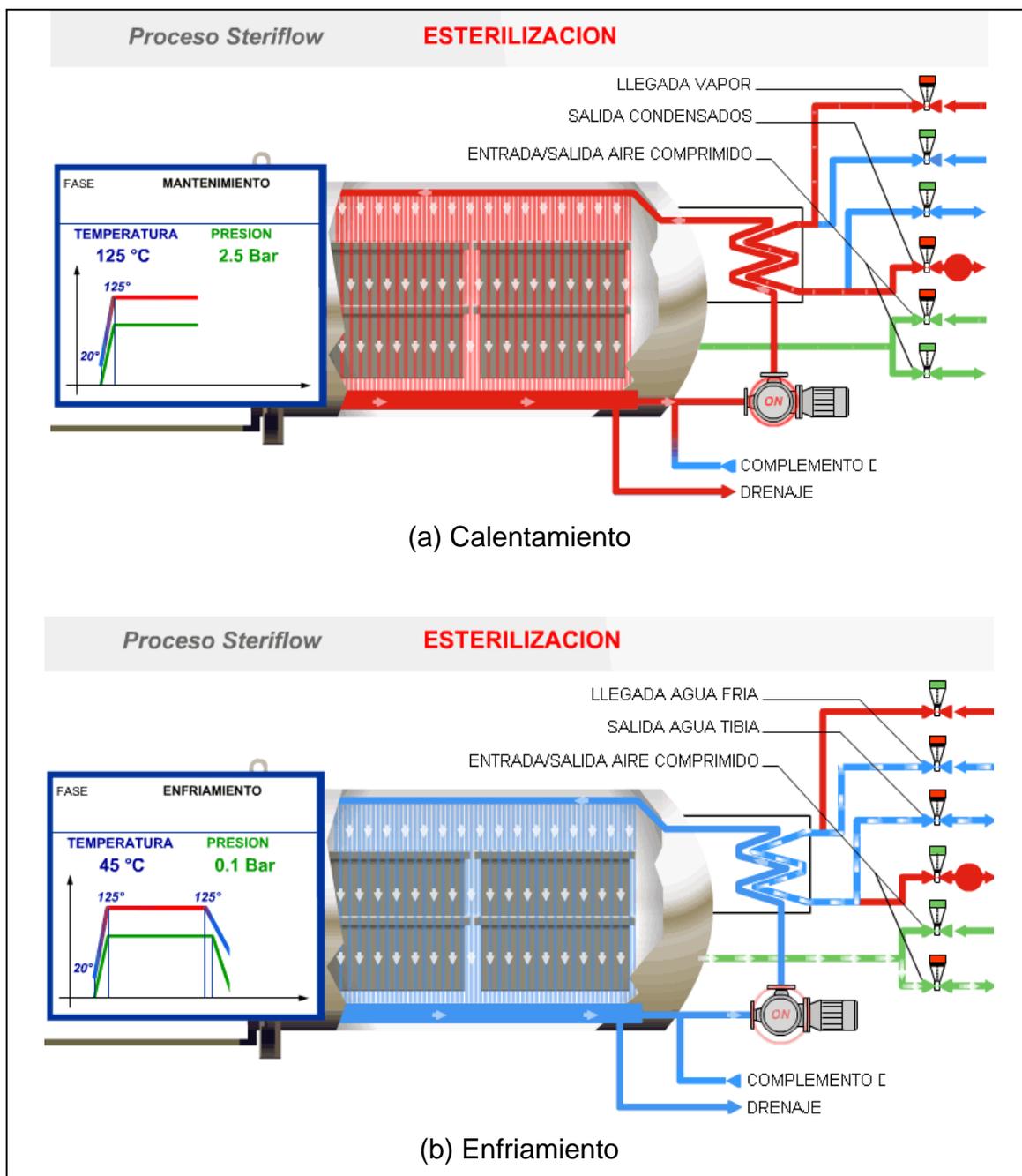


FIGURA 3. Proceso de esterilización con agua caliente.

FUENTE: <http://www.steriflow.com/es/14-proceso>

2.3.3 Proceso con mezcla vapor/aire. Las tres mayores clasificaciones de autoclave vapor/aire pueden ser identificadas sobre la base de los métodos

utilizados para mezclar y circular el medio gaseoso, dada esta clasificación se encuentran los autoclaves con: reposición de aire, flujo positivo y los de convección forzada (MITCHELL, 2002).

En la FIGURA 4, se muestra un esquema de autoclave con mezcla vapor aire, la única diferencia con el equipo de esterilización de vapor saturado, es que éste además cuenta con un sistema de aire comprimido auxiliar que suministra aire al sistema por la válvula (5), por válvulas neumáticas al sistema.

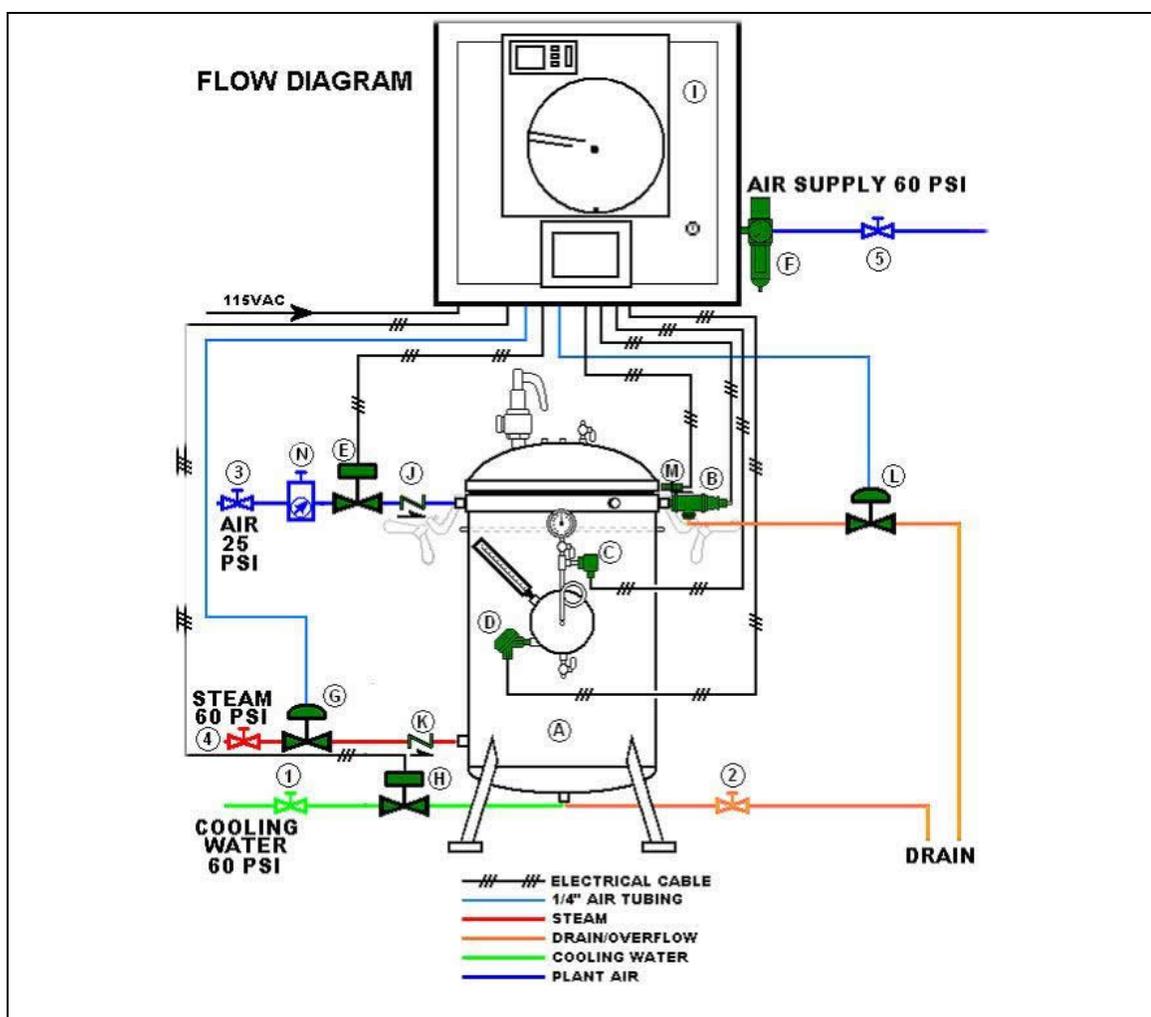


FIGURA 4. Esquema de un autoclave con vapor saturado y aire comprimido.

FUENTE: <http://www.dixiecanner.com/2060.htm>

2.3.3.1 Sistemas de reposición de aire. Son diseñados con el fin de proporcionar un venteo durante el calentamiento. Este se traduce en una caída de presión, lo que provoca que una válvula de aire se abra para reestablecer la presión. Al entrar aire, la temperatura tiende a descender, esta es una señal para la adición de vapor y por ende aumento de la presión (NUÑEZ, 2004).

Debido a las repetidas desviaciones de temperatura y presión, se vuelve dificultoso mantener estable las condiciones operativas. Además la adición de vapor en forma independiente puede producir un medio no homogéneo de calentamiento.

2.3.3.2 Sistemas de flujo positivo. Un controlador de temperatura opera una válvula de flujo proporcional en la línea de vapor, adicionando vapor de forma de mantener la temperatura requerida en el sistema, mientras un controlador de presión en la entrada de aire y líneas de venteo mantienen las condiciones de presión.

Una caída de presión provoca que la válvula de suministro de aire se abra y la válvula de venteo se cierre. En ese caso que la presión se exceda la válvula se cierra y el autoclave es venteadado.

2.3.3.3 Sistemas de convección forzada. Según NUÑEZ (2004), se utiliza una poderosa hélice para circular el medio de calentamiento y mantener una mezcla constante de vapor y aire con los envases. Durante este proceso, el vapor es agregado para reemplazar el que se ha condensado en la etapa de calentamiento. En la práctica, la razón normalmente usada para operar es de un rango de 75% vapor/ 25% aire a 95% de vapor /5% de aire dependiendo de la sobrepresión del aire en el autoclave. La razón aire-vapor es normalmente determinada por la temperatura del proceso y el tipo de envase que se está utilizando. Usualmente el vapor y el aire se premezclan antes de ingresar al

autoclave, pudiendo usar un tanque adicional, independiente del esterilizador para proporcionar aire a presión. El uso de este tipo de equipo ha permitido aumentar las densidades de carga e incrementar la producción en operaciones comerciales.

2.4 Transferencia de calor asociado a los procesos térmicos

2.4.1 Parámetros involucrados en la velocidad de transferencia de calor.

La velocidad de transferencia de calor esta determinada en el interior del objeto por sus propiedades termofísicas, y en el exterior por las características de medio circundante, temperatura y velocidad del fluido que tendrá efecto directo en la magnitud del coeficiente convectivo (SINGH y HELDMAN, 1993).

2.4.1.1 Propiedades termofísicas. Las propiedades termofísicas son dependientes de la temperatura según sea el alimento en estudio, lo que provoca una efecto directo en la velocidad de penetración de calor dentro de él. Por lo anterior para lograr un estudio exitoso de la transferencia de calor en estado transiente, su identificación y magnitud serán muy importantes así como la forma en la cual se expresan. CHOI y OKOS (1986), desarrollaron correlaciones matemáticas para calcular las propiedades termofísicas a partir de la composición proximal y temperatura.

2.4.1.1.1 Conductividad térmica (k). La conductividad térmica es una propiedad específica de un material, en alimentos esta propiedad no es constante y depende de la temperatura (SCHNEIDER, 1957). Hay una estrecha relación entre el contenido de agua y esta propiedad, excepto para aquellos productos vegetales considerablemente menos denso que el agua (SWEAT, 1974). Sin embargo, cuando el rango de temperatura es limitado, esta dependencia puede ser despreciada, y se asume que la conductividad no varía con la temperatura (CARSLAW y JAEGER, 1959).

La conductividad térmica de alimentos con un alto contenido de humedad tiene valores cercanos al de la conductividad térmica del agua (SINGH y HELDMAN, 1993).

2.4.1.1.2 Densidad (ρ). El comportamiento de la densidad de un alimento se ve afectada directamente por la temperatura, ya que ella produce una disminución en los valores de densidad a medida que su magnitud es mayor (LEWIS ,1990). La densidad por otra parte guarda directa relación con su contenido de agua, por definirse como la masa de partículas dividida por su volumen, lo cual nos señala que cualquier variación en el contenido de agua provocará un efecto en su magnitud.

2.4.1.1.3 Calor específico (C_p). El calor específico depende de la composición del alimento, su contenido de humedad, temperatura y presión. Sin embargo, en muchas aplicaciones de procesamiento de alimentos, normalmente se considera que esta propiedad permanece constante en el intervalo de temperatura de trabajo (SINGH y HELDMAN, 1993). En el proceso de calentamiento y enfriamiento transiente sin cambio de fase, el calor específico de un material establece la capacidad de absorber o remover calor, según sea calentamiento o enfriamiento, respectivamente (SCHNEIDER, 1957).

2.4.1.1.4 Difusividad térmica (α). Esta propiedad puede ser expresada en término de las tres anteriores según la siguiente ecuación (SINGH, 1982):

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad (2.1)$$

Al igual que las propiedades mencionadas anteriormente, la difusividad térmica juega un rol importantísimo en el diseño y análisis de procesos de alimentos e incluso en el diseño de los equipos utilizados en ellos. 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.

En productos no homogéneos el valor de la difusividad térmica puede variar según la posición, por sencilla razón de que las otras tres variables involucradas no podrían ser consideradas constantes. SINGH (1982) establece que el efecto que produce el agua y la temperatura sobre el valor de la difusividad térmica es tal que deben ser considerados al momento de comenzar a establecer una metodología para su cálculo. En estudios realizados por CHOI y OKOS (1986), se guarda esta relación (contenido de agua y temperatura), para establecer los modelos propuestos para determinar estas propiedades termofísicas.

2.4.1.2 Coeficiente global de transferencia de calor. Los cálculos de transferencia de calor se basan en el área de la superficie de calentamiento y se expresan watts por metro cuadrado o Btu por hora por pié cuadrado de la superficie a través de la cual fluye el calor. La velocidad de transferencia de calor por unidad de área recibe el nombre de flujo de calor (MACCABE, 2002).

Generalmente en alimentos se habla de coeficiente convectivo de transferencia de calor, que es el parámetro que representa la resistencia a la transferencia de calor, entre un fluido de calentamiento o enfriamiento en la superficie del alimento; por ello controla la velocidad de intercambio de calor entre el medio que lo circunda y el producto (GAFFNEY **et al.**, 1985). Debido a lo citado anteriormente es evidente su importancia y determinación para el cálculo de la cinética de calentamiento y enfriamiento.

Para el caso de alimentos envasados al vacío en bolsas esterilizables y como existe una resistencia adicional a la transferencia de calor dada por el envase, se utiliza el **Coeficiente Global de Transferencia de Calor (U)**.

2.5 Tratamiento térmico.

2.5.1 Evaluación del tratamiento térmico. La inactivación de microorganismos mediante calor es una operación fundamental en la preservación de alimentos. Los conceptos y procedimientos desarrollados en la *Teoría de Cálculo de Procesos Térmicos*, son aplicables a cualquier proceso donde el calor es utilizado para inactivar microorganismos e inducir cambios (MORALES-BLANCAS y TORRES, 2003a).

El cálculo de los procesos térmicos requiere del conocimiento de los parámetros cinéticos que describen el impacto de las temperaturas con importancia letal en la inactivación de microorganismos. Existen dos conceptos aplicados en el cálculo del valor F requerido que asegure el proceso de esterilización: por un lado tenemos lo que se llama **esterilización comercial** y por otro el **esporulamiento económico**. La diferencia entre ellas es que la primera generalmente se usan los parámetros cinéticos de bacterias como el *Clostridium botulinum* y la segunda bacterias altamente resistentes como el *Bacillus stearothermophilus* (PFLUG.1987).

PFLUG (1987), señala un modelo empírico en la ecuación (2.2), que expresa el valor F_T como múltiplo del valor D , esta ecuación es extensamente usada en termobacteriología, para determinar el tiempo necesario o requerido asegurando una concentración final de esporas que cumpla según sea el caso con la “esterilidad comercial” o con el “esporulamiento económico”.

$$F_{T_{Ref}}^z = D_{T_{Ref}} \cdot (\log N_0 - \log N_f) \quad (2.2)$$

El **valor D** está relacionado con la disminución de la carga microbiana, es decir, es un tiempo en el cual se disminuye en un 90% o se reduce un ciclo logarítmico la carga microbiana inicial y por otro lado el **valor z** es el incremento en temperatura necesario para obtener el mismo efecto letal reduciendo 10 veces. Además este valor proporciona información sobre la resistencia relativa a la destrucción de un microorganismo a diferentes temperaturas. Por otro lado N_0 y N_f , son respectivamente el recuento inicial y final en el alimento evaluado.

En el caso de *C. botulinum* PFLUG (1987), recomienda los siguientes parámetros cinéticos para el cálculo del valor F_0 . $D_0 = 0,2$ minutos; $N_0 = 10^4$; $N_f = 10^{-9}$, lo que implica una reducción logarítmica de 13 ciclos. Aplicando la ecuación (2.2), se tiene lo siguiente:

$$F_0 = 0,2 \cdot (10^4 - 10^{-9}) = 2,6 \text{ min}$$

Este valor puede variar de acuerdo a los parámetros utilizados.

En el CUADRO 1, se muestran diferentes valores de F_0 para 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 (minutos)
1. Salud pública	3
2. Preservación (Esporulamiento económico)	
a) Esporas mesófilas	5 – 7
b) Esporas termófilas	
Almacenadas y distribuidas a temperatura ambiente - Área (10^{-3}).	5 – 7
Almacenadas y distribuidas a temperatura ambiente - Área (10^{-6}).	15 - 21

FUENTE: PFLUG (1987)

Por tanto los métodos de obtener un valor F_0 (min), de una curva tiempo-temperatura se basan en el cálculo del área bajo la curva. Actualmente el método mas empleado por los ingenieros de procesos, es la integración numérica donde una de las técnicas o métodos mas usado es el “**Método de Simpson**”. Este método se basa en las siguientes ecuaciones que describen por separado el calentamiento y enfriamiento (MORALES-BLANCAS y TORRES, 2003b).

$$F_p = \int_{t_0}^{t_g} \frac{dt}{10^{\frac{T_{ref}-T(t)}{z}}} + \int_{t_f}^{t_g} \frac{dt}{10^{\frac{T_{ref}-T(t)}{z}}} \quad (2.3)$$

2.5.2 Esterilización comercial. Según el Reglamento Sanitario (CHILE, MINISTERIO DE SALUD, 2003), define la esterilización comercial como el estado que se consigue aplicando calor suficiente, solo o en combinación con otros procesos de conservación de alimentos, que aseguren la destrucción de formas viables de microorganismos patógenos y de otros microorganismos esporulados capaces de alterar el producto y que pudieran multiplicarse a temperatura ambiente, durante su almacenamiento y distribución.

La base para establecer los procesos térmicos para conservas de alimentos es un conocimiento profundo de la microbiología de los alimentos y de los métodos de cálculo en termobacteriología. La determinación de la temperatura y el tiempo necesario para esterilizar un alimento envasado, ha sido el punto de mayor estudio en el desarrollo de la industria del enlatado. El procedimiento para la determinación del proceso no es sencillo. Depende del conocimiento de un número de factores entre los que se incluyen la naturaleza del producto, las dimensiones del envase en el cual se envasará el alimento y los detalles de los procedimientos de procesamiento térmico usados y supervivencia y resistencia al calor de los microorganismos que contaminan el alimento (NUÑEZ, 2004). En la FIGURA 5, se muestra una curva típica de esterilización de un producto,

indicando sus diferentes etapas de proceso que la caracterizan como tal. La primera etapa del proceso denominada **CUT** (*Come-up time*) ó tiempo de elevación de la temperatura, es el tiempo que transcurre desde que entra el vapor (t_0) al autoclave ya cerrado, hasta alcanzar la temperatura de trabajo o temperatura de esterilización (t_{CUT}). La segunda etapa, denominada **tiempo de esterilización** o también conocida en literatura como **tiempo del operador**, es el tiempo en el cual el producto o en este caso la conserva se encuentra sometida a la temperatura de esterilización o trabajo, que va desde t_{CUT} (tiempo inicial deL operador), hasta t_g (tiempo final del operador). La tercera etapa y final conocida como **tiempo de enfriamiento**, como su nombre lo indica es el tiempo que demora el producto en bajar su temperatura desde la temperatura de proceso o esterilización (t_g), hasta alrededor de 35 °C aproximadamente que es la tiempo final del proceso (t_f),

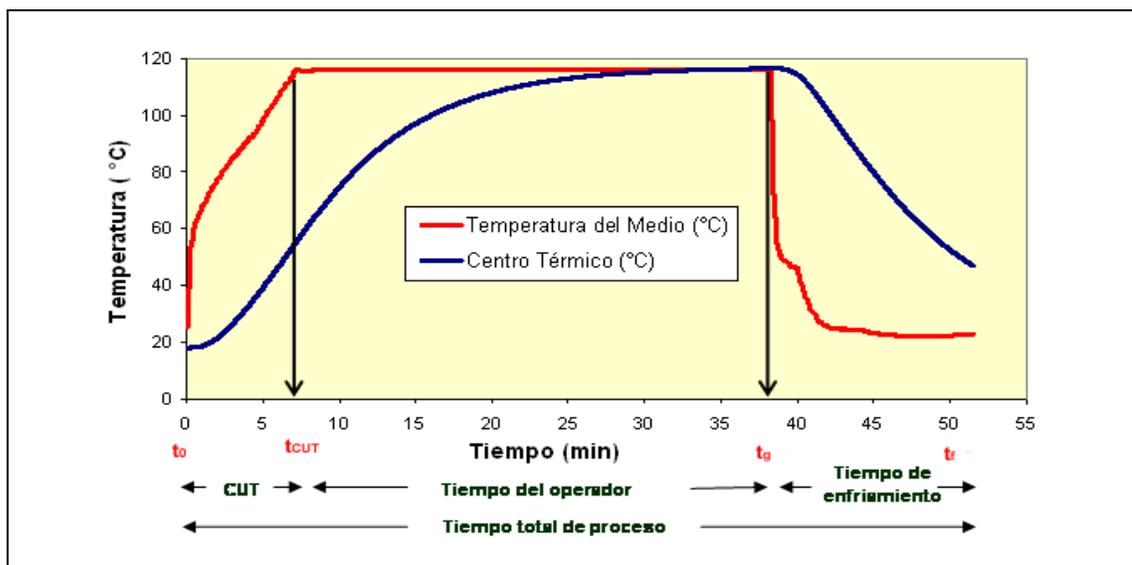


FIGURA 5. Curva típica de esterilización

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

2.5.3 Criterios de esterilización. Los alimentos pueden ser de baja acidez ($4,5 < \text{pH} < 7$), ácidos ($3,7 < \text{pH} < 4,5$) o muy ácidos ($\text{pH} < 3,7$) (NUÑEZ, 2004).

- Los alimentos de baja acidez (carne, lácteos, hortalizas) requieren un tratamiento térmico relativamente severo, ya que a pH mayores de 4,5 se desarrolla el *C. botulinum*, microorganismo que produce una toxina letal.
- Los alimentos ácidos (durazno, peras, naranjas y tomates) pueden presentar bacterias acidúricas de baja resistencia térmica, y otras bacterias, levaduras y hongos. El *C. botulinum* no puede desarrollarse. En estos casos el microorganismo patrón utilizado generalmente es el *Bacillus coagulans*.
- Los alimentos muy ácidos (encurtidos, fermentados, mermeladas) pueden ser atacados por bacterias acidúricas, levaduras y hongos, pero generalmente tienen baja resistencia al calor. Se puede utilizar como microorganismo patrón bacterias del tipo mesófilas, pertenecientes por ejemplo al género *Lactobacillus*.

Los alimentos con pH menores a 4,5 ofrecen mayor seguridad aunque los hongos pueden mediante su metabolismo disminuir la acidez durante el almacenamiento, aumentando el pH y creando condiciones para el desarrollo de las esporas del *C. botulinum*.

2.6 Modelación matemática en alimentos utilizando métodos numéricos.

Las modelaciones matemáticas usando elementos finitos para condicionar y simular diversos procesos térmicos, es un método que tiene varios años de aplicación. A continuación se mencionan algunos autores que han usado en sus investigaciones el FEM:

MAO **et al.** (2005) analizaron experimentalmente la transferencia de calor por microondas en kamaboko. Asimismo el Método de Elementos Finitos fue usado para solucionar la ecuación de transferencia de calor por conducción. Las predicciones del modelo numérico mostraron una buena concordancia con los datos experimentales.

GUSTAFSON **et al.** (1979) usaron el Método de Elementos Finitos en el estudio de la transferencia de calor transiente (calentamiento y enfriamiento) y la influencia de la temperatura sobre las propiedades mecánicas de las regiones no homogéneas (endospermo y germen) del germen de maíz.

HONMING **et al.** (1987) usaron el Método de Elementos Finitos para la transferencia de calor durante el preenfriamiento de un tallo de brócoli “simplificado”, considerándolo como un cono truncado.

ALAGASUNDARAM **et al.** (1990) calcularon la distribución de temperatura en granos durante el secado y aireado en un silo usando métodos numéricos. La ecuación transiente de conducción de calor fue resuelta para tres dimensiones. Utilizaron el Método de Elementos Finitos para el caso de transferencia de calor no lineal y anisotrópica.

POTLURI (1985), desarrollaron un modelo de Elementos Finitos dependiente del tiempo en dos dimensiones para predecir el enfriamiento de canales de vacuno.

HAYAKAWA y SUCCAR (1982), utilizó un modelo de elementos finitos unidimensional para describir la transferencia de calor y la pérdida de humedad en productos frescos de forma esférica. La ecuación de conducción de calor fue usada en coordenadas esféricas para modelar la generación de calor producida por la respiración del producto.

MISRA **et al.** (1979) modelaron el enfriamiento de una manzana en coordenadas esféricas. Se predijo la distribución temperatura usando una formulación de Elementos Finitos unidimensional y dependiente del tiempo. En la investigación se usaron elementos lineales de dos nodos. El modelo numérico fue validado comparando los valores de temperatura predecidos con

los valores obtenidos mediante una solución analítica. Los resultados obtenidos fueron estadísticamente diferentes en relación al modelo analítico.

Ha sido largamente estudiado el proceso térmico de alimentos envasados en envases de hojalata con el propósito de evaluar y optimizar procesos (STUMBO, 1973). Sin embargo, en la actualidad y la importancia ascendente que tiene la bolsa esterilizable, es de mucha relevancia estudiar el comportamiento de dicho envase en el proceso de esterilización comercial en relación a los parámetros estudiados para otros tipos de envases (SIMPSON **et al.**, 2004).

En una extensa búsqueda por la literatura especializada, sólo aparecen tímidas aproximaciones en el estudio de la transferencia de calor transiente en bolsas esterilizables simulando condiciones reales de proceso.

CRISTIANINI y RODRIGUEZ (2002), evaluaron la transferencia de calor en bolsas esterilizables. Ellos indican que muchos estudios al respecto consideran como modelo geométrico un paralelepípedo, lo que implica que los cálculos pueden estar sobredimensionados resultando un sobreprocesamiento del alimento con una innecesaria degradación de los atributos sensoriales. Estos autores consideran en su investigación, un modelo geométrico no regular, tal modelo se basa básicamente en una geometría muy parecida a lo que se conoce como un paralelepípedo ($c > b > a$), con la salvedad que su modelo lo presentaron de forma que sus bordes convergen de la siguiente manera: los lados c y b convergen hacia aproximadamente un punto medio de su espesor (FIGURA 6).

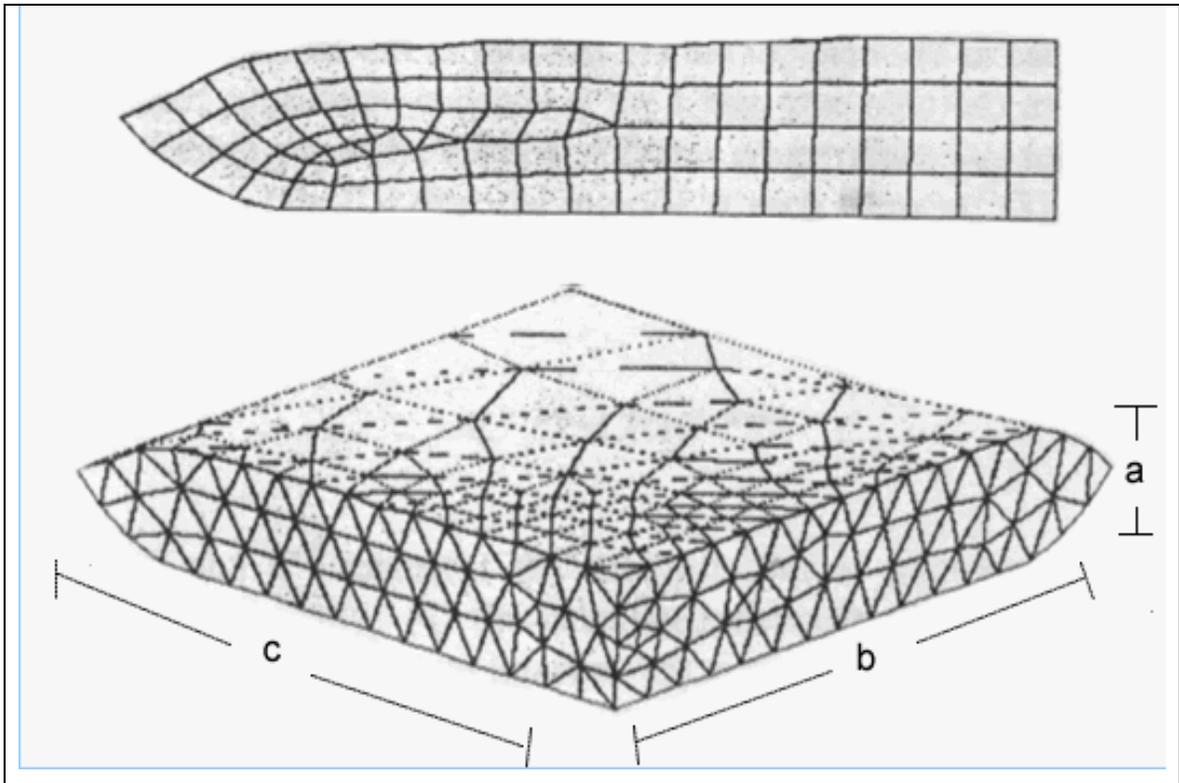


FIGURA 6. Modelo geométrico usado por CRISTIANINI (2002), para el análisis de transferencia de calor en bolsas esterilizables.

FUENTE: CRISTIANINI y RODRIGUEZ (2002).

SIMPSON *et al.* (2004) en sus investigaciones de aplicaciones de la modelación matemática en bolsas esterilizables consideran sus modelos geométricos como conos truncados, lo que implica que no existe asimetría geométrica y por lo demás no consideran la asimetría térmica en un proceso de esterilización en autoclaves.

Por lo tanto hasta el momento existen varias suposiciones en esta área que no han podido ser obviadas en estas últimas investigaciones, lo que en la presente investigación será motivo de análisis y discusión.

2.7 Diseño asistido por computador (CAD).

Básicamente el término se refiere a lo que en inglés se denomina *Computer-Aided Design*, Diseño o Dibujo Asistido por Computador. Este método es la combinación de hardware y software que permite a ingenieros crear los más diferentes modelos físicos a partir de uno real o bien modelar geoméricamente uno hasta llegar a uno establecido en los planos o en la conciencia del usuario (RODRIGUEZ, 2005).

El CAD ha permitido a la gente fácilmente modelar, crear y recorrer o ver diseños de objetos 3D desde diferentes ángulos en un computador sin siquiera tomarse el tiempo de fabricar un prototipo físico. Es una gran herramienta que ahorra tiempo y ha revolucionado el diseño en general. Por lo tanto el crear prototipos computacionales (modelos digitales) es una alternativa emergente a los prototipos físicos. En los prototipos computacionales, se construye un modelo digital que es cercano al modelo físico donde la forma, el tamaño y otros parámetros son exactos. Se ha demostrado que un modelo digital preciso puede trabajar de modo similar a un prototipo físico y puede ser utilizado por las tecnologías CAD y CAE (MACIVER y NELSON, 2000).

2.7.1 Modelo geométrico. Cuando se logra crear la geometría mediante el diseño por computador es lo que se denomina **modelado geométrico**. Con la tecnología CAD, como se mencionó en el apartado anterior, permite crear un modelo geométrico desde uno regular o completamente irregular. Generalmente estos modelos necesitan ser retocados. El retoque y la manipulación del modelo con teclado y ratón es a través de los puntos de control del modelo es lo que se denomina **modelación geométrica**.

Esta técnica de difícil dominio, permite manipular cambiar formas, cortar, suavizar bordes, finalmente en el caso de las bolsas esterilizables crear un

sólido, hasta con el mas mínimo detalle como es el caso del espesor.

Hay cuatro métodos de representar o modelar la geometría del objeto: alámbrico (*Wireframe*), superficies, sólido y geometría paramétrica. La forma más básica es el modo alambre que representa los bordes internos y externos del objeto conectados mediante líneas rectas y curvas, que también se le conoce como Método B-rep (*Boundary representation*). Las superficies definen la forma interna y externa del modelo, mientras que el sólido representa el volumen del objeto. La geometría paramétrica utiliza ecuaciones definidas por el usuario para cambiar la geometría asociada (MOLERO, 2001).

2.7.1.1 Figuras geométricas regulares e irregulares complejas. Un cuerpo geométrico se define como una figura geométrica tridimensional, es decir, que se proyecta en tres dimensiones: largo, ancho y alto. Debido a esta característica existe en el espacio pero se halla limitado por una o varias superficies. También se le denomina sólido. Los diferentes sólidos se pueden clasificar en poliedros y cuerpos redondos (PEREZ, 2004). Más información de la clasificación de estas geometrías la reporta RODRIGUEZ (2005).

2.7.1.2 Ingeniería Reversa. Según RODRIGUEZ (2005), el término de "*diseño en 3D*" es la creación de los modelos CAD, en el computador. Pero a la vez si se quiere reproducir un modelo del mundo real, la tecnología CAD no es la más adecuada en términos de la modalidad de diseño en 3D, debido a la complejidad y tiempo que demoraría en completar el modelo, sin descartar la no fidelidad del modelo real. Es por esto que actualmente se ha recurrido a la obtención de manera digital de la forma física exacta de un objeto, mediante la llamada Ingeniería Reversa.

Para comprender el término de ingeniería reversa consideraremos que mientras la ingeniería convencional transforma conceptos y modelos en partes reales, la

ingeniería reversa es aquella disciplina que toma esas partes reales y las transforma en conceptos y modelos (VÁRADY *et al.*, 1997).

Según (VARÁDY *et al.*, 1997), la ingeniería reversa se caracteriza por 4 pasos fundamentales.

- **Captura de datos:** Es la interacción que se tiene con el modelo físico específicamente con la superficie del objeto en análisis. Según (PINO, 2004) para esta interacción existen métodos táctiles o de contacto.
- **Preprocesamiento:** Es el resultado en términos de conjunto de datos, este conjunto de datos es una conexión de puntos, de manera tal que constituyan una estructura ordenada denominada superficie (RODRIGUEZ, 2005).
- **Segmentación y adecuación de superficie:** Con la ordenación del conjunto de puntos se procede a una segmentación que los divide en subconjuntos donde cada división incluyen aquellos puntos que contienen los datos que forman la superficie en particular, procediendo a clasificarlos y decidir que tipo de superficie corresponde.
- **Creación del modelo CAD:** Con la finalización de las etapas anteriores se obtiene lo que se llama el modelo digital tridimensional.

Básicamente la ingeniería reversa es un proceso para generar un modelo a partir de sus propiedades. Este método es exitoso utilizado en dominios donde las propiedades puede ser cuantificables, tales como la optimización de partes mecánicas bajo altos niveles de stress y tienen una aplicación cada vez mas difundida en sistemas computacionales CAD⁶/CAM⁷/CAE⁸ (BOSINCO *et al.*, 1998).

⁶ Computer-Aided Design, Diseño Asistido por Computador

⁷ Computer-Aided Manufacturing, Fabricación Asistida por Computador

⁸ Computer-Aided Engineering, Ingeniería Asistida por Computador

La metodología como tal se inicia en el análisis de un objeto, del cual la superficie puede deducirse en un modelo digital idéntico, explotando el uso de la tecnología CAD, ya que debido a las extensas ventajas que proporciona el uso del computador con dicha tecnología, se ve aumentada la eficiencia, calidad de diseño, fabricación y análisis del objeto a ser estudiado (BORDEGONI y FILIPPI, 2001).

Finalmente esta metodología produce una copia integra o solo una parte del objeto, cuando no hay disponible modelos o documentación que se ajusten de manera exacta a los requerimientos que se necesiten, o cuando se vea imposibilitado el obtener de manera precisa una replica del objeto existente, cuando es necesario realizar un análisis o alguna modificación para su estudio.

2.7.1.3 NURBS (Non-Uniform Rational B-Splines). Estas son representaciones matemáticas de geometría en 3D capaces de describir cualquier forma con precisión, desde simples líneas en 2D, círculos, arcos o curvas, hasta los más complejos sólidos o superficies orgánicas de formas libres en 3D. Las NURBS como tal se utilizan ampliamente en la industria del CAD y mas en computación para la generación de elementos 3D.

En resumen una curva NURBS es un vector que evalúa la parte discreta de una función polinomial racional, siendo utilizada para definir la superficie de un modelo digital 3D con métodos de interpolación, adecuación y diseño seccional cruzado (PIEGL, 1991).

Una curva de ellas se define mediante tres elementos: puntos de control, grados y nodos.

PINO (2004), describe estos tres elementos de la siguiente manera:

- **Puntos de control:** son una serie de puntos que controlan la geometría NURBS. Excepto por lo puntos extremos de la curva (o punto final si es una curva cerrada), esos puntos de control están alejados de la curva (FIGURA 7) Actúan como imanes atrayendo a la curva hacia sí mismos, y cuando uno de ellos es movido, la curva cambia para acomodarse a la nueva localización del punto de control.
- **Grado:** Referente al grado del polinomio usado para crear la curva y determina la fuerza con la que el punto de control atrae a la curva.
- **Nodos:** Cada función base afecta sólo a la sección de la curva próxima al punto de control, y los extremos de dichos segmentos se denominan **nodos**. El NURBS significa no-uniforme, y se refiere al espaciado desigual de nodos (WILSON, 2001).

Si se cambia cualquier uno de los factores antes mencionados, cambia la forma de la curva (RHINOCEROS, 2006).

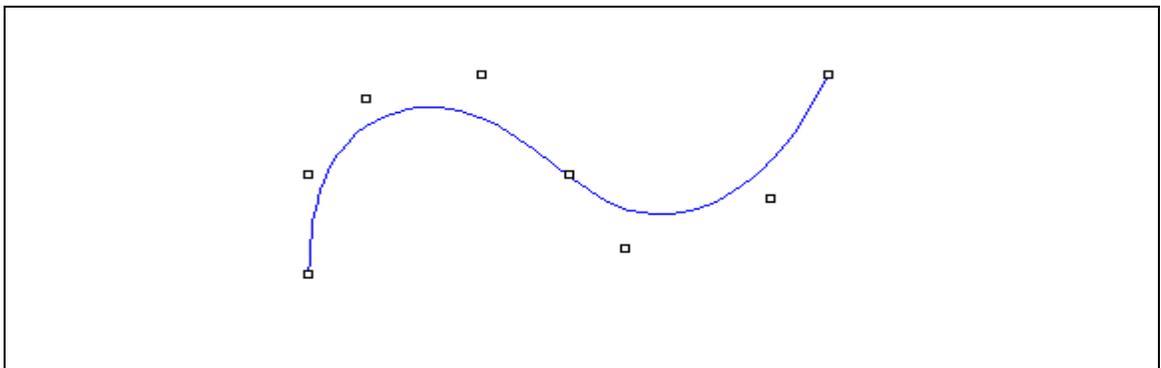


FIGURA 7. Curva NURBS (azul) con sus puntos de control (negro).

FUENTE: RHINOCEROS (2006).

2.7.2 Digitalización 3D. La recuperación de la forma a partir de muestreos de puntos (x , y , z) de la superficie externa de objetos como parte esencial de una metodología de ingeniería reversa es conocida como digitalización tridimensional y tiene aplicaciones no sólo en diseño de productos, sino en

áreas hasta ahora más remotas como medicina, antropometría, entretenimiento y simulación de fenómenos físicos superficiales. Así, considerando los beneficios y limitaciones de los datos digitalizados, la aplicabilidad de esta técnica puede ser considerada en variados casos de estudio (WILHITE, 2003).

Uno de los factores determinantes en una buena digitalización tridimensional es la calibración, definiendo un origen asociado al sistema de digitalización que coincida con las coordenadas originales para toda la digitalización. Una vez terminada esta operación de calibración es posible iniciar el proceso de adquisición de coordenadas tridimensionales con vista a generar la superficie (ALMEIDA *et al.*, 2000).

En el análisis de imágenes digitales 3D, las medidas son sólo posibles cuando ellas están basadas en mallas de datos regularmente capturados de un sólido dado, asumiendo que los datos fueron definidos por un apropiado esquema de digitalización y una adecuada resolución de malla (KEMOCHI y KLETTE, 2000).

Al obtener los parámetros requeridos se pueden obtener correlaciones con otros parámetros fácilmente medibles, tales como masa, volumen y medidas dimensionales del objeto, las cuales forman la base para muchos modelos de predicción, útiles en la aplicación de la tecnología CAE y en la simulación computacional de procesos (CLAYTON *et al.*, 1995).

La reconstrucción de superficies partiendo de un conjunto de puntos, incluye la adquisición de datos, reconstrucción topológica, y continuidad requerida para cada aplicación (prototipos rápidos, despliegue, cálculo de parámetros de forma, etc.). La geometría del objeto determina el tipo de muestreo y la mayor eficiencia de unos métodos sobre otros. De este mismo modo los datos de salida determinan el proceso de reconstrucción de la superficie (PINO, 2004).

2.7.3 Intercambio de Datos CAD/CAE. Hasta antes de los años 80 los usuarios se encontraban abrumados por la imposibilidad de compartir datos de un sistema CAD (de diseño) a un CAM (fabricación) ó CAE (ingeniería). Se hizo así evidente la necesidad de intercambio de datos que posibilitaran la integración y automatización CAD/CAM/CAE.

En el desarrollo de formatos de intercambio se han preocupado varias organizaciones internacionales, como **ISO** (International Standards Organization), **ANSI** (American National Standards Institute) y **DIN** (Deutsches Institut für Normung).

En la actualidad existen numerosos formatos de intercambio de datos, algunos de ellos son normas internacionales y otros son normas nacionales. Así, nos encontramos con formatos orientados a diseño tales como IGES, VDA, SET; formatos orientados a fabricación, como APT, CLDATA, código ISO, etc; formatos de inspección, como DEAPL, DMIS, etc. (BARREIRO **et al.**, 1999).

Hoy en día los paquetes de software incluyen herramientas que posibilitan el intercambio de datos desde un software CAD a uno CAE, sin necesidad de exportar el archivo en un formato universal. Los archivos CAD en su forma nativa pueden ser abiertos directamente en los software CAE de análisis, asegurando la integridad de los datos del modelo que a veces se sacrifica cuando se traduce la geometría a formatos universales como IGES o ACIS.

2.8 Ingeniería asistida por computador (CAE): simulación de procesos.

CAE es el acrónimo en inglés de *Computer-Aided Engineering*, Ingeniería Asistida por Computador. El CAE es un sistema que permite a los ingenieros analizar y simular en un ordenador los modelos que piensan o serán puestos en práctica, con el objetivo de ver su validez sin incurrir en costos de fabricación.

Esto es muy importante ya que una simulación ahorra muchos costos, tanto en dinero como en tiempo, que significa construir prototipos físicos, realizar pruebas de laboratorio y planta piloto. Según RODRIGUEZ (2005), sugiere que en una etapa final un modelo debe ser siempre válido experimentalmente con un prototipo físico llevado a condiciones reales.

En si CAE y la simulación de procesos se define como una herramienta poderosa que combina información geométrica con información funcional para realizar análisis de ingeniería (RODRIGUEZ, 2005).

La simulación de procesos es una de las más grandes herramientas de la ingeniería industrial, la cual se utiliza para representar un proceso mediante otro que lo hace mucho más simple y entendible. Esta simulación es en algunos casos casi indispensable, y en otros casos no lo es tanto, pero sin este procedimiento se hace más complicado (ALFARO, 2003).

Hoy en día la simulación es un proceso cotidiano en las grandes industrias, puede ser desde la producción de textiles, alimentos, juguetes, construcción de infraestructuras por medio de maquetas, hasta el entrenamiento virtual de los pilotos de combate. La simulación, además, puede ayudar a resolver asuntos relacionados con el diseño de nuevos sistemas o modificación de los existentes. Esto se fundamenta en que las inversiones o su modificación son costosas y, a través de la simulación, se puede experimentar qué beneficios trae la implementación de estos cambios a un reducido costo (RODRIGUEZ, 2005).

2.8.1 Análisis de elementos finitos. Muchos de los fenómenos que suceden en la naturaleza y en la vida cotidiana pueden ser descritos mediante modelos matemáticos. La complejidad de dicho modelo depende del fenómeno que se desea describir. Algunos de estos modelos se pueden escribir en términos de ecuaciones diferenciales parciales, y en la gran mayoría la solución exacta a

estas ecuaciones no existe hasta nuestros días. La alternativa es usar métodos numéricos para *aproximar* la solución. Dados los avances en la tecnología de los computadores digitales, muchos problemas, cuya solución analítica no se conoce, han podido ser simulados mediante métodos numéricos con bastante precisión (DE LA CRUZ, 2002).

Los primeros matemáticos ya habían empleado "Elementos Finitos" para determinar un valor aproximado de (π) . Arquímedes usó ideas similares para determinar el área de las figuras planas. Este hecho dio las primeras premisas para el desarrollo de cálculo integral. El desarrollo de los primeros ordenadores digitales durante la década de 1950, permitió la aplicación del método de elementos finitos a la solución de ecuaciones diferenciales.

Sistemas físicos **continuos** del mundo real, tales como el flujo de aire alrededor de un avión, la concentración de esfuerzos en una prensa, el campo eléctrico en un circuito integrado, la concentración de especies químicas en un reactor, y en nuestro caso, la transferencia de calor, son generalmente modelados matemáticamente usando ecuaciones diferenciales parciales. Para realizar simulaciones en un computador, las ecuaciones deben pasar del sistema continuo a un sistema **discreto**, es decir, ser "**discretizadas**" sobre un número finito de puntos del espacio (y tiempo) donde variables como velocidad, densidad, campo eléctrico, temperatura, entre otras, serán calculadas. Los métodos usuales de discretización, como Diferencias Finitas, Volúmenes Finitos y Elementos Finitos, utilizan puntos vecinos para calcular derivadas y logrando el concepto de *malla* sobre la cual se realizan los cálculos (DE LA CRUZ, 2002).

Este método ha facilitado en gran medida la solución de los sistemas de ecuaciones lineales, lo que representa un retorno a los procedimientos tradicionales de cálculo. Estos métodos matriciales implican un gran número de operaciones reiterativas particularmente adecuadas para el cálculo automático y

han sido formuladas con el fin de obtener las mayores ventajas de los ordenadores (LARA, 2000).

El concepto fundamental del Método de Elementos Finitos (FEM, *Finite Element Method*) es que cualquier variable *continua*, como temperatura, presión, o desplazamientos, puede ser aproximada por un modelo *discreto* compuesto por un juego de funciones continuas por trozos, definidas sobre un número finito de subdominios (SEGERLIND, 1976).

El Método de Elementos Finitos de forma simple consiste en convertir el sólido en un número finito de partes llamadas **elementos** cuyo comportamiento se especifica con un número finito de parámetros. Dichos elementos contienen una serie de puntos interconectados entre sí llamados **nodos** y el conjunto se conoce como **mall**a (ALDAYA, 1998). Dicho de otra forma, una región compleja que define un dominio continuo es discretizada en formas geométricas simples llamadas *elementos* (FIGURA 8). Las propiedades y las ecuaciones de gobierno son asumidas sobre estos elementos y expresadas matemáticamente en términos de valores desconocidos en puntos específicos, llamados *nodos*.

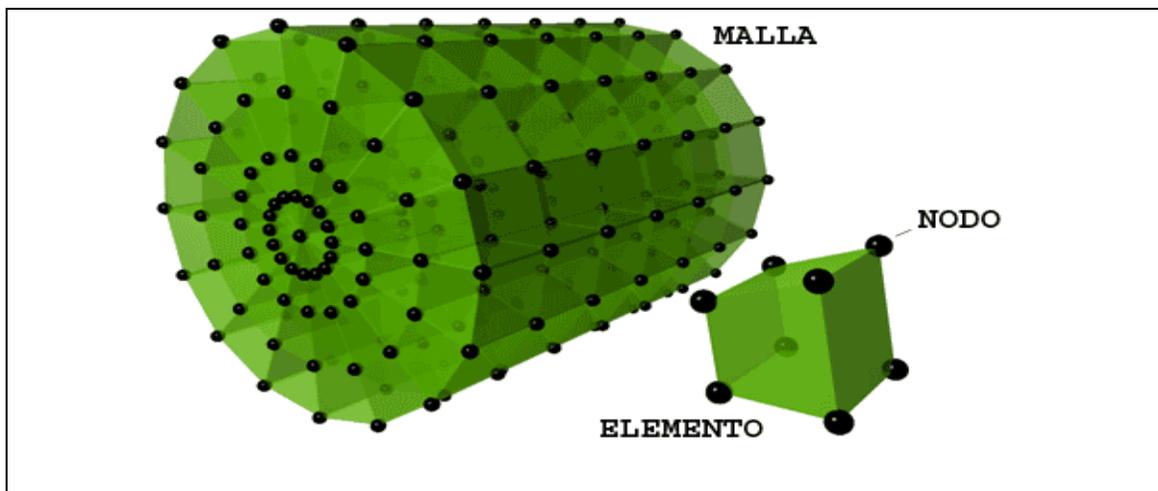


FIGURA 8. Nodos y elementos en un modelo cilíndrico.

FUENTE. ALGOR (2006).

Un proceso de *ensamblaje* es usado para conectar los elementos individuales al sistema dado. Cuando se consideran los efectos de las cargas y condiciones de frontera, usualmente se obtiene un juego de ecuaciones algebraicas lineales o no lineales. La solución a estas ecuaciones da el comportamiento *aproximado* del dominio o sistema continuo. El dominio continuo tiene un número *infinito* de grados de libertad, mientras que el modelo discretizado tiene un número **finito** de éstos. Este es el origen del nombre del Método de Elementos Finitos (BARTON y RAJAN, 2000).

Para definir el comportamiento en el interior de cada elemento se supone que dentro del mismo, todo queda perfectamente definido a partir de lo que sucede en los nodos a través de una adecuada función de *interpolación* (ALFARO, 2003).

Dos características del FEM merecen ser mencionadas:

- La aproximación mediante un número de intervalos discretos del campo físico (dominio continuo) en los elementos finitos proporciona una buena precisión aun con funciones de aproximación simples. Simplemente aumentando el número de elementos se puede conseguir aumentar la precisión.
- El lugar de la aproximación lleva a escasos sistemas de ecuaciones para un problema discretizado. Esto ayuda a facilitar la solución de problemas que tienen un número muy grande de incógnitas nodales (BARTON y RAJAN, 2000).

El concepto fundamental del FEM puede ser ilustrado más fácilmente usando un ejemplo unidimensional de la distribución de temperatura en una aleta, como se muestra en la (FIGURA 9). La función continua es $T(x)$ y el dominio es el intervalo $0,L$ a lo largo del eje x . Cinco puntos a lo largo del eje x son definidos y rotulados (FIGURA 10a). Estos puntos son los nodos; ellos no tienen que estar igualmente espaciados. Podrían haberse definido más de cinco puntos, pero

estos cinco son suficientes para ilustrar los conceptos básicos. Los valores de $T(x)$ son luego especificados en cada nodo. Estos valores se muestran gráficamente en la (FIGURA 10b) y son rotulados para coincidir los números de los nodos, T_1, T_2, \dots, T_5 .

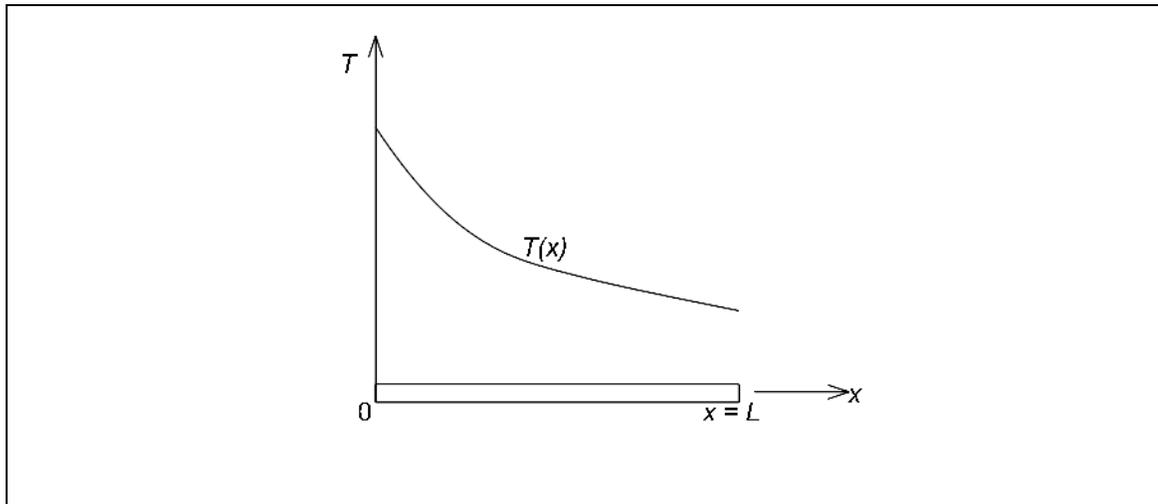


FIGURA 9. Distribución de temperatura en una aleta uni-dimensional.

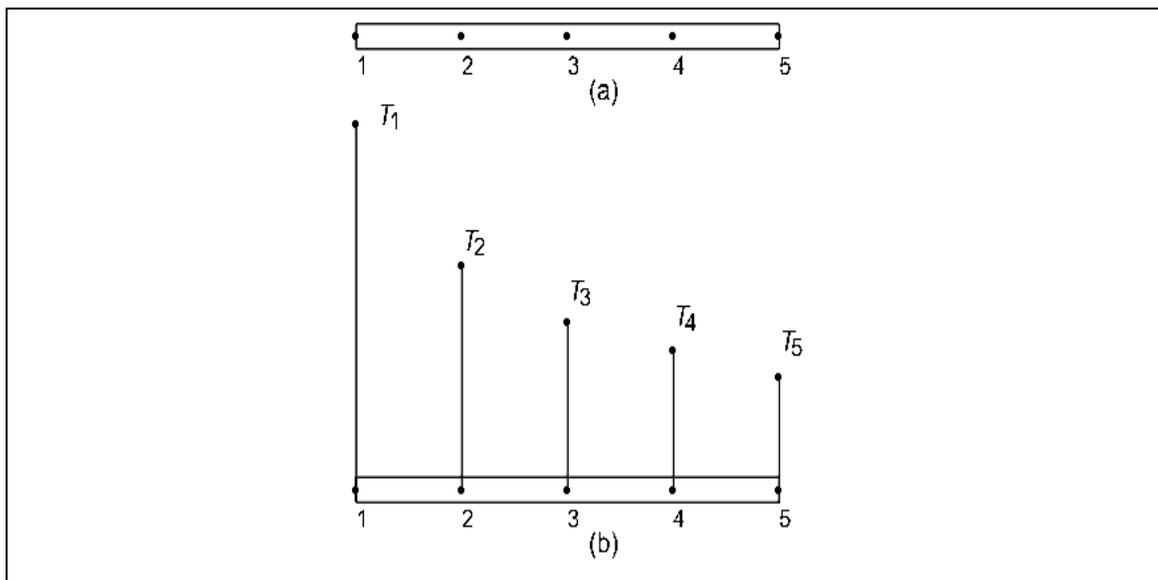


FIGURA 10. Los puntos nodales y los valores asumidos de $T(x)$.

La división del dominio en elementos puede proceder de dos formas. Podemos limitar cada elemento a dos nodos produciéndose cuatro elementos (FIGURA 11a), o podemos dividir el dominio en 2 elementos cada uno con tres nodos, (FIGURA 11b). El polinomio del elemento es definido usando los valores de $T(x)$ en los puntos nodales del elemento. Si subdividimos la región en cuatro elementos, habrán dos nodos por elemento, y la función del elemento será lineal en x (dos puntos producen una línea recta). La aproximación final a $T(x)$ consistiría en cuatro funciones lineales continuas por trozos, cada una definida sobre un elemento individual (FIGURA 12a).

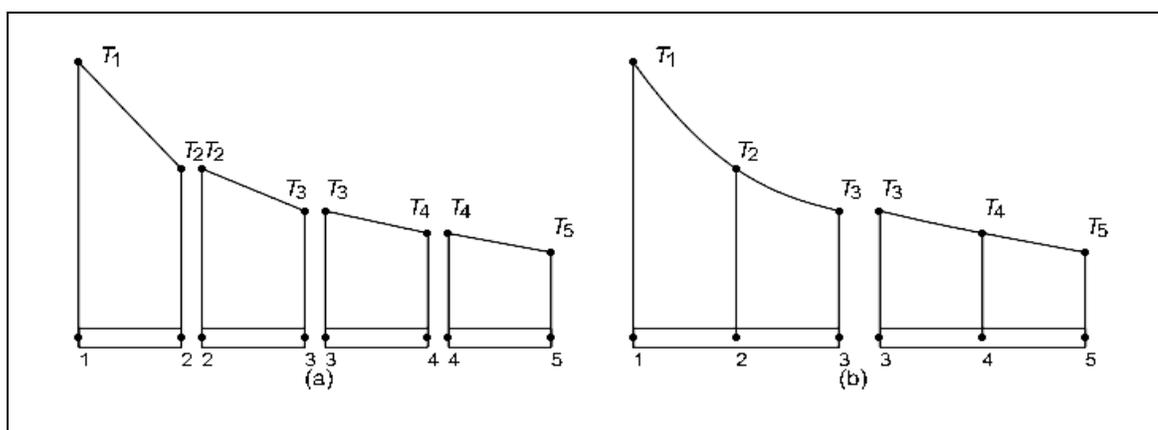


FIGURA 11. División del dominio en elementos

La división del dominio en dos elementos permite que la función del elemento sea una ecuación cuadrática. La aproximación final a $T(x)$ en este caso serían dos funciones cuadráticas continuas por trozos (FIGURA 12b). Las funciones del elemento constituyen una aproximación continua por trozos porque las pendientes de estas dos funciones cuadráticas no son necesariamente las mismas en el nodo tres.

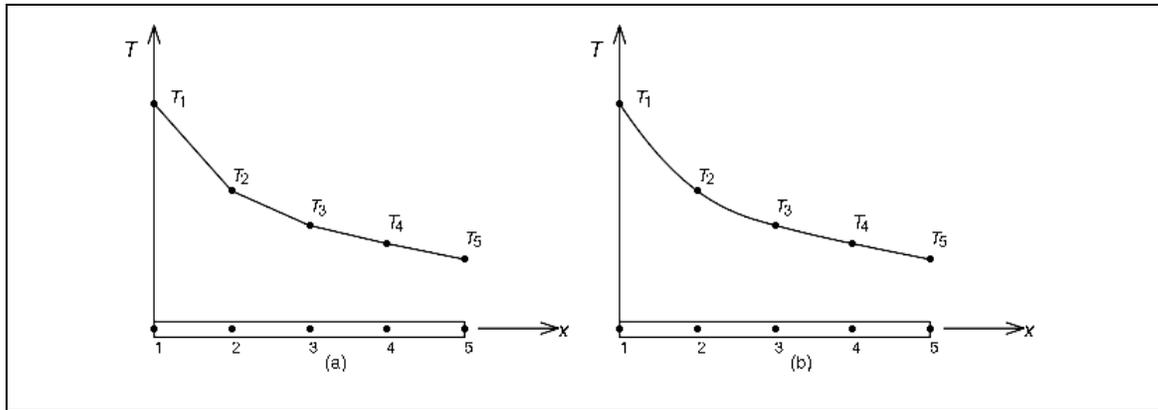


FIGURA 12. Modelos discretos para la distribución de temperatura unidimensional.

Generalmente la distribución de temperatura es desconocida, y deseamos determinar los valores de esta cantidad en ciertos puntos. El procedimiento es el mismo descrito antes pero con un paso adicional. Un juego de nodos es definido y los valores de temperatura en estos nodos son T_1, T_2, T_3, \dots , los cuales son ahora variables ya que no son conocidos. El dominio es dividido en elementos, y se define una ecuación de temperatura para cada uno. Los valores nodales de $T(x)$ deben ahora ser “ajustados” tal que proporcionen la “mejor” aproximación posible a la verdadera distribución de temperatura. Este ajuste se logra minimizando alguna variable asociada con el problema físico. Una funcional relacionada a la ecuación diferencial de gobierno es minimizada cuando se consideran problemas de transferencia de calor. El proceso de minimización produce un juego de ecuaciones algebraicas lineales que pueden ser resueltas para los valores nodales de $T(x)$ (SEGERLIND, 1984)

El proceso computacional del FEM típicamente consiste en tres pasos (KARDESTUNCER, 1987; BARTON y RAJAN, 2000; MOLERO, 2001):

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

definición de los elementos, propiedades del material, cargas y parámetros de análisis (ALGOR, 2006) y se le dicen al computador las ecuaciones de gobierno, condiciones de frontera, propiedades, y métodos de solución a utilizarse.

- **Procesamiento o solver**, en el cual el computador resuelve el problema; y
- **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 máximos y mínimos, archivos de imágenes (JPEG, GIF, BMP, etc.) y creando películas de los acontecimientos virtuales (DATTA, 1998; ALGOR, 2006; MOLERO, 2001).

Mayores antecedentes de un análisis típico por elemento finitos, lo podemos ver en RODRIGUEZ (2005).

2.8.2 Generación de la malla (*mesh*). La discretización espacial, es decir, la generación de la malla es un paso fundamental para la resolución de problemas reales de ingeniería mediante el método de elementos finitos. Este paso como tal tiene una alta influencia en la precisión y el costo computacional del análisis. En este paso de pre-procesamiento, la geometría ya definida necesita ser dividida en piezas más pequeñas, los elementos, para una solución numérica. Así, este paso es un balance cuidadoso entre proveer suficientes elementos (o nodos) tal que todas las físicas esenciales sean capturadas, pero no demasiadas.

Este proceso de mallado, es la fase más crítica en el análisis por elementos finitos. El tipo y colocación de cada elemento, así como su densidad, tiene profundos efectos en la precisión de resultados (MOLERO, 2001).

No es posible concretar el número de elementos que se requieren para obtener en cada caso la solución más satisfactoria, ya que va a depender de la

estructura del modelo en estudio, es decir, el grado de irregularidad así como su volumen. La elección de la subdivisión más conveniente ha de realizarse de acuerdo con la experiencia, basándose, si es posible, en resultados obtenidos mediante ensayos. En cualquier caso, se deben poner en práctica soluciones que hagan intervenir mallas de diferentes dimensiones con el fin de asegurar la convergencia de los resultados (LARA, 2003).

Hoy en día, los software CAE pueden ahorrar el trabajo de creación manual de la malla pues incluyen Generadores Automáticos de Malla (*Automatic Mesh Generators*).

La generación automática de mallas se ha convertido en una herramienta común para resolver numéricamente ecuaciones diferenciales parciales sobre regiones de forma irregular. La generación numérica de mallas puede pensarse como un procedimiento para distribuir ordenadamente a un conjunto de observadores sobre un dominio físico, de tal manera que la comunicación entre ellos sea eficiente y todos los fenómenos físicos sobre el dominio completo puedan ser representados con suficiente exactitud por este número finito de observadores. Una malla es una estructura sobre la cual se construirá una solución numérica. Esta solución aproxima con cierta exactitud el comportamiento del fenómeno bajo estudio (DE LA CRUZ, 2002).

Conseguir una malla de alta calidad puede ser la parte de mayor consumo de tiempo en un análisis de elementos finitos, pero los resultados hacen que bien valga la pena. Una buena malla es el balance de precisión y tiempo computacional; las mallas de calidad convergen rápidamente, producen resultados precisos y no producen errores (ALGOR, 2006).

2.8.2.1 Técnicas de generación de malla. Existen principalmente dos tipos de mallas que pueden caracterizarse por la forma en que se conectan los nodos. A

continuación se discutirán en forma rápida los principales tipos de mallas que se conocen y la forma en que éstas son generadas (DE LA CRUZ, 2002).

Según DE LA CRUZ (2002), existen 3 tipos de mallado. Las mallas estructuradas, no estructuradas y mallas adaptivas

2.8.2.1.1 Mallas estructuradas: Son las que tienen una conectividad regular, lo que implica que cada punto tiene el mismo número de vecinos (en algunos casos un número pequeño de puntos puede tener diferente número de vecinos). En dominios rectangulares es simple construir una malla, el problema aparece cuando se quiere construir una en un dominio irregular. Generalmente las mallas se construyen de tal manera que las fronteras coincidan con las líneas coordenadas, es decir, se usan coordenadas curvilíneas (DE LA CRUZ, 2002).

2.8.2.1.2 Mallas no estructuradas: Estas son de conectividad irregular, es decir, cada punto puede tener un número diferente de vecinos. Este tipo de malla es clásico en el método de elementos finitos. Existe un amplio rango de formas posibles para el método de elementos finitos: triángulos, cuadrados, tetraedros, pentaedros, hexaedros, etc. Sin embargo este método tiene ciertos requerimientos para una malla (DE LA CRUZ, 2002):

- La malla debe ser válida, es decir, sin agujeros, no se debe intersectar ella misma, etc. Aunque estos requerimientos son obvios, muchos esquemas de generación de mallas requieren una enorme verificación de estas condiciones.
- La malla debe acoplarse con la frontera del dominio, la cual también es una condición obvia pero algunos métodos (por ejemplo triangulación de Delaunay) no satisfacen esto y es necesario verificar y corregir las aristas o caras que crucen la frontera.

- La densidad de la malla debe ser controlable para permitir un equilibrio entre la exactitud de la solución y los cálculos en el tiempo.
- La densidad de la malla debe variar dependiendo de la exactitud deseada en cada lugar del dominio y esta variación deberá ser suave para reducir errores numéricos.
- En general, los ángulos interiores de los elementos de la malla, deben ser aproximadamente iguales (triángulos equiláteros, tetraedros regulares). Elementos altamente distorsionados (triángulos delgados por ejemplo) pueden ocasionar problemas de estabilidad numérica causados por errores de redondeo.

2.8.2.1.3 Mallas adaptivas: En los puntos anteriores se mencionaron algunas técnicas para generar mallas estructuradas y no-estructuradas, especificando la densidad de las líneas de la malla. Esta densidad se selecciona para obtener una solución aceptable en exactitud y en tiempo. Es posible especificar ciertos aspectos de la malla al inicio de los cálculos, por ejemplo alta densidad cerca de las fronteras. Pero la solución puede desarrollar fenómenos de interés que no son predecibles con anterioridad. En los lugares donde se dan estos fenómenos es necesario refinar la malla para que la solución sea exacta. En contraste, pueden existir áreas grandes del dominio donde la solución sea muy suave y por lo tanto no es necesario hacer un refinamiento. Entonces, usando una malla que se adapte a la solución conforme ésta se va calculando puede producir soluciones muy precisas en tiempos óptimos. El esquema de las mallas adaptivas tiene dos partes (DE LA CRUZ, 2002):

- Medición del error local y optimización (refinamiento o engrosamiento) de la malla si es necesario. La medida del error se debe basar en alguna técnica de extrapolación como la de Richardson. La densidad requerida de la malla puede calcularse usando la medida del error local y el orden local del método

de discretización. La distribución requerida de la densidad de la malla equilibrará los errores numéricos en todo el dominio.

- Reconstruir la malla usando la distribución especificada de la densidad de la malla. El método utilizado depende de si el problema es estacionario o dependiente del tiempo. Para problemas estacionarios se usa un número pequeño de adaptaciones. En el caso de problemas que dependen del tiempo, un número grande de adaptaciones se requieren conforme la solución cambia. El método de regeneración de la malla debe ser rápido. La interpolación entre malla y malla debe ser muy precisa en casos de dependencia temporal; para problemas estacionarios, esto es menos importante.

Existen tres métodos para refinar una malla: movimiento de los puntos de la malla, refinamiento local y regenerar la malla en su totalidad (DE LA CRUZ, 2002).

- El movimiento de los puntos de la malla mantiene la conectividad original, pero mueve los nodos. Este método se realiza con ajustes relativamente pequeños sin introducir celdas muy distorsionadas y además es rápido. Es conveniente para mallas estructuradas que requieren una conectividad fija, y también para problemas dependientes del tiempo donde la velocidad de refinamiento es importante.
- En el refinamiento local, las celdas de la malla son subdivididas. Las celdas vecinas deberán tener el mismo grado de subdivisión para mantener la validez de la malla. Este método es rápido y es ideal para problemas con dependencia temporal. La conectividad de la malla cambia con cada modificación de ésta, por lo que este método es poco conveniente para mallas estructuradas.
- Regeneración de la malla completa usando parámetros nuevos para la densidad de líneas. Es el método más general pero es lento y no existe una forma simple para revertir los refinamientos. Con la triangulación de Delaunay, se adicionan puntos extra a la triangulación original para hacer el refinamiento.

2.8.2.2 Tipos de elementos en el análisis térmico. Existen diversos tipos de elementos que constituirán la malla, caracterizados por su forma y el número de nodos que lo constituyen, y el tipo a usar dependerá de la geometría del modelo y del tipo de análisis a efectuar. Para el análisis térmico, en particular, se distinguen los siguientes (ALGOR, 2006):

2.8.2.2.1 Elementos 2D: (Tipo 40) Son elementos de 3 ó 4 nodos hechos de segmentos de líneas rectas dibujados en el plano Y-Z. No hay flujo de calor (y por lo tanto no hay cambio de temperatura) en el exterior de la dirección del plano. Sólo un grado de libertad está definido para estos elementos, la temperatura. Los elementos 2D pueden ser de 2 tipos: **axisimétricos** (con simetría tanto geométrica como de carga alrededor del eje Z y con coordenadas radiales definidas a lo largo del eje Y, usados en sólidos de revolución), y **planares** (de un grosor específico normal al plano Y-Z y que no exhibe variación normal al plano Y-Z. Aunque el grosor no afecta las temperaturas, afecta el flujo de calor total a través del modelo).

2.8.2.2.2 Elementos Ladrillo (Brick): (Tipo 39) Son elementos 3D de 4, 5, 6 u 8 nodos formulados en el espacio 3D. La determinación de cuántos nodos abarca un elemento dado es hecha automáticamente basada en la conectividad de las líneas. Es decir, el usuario no necesita hacer nada para designar cuántos nodos estarán en el elemento. Así, un modelo hecho de ladrillos 3D puede contener una mezcla de ladrillos de 4, 5, 6 y 8 nodos. El calor fluye en las 3 direcciones, y por lo tanto se calcula una distribución tridimensional de temperaturas. Sólo un grado de libertad está definido para estos elementos, la temperatura.

2.8.2.2.3 Elementos Tetraédricos (Tetrahedra): (Tipo 38) Son tetraedros curvilíneos isoparamétricos o sub-paramétricos de 4 ó 10 nodos, formulados en el espacio 3D.

2.8.2.2.4 Elementos Barra (*Rod*): Son elementos de 2 nodos que presentan una orientación arbitraria en el sistema X, Y, Z. Estos elementos son usados para modelar transferencia de calor en estructuras relativamente largas y delgadas.

2.8.2.2.5 Elementos Placa (*Plate*): Son elementos de 3 ó 4 nodos formulados en el espacio tridimensional. Estos elementos son usados para modelar transferencia de calor en estructuras tipo placa o cáscara delgadas. Los elementos placa pueden tener cargas convectivas y de radiación en su superficie. Los flujos de calor pueden también ser especificados directamente en sus superficies. Los elementos placa pueden también incurrir generación de calor por unidad de volumen.

2.8.2.2.6 Elementos de Frontera (*Thermal Boundary*): Son elementos de 1 nodo formulados en el espacio tridimensional. Estos elementos son usados en “temperaturas aplicadas” en un nodo (análisis estacionario y transiente) o una “temperatura dependiente del tiempo” en un nodo (análisis transiente). Son usados en conjunto con los elementos tipo 38, 39 y 40. Una **temperatura aplicada** es usada para fijar un nodo a cierta temperatura a lo largo del análisis. En realidad se agrega un nodo adicional al modelo. Este nodo es mantenido a la temperatura especificada. El calor es transferido desde el nuevo nodo al nodo en el modelo a través de un elemento con una “rigidez” (*stiffness*) térmica especificada. La temperatura del nodo en el modelo dependerá del valor de la rigidez. Un valor alto de rigidez causará que el nodo en el modelo esté muy cerca del nuevo nodo. Una baja rigidez significa que el elemento de frontera absorbe algo del calor y la temperatura del nodo en el modelo podría ser significativamente más baja que la del nuevo nodo. Una **temperatura dependiente del tiempo** en un nodo es usada en análisis transiente y significa que el nodo al cual es aplicada comenzará el análisis con ese valor de

temperatura inicial y podrá cambiar debido a las cargas de calor aplicadas al modelo (ALGOR, 2006).

2.8.2.3 Criterios de mallado. Entre los usuarios de la tecnología de elementos finitos, por mucho tiempo ha existido un debate respecto a cuál forma de elementos produce el resultado más adecuado. A menudo se ha sostenido que los elementos de forma cuadrilátera y hexaédrica tienen un desempeño superior a los elementos triangulares y tetraédricos, al comparar un número equivalente de grados de libertad (OWEN, 2003). Los tetraedros no son muy buenos para el MEF y se necesita de muchos elementos para obtener resultados aceptables. Elementos cuadriláteros y hexaedros son mucho mejores (DE LA CRUZ, 2002). El uso de hexaedros puede reducir enormemente el número de elementos y, por consiguiente, los tiempos de análisis y post-procesamiento (OWEN, 2003).

El método de mallado que ha llegado a ser el más utilizado para mallas de sólido, y el cual fue elegido para la presente investigación, es aquel que consiste en la combinación del uso de elementos hexaédricos (“ladrillos”) en conjunto con tetraédricos, conocido también como método mixto “**ladrillos/tetraedros**”. Este método genera una malla de la más alta calidad y con el menor número de elementos. Este diseño de malla creará tantos ladrillos de 8 nodos como sea posible con respecto al tamaño de la malla. Cuando tenga que hacerlo creará “cuñas” de 6 nodos, “pirámides” de 5 nodos, o tetraedros de 4 nodos. Estos elementos que no son de 8 nodos serán colocados en su mayor parte hacia el centro del modelo y generalmente no constituirán gran parte del volumen (ALGOR, 2006). El mallado mixto es más rápido y en la gran mayoría de los casos -si no en todos- es más que suficiente (CAESOFT, 2003).

Otra tecnología más vieja de mallado consiste en hacer que todos los elementos sean tetraedros, pero esta opción requiere significativamente más elementos para conseguir el mismo tipo de exactitud que el método mixto

ladrillos/tetraedros. Es típicamente usado en pruebas comparativas. Se debe tener una malla de superficie triangular para usar este diseño de mallado (ALGOR, 2006). El mallado con tetraedros es mucho más rápido, pero mucho más impreciso (los errores habituales van del 20 al 50% o incluso mayores, frente a menos del 5% con mallado hexaédrico) (CAESOFT, 2006).

Otro diseño de malla es donde todos los elementos son ladrillos, usada sobre todo en procesadores que aceptan sólo ladrillos de 8 nodos. En muchos casos, éstos son procesadores de flujo de fluidos. Esta opción genera 8-10 veces más elementos que el método “ladrillos/tetraedros”.

En general se aplica la siguiente máxima: mientras mejor la malla de superficie, mejor es la malla de ladrillos de 8 nodos que el generador de malla de sólido es capaz de crear (ALGOR, 2006)

2.8.3 Modelo del material. Según su material los elementos pueden ser de diferentes tipos (ALGOR, 2006):

2.8.3.1 Material isotrópico: es aquel donde la conductividad térmica (k) es la misma, medida en cualquier punto y cualquier dirección. Además, todas las propiedades del material (conductividad y calor específico) son consideradas independientes de la temperatura.

2.8.3.2 Material anisotrópico: Son materiales cuyas propiedades varían dependiendo del punto y la dirección de medición.

2.8.3.3 Material ortotrópico: No todos los materiales son anisotrópicos; la mayoría tiene uno o más planos de simetría, característica que los hace denominarse ortotrópicos. La FIGURA 13, ilustra la diferencia entre isotropía y ortotropía. En este caso la conductividad térmica puede ser diferente en tres direcciones ortogonales (aunque sólo dos direcciones son usadas para un

modelo 2D). Además, todas las propiedades del material (conductividad y calor específico) pueden ser una función de la temperatura (ingresando una tabla de temperatura y propiedades del material).

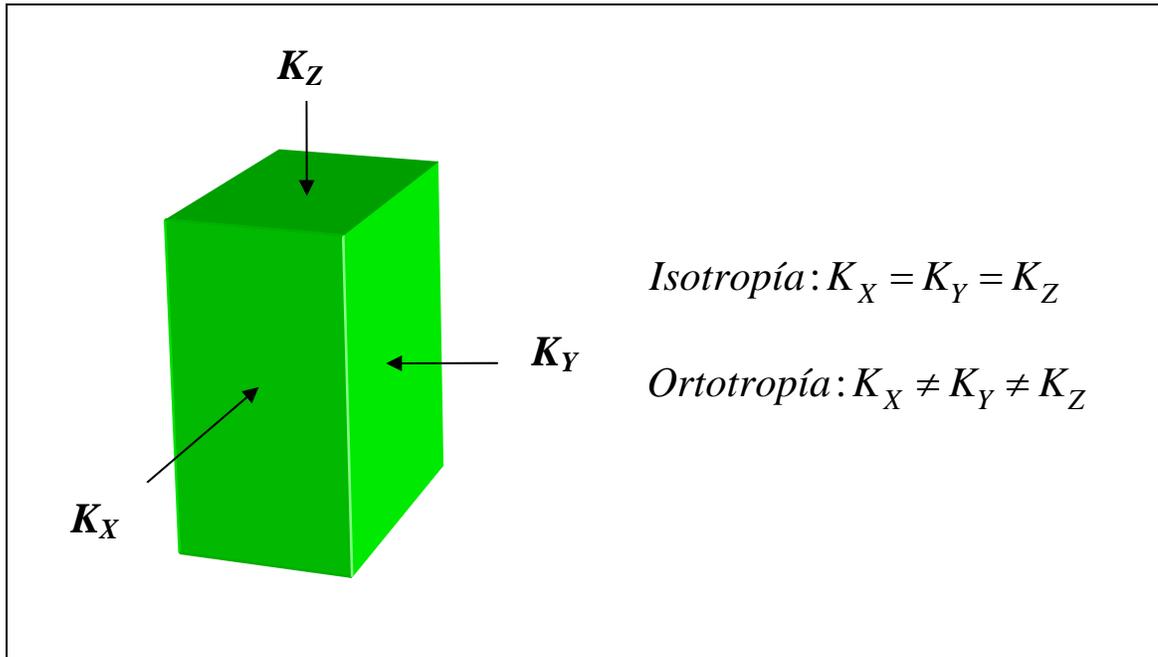


FIGURA 13. Concepto de Isotropía y Ortotropía.

2.8.5 Propiedades del material. Un paso muy importante en la ingeniería basada en la simulación es el usar datos de propiedades del material (**densidad, conductividad térmica, calor específico**, etc.) tan exactos como sean posibles. Sin embargo, es aquí donde también los procesos alimenticios están en una leve desventaja comparados con procesos que no usan materiales neutrales. Las propiedades del acero, por ejemplo, son más fácilmente disponibles y quizás tienen mucha menos variabilidad que una sopa de pollo. No es necesario, sin embargo, en la ingeniería basada en simulación tener datos absolutamente exactos (DATTA, 1998).

Algunas formas de obtener datos son las siguientes (DATTA, 1998):

- *Medir datos, si es posible*: Este es el escenario ideal, particularmente considerando cómo variará la formulación del producto alimenticio. A las compañías, por ejemplo, les gustaría medir “en casa” la propiedad específica de su formulación para mantener la confidencialidad y usarla en el diseño de productos o procesos. A veces esto puede no ser posible debido a la necesidad de técnica detallada, instrumentación cara, o tiempo más largo que el necesario.

- *Usar bases de datos computarizadas*: En otras áreas de manufactura, hay enormes bases de datos de propiedades de materiales, corrientemente disponibles en CD-ROM. Por ejemplo, CenBASE/Materials en Internet es una base de datos de búsqueda de más de 35.000 plásticos, metales, mezclas, y cerámicas de más de 300 catálogos de productos de fabricantes a nivel mundial. En el procesamiento de alimentos, tales bases de datos sólo están comenzando a aparecer (SINGH, 1995; NESVADBA **et al.**, 2004).

- *Usar manuales y libros de datos de propiedades*: Esta es quizás la fuente más popular de datos para investigadores. Aunque no tan exhaustiva como otros manuales de datos de materiales, hay datos considerables en formato impreso (RAO y RIZVI, 1995; PERRY **et al.**, 1984). También hay *papers* resumen que llevan grandes cantidades de datos sobre una propiedad específica, como la propiedad dieléctrica de alimentos (DATTA **et al.**, 1995; TINGA y NELSON, 1973).

- *Usar fórmulas predictivas*: Las correlaciones entre propiedad y composición desarrolladas a partir de datos medidos (CHOI y OKOS, 1986; DATTA **et al.**, 1995) son probablemente más útiles para el propósito de estimar propiedades en CAE, siempre que la correlación disponible sea para un material cercano. Datos exactos de composición se vuelven críticos al usar las correlaciones acertadamente. Por ejemplo, las propiedades dieléctricas pueden cambiar

drásticamente con leves cambios en la sal. Libros que tratan de propiedades de alimentos a menudo ofrecen proporcionar fórmulas predictivas o correlaciones (RAHMAN, 1996; RAO y RIZVI, 1995; OKOS, 1986; MOHSENIN, 1980).

- *Análisis de sensibilidad usando estimaciones razonables*: Ya que la idea de la ingeniería basada en la simulación es de cualquier modo probar muchos escenarios “qué pasa si”, una parte natural de este ejercicio es examinar el efecto de variaciones de las propiedades en el proceso. De esta forma, podemos asociar las propiedades y ver el efecto de un rango de propiedades en el proceso. Este proceso se llama *análisis de sensibilidad*. No se limita sólo a variaciones en las propiedades, sino que puede extenderse a variaciones en el mismo proceso. Diferentes condiciones de frontera, diferentes geometrías, etc., pueden ser probadas con relativa facilidad en el computador. Si el resultado del proceso llega a ser bastante sensible a variaciones de los datos de propiedades en un caso particular, señala la necesidad de obtener datos de propiedades muy exactos. El análisis de sensibilidad es uno de los pasos más importantes en CAE (DATTA, 1998).

2.8.6 Método de Solución. Una vez que las ecuaciones y las propiedades están definidas, el próximo paso es seleccionar un método de solución que proporcione la solución más eficiente. La ventaja de usar el software disponible es que uno puede a menudo elegir un método de solución sin tener que ser muy hábil en los detalles de tales métodos. El software comercial tiende a tener una buena propiedad de convergencia para una amplia variedad de situaciones. El fabricante del software también típicamente tiene recomendaciones de técnicas de solución para diversos tipos de problemas. Un adecuado conocimiento sobre métodos numéricos es de ayuda en esta etapa (DATTA, 1998).

Al igual que la convergencia, la velocidad es muy importante a la hora de obtener resultados. El software de simulación utilizado en la presente

investigación ofrece varias posibilidades de “solucionadores” (*solvers*). El método por defecto (y recomendado por el software) es el *Sparse*, el cual puede resolver cientos de miles de ecuaciones en pocos minutos, llegando a ser hasta 430 veces más rápido que otros *solvers* (como *Banded* o el *Skyline*), además de su mejor propiedad de convergencia. El *Sparse* se basa en que las matrices están formadas por muchos elementos iguales a cero, pero se trabaja sólo con los elementos distintos de cero, beneficiándose así tanto en tiempo como en espacio (GUNDERSEN *et al.*, 2002).

2.8.7 Análisis (Procesamiento). Una vez que se ha especificado el método de solución el computador lleva a cabo el procedimiento de solución. Las ecuaciones son discretizadas y se forman grandes sistemas lineales de ecuaciones algebraicas (matrices). Aunque el usuario puede tener algo de control sobre esta formulación de matrices, en la mayoría de los casos es realizada automáticamente por el software sin mucha intervención del usuario. Típicamente, esta formulación de matrices representa la etapa de mayor consumo de tiempo computacional, y para muchos problemas puede justificar el 80% de los recursos computacionales totales. Las matrices son resueltas usando procedimientos bien conocidos (DATTA, 1998).

La etapa de análisis en el Método de Elementos Finitos puede durar desde un par de minutos a varias horas, ¡incluso días!, dependiendo de varios factores como, entre otros: características del computador ocupado (velocidad y tipo de procesador, cantidad de memoria RAM, velocidad del disco duro, etc.), complejidad del modelo, tamaño, tipo y cantidad de los elementos de la malla, la duración elegida para el proceso simulado, y el intervalo de tiempo (“paso de tiempo”) en que se desea que el programa realice los cálculos (FoodDigiCAELab, 2006).

2.8.8 Revisión de resultados (Post-procesamiento). El post-procesamiento es el importante paso de visualizar los resultados y hacer cálculos posteriores a partir de los datos en bruto generados por la solución. La mayoría de los *software* comerciales pueden mostrar contornos, historia, vectores y otros esquemas. Estos perfiles espaciales o temporales en la completa región 3D pueden proporcionar un discernimiento y entendimiento del proceso que no es posible usando la experimentación. Tal visualización es una de las más grandes ventajas de la Ingeniería Asistida por Computador (DATTA, 1998).

2.8.9 Confiabilidad de los Resultados Computacionales. Nunca se debería confiar ciegamente en los resultados computacionales, y el software nunca debería usarse como una caja negra. Sin embargo, también es importante aceptar que no hay ninguna manera segura de confirmar los resultados computacionales. Hay varias maneras de minimizar las posibilidades de obtener una mala solución (DATTA, 1998):

- **Chequeando la convergencia de la malla.** Sólo se obtienen soluciones numéricas en lugares discretos como un punto de malla (nodo). La solución numérica siempre tiene una cierta cantidad de error asociada con ella. El error total en una solución final está compuesto por el error de discretización más el error de redondeo. El error de discretización es el error de aproximación. Por ejemplo, una solución usando software de elementos finitos típicamente no satisface la ecuación de gobierno original en todas partes. En cambio, satisface la ecuación en el promedio. El error de redondeo es el error de cálculo originado por la “longitud de palabra” finita del computador. Para reducirlo, necesitan ser llevados más lugares decimales. El error entre la solución real y la solución numérica aproximada necesita mantenerse en un mínimo. La manera más significativa de reducir tal error es aumentar el número de puntos de malla o elementos.

No se sabe a priori cuántos elementos o puntos de malla son suficientes para un problema; depende de la física del problema. Así, un paso importante es aumentar el número de elementos o puntos de malla y chequear si la solución cambia apreciablemente. Si la solución cambia significativamente, puede ser un signo de que el número de elementos usados no fue suficiente, y el cálculo tendría que ser repetido usando un número más grande de elementos. Este proceso se repite hasta que la solución ya no cambie apreciablemente a medida que se agreguen más puntos de malla o elementos. En este punto, se asume que la solución ha convergido.

El proceso de aumentar los puntos de malla y de resolución puede automatizarse completamente en algún software usando una técnica llamada mallado adaptivo, donde el software agrega automáticamente más elementos o de malla dondequiera que se necesite, basado en errores de truncamiento locales estimados. Aunque esta opción está disponible en unos pocos programas como FLUENT, no está típicamente disponible en muchos de los programas de CFD.

- **Revisando el Archivo de Entrada.** El archivo de entrada debe verificarse para confirmar que el computador, de hecho, está usando la misma geometría, ecuación de gobierno, condiciones de frontera y condiciones iniciales, y propiedades, como se pensó. La visualización usando gráficos es una excelente herramienta para este propósito.
- **Usando el sentido común.** El chequeo más obvio e inmediato es visualizar los resultados y ver si ellos tienen sentido. Por ejemplo, en un cálculo calorífico que no involucra una fuente de calor, las temperaturas por todas partes y en todo momento deben estar entre las temperaturas iniciales y de frontera. Cualquier valor de temperatura fuera de este rango señalaría ciertamente un problema con el proceso computacional.

- **Comparando con Datos Experimentales.** Después de las citadas verificaciones numéricas y de sentido común, un paso importante puede ser comparar los resultados con datos experimentales, si es en absoluto posible. La validación experimental es a menudo un paso crítico, aun cuando tal validación puede hacerse para un problema más simple, o para un número limitado de parámetros. Los esfuerzos adicionales en la comprobación experimental del modelo pueden ser recompensados por un aumento en la confianza del modelo.
- **Empezando con un Problema más Simple.** Es a menudo deseable empezar de un problema más simple para el que las soluciones sean conocidas o sean fácilmente comprobables. Es típicamente más fácil de construir la complejidad sobre el modelo simple.

2.8.10 Ventajas y desventajas del Método de Elementos Finitos. El Método de Elementos Finitos ofrece muchas ventajas importantes al ingeniero (BARTON y RAJAN, 2000):

- Es fácilmente aplicable a objetos de formas irregulares complejas, cuerpos no homogéneos (compuestos de varios materiales diferentes y con diferentes propiedades), cuerpos de materiales no isotrópicos (ortotrópicos, anisotrópicos) y con condiciones de frontera complejas.
- Condiciones de frontera tales como cargas superficiales discontinuas, no presentan dificultad para el método. Condiciones de frontera mezcladas pueden ser manejadas fácilmente (SEGERLIND, 1976).
- El tamaño de los elementos se puede variar, permitiendo que la malla se pueda expandir o refinar, según se requiera (SEGERLIND, 1976).
- Aplicable a problemas de estado estacionario y transiente.
- Aplicable a problemas lineales y no lineales.

- Un solo método puede resolver una amplia variedad de problemas además de transferencia de calor, como mecánica de sólidos, mecánica de fluidos, reacciones químicas, electromagnetismo, biomecánica y acústica, por nombrar sólo algunos.
- Los paquetes de software FEM de propósito general están disponibles a precios razonables, y pueden ser fácilmente ejecutados en un computador personal.
- El FEM puede acoplarse a programas CAD para facilitar el modelado de sólidos y la generación de mallas.
- Muchos paquetes de software incluyen interfaces GUI (*Graphic User Interface*, Interfaz Gráfica de Usuario), generadores automáticos de malla y sofisticados post-procesadores y gráficos para agilizar el análisis y hacer el pre y post-procesamiento más amigable al usuario.

La simulación usando FEM también ofrece ventajas comerciales a las organizaciones:

- Costos reducidos de pruebas y rediseños acortando de esta forma el tiempo de desarrollo del producto, equipo y/o proceso.
- Identifica tópicos en diseños antes de que designen las herramientas.
- Refina componentes antes de que las dependencias a otros componentes no permitan cambios.
- Optimiza el desempeño antes del prototipo.
- Descubre problemas de diseño antes de que se presenten problemas comerciales y/o legales.
- Permite más tiempo a los ingenieros de usar su juicio y experiencia, y reduce el tiempo de implementación.

Entre las desventajas que se podrían mencionar de este método estarían:

- Se obtiene un resultado numérico específico para un problema específico. No se produce una solución general cerrada, la cual permitiría examinar la respuesta del sistema a cambios en diversos parámetros.
- El FEM se aplica a una *aproximación* del modelo matemático de un sistema (fuente de los llamados errores heredados).
- Se necesita experiencia y juicio con el fin de construir un buen modelo de elementos finitos.
- Un computador poderoso y un software FEM confiable son esenciales.
- Los datos de entrada y salida pueden ser muy grandes y tediosos de preparar e interpretar.
- Problemas numéricos: los computadores trabajan con un número finito de dígitos significativos. Hay acumulación de errores de truncamiento numérico y redondeo. Se puede solucionar evitando unir elementos pequeños con grandes.
- Es susceptible a errores de modelado introducidos por el usuario. Pobre elección de tipos de elementos, elementos distorsionados, geometría mal modelada.

3. MATERIAL Y MÉTODO

3.1 Lugar de ejecución.

El presente trabajo de investigación fue llevado a cabo en el Laboratorio de Digitalización 3D e Ingeniería Asistida por Computador para el Procesamiento y Preservación de Alimentos (**FoodDigiCAELab**, <http://www.fooddigicaelab.uach.cl>) y en la Planta Piloto de Instituto de Ciencia y Tecnología de los Alimentos (ICYTAL), ambos pertenecientes a la Universidad Austral de Chile.

3.2 Materiales y equipos.

3.2.1 Jurel. El material de prueba seleccionado para obtener las diferentes formas complejas a ser evaluadas en la presente investigación fue el Jurel debido a su disponibilidad en la región y a su actual situación de exportación envasados en bolsas esterilizables hacia el mercado Norteamericano en diferentes cortes (conos y filetes) por las Empresas Pesqueras San José⁹ y Alimentos Mar Profundo¹⁰. En la FIGURA 14 se puede apreciar un jurel típico.

Nombre común (Chile): Jurel

Nombre científico: *Trachurus symmetricus murphyi*.

Familia: Carangidae

Nombre internacional: Jack Mackerel.

⁹ Pesquera San José S.A. Avda El Bosque Norte 0440 p10; Las Condes Santiago. Sitio Web <http://www.sanjose.cl>.

¹⁰ Alimentos Mar Profundo S.A. Avda Océano Pacífico 3679; Coronel, VIII Región. Sitio Web <http://www.marprofundo.cl>.



FIGURA 14 Jurel (*Trachurus symmetricus murphyi*)

Con el material seleccionado se consideró tres tipos de cortes o formas para ser envasadas al vacío en bolsas esterilizables y aplicar el tratamiento de esterilización comercial, éstas fueron las siguientes: **conos truncados**, **filetes** y el **corte transversal (medallones)** del pescado (FIGURA 15, FIGURA 16 y FIGURA 17).



FIGURA 15. Conos de jurel



FIGURA 16. Filetes de jurel.



FIGURA 17. Medallones o rodajas de jurel.

El jurel es un pez pelágico que se distribuye sobre la plataforma continental entre 0 a 100 m, formando cardúmenes asociados con sardina y anchoveta. Su distribución en Chile va desde de Arica al sur de las costas de Valdivia, aún cuando existe literatura que la reporta más al sur, pero la masa de la extracción nacional de este producto es de la I a la X Región. Internacionalmente la

ubicación geográfica de este pez es en general en el Océano pacífico Suroriental (frente a la costa sudamericana) y, secundariamente el Océano pacífico Suroccidental, al sur de Nueva Zelanda (CHILE, SERVICIO NACIONAL DE PESCA (SERNAPESCA) 2004).

Hoy en día el desembarque de este producto llega a los 1400 millones de toneladas / año, de las cuales el 67% se transforma en harina de pescado y el 19% en conservas. De este último subproducto alrededor de 58 mil toneladas son producto de exportación, algunos países que importan este producto chileno son: Sri Lanka, Japón, Taiwán, Alemania entre otros (CHILE, SUBSECRETARIA DE PESCA (SUBPESCA), 2004).

Siendo las conservas de jurel un producto tanto de exportación como de consumo nacional, ha sido factor de estudio industrial, en lo que se refiere a su proceso y optimización del mismo, tanto en envases de hojalata y en estos últimos años en bolsas esterilizables (retortable pouches).

3.2.2 Bolsas esterilizables. Las bolsas esterilizables de 120 x 206 mm fueron proporcionadas por la compañía Envases del Pacífico (EDELPA S.A.¹¹). Estos envases de 0,127 mm (0,005 pulg.) de espesor están compuestos por los siguientes materiales: Polipropileno, Lámina de aluminio, Nylon y Poliéster (FIGURA 18).

3.2.3 Sistema de sellado al vacío. Se utilizó un sistema de sellado al vacío, donde la temperatura, la presión del vacuómetro y el tiempo de fusión debe mantenerse de acuerdo a las especificaciones del fabricante del envase. El equipo utilizado fue la selladora Plaspak Modelo KVP – 65OT (Plaspak Maquinaria Ltda., Santiago, Chile).

¹¹ Envases del Pacífico S.A. Camino a Melipilla 113320 – Santiago. Sitio Web [http:// www.edelapa.cl](http://www.edelapa.cl)



FIGURA 18. Bolsas esterilizables o Retortable pouches.

3.2.4 Sistema de digitalización 3D. El sistema de digitalización utilizado está compuesto por las siguientes partes:

- Brazo digitalizador 3D de precisión Microscribe-3DL (Microscribe-3D™, Immersion Co., San José, CA USA), con exactitud de punta aguja de 0,64 mm (FIGURA 19).
- Computador personal (PC) Pentium 4 de 3.0 Mhz, 2 GB RAM y 256 MB en video, con sistema operativo Microsoft® Windows® XP Service Pack 2 Profesional, con puerto serial RS-232 al cual es conectado el brazo digitalizador.
- Software modelador 3D de superficies NURBS (Non-Uniform Racional B-Spline) Rhinoceros® 3.0 SR4 (Robert McNeel & Associates, Seattle, WA USA).
- Plataforma de soporte para los modelos físicos.
- Lápices permanentes finos, gruesos de distintos colores.
- Regla Flexible.

- Pistola sellante de goma.
- Masilla adhesiva removible.



FIGURA 19. Brazo digitalizador Microscribe-3DL™.

3.2.5 Sistema de simulación. Para la simulación computacional de los procesos térmicos se usó los siguientes materiales:

- Computador personal (PC) Pentium® 4 de 3.2 GHz, 2GB de RAM y 256 MB de video, con sistema operativo Microsoft® Windows® XP Service Pack 2 Profesional.
- Software **FoodProperty v1.0**, para la estimación de propiedades termofísicas de alimentos, disponible a través del sitio web <http://www.wamfoodlab.cl/>. Este software asistido por la Web (Web-Aided Software), también disponible en la versión Software Basado sobre la Web (Web-Based Software) denominado **WebFoodproperty**, permite calcular las

propiedades térmicas como conductividad térmica y calor específico además de las propiedades físicas de densidad y entalpía de alimentos utilizando los modelos de **Composición Fraccional** y de la **Solución Binaria** para cualquier rango de temperatura entre -40 y 150 °C. El primer modelo está basado en las fracciones másicas y las propiedades de los principales componentes puros (CHOI y OKOS, 1986). El segundo modelo está basado en el conocimiento de las propiedades de los componentes agua y sólidos del producto y en los principios termodinámicas para soluciones ideales.

- Software de simulación basado en el Método de Elementos Finitos **ALGOR 19 SP1** (ALGOR®, ALGOR Inc., Pittsburg, PA) con módulo “Professional Heat Transfer Core Package” que permite realizar análisis de transferencia de calor en estado estacionario y transiente, y con la capacidad de importar directamente modelos de Rhinoceros® gracias a la función RHINOCEROS® IMPORT EXTENDER.

3.2.6 Determinación del coeficiente global de transferencia de calor (U).

Para la determinación del coeficiente global de transferencia de calor (U) se utilizó el Método de la Capacidad Calorífica Global, también conocido como el método de Análisis de Parámetros Concentrados (“*Lumped Capacitance Analysis*”) y para ello se utilizaron los siguientes implementos:

- Cilindros de cobre macizo de dimensiones conocidas 99% pureza.
- Termocuplas flexibles Physitemp® con aislamiento Kapton® calibre 30 y una velocidad de respuesta de 0,05 segundos, de cobre y constantán (termocuplas tipo T, según de la denominación de la American National Standard Institute, ANSI).
- Silicona sellante de altas temperaturas RTV.
- Registrador de temperaturas DIGI-SENSE® Temperatura / Humidity. Logger, modelo N° 91090-00 de 2 Canales, con registro de temperatura cada 1 segundo (FIGURA 20).



FIGURA 20. Registrador de temperatura DIGI-SENSE®.

3.2.7 Sistema de esterilización. Los productos en bolsas esterilizables fueron sometidos al proceso de esterilización o autoclavado, donde se utilizaron los siguientes materiales y equipos:

- **Equipo de esterilización.** Autoclave Dixie Canner Equipment modelo RDSW-3 de la Planta Piloto del Instituto de Ciencia y Tecnología de los Alimentos (FIGURA 21).
- **Sistema de medición de presión y temperatura incorporados al autoclave Dixie Canner.** En la FIGURA 22, manómetro “USG”, con un rango de presión de 0 a 60 *psi* y termómetro “TRERICE”, con un rango de temperatura de 80 a 130 °C.
- **Compresor.** Hydrovane 50 L, Modelo 550Lpurs 10-2415D111 (FIGURA 23).

- **Sistema auxiliar de alimentación de agua a alta presión con bomba centrífuga PEDROLLO de 1 HP de potencia.**
- **Adaptador de bronce para la entrada de termocuplas al autoclave (FIGURA 24 y FIGURA 25).**



FIGURA 21. Autoclave Dixie Canner Equipment modelo RDSW-3.

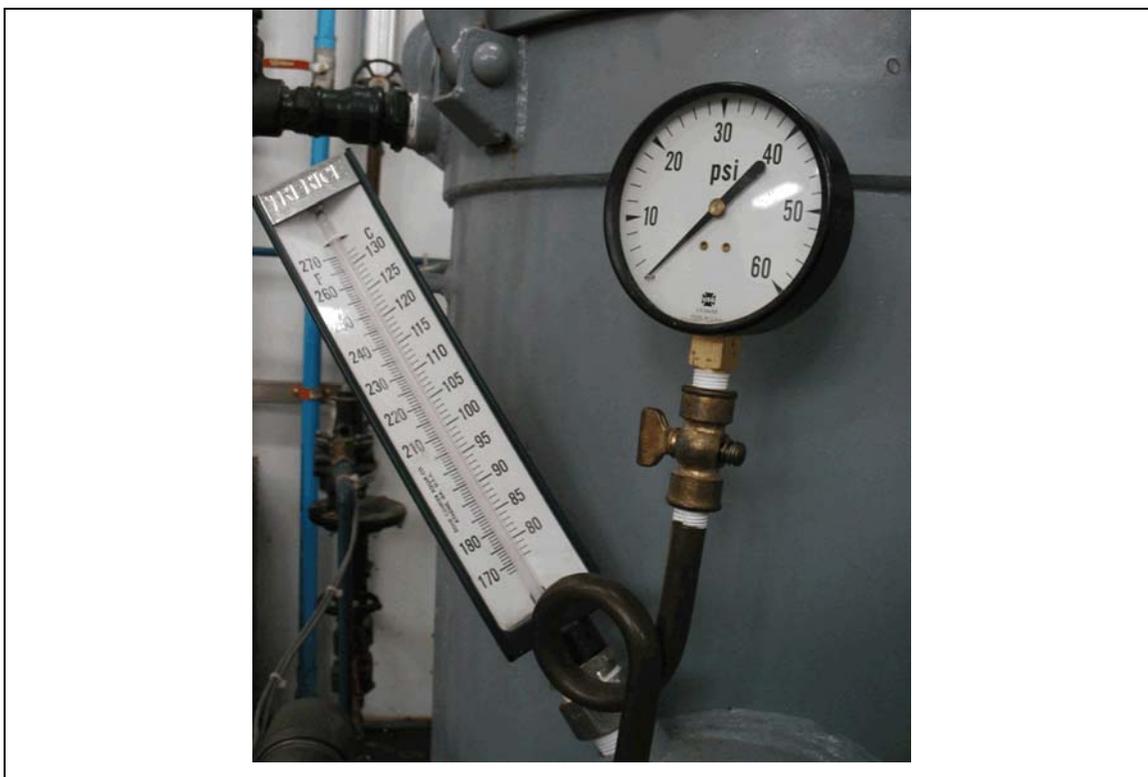


FIGURA 22. Sistema de medición de temperatura y presión del autoclave Dixie Canner.



FIGURA 23. Compresor HYDROVANE 50L.



FIGURA 24. Componentes del dispositivo de bronce.

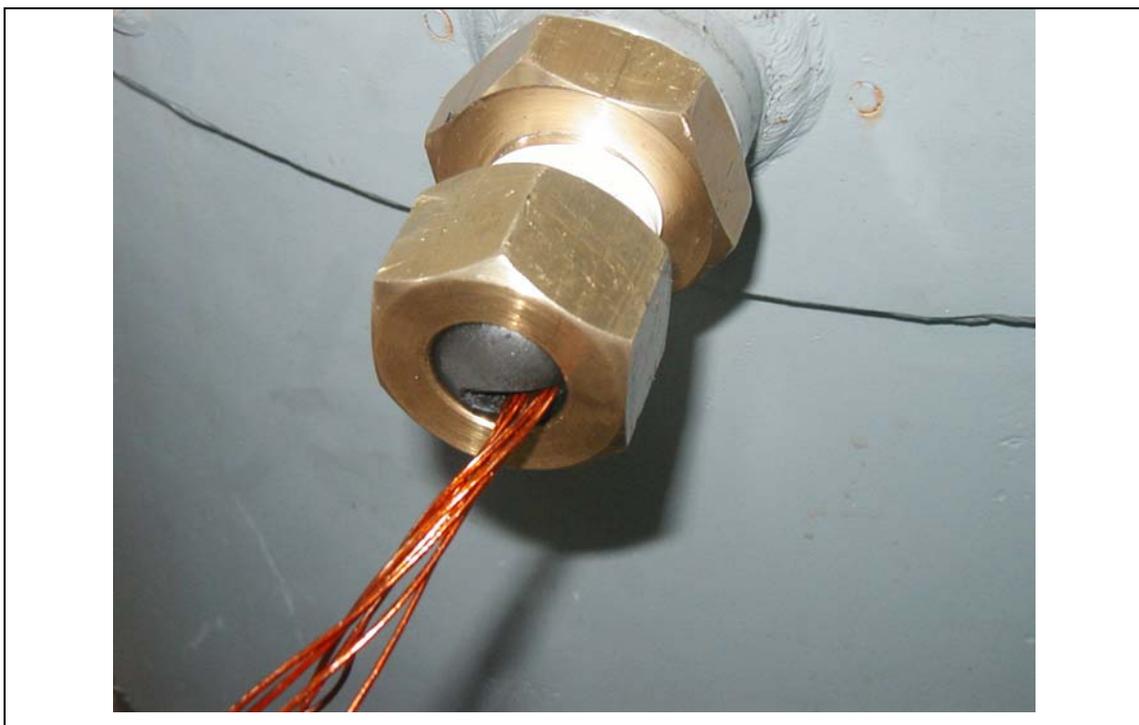


FIGURA 25. Dispositivo de bronce para el paso de termocuplas al interior del autoclave.

3.2.8 Sistema de medición de temperaturas. Para la medición de las temperaturas se utilizó el siguiente equipamiento:

- **Termocuplas.** Para la medición de temperaturas en los alimentos se utilizó Termocuplas tipo T (cobre-constantán) flexibles Kapton® calibre 30 (FIGURA 26). Las especificaciones técnicas se detallan en el CUADRO 2.

CUADRO 2. Especificaciones de las termocuplas Kapton®.

Tipo	T
Rango de temperatura	-418 a 759 °F (-250 a 404 °C)
Diámetro	0,010" (0,508 mm)
Longitud del Cable	5 ft (1,524 m)
Conexiones	Miniconector
Empalme	Expuesto
Constante de tiempo	0,1 s
Tiempo de Respuesta	0,5 s

- Dispositivo de bronce para la entrada de termocuplas en las bolsas esterilizables (FIGURA 27).
- Alargadores: cables compensados tipo T en espiral, con miniconectores macho/hembra de 1.5 m de longitud totalmente extendida. Temperatura máxima 105 °C.
- Registrador de temperaturas (*Data Logger*) de 12 canales marca Digi-Sense "12-Channel Scanning Thermocouple Thermometer" (Barnant Co., Barrington, IL 60010) (FIGURA 28). Este equipo permite un intervalo mínimo 4 segundos para la captura de datos. A este equipo fueron conectadas las termocuplas, utilizando miniconectores apropiados.
- Captura de datos. Computador personal (PC) con procesador Pentium 3 de 500 MHz, 256 MB de RAM, con tarjeta aceleradora gráfica de 32 MHz,

sistema operativo Microsoft® Windows® XP Profesional, conectado a través de un puerto serial RS-232 al *Data Logger*.

- *Software* de adquisición de datos **PC-DAC** - Data analysis and Control Software – Versión1.0 (Copyright© Barnant Company, 1993), que permite recolectar la información del Data Logger al Computador, haciendo posible la visualización en tiempo real de los datos de temperaturas captados por las termocuplas para luego guardarlos en una archivo para su posterior análisis.



FIGURA 26. Termocuplas tipo T Kapton® calibre 30.



FIGURA 27. Dispositivo de bronce para el paso de termocuplas al interior de la bolsa esterilizable.



FIGURA 28. Data Logger marca Digi-Sense de 12 canales.

3.2.9 Instrumentos de medición de precisión. Se utilizaron además los siguientes accesorios o utensilios menores:

- Pie de metro digital marca Fowler & NSK (Japón).
- Micrómetro marca Fowler & NSK (Japón).

3.2.10 Equipo de rayos X. Para determinar la ubicación espacial tridimensional del las termocuplas en el material de prueba (cortes de jurel), se utilizó un equipo de rayos X Modelo DXD – 350 II General Electric (FIGURA 29) y una reveladora automática Modelo XP 1000 DAITO (FIGURA 30), del Hospital Veterinario de la Facultad de Ciencias Veterinarias de la Universidad Austral de Chile.



FIGURA 29. Equipo de rayos X Modelo DXD – 350 II General Electric.



FIGURA 30. Reveladora automática Modelo XP 1000 DAITO.

3.3 Metodología.

Hasta la fecha para los cálculos y evaluación de procesos térmicos de productos marinos en bolsas esterilizables es común encontrar, en la literatura especializada, una aproximación de la forma real considerándolos como planchas (NUÑEZ, 2004), conos truncados (MITCHELL, 2002; SIMPSON *et al.*, 2004), y paralelepípedos (CRISTIANINI y RODRIGUEZ, 2002). En la presente investigación se trabajará con desafíos no abordados hasta el momento como son la forma irregular compleja y condiciones de borde variables y asimétricas.

Para desarrollo de la presente investigación se requirió dividirlo en las siguientes etapas:

- Modelación matemática del fenómeno físico.
- Experimentación en laboratorio.
- Obtención del modelo digital del producto seleccionado.
- Simulación computacional del tratamiento térmico considerando asimetría geométrica y asimetría térmica.
- Evaluación del tratamiento térmico.

3.3.1 Modelo matemático del fenómeno físico. La selección y subsiguiente solución numérica en elementos finitos del modelo matemático a formular requirió de las siguientes suposiciones:

- (1) La transferencia de calor ocurre solo por conducción en el interior del producto, ya que no existe líquido de cobertura en la conserva.
- (2) Las condiciones del medio, temperatura y coeficiente total de transferencia de calor son variables en el tiempo.
- (3) El alimento es considerado isotrópico y de composición uniforme. La composición del producto no varía durante las etapas de calentamiento y enfriamiento.
- (4) Las bolsas poseen un alto grado de vacío, de tal forma que no es un factor crítico que afecte la transferencia de calor durante el proceso.
- (5) Las propiedades termofísicas (k , C_p y ρ) del producto son constantes con respecto a la temperatura.
- (6) El cambio de volumen y área superficial del producto son despreciables por efecto del tratamiento térmico.

De acuerdo a las consideraciones teóricas, el modelo apropiado para representar el proceso de esterilización alimentos sólidos envasados al vacío de formas irregulares complejas es aquella que considera un proceso de conducción de calor transiente con propiedades térmicas constantes con la temperatura. El modelo completo se sustenta en la Ecuación de Gobierno, Condiciones de Borde y Condiciones Iniciales que se muestran en las siguientes secciones.

3.3.1.1 Ecuación de gobierno. La ecuación tridimensional para la conducción de calor transiente en un material isotrópico y homogéneo, con propiedades termofísicas constantes con la temperatura y orientación, puede ser descrita por

la siguiente ecuación diferencial, que en este caso está expresada en coordenadas rectangulares:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.1)$$

Siendo $\alpha = \frac{k}{\rho \cdot C_p}$, la difusividad térmica del producto; ρ = densidad; C_p = Calor específico; k = Conductividad térmica.

El dominio irregular complejo compuesto por las superficies S_1 y S_2 (FIGURA 31), correspondiente al modelo digital, representaría las condiciones de asimetría geométrica.

Para completar el modelo matemático, se deben tener claras las condiciones iniciales y de borde para el dominio irregular complejo (superficies S_1 y S_2).

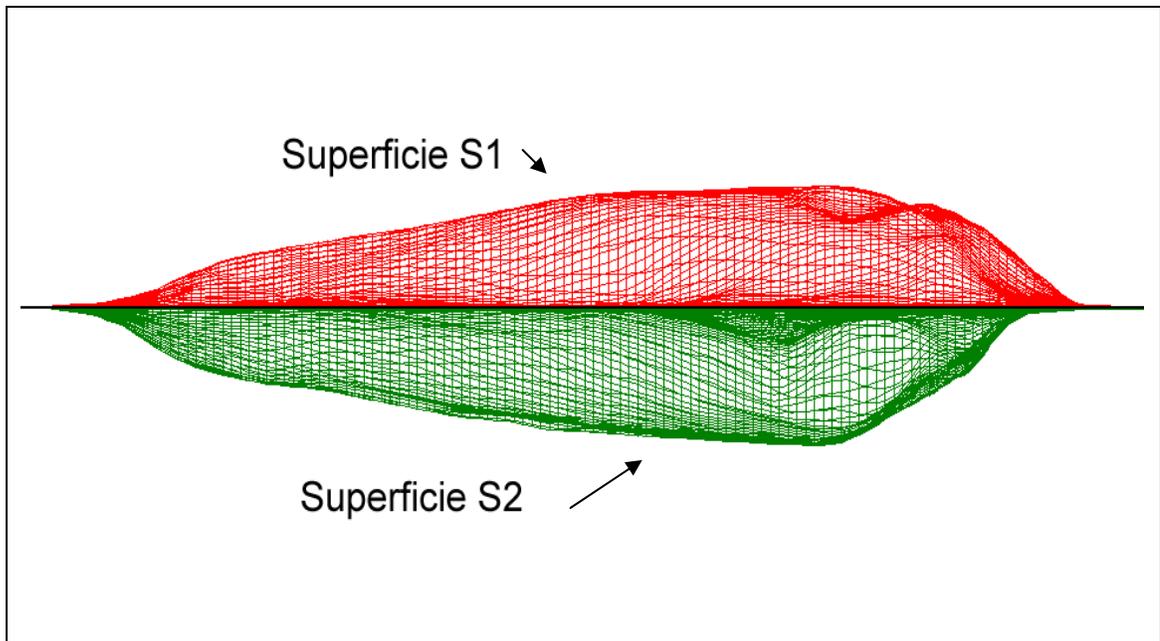


FIGURA 31. Superficies expuestas al medio de esterilización.

3.3.1.2 Condiciones iniciales.

$$\text{Etapa de calentamiento: } T(x, y, z, 0) = T_{in} ; \text{ para todo } x, y, z , t=0 \quad (3.2)$$

$$\text{Etapa de enfriamiento: } T_{in}(x, y, z, t_g) = T_g(x, y, z) ; \text{ para todo } x, y, z , t=t_g \quad (3.3)$$

En la ecuación (3.2) indica que la temperatura inicial es uniforme en todos los puntos del dominio, mientras la ecuación (3.3) indica que la temperatura inicial de cada punto (nodo) del dominio para la etapa de enfriamiento es la condición alcanzada al finalizar la etapa de calentamiento (tiempo t_g).

3.3.1.3 Condiciones de borde considerando asimetría geométrica (dominio irregular 3D) y térmica.

Etapa de calentamiento:

$$k \cdot \frac{\partial T}{\partial n}(x, y, z, t) = U_1(t) [Ta_1(t) - T_s]_{x,y,z \text{ sobre la superficie limite } S1} ; t > 0 \quad (3.4)$$

$$k \cdot \frac{\partial T}{\partial n}(x, y, z, t) = U_2(t) [Ta_2(t) - T_s]_{x,y,z \text{ sobre la superficie limite } S2} ; t > 0 \quad (3.5)$$

Etapa de enfriamiento:

$$k \cdot \frac{\partial T}{\partial n}(x, y, z, t) = U_3(t) [Ta_3(t) - T_s]_{x,y,z \text{ sobre la superficie limite } S1} ; t > 0 \quad (3.6)$$

$$k \cdot \frac{\partial T}{\partial n}(x, y, z, t) = U_4(t) [Ta_4(t) - T_s]_{x,y,z \text{ sobre la superficie limite } S2} ; t > 0 \quad (3.7)$$

Donde U es el coeficiente total de transferencia de calor, que incorpora el coeficiente convectivo de transferencia de calor y el efecto de la resistencia térmica 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 superficie límite expuesta a las condiciones de borde, lo cual es indicado como dos porciones superficiales en el problema a resolver (S_1, S_2), $\frac{\partial T}{\partial n}$ es la gradiente de temperatura normal de la superficie.

Las ecuaciones (3.4, 3.5, 3.6, 3.7), representan las condiciones de asimetría térmica. En ambas etapas, calentamiento y enfriamiento. El modelo matemático contempla la variación de temperatura en el autoclave, durante las etapas de calentamiento y enfriamiento $[T_a(t)]$.

3.3.2 Experimentación en laboratorio. Esta etapa consistió básicamente en la logística necesaria para realizar el tratamiento térmico de esterilización de alimentos envasados el vacío en bolsas esterilizables.

3.3.2.1 Calibración de termocuplas. Una vez conectadas las termocuplas tipo T al Data-Logger fueron calibradas mediante puntos fijos, es decir, el punto de ebullición del agua pura (100 °C) y punto de fusión del hielo (0 °C) a condiciones de presión atmosférica al nivel del mar. NICHOLAS y WHITE (1994) recomiendan este método para la calibración de todo tipo de termocuplas. El procedimiento de calibración se realizó previo a cada ensayo.

3.3.2.2 Servicios básicos del sistema de esterilización. Básicamente en este paso se comprobó para cada ensayo que las condiciones fueran óptimas en lo que se refiere al suministro de la presión del vapor que puede oscilar de 90 a 120 *psig*. Junto con verificar la presión del vapor, es de vital importancia verificar la presión del aire suministrado por el compresor, éste valor debe ser cercano a 15 *psig* para poder lograr la sobrepresión deseada durante el proceso térmico.

3.3.2.3 Selección y preparación del jurel. Las muestras de Jurel, requeridos para la presente investigación, se obtuvieron en el muelle fluvial de la ciudad de Valdivia. Se seleccionaron jureles con una talla (largo) de entre 40 a 60 cm. Para conservar este producto durante la investigación se almacenó a temperatura de congelación (-20 °C) hasta su utilización. Para las experiencias, los pescados fueron descongelados y trozados en los 3 tipos de cortes mencionados anteriormente (conos, filetes y medallones).

Otro proceso importante que se efectuó previo al tratamiento térmico fue una precocción en agua a 95 °C. En esta etapa se elimina la mayor cantidad de agua del producto con la finalidad de reducir ostensiblemente la presión interna en la bolsa que se provocaría por el sobrecalentamiento del vapor formado a partir del agua del producto.

3.3.2.4 Inserción de las termocuplas. Una vez terminado el proceso de precocción se procedió a la inserción de las termocuplas Kapton® en el producto. Se utilizó un dispositivo especial de bronce para introducir la termocupla a través del envase flexible sin perder la condición de vacío (FIGURA 26).

En la práctica es difícil insertar las termocuplas en el punto más frío, de un alimento de forma irregular compleja, mas aún cuando existen condiciones de borde asimétricas, por lo tanto la inserción de estas se realizó en forma tal que el extremo expuesto soldado ("*Probe Junction*") quede ubicado en zonas preestablecidas en los cortes evaluados (FIGURA 32a, FIGURA 32b y FIGURA 32c). La localización exacta del extremo sensible de la termocupla en el interior del alimento (coordenadas x , y , z) fue obtenida mediante Rayos X, las que fueron tomadas en dos distintos planos XY y XZ para cada caso. Los nodos evaluados de los modelos digitales, después de cada simulación en ALGOR®, correspondieron a cada uno de los puntos ubicados espacialmente.

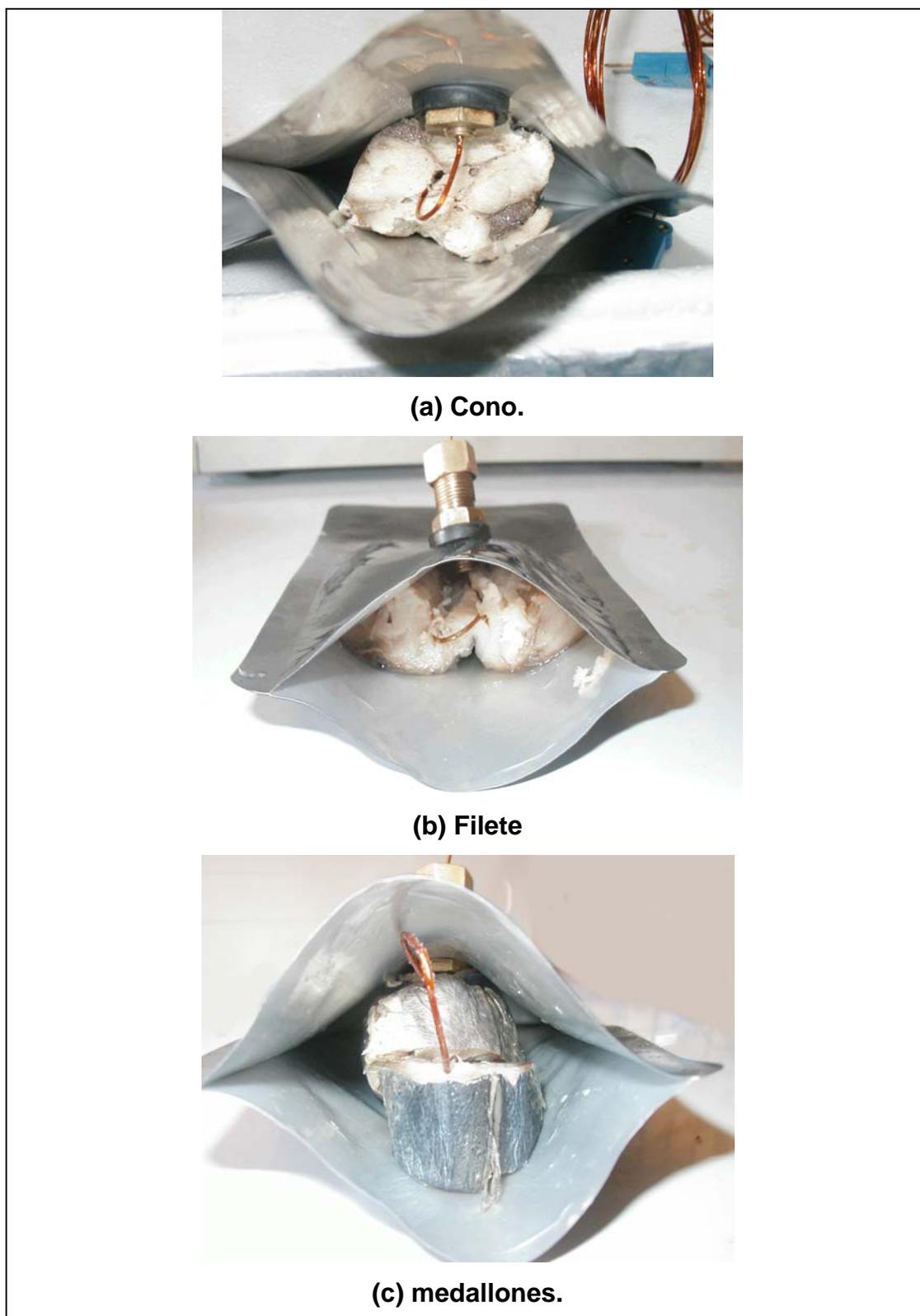


FIGURA 32. Inserción de termocuplas a los productos evaluados.

3.3.2.5 Sellado al vacío. Una vez que se insertó la termocupla y se aseguró el dispositivo de bronce en la bolsa, se procedió a realizar el sellado al vacío, logrando la casi nula retención de aire al interior del envase (FIGURA 33).

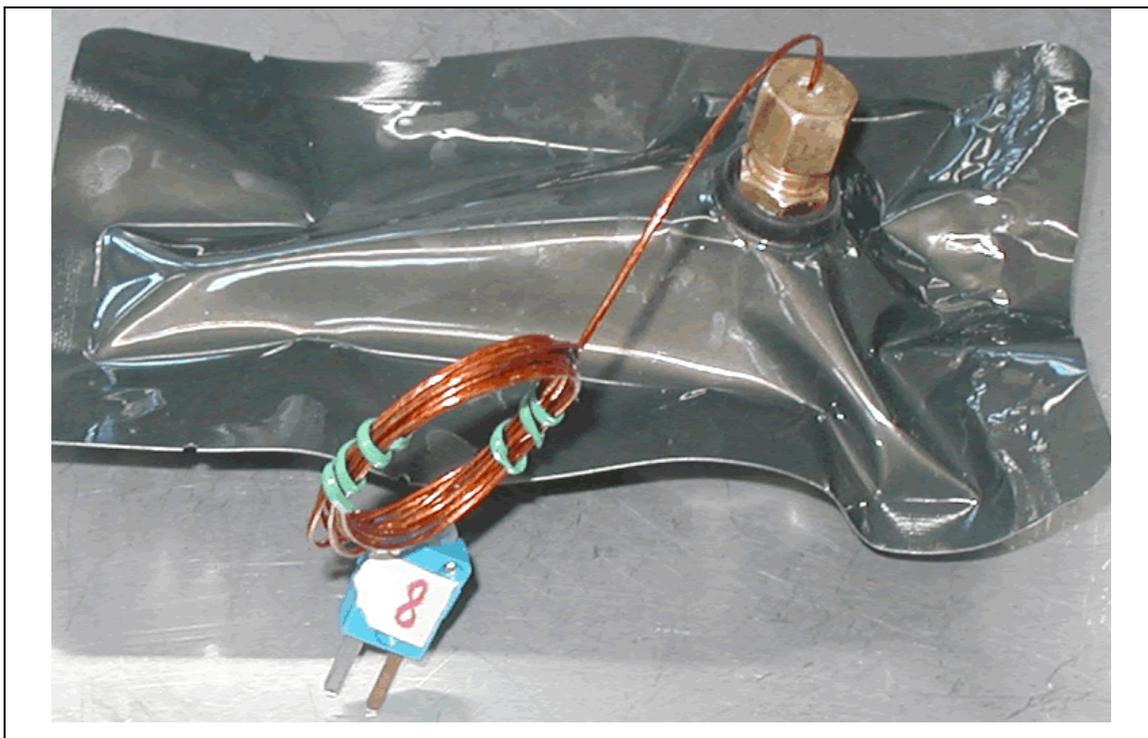


FIGURA 33. Envasado al vacío.

3.3.2.6 Configuración del Data-Logger. El data logger al cual fueron conectadas las termocuplas, se configuró para registrar datos de temperatura de todas las termocuplas a un intervalo de **4 segundos**. Para la captura de datos del Data-Logger se necesitó la ejecución del programa **PC-DAC12**, el cual genera un archivo de extensión (*.dat) para su posterior análisis en una hoja de cálculo. En la FIGURA 34 se observa el montaje del autoclave y el sistema de adquisición de datos.



FIGURA 34. Equipamiento de esterilización y sistema de adquisición de datos.

3.3.2.7 Tratamientos térmicos aplicados. En base a los resultados de NUÑEZ (2004), SIMPSON *et al.* (2004) y WILLUMSEN¹², se establecieron los parámetros de los tratamientos térmicos para todos los cortes evaluados. El tiempo de elevación (CUT) se fijó entre 7 y 8 min, mientras que la temperatura de esterilización se fijó constante a $116 \pm 0,5$ °C. Para cumplir con los criterios de esterilidad comercial los tiempos de proceso térmico se fijaron en base a la forma y tamaño del corte de jurel evaluado.

3.3.2.8 Sobrepresión durante el procesamiento térmico. Como ya se mencionó en el Capítulo II, la sobrepresión en el sistema se usa para equilibrar

¹² Juan Willumsen V. Gerente de Ingeniería - San José S.A. 2005. Tiempos y especificaciones técnicas del proceso de esterilización de jurel en bolsas esterilizables. jwillums@coloso.cl. (15 Abr. 2005).

la presión interna de la bolsa con la externa (medio), debido a que esta última decae al momento de cortar el suministro de vapor empezando el enfriamiento. En pruebas preliminares se demostró como afecta a un envase flexible el enfriamiento sin sobrepresión (FIGURA 35). La no observación de este requisito puede provocar un hinchamiento continuo hasta a veces provocar la explosión, rotura del sellado, o la deformación en el empaque flexible a estados impresentables ante el consumidor como se puede observar en la FIGURA 36.



FIGURA 35. Bolsas al final del calentamiento sin sobrepresión.



FIGURA 36. Producto final de un proceso sin sobrepresión.

Como se indica en la sección 3.3.2.7, la temperatura de trabajo fue de $116 \pm 0,5$ °C siendo la presión correspondiente de $0,7503 \text{ kg}_f/\text{cm}^2$ man. (10,67 psi). A las condiciones de esterilización fue necesaria aplicar sobrepresión al momento del corte de vapor hasta que el producto redujera su temperatura a aproximadamente 100 °C. La sobrepresión fue necesaria para llevar al equilibrio la presión interna y externa (medio) de la bolsa esterilizable. Los niveles de sobrepresión aplicados en el tratamiento térmico, recomendados en la literatura técnica especializada, fluctúan entre 0,2 a $0,7 \text{ Kg}_f/\text{cm}^2$ por encima de la presión correspondiente a la temperatura de esterilización (MITCHELL, 2002; NUÑEZ, 2004). Así, la presión aplicada para esta etapa fue de alrededor de $0,94 \text{ Kg}_f/\text{cm}^2$ man. (13,36 psi) aproximadamente.

3.3.2.9 Determinación del coeficiente global de transferencia de calor. El coeficiente convectivo 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 (GAFFNEY **et al.**, 1985; MAESMANS **et al.**, 1992). Debido a lo citado, es evidente su importancia para el cálculo de la cinética durante las etapas de calentamiento y/o enfriamiento, que además puede ser variable con las condiciones de esterilización.

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. Para tomar en cuenta el efecto de la bolsa hacia el modelo matemático, se utilizó la siguiente expresión que involucra todas las resistencias térmicas desde el ambiente hasta el material alimenticio (ZURITZ y SASTRY, 1990; SIMPSON **et al.**, 2004):

$$\frac{1}{U} = \left[\frac{1}{h} + \frac{e_p}{k_p} \right] \quad (3.8)$$

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 en este caso la bolsa (m)

k_p : Conductividad térmica del material ($W/m K$)

La Ecuación (3.8) teóricamente es estrictamente válida en condiciones estacionarias; sin embargo, puede ser utilizada en condiciones transientes cuando la resistencia conductiva del material de empaque es despreciable con relación al interior del alimento (ZURITZ y SASTRY, 1990).

Un valor correcto del coeficiente U en función del tiempo es de mucha importancia al momento de realizar una simulación del proceso de esterilización. Por esa razón, se determinó la variación del coeficiente U en función del tiempo durante las etapas de calentamiento y enfriamiento de los procesos térmicos aplicados.

La metodología implementada está basada en los trabajos de ORDOÑEZ (1996) y DIAZ (2000). El método en general se basa en la utilización de objetos de cobre de propiedades y dimensiones conocidas, los cuales fueron envasados al vacío en las mismas bolsas esterilizables utilizadas para los cortes de jurel (FIGURA 37). De esta manera se estaría calculando directamente el coeficiente U utilizando la siguiente expresión:

$$U = - \left[\text{Ln} \left(\frac{T_{\infty} - T}{T_{\infty} - T_0} \right) \right] \cdot \left(\frac{Cp \cdot \rho \cdot V}{A \cdot t} \right) \quad (3.9)$$

donde:

T_{∞} : Temperatura del medio (°C).

T : Temperatura final del intervalo evaluado (°C).

T_0 : Temperatura inicial en el intervalo evaluado (°C).

Cp : Calor específico del cobre (J/kg °C).

ρ : Densidad del cobre (kg/m³).

V : Volumen (m³).

A : Área (m²).

t : Tiempo del intervalo (s).

El objeto de cobre envasado al vacío en una bolsa esterilizable fue sometido al proceso de esterilización en el autoclave. Para este caso se registraron la historia tiempo-temperatura para las dos etapas donde la temperatura es función del tiempo. La primera fue para el intervalo de elevación de temperatura

(7 min aprox.) hasta conseguir la temperatura de autoclavado (116 °C); la segunda etapa, y después de tener la temperatura de esterilización constante por algunos minutos, fue para el enfriamiento registrándose datos hasta que la temperatura del objeto de cobre fuera aproximadamente unos 30 °C.

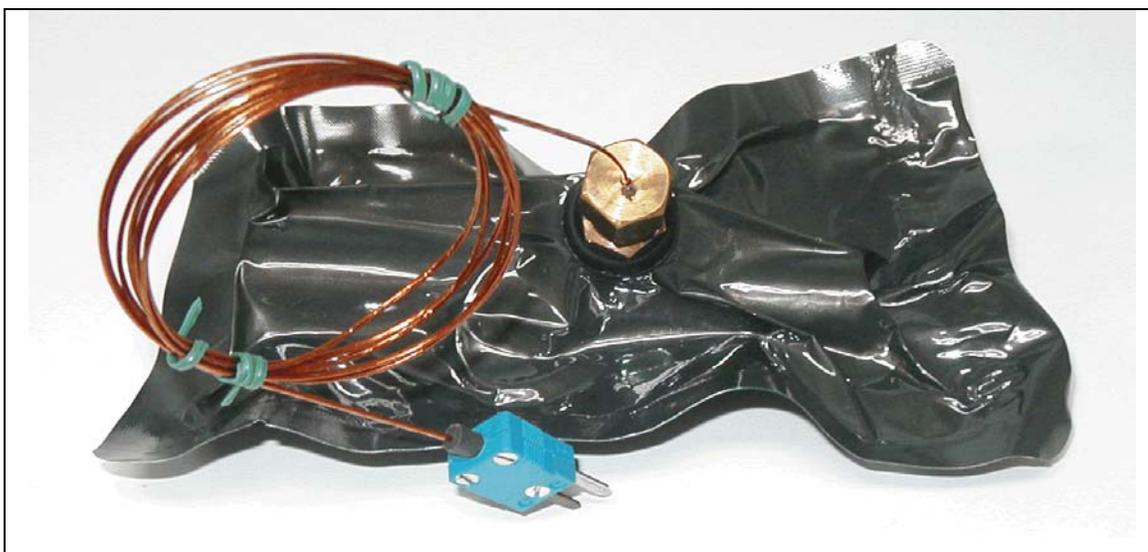


FIGURA 37. Objeto de cobre envasado al vacío en bolsas esterilizables.

A partir de los datos generados y aplicando la Ecuación (3.9) por intervalos de tiempo de 10 s se obtuvo valores del coeficiente U en función del tiempo, para las etapas del proceso CUT y enfriamiento. Con los perfiles del coeficiente U obtenidos, se acondicionaron a las curvas de calentamiento-enfriamiento de los cortes de jurel.

Como las curvas de los cortes de jurel tienen un mismo CUT, una temperatura de trabajo igual (116 °C), y un tiempo de enfriamiento similar, son perfectamente extrapolables manteniendo el último valor de U a 116 °C constante durante el tiempo del operador y luego aplicar los valores correspondientes a la etapa de enfriamiento como lo muestra la FIGURA 38.

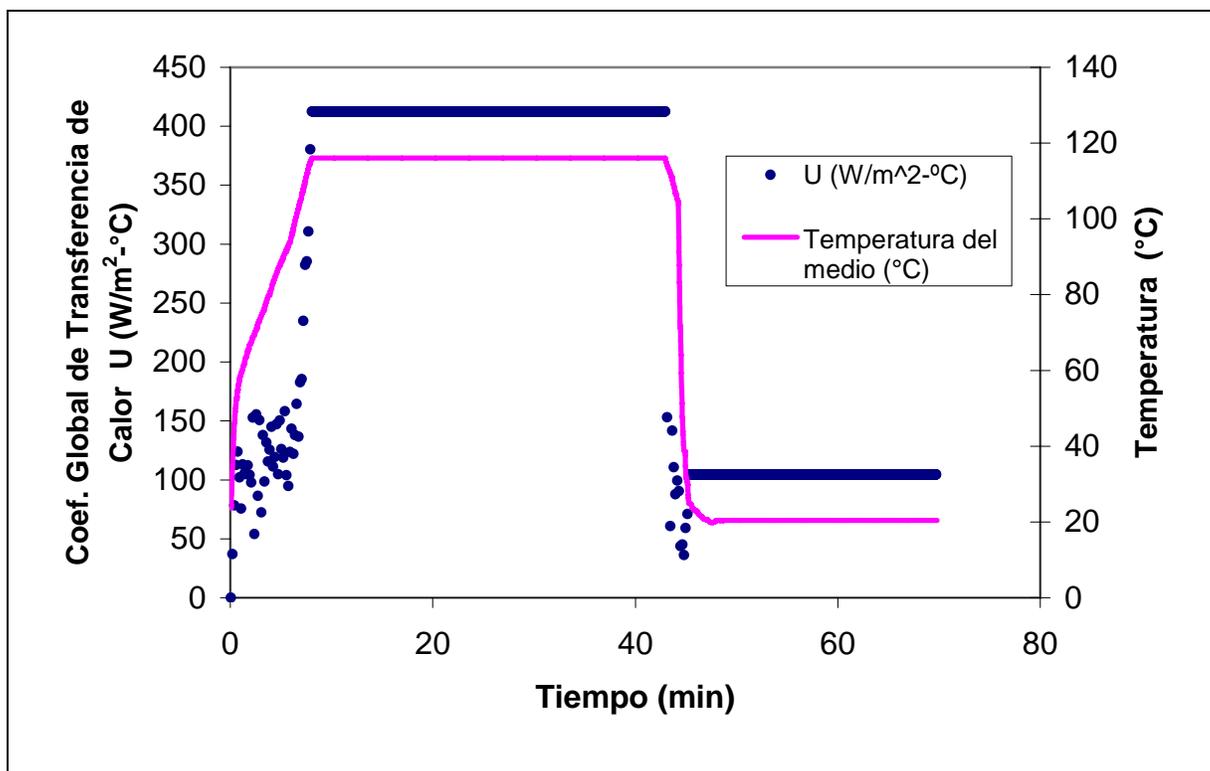


FIGURA 38. Valores del coeficiente U en función del tiempo para el caso de conos de jurel

3.3.2.10 Determinación de la ubicación física de las termocupas insertadas. Para saber exactamente cual es el nodo que corresponde a la ubicación espacial de la termocupla inserta en el alimento, se aplicó la tecnología de Rayos X. Estas coordenadas fueron fácilmente medibles ya que la imagen de la radiografía se tomaron a escala 1:1, con respecto al tamaño de las muestras utilizadas.

Las radiografías fueron tomadas en dos posiciones: **vista superior** que refleja bidimensionalmente la coordenada (x,y) y **vista lateral**, que refleja en la misma dimensión anterior pero en la coordenada (x,z) . Para cuantificar tridimensionalmente el punto del extremo sensible de la termocupla que aparece en la imagen radiográfica, se uso una regla metálica patrón que fue puesta al lado de cada modelo físico al momento de tomar la radiografía.

Con la versatilidad que nos entrega el software de simulación ALGOR®, nos permitió ver y rotar en 3D los modelos digitales sin restricción, hasta encontrar aquél nodo tridimensional que coincidiera con aquella coordenada donde estaba localizada el extremo sensible de la termocupla en la radiografía.

3.3.3 Simulación de procesos térmicos de alimentos de formas complejas.

La simulación de procesos es una de las más grandes herramientas de la ingeniería actual. Así, la simulación de procesos térmicos de alimentos irregulares de formas complejas consta de dos grandes áreas que son el modelado geométrico (CAD) y la simulación de procesos (CAE).

3.3.3.1 Obtención de modelos digitales 3D. El método utilizado, se basó en los principios de ingeniería reversa. Este método consistió en la adecuación de una plataforma compuesta por *hardware* y *software* comerciales, utilizados en otras áreas como la industria del cine, automotriz, entre otras, para ser aplicada en la captura de la forma irregular compleja del conjunto producto-bolsa esterilizable.

3.3.3.1.1 Trazado de mallas. El primer paso para la digitalización 3D es el trazado de mallas (filas y columnas) sobre la superficie del modelo físico, en este caso la bolsa esterilizable envasada al vacío. Para el trazado de las mallas se utilizaron lápiz de tinta fino de distintos colores y una regla flexible (FIGURA 39) de acuerdo al procedimiento descrito por PINO (2004).

En aquellas zonas de mayor irregularidad se trazó una malla más fina, es decir, filas y columnas con menor espaciamiento. Con esto se logró un mayor nivel de detalle de la representación digital del alimento envasado al vacío en bolsas esterilizables.

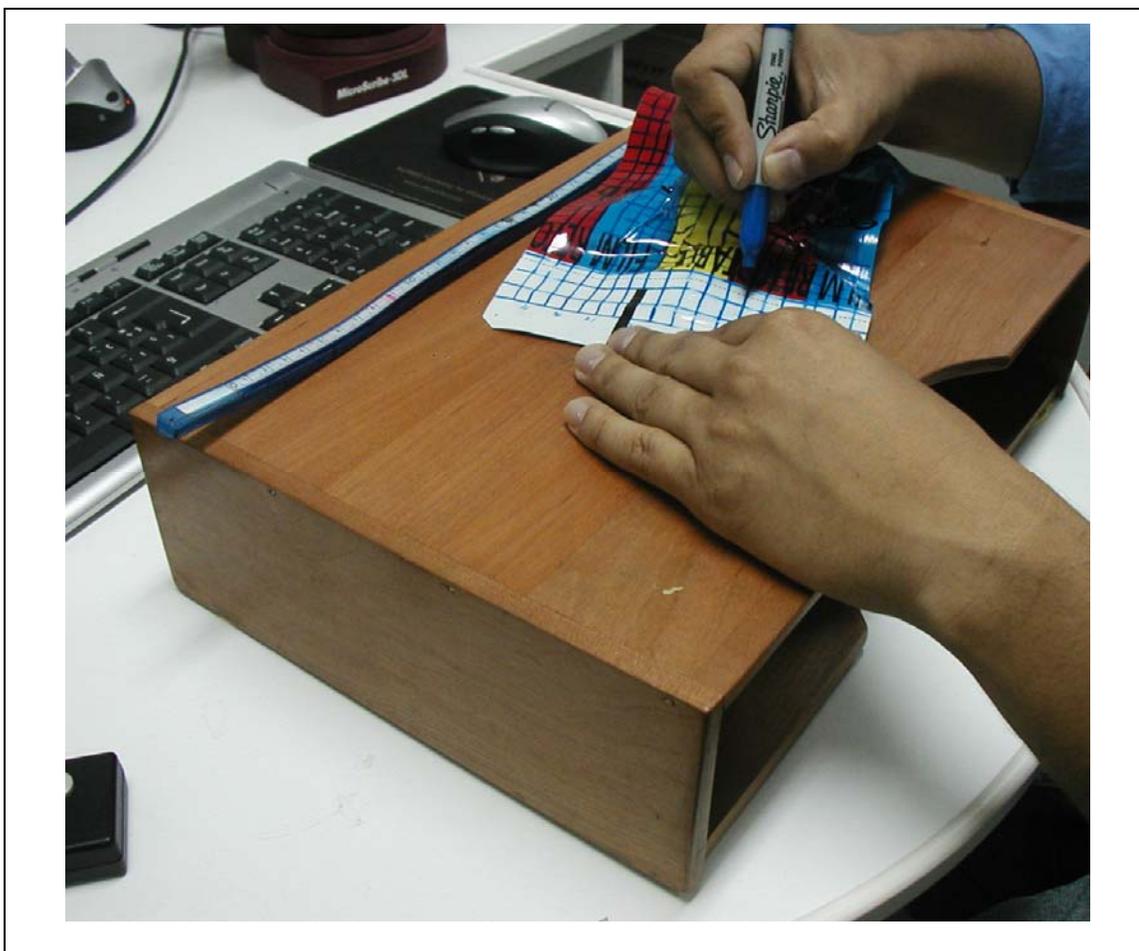


FIGURA 39. Trazado de la malla (filas y columnas) sobre la superficie de una bolsa esterilizable.

3.3.3.1.2 Captura de puntos. Para el jurel envasado al vacío en bolsas esterilizables se diseñó un soporte específico de madera que fue montado sobre una plataforma de trabajo o mesón, siendo adheridos a ésta con masilla adhesiva de fácil extracción (FIGURA 40). La posición del modelo físico sobre el soporte es muy importante para que éste sea completamente accesible para la punta del brazo digitalizador *MicroScribe 3DL*.



FIGURA 40. Plataforma de soporte para la digitalización tridimensional de los trozos de jurel envasados al vacío en bolsas esterilizables.

Para capturar los puntos resultantes del trazado de la malla sobre cada modelo físico se implementó el procedimiento de reconstrucción de superficies descrito por PINO (2004). El procedimiento consiste en reconstruir superficies desde un “point grid” o *grilla de puntos*. Esta opción del software Rhinoceros® necesita que se ingrese la matriz (números de filas y columnas) de puntos que fueron trazados previamente sobre la superficie de la bolsa esterilizable. Cada coordenada de la malla es ingresada ubicando, sobre cada punto de la matriz trazada, la punta de aguja fina del brazo digitalizador (FIGURA 41).



FIGURA 41. Captura de los puntos de la malla trazada sobre las bolsas esterilizables con el brazo digitalizador Microscribe-3DL™.

3.3.3.1.3 Generación del modelo digital. Consistió de dos grandes pasos a seguir. Por una parte la digitalización 3D de los modelos físicos por el método de reconstrucción de superficies y por otro lado el modelado tridimensional utilizando puntos de control, para así generar un sólido digital reconocible por algún software de tecnología CAE. Las técnicas se detallan a continuación:

a) Digitalización de las superficies Una vez capturados todos los puntos de cada cara o superficie de la bolsa esterilizable, es decir, las coordenadas (x, y, z), el software Rhinoceros® reconstruye la superficie y realiza su representación geométrica digital. La representación para todas las formas es realizada en base a curvas NURBS (FIGURA 42).

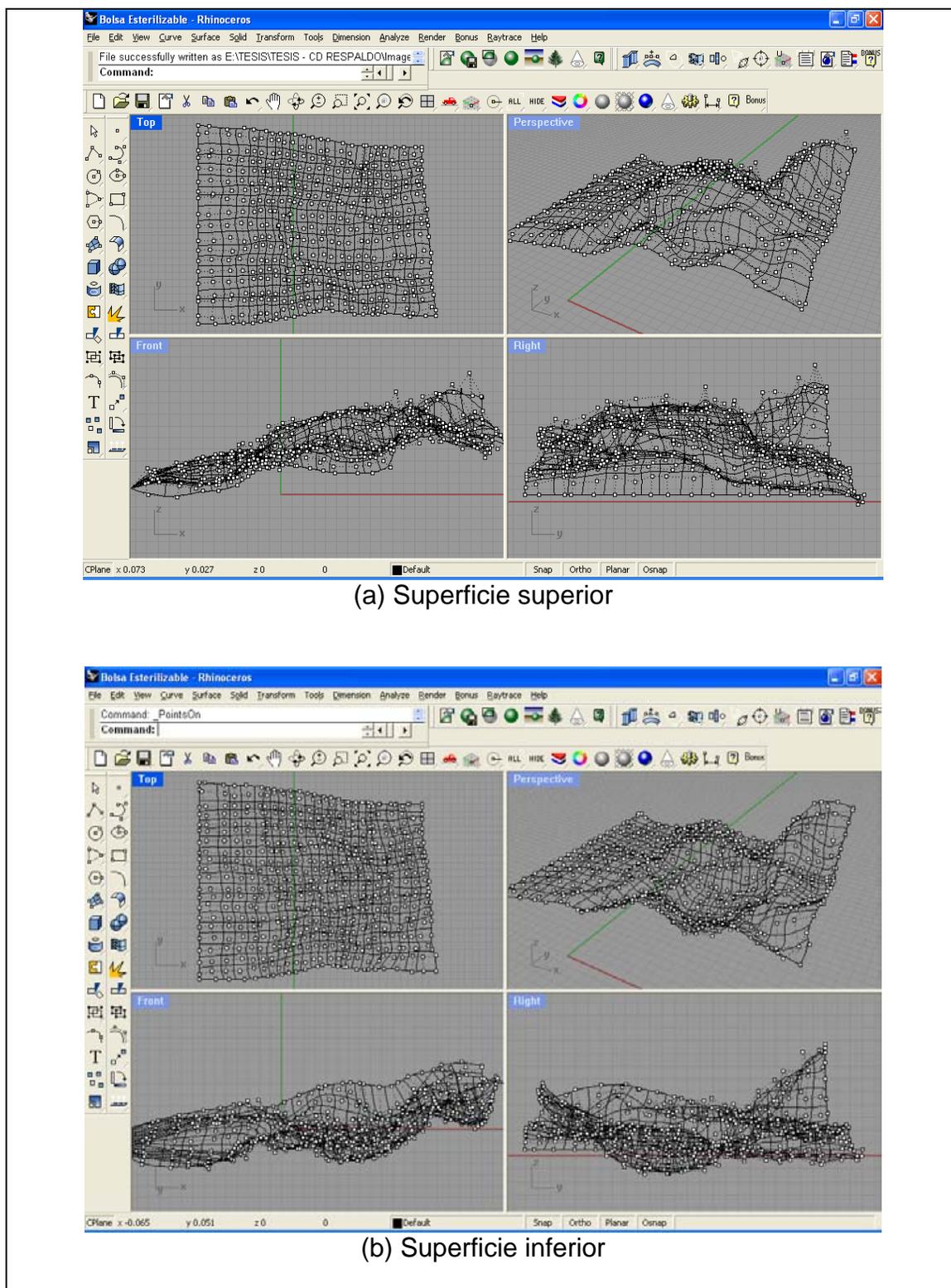


FIGURA 42. Matriz de puntos 3D de una de las superficies de las bolsas esterilizables capturados con el software Rhinoceros®.

b) Modelado geométrico 3D. Este proceso requirió la adquisición de un conocimiento técnico avanzado del software de tecnología CAD, como se describió en el Capítulo 2. Técnicamente el proceso de modelación tridimensional consiste en el desplazamiento de puntos de control hasta un nivel de precisión de nanómetros¹³. El manejo de los puntos de control implicó cortar, suavizar bordes, generar nuevas superficies, cerrar perfectamente los modelos digitales de las dos superficies, de manera tal que se transforme en un solo modelo sólido idéntico al original (FIGURA 43).

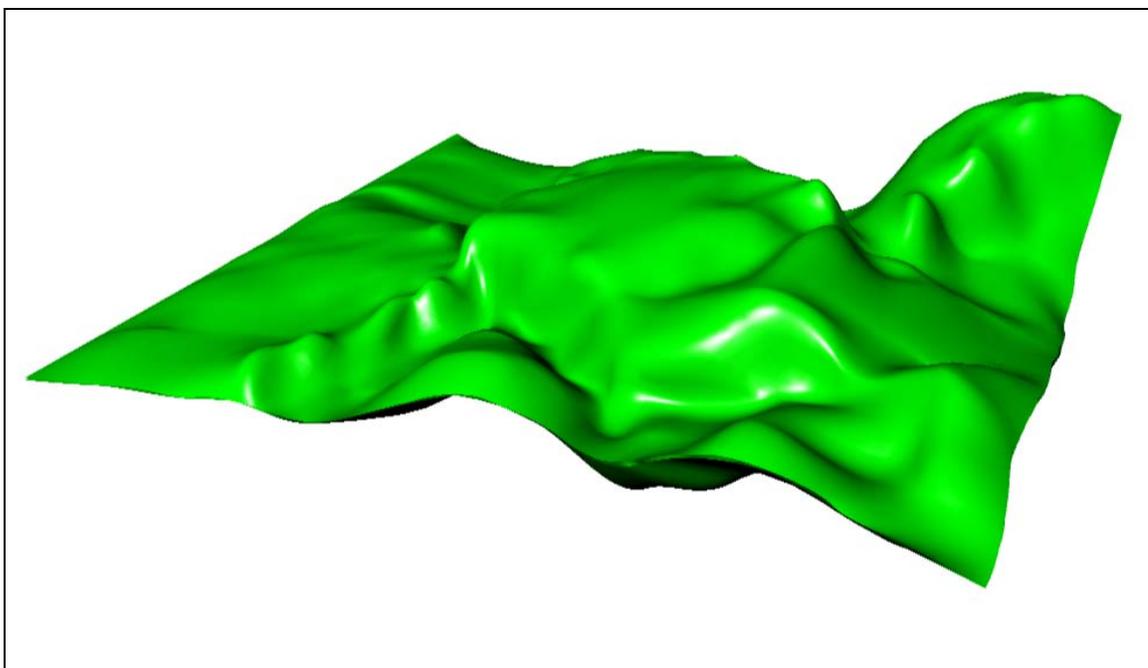


FIGURA 43. Modelo sólido digital de una bolsa esterilizable

Además aprovechando las capacidades del software se puede calcular con bastante exactitud el área superficial y volumen del modelo digital generado. Lo anterior posibilitaría eventualmente dividirlo en varias secciones, analizar cada una por separado y lo mas importante exportarlo a cualquier software CAE de

¹³ Facundo Miri, Soporte online del Software Rhinoceros® para Latinoamérica. Técnicas y comandos para la modelación tridimensional para el movimiento de puntos de control. fcundo@mceel.com. (28 Oct. 2004).

simulación de procesos térmicos para el análisis de transferencia de calor transiente bajo condiciones de asimetría térmica.

3.3.3.2 Intercambio CAD/CAE. Esta es la etapa intermedia de comunicación entre dos software de Ingeniería, donde el modelo CAD del alimento o material representado digitalmente en Rhinoceros® es guardado como un archivo tipo “Rhino 3-D Model” (extensión “.3dm”). Luego, mediante la función RHINOCEROS® IMPORT EXTENDER, este archivo es importado en su forma nativa directamente por el software **CAE** de análisis de transferencia de calor **ALGOR®** (FIGURA 44), manteniéndose intacta la información no sólo geométrica sino también del sistema de unidades, entre otros.

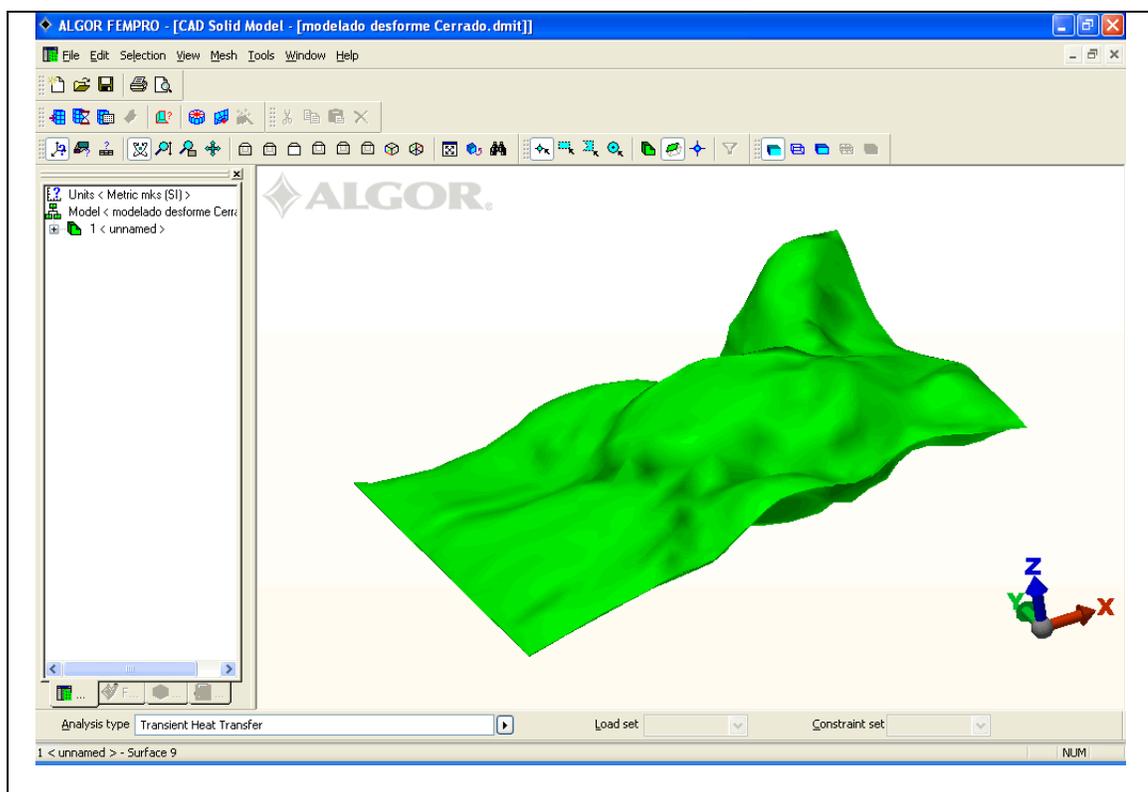


FIGURA 44. Modelo sólido digital de la bolsa esterilizable importado en el software ALGOR®.

3.3.3.3 Determinación de algunos parámetros de simulación. Para la obtención de resultados confiables existen varios parámetros de entrada para el software ALGOR® que deben ser establecidos previo a la realización de las simulaciones.

3.3.3.3.1 Pruebas convergencia numérica. Para conocer qué tamaño de elementos sería el adecuado para las simulaciones, se procedió a realizar *pruebas de convergencia*, en donde un mismo modelo (dominio digital) se somete a simulaciones en las que se va disminuyendo el tamaño de los elementos. Es de esperar que mientras mas pequeño sea el tamaño de los elementos (y por tanto mayor el número de éstos), se generará una solución cada vez más “exacta”; sin embargo, el tiempo computacional, los requerimientos de hardware, y sistema operativo, pueden aumentar dramáticamente hasta un punto que el propio sistema operativo/computador colapsen, sin importar la tecnología de éste. Si la solución cambia significativamente con respecto al tamaño de elemento anterior, puede ser un signo de que el tamaño de los elementos usados es aún “grande”, y el cálculo tendría que repetirse usando un tamaño más pequeño de elementos. Este proceso (disminución del tamaño de los elementos) se repite hasta que la solución no cambie apreciablemente. En este punto, se considera que la solución ha convergido.

La prueba de convergencia que se realizó en la presente investigación fue aplicada a un modelo de cono truncado de jurel envasado al vacío en bolsas esterilizable y las variables consideradas fueron las siguientes:

a) Tamaño de malla: Se eligieron 5 densidades de malla que se detallan en el CUADRO 3.

CUADRO 3. Tamaños de malla elegidos para las pruebas de convergencia.

Tamaño absoluto de la malla (m)
0,005
0,0045
0,004
0,0035
0,003

b) Tamaño del paso de tiempo: Este es el tamaño en segundos de cada paso de cálculo, o mejor dicho, el tamaño del intervalo de tiempo en que el software realizará los cálculos. Dado que un análisis transiente es una integración numérica, los resultados serán más exactos mientras mas pequeño sea el paso de tiempo. También algunos modelos pueden provocar una inestabilidad numérica debido a que la cantidad de datos para las cargas (condiciones de borde) respectivas, que explican su comportamiento con el tiempo, son excesivas.

Se analizaron 3 tamaños de paso de tiempo: 1; 0,5; 0,1 segundos. Para todos los análisis se utilizaron parámetros comunes del producto, como son sus propiedades térmicas y físicas, que se detallan en el CUADRO 4.

Los resultados y parámetros que se consideraron y compararon para la determinación del mallado óptimo fueron:

- El tiempo en que el nodo de más lento calentamiento llegue a 75 y a 100 °C respectivamente (“ t_{75} ”, “ t_{100} ”).
- Gasto computacional, tiempo que demora la simulación (“ t_T ”).
- Espacio ocupado en el disco duro (“HDD”).

Los resultados para el análisis de convergencia se muestran en el CUADRO 5.

CUADRO 4. Parámetros del modelo comunes en todos los análisis.

Nombre del modelo	Retortable Pouche
Volumen	0,000179023018 (+/- 1e-013) m ³
Área Superficial	0,050818348 (+/- 1.5e-008)m ²
Temperatura nodal por defecto (inicial)	20 °C
Tipo de elementos	Ladrillo (Brick)
Modelo del material	Isotrópico
Densidad másica	1018,0 kg/m ³
Conductividad térmica	0,588 J/(s °C m ²)
Calor específico	3692,3 J/(kg °C)
Coeficiente convectivo global	Variable con el tiempo
Tiempo de elevación (CUT)	720 s ~12 min
Temperatura de esterilización	121,1 °C
Tiempo de proceso	4196 s

Se puede observar en el CUADRO 5, que hay casilleros completados con ERROR¹, para todos los cálculos con paso de tiempo 0,1s. Esto se debe que la cantidad de cálculos realizados en el software ALGOR® sobrepasa la capacidad del computador y la estabilidad del sistema operativo Windows® XP Service Pack 2. Se observa claramente que el paso de tiempo no juega un papel importante en la convergencia ya que no hay diferencia entre los valores de tiempo calculados para los pasos de tiempo de 1 y 0,5 s para cada densidad de malla evaluada.

Además se evaluó una densidad de malla de 2 mm. En este caso no se obtuvo resultados de simulación debido al aumento drástico de elementos, lo que sobrepasa la capacidad del software ALGOR® y la estabilidad del sistema operativo como en el caso del ERROR¹.

CUADRO 5. Resultados de las pruebas de convergencia.

Tamaño elemento	Nº elem. (Nº nodos)	Nodos más frío	Item	Tamaño del Paso de Tiempo		
				1s	0.5s	0.1s
5 mm	10926 (3834)	3201 3205 3217 3215	Código	4ab5mm1s	4ab5mm05s	4ab5mm011s
			t_T (h)	6,5	10,3	ERROR ¹
			HDD (GB)	2,27	4,53	ERROR ¹
			t_{75} (s)	1260	1259,5	ERROR ¹
			t_{100} (s)	1779	1779	ERROR ¹
4,5 mm	13985 (5083)	4281 4279 4269 4273	Código	4ab4mm1s	4ab4mm05s	4ab4mm01s
			t_T (h)	10,1	20,4	ERROR ¹
			HDD (GB)	3,1	6,3	ERROR ¹
			t_{75} (s)	1268	1268	ERROR ¹
			t_{100} (s)	1788	1787,1	ERROR ¹
4 mm	18091 (6675)	6625 6623 6596 6626	Código	4ab3mm1s	4ab3mm05s	4ab3mm01s
			t_T (h)	11,6	21,0	ERROR ¹
			HDD (GB)	3,83	7,63	ERROR ¹
			t_{75} (s)	1121	1121	ERROR ¹
			t_{100} (s)	1592	1591,5	ERROR ¹
3,5 mm	24524 (9277)	7793 7776 7775 7792	Código	4ab3mm1s	4ab3mm05s	4ab3mm01s
			t_T (h)	20,1	41,3	ERROR ¹
			HDD (GB)	5,6	11,8	ERROR ¹
			t_{75} (s)	1264	1265	ERROR ¹
			t_{100} (s)	1784	1784	ERROR ¹
3 mm	35526 (13814)	11539 11540 11555 11538	Código	4ab3mm1s	4ab3mm05s	4ab3mm01s
			t_T (h)	24,21	ERROR ¹	ERROR ¹
			HDD (GB)	7,7	ERROR ¹	ERROR ¹
			t_{75} (s)	1272	ERROR ¹	ERROR ¹
			t_{100} (s)	1789	ERROR ¹	ERROR ¹

De los valores analizados en el CUADRO 5 se puede inferir que los resultados no cambian drásticamente para los tiempos correspondientes a 75 y a 100 °C, salvo cuando se aplica una malla de 4 mm. Esto se explica ya que el modelo genera nodos y elementos aleatorios, lo que en este caso provocó que la coordenada del nodo más frío sea desplazada levemente.

Por lo tanto se sabe que a menor densidad de malla aumentan el número de elementos y por lo tanto la solución es mas aproximada, por tal razón se eligió la densidad de malla de 3 mm con un intervalo de tiempo de 1 s. Dado que la solución no converge apropiadamente, se sabe por experiencia ingenieril que mientras mas pequeña sea la densidad de malla la solución es mas “exacta” (RODRIGUEZ, 2005). Aunque no fue el caso, en algunas ocasiones se debe hacer un balance entre la exactitud deseada y el tiempo de cálculo.

3.3.3.3.2 Propiedades termofísicas. Como se mencionó anteriormente las propiedades termofísicas son parte de las condiciones de entrada en el cálculo de tiempos de proceso en la simulación numérica. Muchos autores las determinan o estiman a 100 °C y las consideran constantes para todo el rango de trabajo (SIMPSON *et al.*, 2004).

En base a la composición proximal como se muestra en el CUADRO 6, las propiedades termofísicas fueron calculadas mediante el software **WebFoodProperty** (disponible en <http://www.wamfoodlab.cl>) a tres diferentes temperaturas con importancia letal.

a) Composición proximal del jurel (*Trachurus murphyi*).

CUADRO 6. Composición química fraccional del jurel.

Composición	Fracción másica
Agua	0,73
Proteínas	0,219
Lípidos	0,038
Carbohidratos	0,012
Extracto No Nitrogenado	0,001

FUENTE: SCHMIDT y HEBBEL (1992)

b) Propiedades termofísicas. Estas fueron calculadas a tres distintas temperaturas: 100, 110 y 116 °C. A continuación en el CUADRO 7, se muestran los resultados de densidad, conductividad térmica y calor específico a cada una de las temperaturas señaladas. Con la finalidad de determinar la influencia de las propiedades termofísicas sobre la curvas de temperatura y sobre el valor F_0 , se procedió a simular con el software ALGOR® un mismo modelo digital para los tres conjuntos de propiedades termofísicas del CUADRO 7 manteniendo los otros parámetros de simulación invariables.

CUADRO 7. Propiedades termofísicas del jurel a distintas temperaturas.

Temperatura (°C)	Densidad kg / m^3	Conductividad Térmica $J / (s \cdot ^\circ C \cdot m^2)$	Calor Específico $J / (kg \cdot ^\circ C)$	F_0 (min)
100	1017	0,572	3646,7	15,69
110	1010	0,575	3656	16,78
116	1004,9	0,576	3663,1	16,83

Del CUADRO 7, se observa que a medida que aumenta el valor de temperatura para el cálculo de las propiedades termofísicas, el valor de F_0 aumenta levemente. Por lo tanto se usará para las simulaciones térmicas, aquellas

propiedades termofísicas calculadas a 100 °C, ya que no hay una diferencia importante con las calculadas a las otras temperaturas.

3.3.3.4 Simulación del proceso térmico en ALGOR®. Una vez creado el modelo digital en Rhinoceros® de los cortes envasados al vacío en bolsas esterilizables, éstos son sometidos a la simulación de los tratamientos térmicos con el software ALGOR®. El método que utiliza este software para la resolución de los problemas es el **Método de Elementos Finitos** (ver Capítulo 2).

3.3.3.4.1 Definición del sistema de unidades.. Gracias a la tecnología RHINOCEROS® IMPORT EXTENDER de ALGOR® v. 19.0 el programa reconoce automáticamente el sistema de unidades del modelo digital de Rhinoceros. Sin embargo, si se desea, el sistema de unidades puede ser cambiado a Métrico mks (SI), Métrico cgs, Inglés (in), etc. (FIGURA 45).

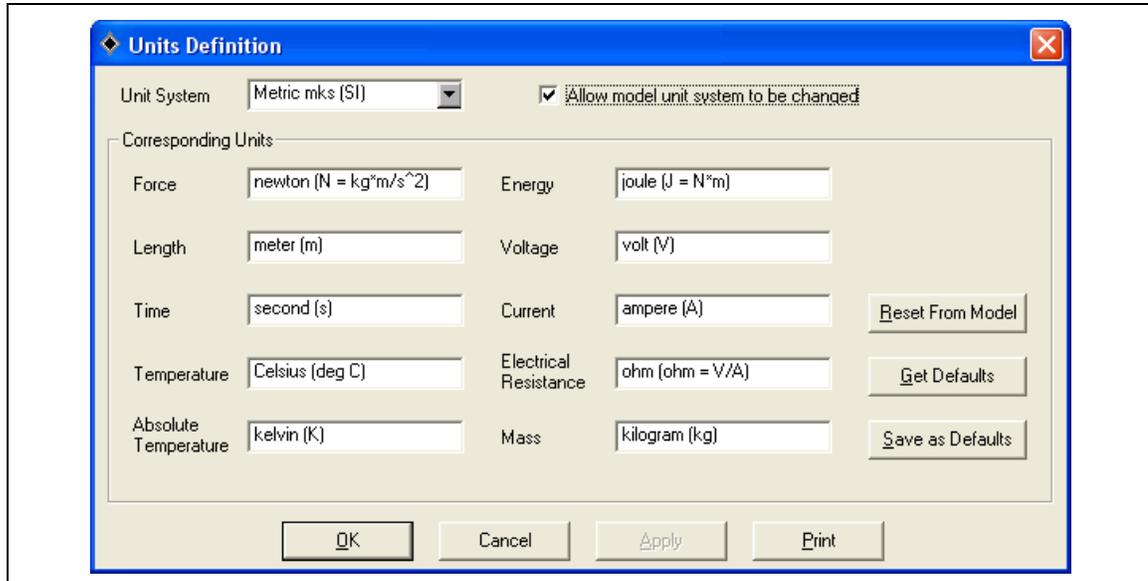


FIGURA 45. Definición del sistema de unidades.

3.3.3.4.2 Elección del escenario del diseño. Una vez que el modelo está abierto en ALGOR®, pide especificar el tipo de análisis que se desea realizar.

Para el caso de la presente investigación se trata del caso de transferencia de calor en estado transiente (FIGURA 46), donde el historial tiempo-temperatura del proceso, sería el resultado esperado.

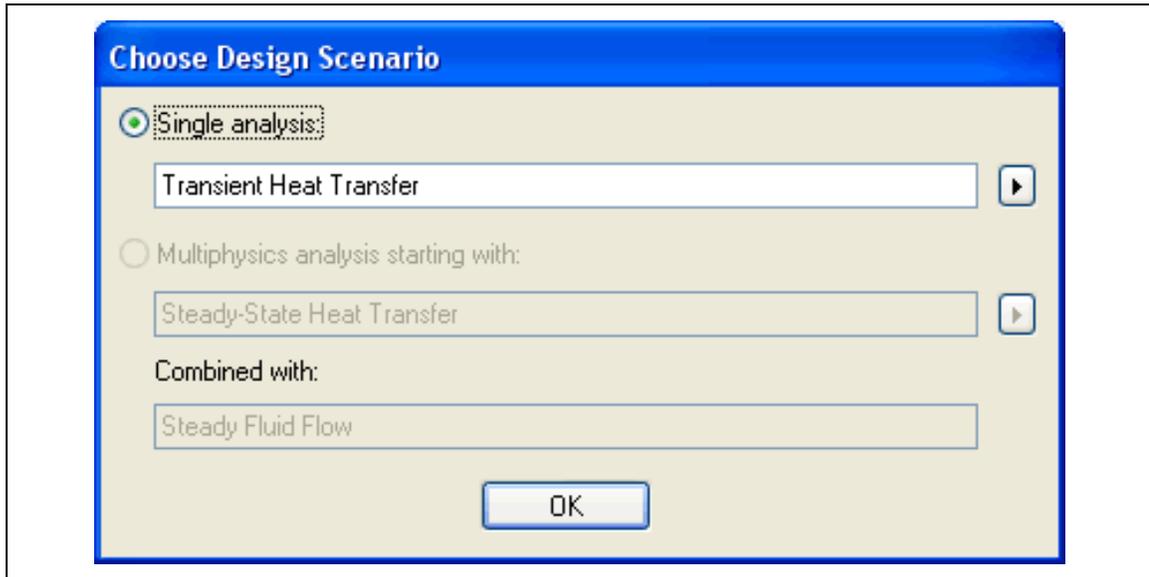


FIGURA 46. Definición del escenario del diseño.

3.3.3.4.3 Generación de la malla. Cuando se establece el escenario, se debe crear la malla de elementos que discretizarán el dominio continuo del alimento para su análisis numérico. Este proceso de mallado es realizado en ALGOR® de forma automática, previo ingreso de la densidad de malla deseada, es decir, del tamaño promedio que se le dará a cada elemento (RODRIGUEZ 2005).

ALGOR® presenta dos formas de elegir el tamaño de la malla: una es en porcentaje, donde el generador de malla del software calcula automáticamente un tamaño de malla basado en el porcentaje ingresado multiplicado por el tamaño de malla por defecto (cuando el *slider* está en la mitad, indicando un 100%). La otra opción es ingresar el tamaño absoluto de malla, donde el generador de malla intentará hacer la malla sobre el modelo usando aproximadamente el tamaño de malla ingresado. El número ingresado aquí

corresponderá a la longitud aproximada de los lados de los elementos (FIGURA 47).

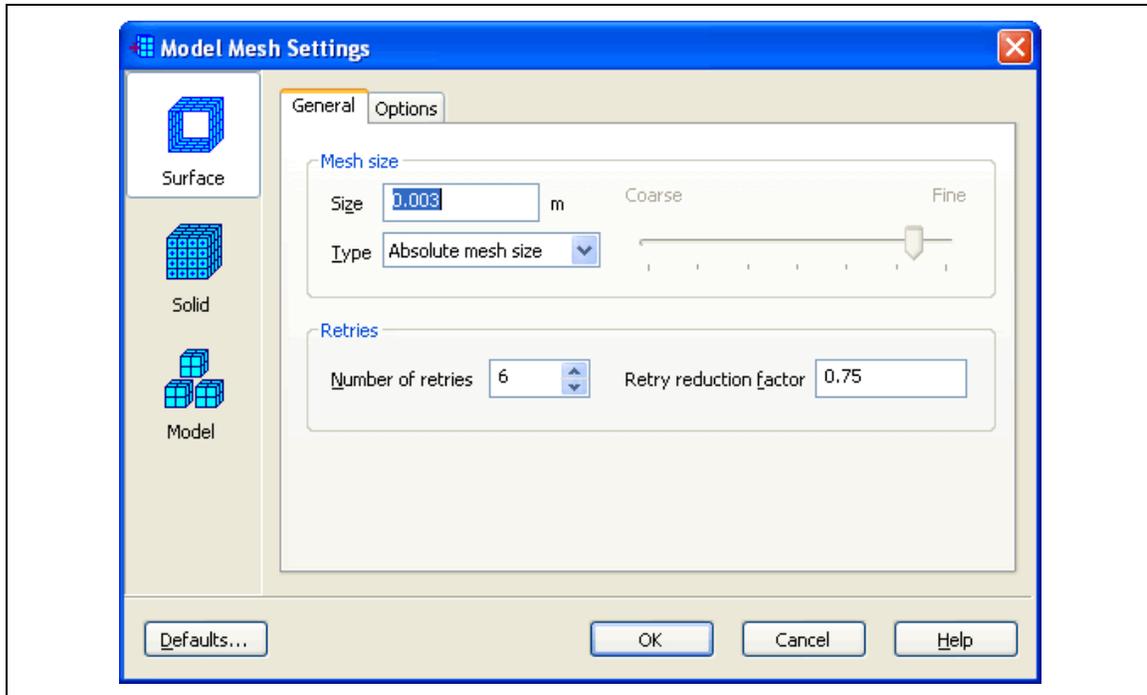


FIGURA 47. Generación de la densidad de la malla en el modelo.

Antes de crear el mallado del dominio 3D del alimento, se crea, primero, una *malla de superficie*, en donde se generan elementos 2D sólo en la superficie del modelo, para así tener una idea de cómo quedará la malla del sólido antes de generarla. También se debe elegir qué tipo de elementos deseamos en la malla: sólo ladrillos, sólo tetraedros, o una mezcla de ellos. Se eligió el método de mallado mixto "**Bricks/Tetrahedra**" (Ladrillos/Tetraedros), la opción por defecto, ya que genera una malla de la más alta calidad y con el menor número de elementos. Toda esta generación de elementos es realizada por ALGOR® en forma automática (FIGURA 48).

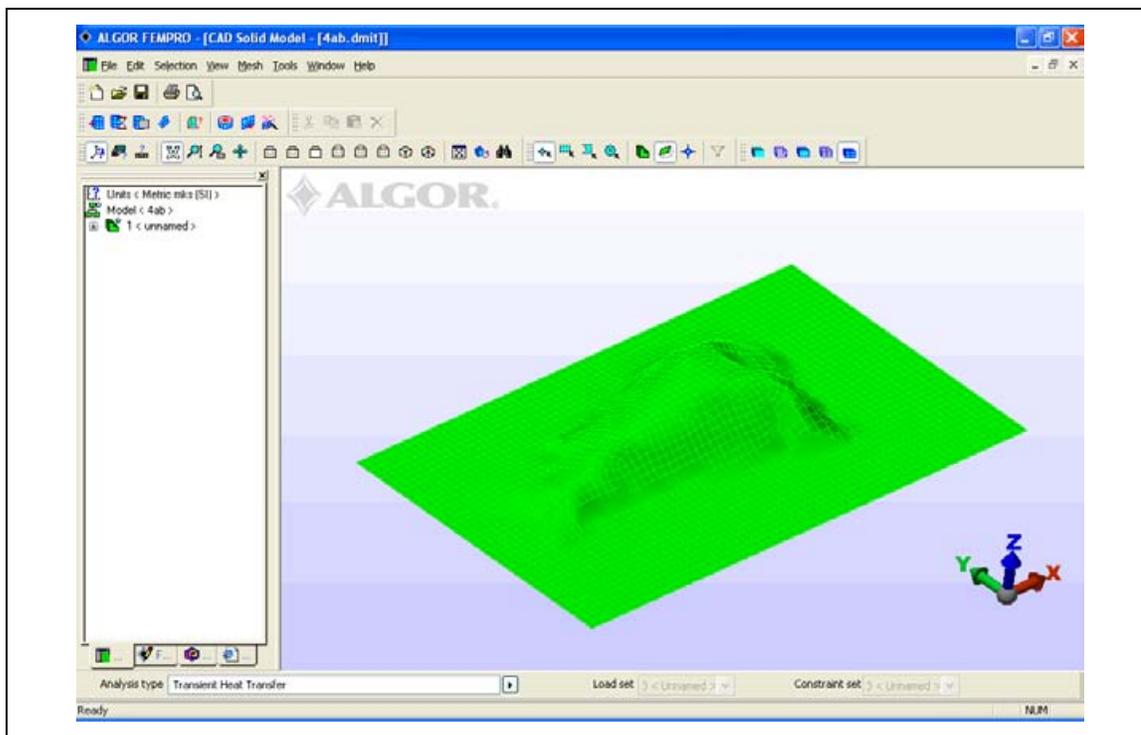


FIGURA 48. Malla de superficie de un modelo digital de cono de jurel envasado el vacío en bolsa esterilizable

3.3.3.4.4 Definición de los elementos. Se debe tener claro que tipo de elementos se analizará. Puestos que estos pueden ser isotrópico o bien ortotrópico (FIGURA 49). Se utilizó el modelo isotrópico por la relativa homogeneidad del alimento analizado, en este caso el jurel (RODRIGUEZ, 2005).

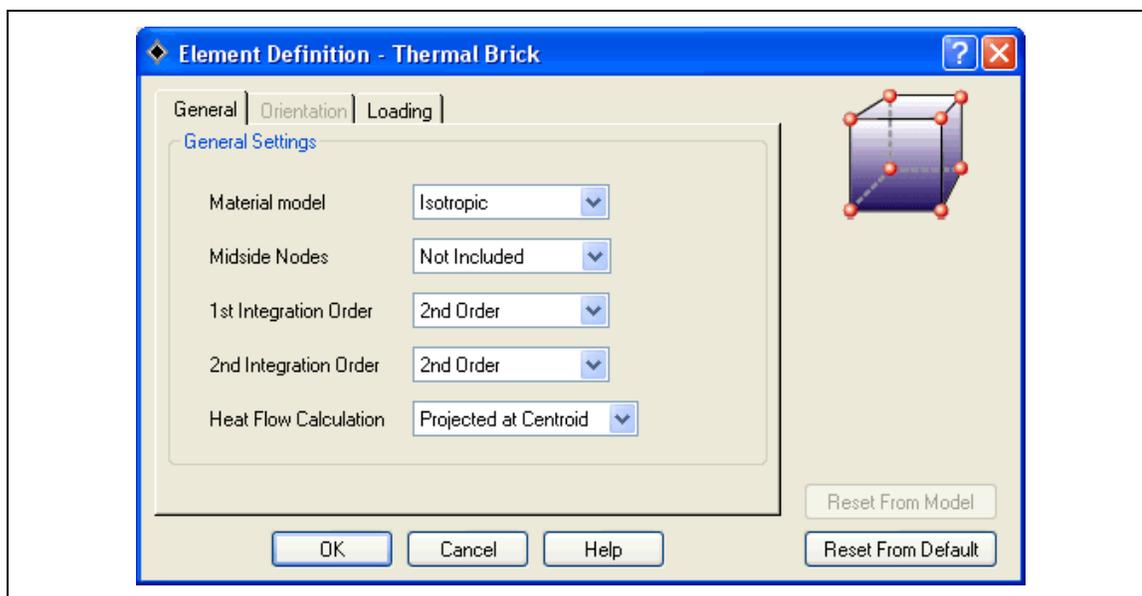


FIGURA 49. Ventana de definición de unidades en ALGOR®.

3.3.3.4.5 Especificación del material de los elementos. Es aquí cuando se ingresan las propiedades termofísicas del alimento analizado y son las que se ingresan al software: **Densidad másica (ρ)**, **Conductividad térmica (k)**, y **Calor específico (C_p)** (FIGURA 50). Ellas fueron determinadas por medio del software *FoodProperty Pro* a la temperatura de 100 °C descrito en 3.3.7.2.

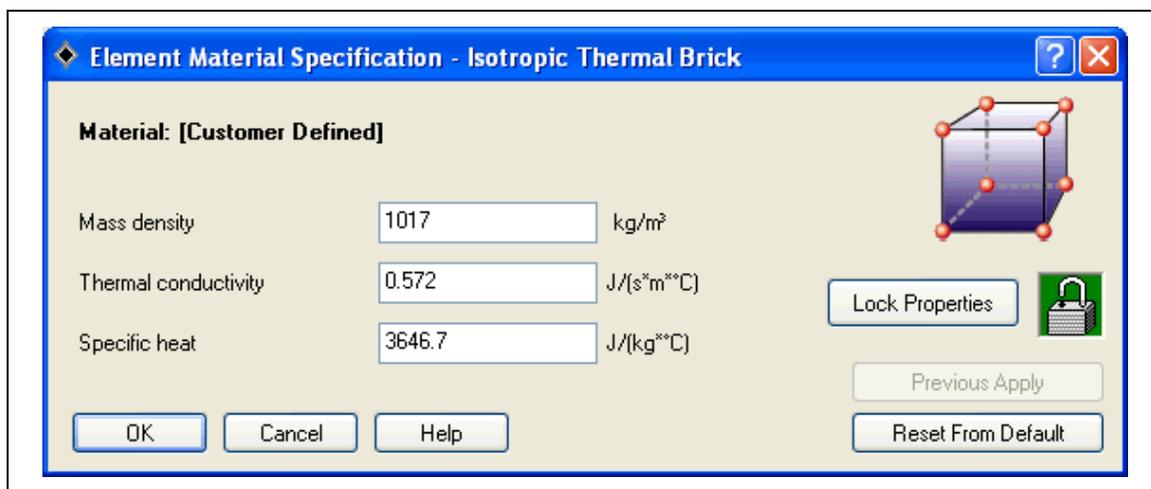


FIGURA 50. Propiedades termofísicas del material seleccionado.

3.3.3.4.6 Ingreso de los parámetros de tiempo y temperatura nodal. Acá se especifica el número de pasos de tiempo (*Number of time steps*), el tamaño del paso de tiempo (*Time-step size*). Esto determinará la duración (en segundos) del proceso simulado. Además se debe especificar el intervalo de salida de los resultados (*Output interval*), (FIGURA 51). Los parámetros ingresados se detallan en el CUADRO 8, para el caso particular del ejemplo mostrado de un cono de jurel envasado al vacío en bolsas esterilizables.

El producto del tamaño de paso de tiempo por el número de pasos de tiempo da por resultado la duración total del proceso térmico. En caso del cono se quiso conseguir un tiempo de procesos de 4196 segundos. Entonces como el tamaño de paso de tiempo se definió en 1 segundo, el número de pasos de tiempo debió ser 4196, lo que refleja el tiempo total del proceso de esterilización de los conos (incluye CUT, tiempo del operador y enfriamiento).

En la FIGURA 52, se ingresa la “**temperatura nodal**”, que es la temperatura inicial experimental de los productos.

CUADRO 8. Parámetros del evento comunes a todos los análisis en ALGOR®.

Número de pasos de tiempo (Number of time steps)	4196
Tamaño del paso de tiempo (s) (Time-step size)	1
Intervalo de salida (Output interval)	1

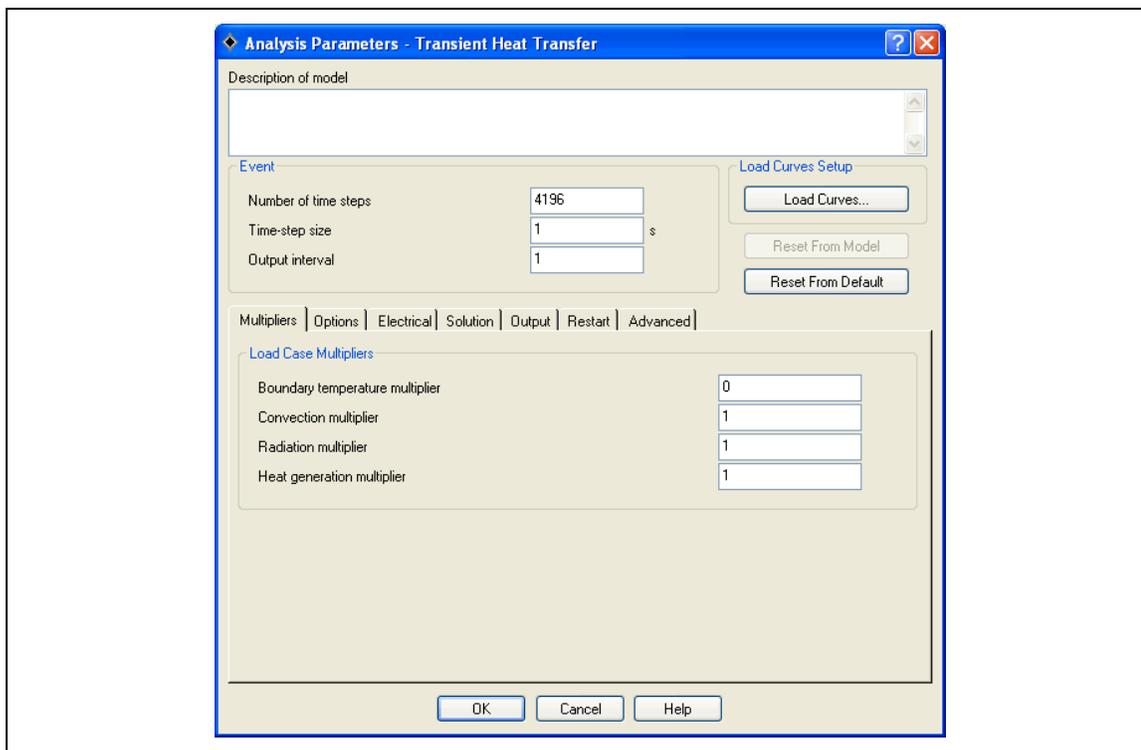


FIGURA 51. Ingreso del tiempo de proceso y paso de tiempo.

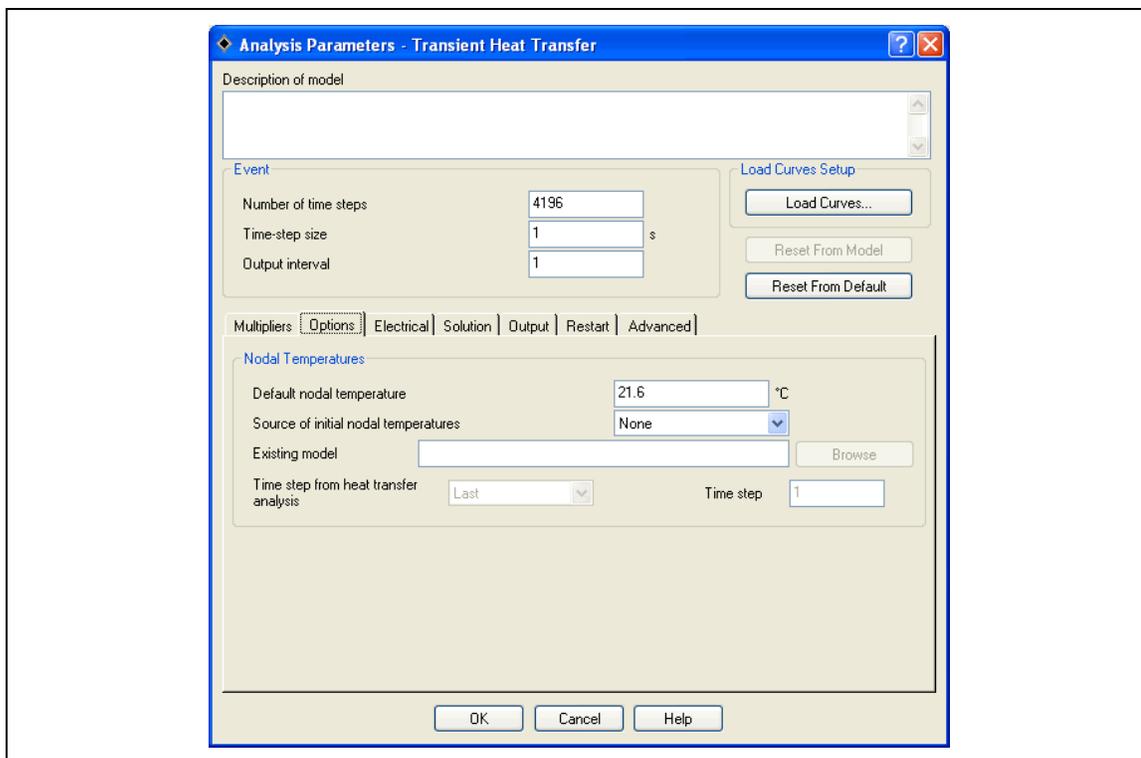


FIGURA 52. Ingreso de la temperatura inicial o nodal del modelo.

3.3.3.4.7 Especificación de las cargas de superficie. Es aquí donde se seleccionaran el área del modelo donde serán aplicadas las cargas, es decir las superficies donde se realizarán la transferencia de calor por convección. Experimentalmente la bolsa esterilizable es sometida en todas sus superficies a la acción del vapor saturado y finalmente a la acción del agua fría, por lo tanto en el modelo se seleccionaran todas aquellas superficies que estén en contacto con el medio de calentamiento y/o enfriamiento. Para cada una de estas superficies se define el **Coefficiente Global de Transferencia de calor U [(t , T)] y la Temperatura del Medio.**

Se definió una curva de coeficiente global de transferencia de calor (U) en función del tiempo, por lo tanto se utilizó una curva de carga (*load curve*), que represente su variación durante el proceso de esterilización (FIGURA 51).

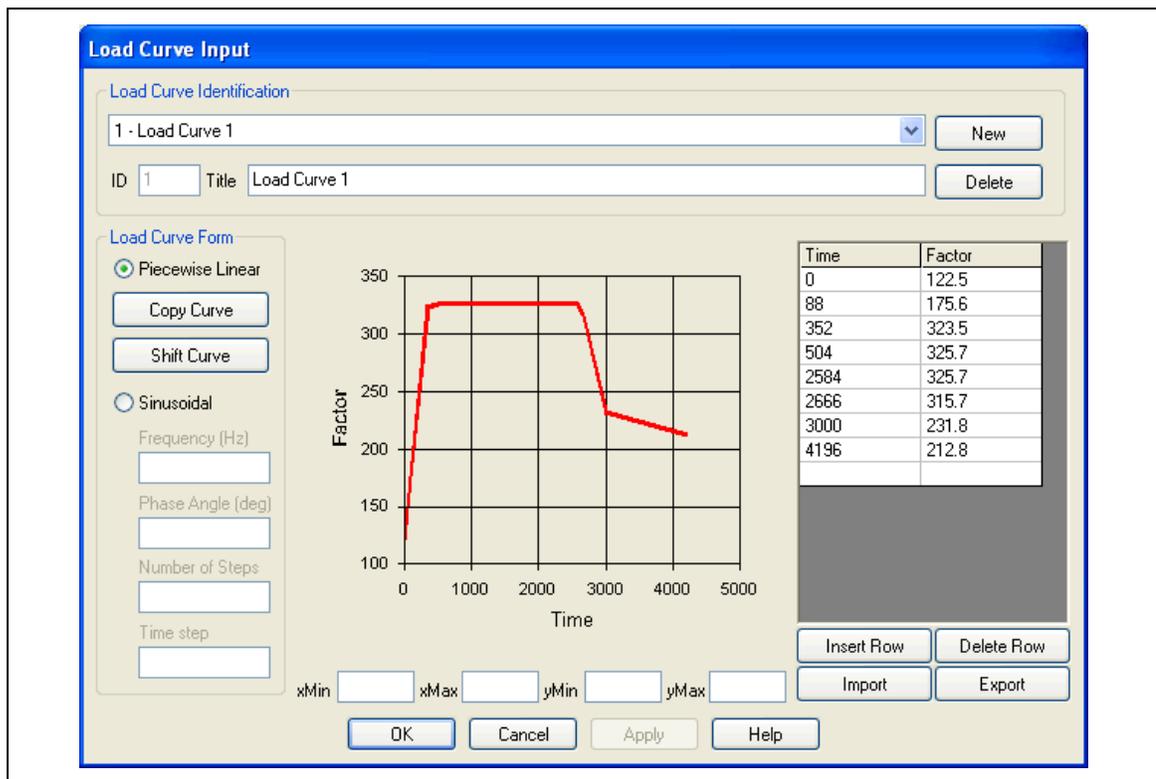


FIGURA 53. Ingreso de los valores de la curva de carga del coeficiente global de transferencia de calor, para el proceso de esterilización de bolsas esterilizables.

Para el caso de la temperatura del medio se usó el mismo criterio anterior, como el parámetro es variable con el tiempo de proceso (calentamiento /enfriamiento) se agrega una segunda *load curve* (FIGURA 54).

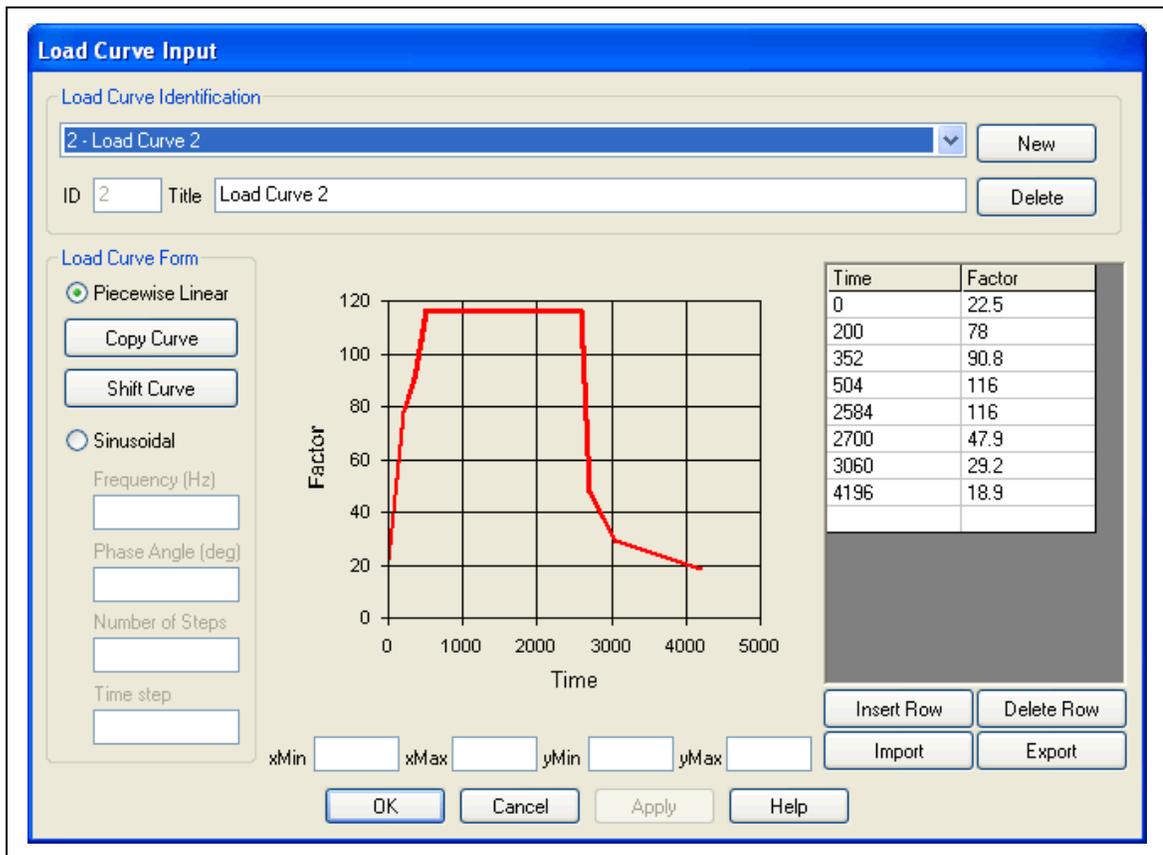


FIGURA 54. Ingreso de los valores de la curva de carga de temperatura del medio, para el proceso de esterilización de bolsas esterilizables.

En las FIGURAS 53 y 54, se observan las curvas aplicadas en cada caso a la simulación térmica. Cabe resaltar que en el eje de las ordenadas aparece como “**factor**”, es decir, son los factores que deberán ser multiplicados en cada caso por el coeficiente global de transferencia de calor y la temperatura del medio, que en ambos casos tiene un valor de “1” (FIGURA 55).

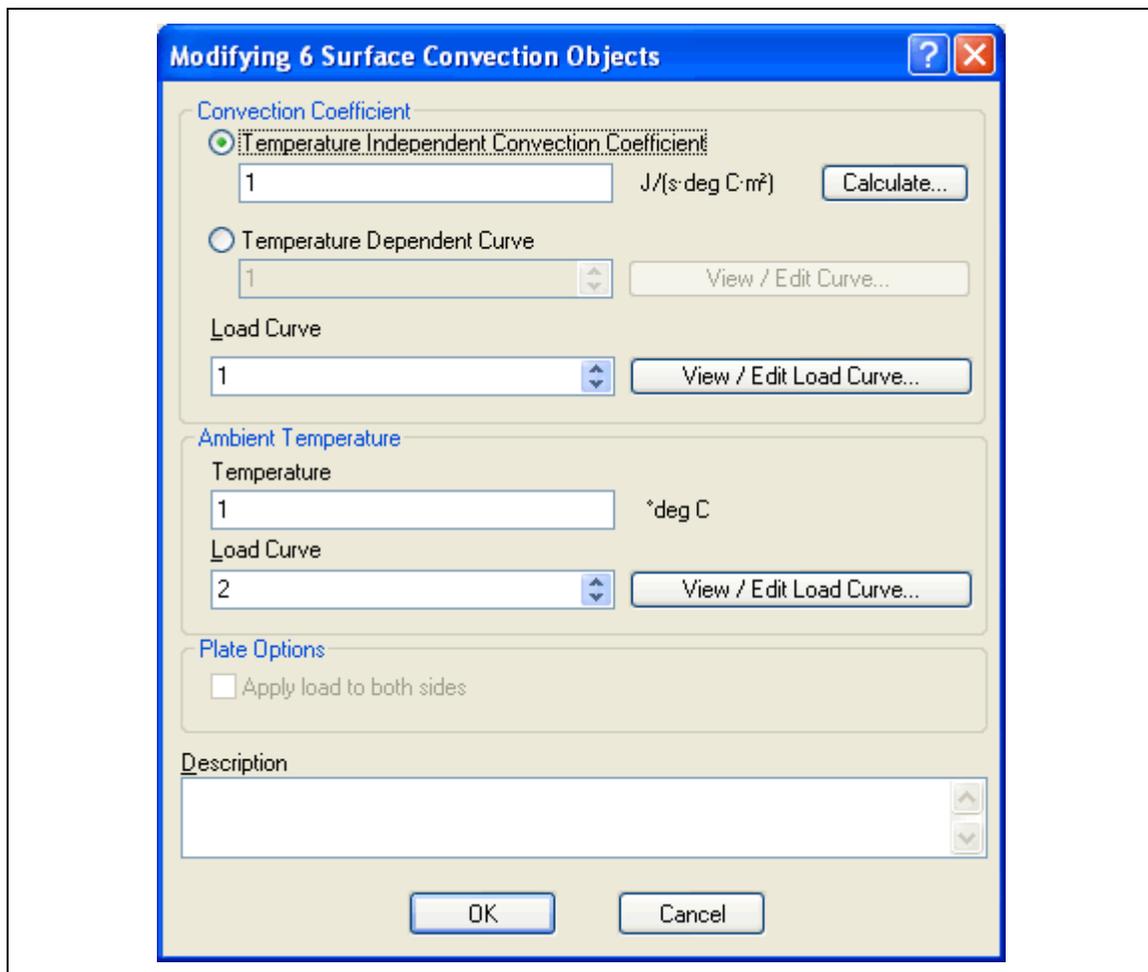


FIGURA 55. Asignación de las curvas de cargas al modelo digital.

Una vez que se crean las curvas de cargas tanto para el coeficiente global así como para la temperatura del medio, cada una de ellas asignadas con un número (1 y 2) respectivamente, se dice que al modelo se le han “aplicado las cargas”, que se pueden apreciar como unos pequeños iconos de forma de “L” y de color amarillo (FIGURA 54) indicando que a esos nodos se han aplicado cargas (*loads*).

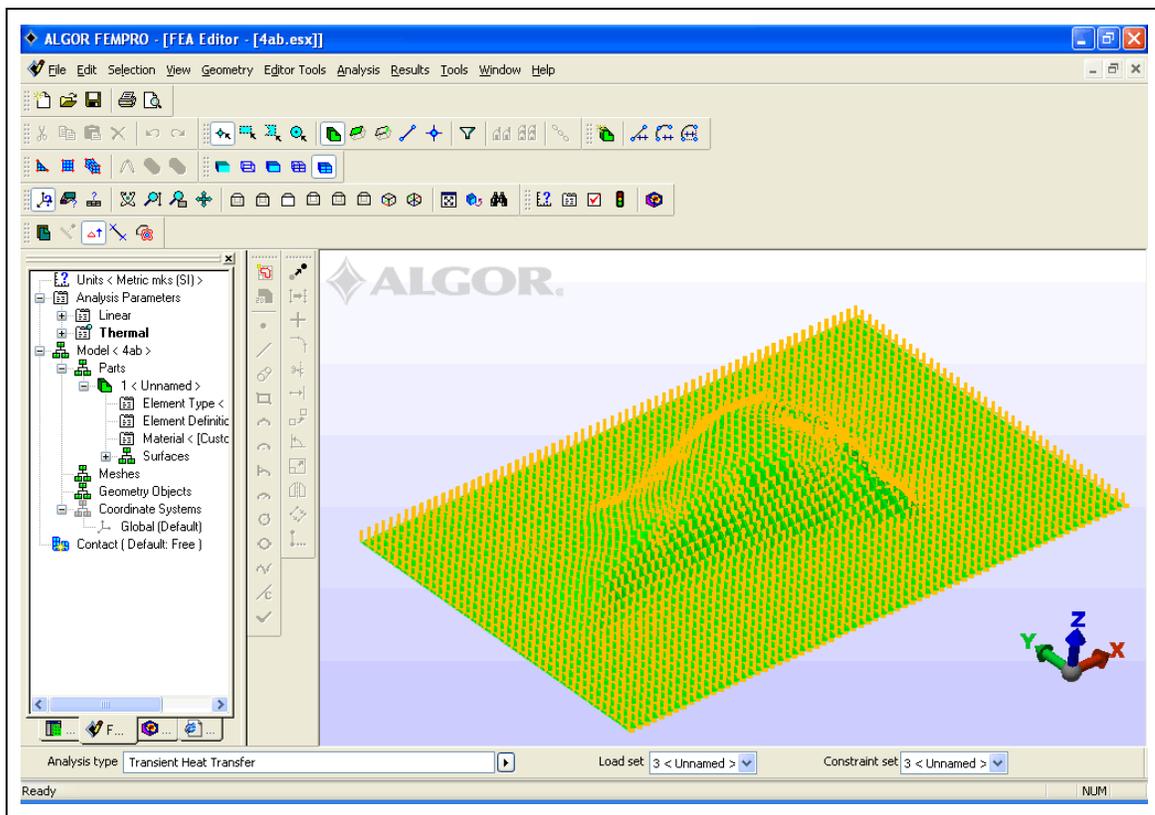


FIGURA 56. Modelo digital con cargas listas para el proceso de simulación térmica.

3.3.3.4.8 Análisis. Cuando se tienen ingresados todos los datos citados anteriormente se procede a la ejecución del análisis o simulación. ALGOR® va mostrando el progreso de éste en una ventana (FIGURA 57) donde se pueden ir viendo detalles como el paso de tiempo (*step*) en que se están realizando los cálculos, el tiempo transcurrido, el consumo de disco duro, etc. El tiempo o gasto computacional depende de muchos factores, haciendo posible que presente una duración que oscile desde horas hasta días.

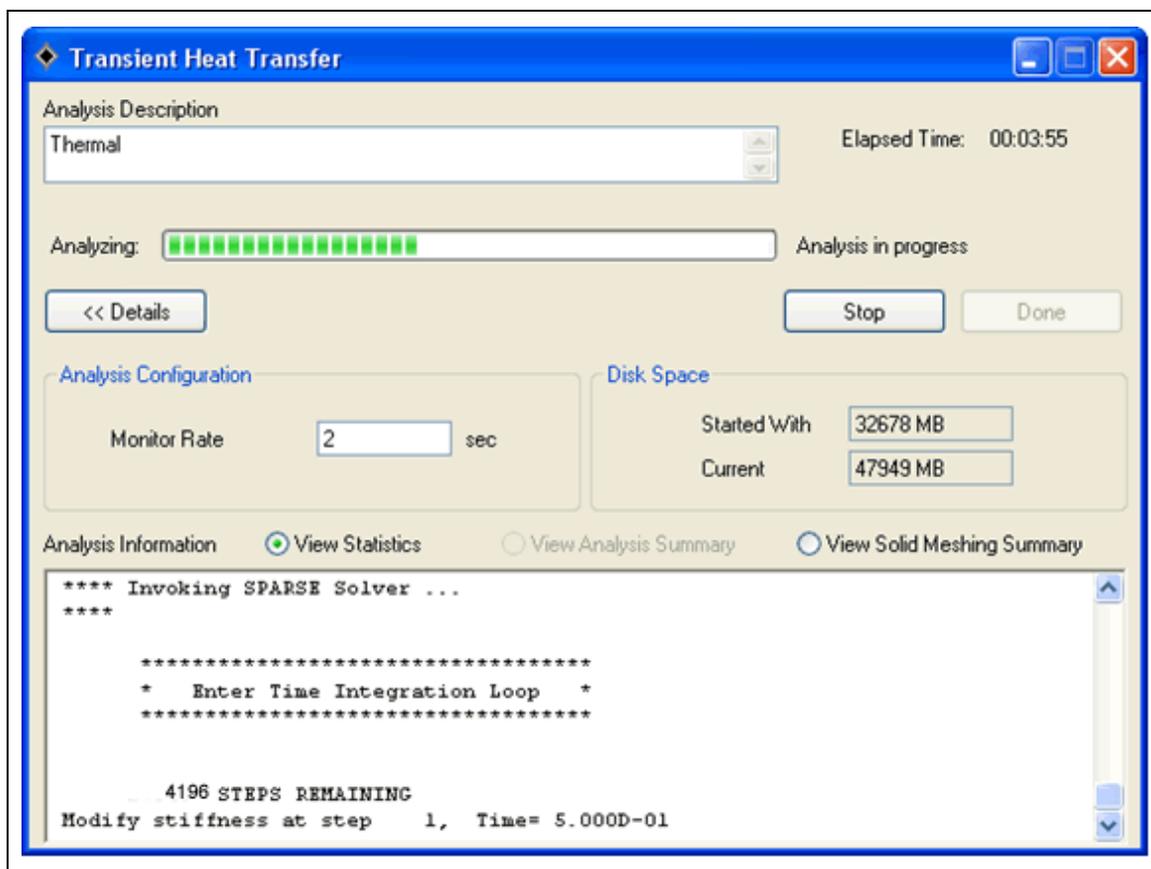


FIGURA 57. Ventana del análisis del proceso en curso.

3.3.3.4.9 Revisión de resultados simulados. Los resultados del análisis son vistos de manera primeramente gráfica en el modo **Superview**, es decir, con escalas de colores se describe la penetración o distribución de calor. Con colores rojos, anaranjados son las superficies más calientes, mientras que con colores morados tenues, aquellas que están más frías o con una menor temperatura que las anteriores. Además por medio de planos de corte se puede mejorar la visualización de la distribución de temperatura al interior del alimento.

Por otro lado ALGOR® nos entrega las gráficas o historial tiempo/temperatura de algún nodo específico del modelo digital simulado. Este nodo puede ser cualquiera de los generados por el modelo (interior o exterior), pudiendo ser alguno que represente una coordenada tridimensional específica evaluada o

simplemente el nodo de calentamiento más lento o nodo más frío. Estos datos son fácilmente exportables a cualquier software de tipo planillas de cálculo. Finalmente ALGOR® permite crear una animación de video mostrando la penetración de calor de todo el proceso.

3.3.4 Ajuste entre las curvas simuladas y experimentales. La bondad del ajuste entre las curvas simuladas y experimentales fue expresada mediante el estadístico **RMSE (Root Mean Square Error, Raíz Cuadrada del Error Cuadrático Medio)**, llamado también Error estándar de estimación expresado en forma absoluta (°C) y en forma relativa (%) como sigue (STEEL y TORRIE, 1960; BIZOT, 1983):

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

$$\%RMSE = 100 \sqrt{\frac{\sum_i^N \left[\frac{(T_i - T_i^*)}{T_i} \right]^2}{N}} \quad (3.11)$$

donde:

T_i : temperaturas experimentales (°C)

T_i^* : temperaturas simuladas (°C)

N : número total de temperaturas experimentales

En todos los casos los valores de RMSE (°C) y RMSE (%) para la etapa de calentamiento se determinarán hasta el momento que comienza a enfriarse el producto y para la etapa de enfriamiento hasta el final del proceso. Además se adoptó como criterio ingenieril un RMSE (%) máximo de 10% (CALIFANO,

1981; CLELAND y EARLE, 1984 ZHANG y CAVALIERI, 1991; MORALES-BLANCAS *et al.*, 1999).

3.3.5 Evaluación del tratamiento térmico. El objetivo de un proceso de esterilización es asegurar la calidad microbiológica y como se vio en 2.5.1, esto varía si se trata de esterilidad comercial (*Clostridium botulinum*) o esporulamiento económico (*Bacillus stearothermophilus*) y por tanto cambiarían los parámetros cinéticos a utilizar en el cálculo de la letalidad del tratamiento térmico dependiendo del microorganismo indicador de la eficiencia del tratamiento térmico.

Para el caso de la presente investigación se tomó en cuenta el concepto esterilidad comercial, es decir, a partir de los resultados generados en las respectivas simulaciones, nos preocupamos que desde el punto de vista de salud pública, las conservas sean seguras contra el botulismo (PFLUG, 1987). Lo mismo podría efectuarse para el esporulamiento económico, referido al logro de conservas microbiológicamente estables.

Por tanto es de mucha relevancia conocer aquel punto del alimento donde el tratamiento demora en ser más efectivo, es decir, el punto de más lento calentamiento o *nodo más frío*. Este nodo fue obtenido para cada modelo evaluado exportando desde ALGOR® un archivo "CSV" (*Comma Separated Values*, Valores separados por coma), con los datos de temperaturas nodales cada 100 segundos hasta el fin del tiempo del operador de cada modelo. Estos archivos CSV fueron importados directamente a la planilla de cálculo Microsoft Excel. Para cada tiempo se ubicaron los 5 nodos más fríos, ya que estos pueden ir cambiando durante el proceso térmico debido a la asimetría geométrica y/o térmica. Durante el tiempo del operador aquél nodo que se mantiene constante como el nodo de menor temperatura hasta el inicio de la etapa de enfriamiento sería el ***nodo más frío*** del producto.

Para cada simulación una vez determinado el nodo mas frío del producto, se procedió a calcular el valor F_0 del proceso a partir del perfil tiempo-temperatura. Para conseguir la esterilidad comercial el valor de F_0 del proceso debía ser igual o mayor que el F_0 requerido (3 min) obtenido de PFLUG (1987),

El F_0 del proceso se calculó partir de la ecuación (3.12) cuando se consideró evaluar por etapas del proceso térmico (CUT, tiempo del operador y tiempo de enfriamiento):

$$F_0 = \int_{t_0}^{t_{CUT}} \frac{dt}{10^{\left(\frac{T_{ref}-T(t)}{z}\right)}} + \int_{t_{CUT}}^{t_g} \frac{dt}{10^{\left(\frac{T_{ref}-T(t)}{z}\right)}} + \int_{t_g}^{t_f} \frac{dt}{10^{\left(\frac{T_{ref}-T(t)}{z}\right)}} \quad (3.12)$$

y, de la ecuación (3.13) cuando se consideró evaluar solamente las temperaturas con importancia letal (> 100 °C):

$$F_0 = \int_{t_0}^{t_{T<100^\circ C}} \frac{dt}{10^{\left(\frac{T_{ref}-T(t)}{z}\right)}} + \int_{t_{T \geq 100^\circ C}}^{t_g} \frac{dt}{10^{\left(\frac{T_{ref}-T(t)}{z}\right)}} + \int_{t_g}^{t_{T \geq 100^\circ C}} \frac{dt}{10^{\left(\frac{T_{ref}-T(t)}{z}\right)}} + \int_{t_{T < 100^\circ C}}^{t_f} \frac{dt}{10^{\left(\frac{T_{ref}-T(t)}{z}\right)}} \quad \dots(3.13)$$

donde:

t_0 = Tiempo inicial del proceso (min)

t_{CUT} = Tiempo de elevación (min)

t_g = Tiempo final a la temperatura de esterilización e inicio del enfriamiento (min).

$t_{T < 100^\circ C}$ = Tiempo en que el producto alcanza los 100 °C (min).

$t_{T > 100^\circ C}$ = Tiempo en que el producto sobrepasa los 100 °C (min).

t_f = Tiempo final del proceso de esterilización (min).

4. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se presenta la validación de la metodología propuesta para la simulación del proceso de conducción de calor en trozos de jurel envasados al vacío en bolsas esterilizables, mediante la comparación de los resultados simulados con los experimentales considerando asimetría geométrica y térmica.

4.1 Asimetría geométrica.

Se denomina asimetría geométrica a la propiedad de un objeto cuando las características (forma, tamaño y posición relativa de sus partes) son distintas en ambos lados de una línea divisora imaginaria en torno a su centro de gravedad. Generalmente en el caso de la mayoría de los alimentos, se presenta esta condición, es decir, que a cualquier corte transversal sus partes no tienen simetría. Es así que estas formas se denominan irregulares complejas.

Considerando las irregularidades de los cortes de jurel envasados al vacío en bolsas esterilizables, y que cada corte es único e irrepetible, se dio por hecho que estos presentan asimetría geométrica, lo cual provocaría que el centro geométrico sea diferente en relación a un modelo similar pero con simetría geométrica.

Para comparar las diferencias se obtuvo primeramente una réplica de yeso de un cono de jurel típico utilizando alginato y yeso amarillo siguiendo las técnicas descritas por PINO (2004). La réplica fue digitalizada de acuerdo al procedimiento descrito en la sección 3.3.3.1.3 obteniéndose el modelo digital que se observa en la FIGURA 58. Por otro lado, se generó también un modelo

digital simétrico que se asemeje a un cono de jurel, es decir, un cono truncado (FIGURA 59), que tuviera la misma área superficial (m^2) que el modelo digital irregular complejo obtenido de la réplica de yeso.

Ambos modelos se simularon individualmente en ALGOR® con condiciones de borde idénticas. En las FIGURA 60a, FIGURA 60b, FIGURA 61a y FIGURA 61b, se observa claramente como el centro térmico difiere en su localización cuando se compara el cono truncado (forma irregular simple) con el cono digitalizado tridimensionalmente (forma irregular compleja). Como se observa un cono truncado no es la mejor aproximación geométrica de un cono de jurel ya que presenta bases circulares en lugar de “elípticas”. Esto produciría la desviación de los resultados simulados.

Las FIGURAS 60 y 61, no muestran un cambio drástico en la localización del centro térmico. Sin embargo, para evaluar la ventaja de trabajar con una aproximación del modelo real (cono truncado) y la representación exacta del alimento (cono jurel digitalizado), es necesario calcular el valor de F_0 a partir de los perfiles tiempo/temperatura simulados del centro térmico de ambos dominios (FIGURA 62). Para el modelo irregular simple el valor F_0 calculado es de 6.01 min, en cambio para el modelo digital irregular complejo el valor de F_0 es de 6.91 min.

Por lo tanto, se observa que es de cierta relevancia contar con la forma “exacta” del producto para las simulaciones de los procesos térmicos, ya que influye en la letalidad de los mismos. Lo anterior permitiría optimizar los tratamientos térmicos en orden de reducir los tiempos de proceso.

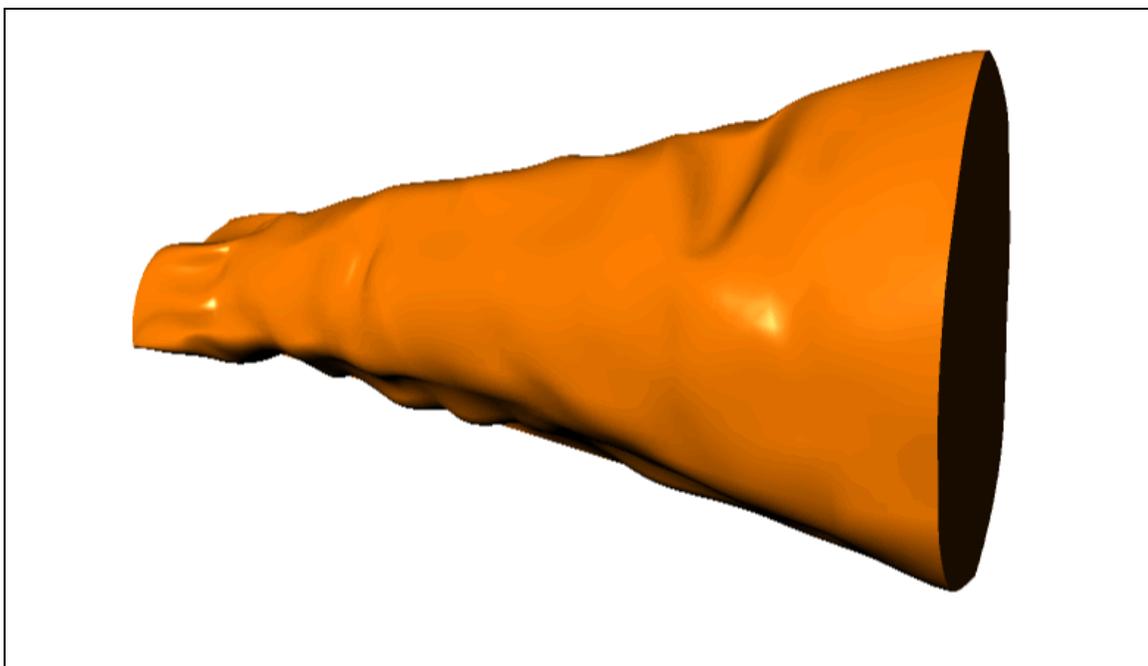


FIGURA 58. Cono de jurel digitalizado (irregular complejo) a partir de una réplica de yeso.

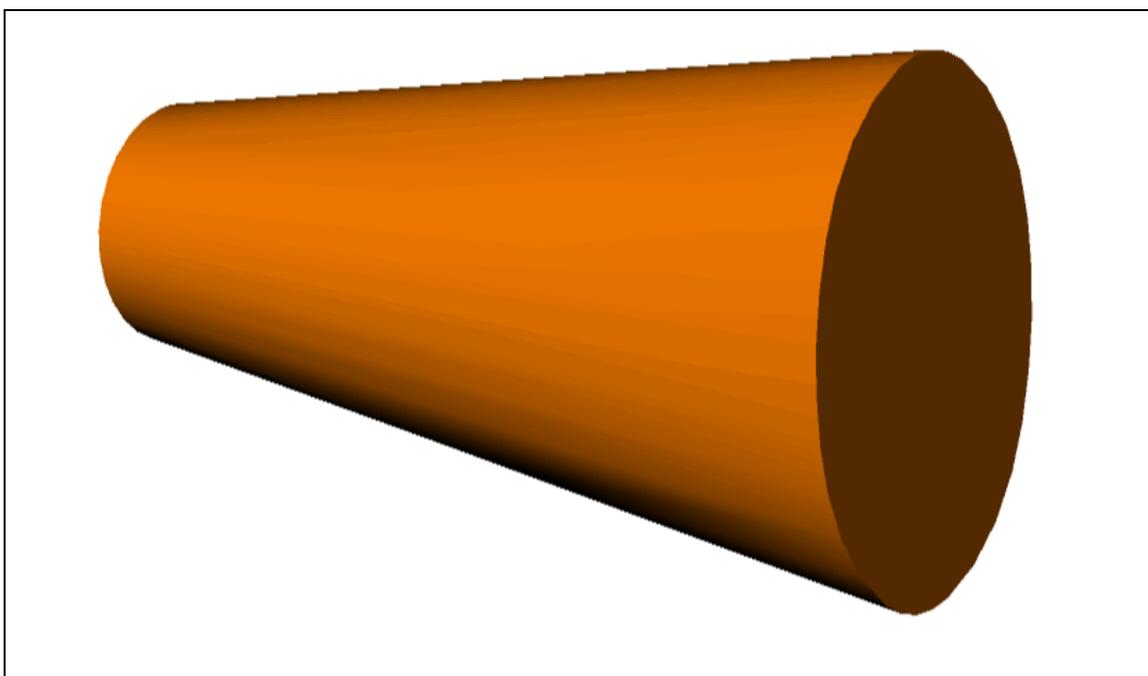


FIGURA 59. Cono truncado (irregular simple) generado con Rhinoceros®.

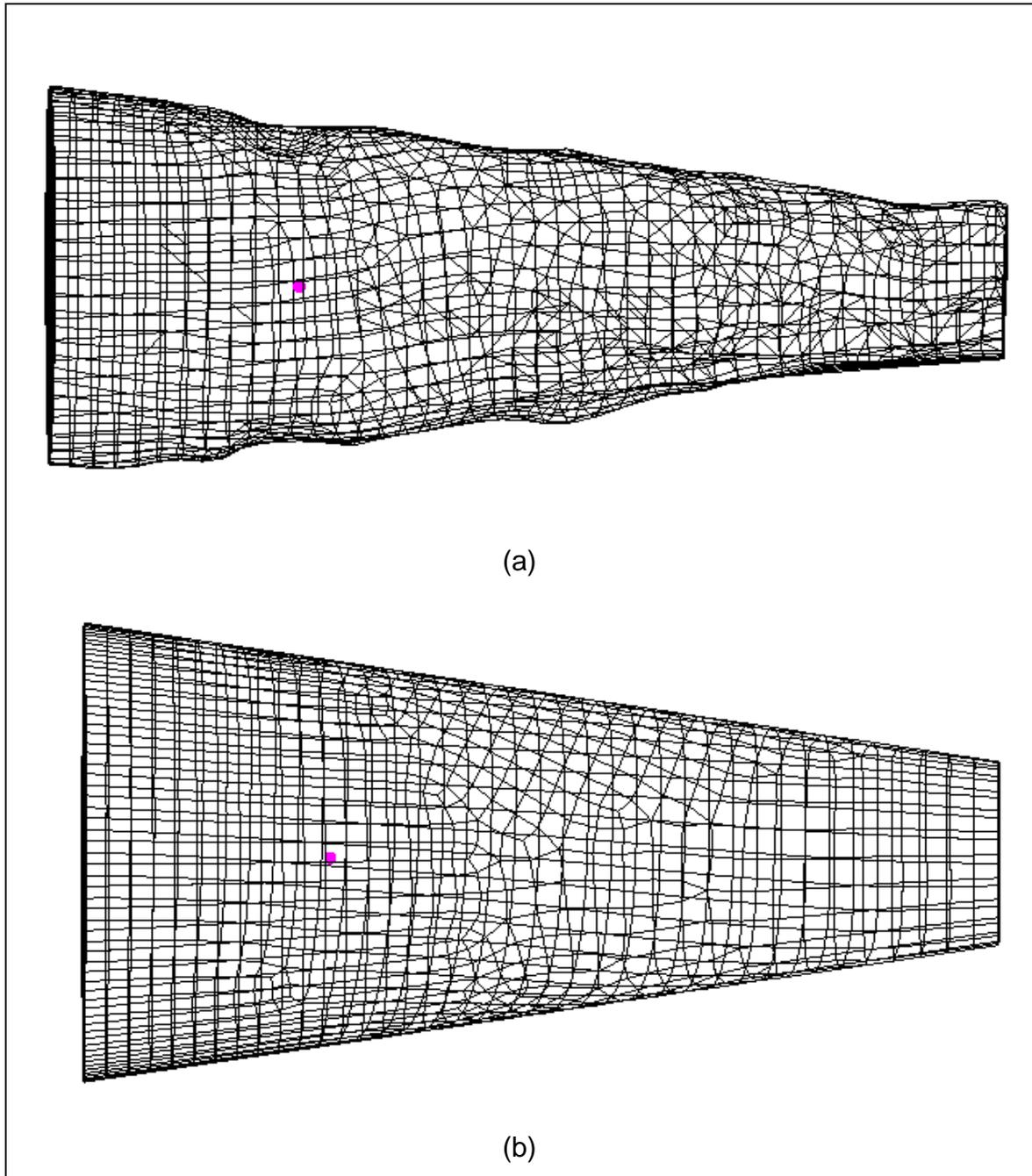


FIGURA 60. Plano XZ, de los modelos: (a) como juel (irregular complejo), (b) como truncado (irregular simple).

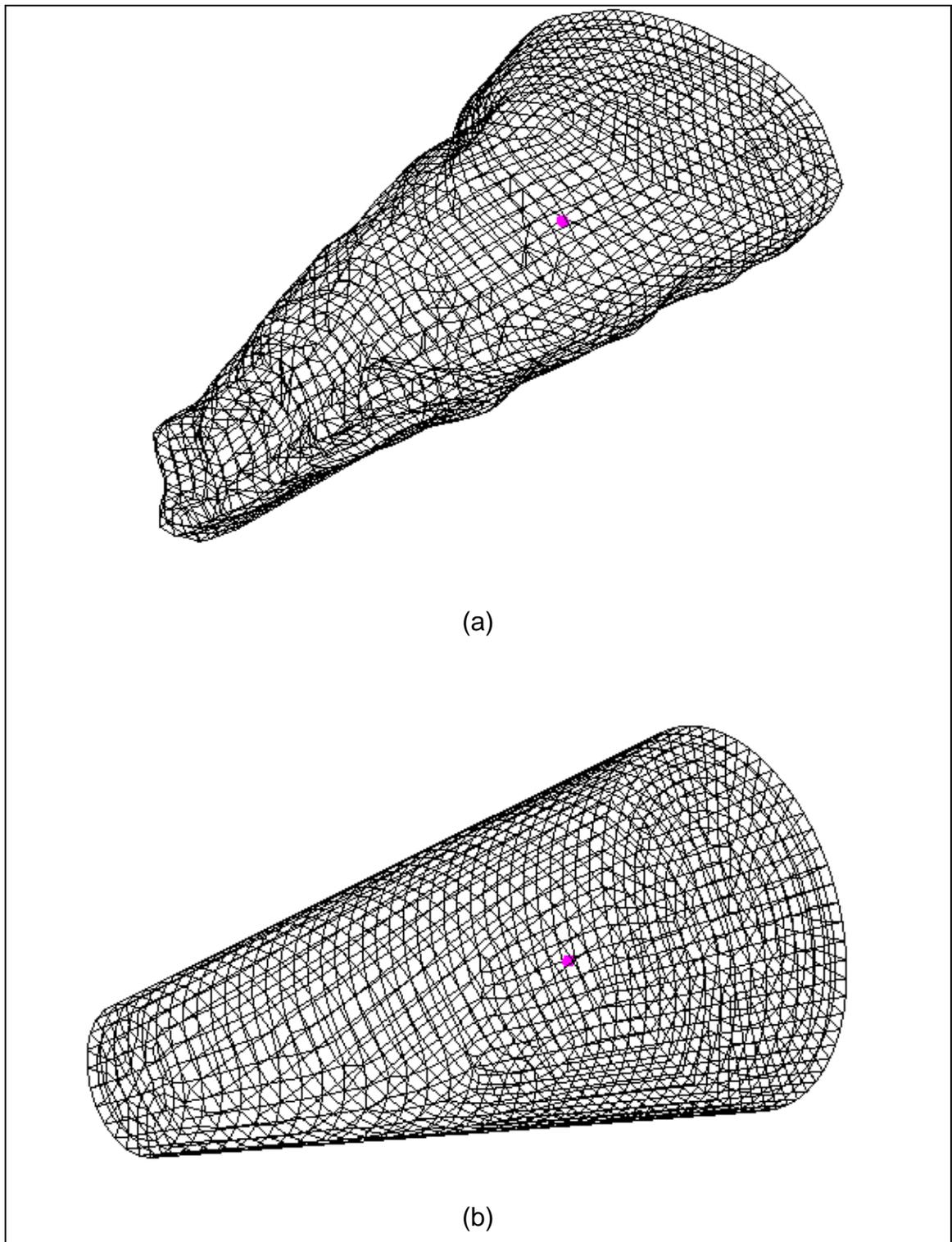


FIGURA 61. Plano en perspectiva de los modelos: (a) como jurel (irregular complejo), (b) como truncado (irregular simple)

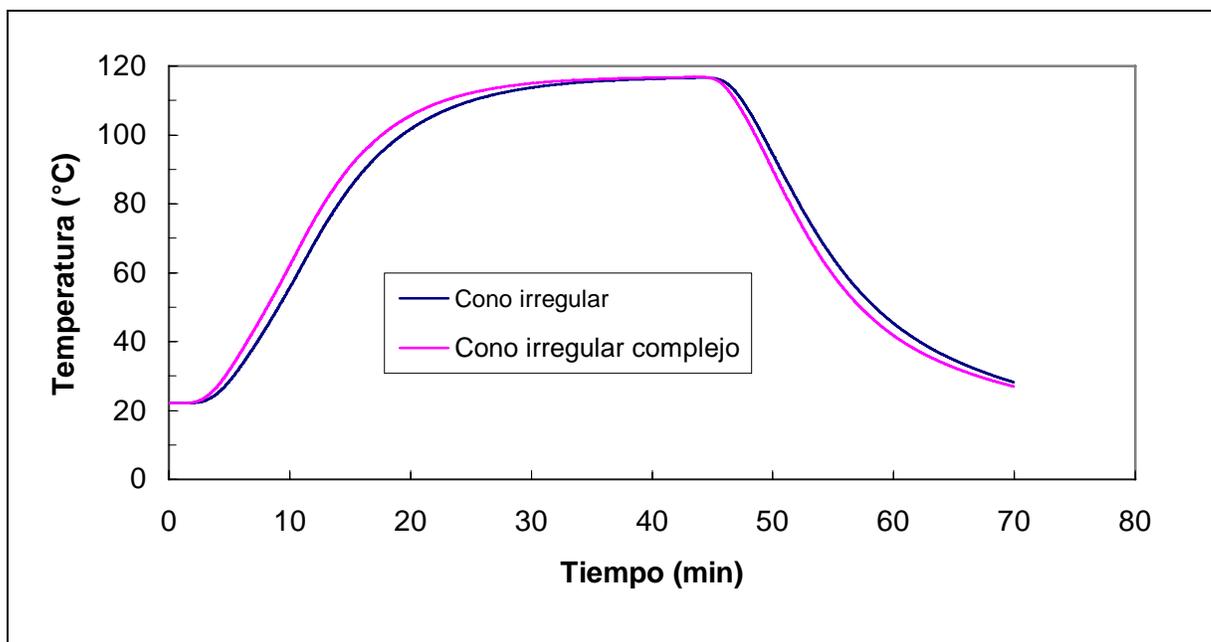


FIGURA 62. Perfiles simulados de las formas irregular simple (cono truncado) e irregular compleja (cono juelel).

4.2 Asimetría térmica.

La diferencia en las condiciones del medio en dos o más partes de la superficie total de producto durante un proceso térmico, la cual provocaría una penetración del calor no uniforme, es lo que se llama asimetría térmica. Esta propiedad puede originar que el centro térmico del alimento, donde estaría ubicado el nodo o punto mas frío, pueda ser desplazado reflejándose en las curvas de penetración de calor (FIGURA 63).

Las condiciones del medio en el interior del autoclave, usualmente no son uniformes o pueden variar sobre cada uno de los envases, debido a la entrada y distribución del vapor. Esto quiere decir que el coeficiente global de transferencia de calor " U " y la temperatura del medio sobre las superficies de los envases pueden no ser los mismos valores para todos. En este caso estaríamos frente a las condiciones de asimetría térmica.

Para esta parte, los valores del coeficiente global de transferencia de calor se determinaron experimentalmente, a partir de objetos de cobre envasados al vacío en bolsas esterilizables. Estos fueron puestos horizontalmente uno sobre otro al interior del autoclave para emular lo que podría pasar en una retorta cargada de bolsas esterilizables. Para lograr las condiciones de asimetría térmica se forzó condiciones no uniformes de calentamiento, regulando la entrada de vapor, y enfriamiento (agua).

Para comprobar la influencia del coeficiente global de transferencia de calor, se procedió a simular el **modelo digital** de una bolsa esterilizable conteniendo un cono de jurel típico con las mismas condiciones de borde mostradas en el CUADRO 9, donde la única condición que se varió fue el comportamiento del coeficiente global de transferencia de calor para los tres casos evaluados (Condiciones uniformes y constantes, Condiciones de simetría térmica y variables con el tiempo, Condiciones de asimetría térmica y variables con el tiempo).

CUADRO 9. Parámetros del producto y del proceso comunes.

Nombre del modelo	Retortable-Pouche AS
Volumen	0.000137340906 (+/- 1e-013) m ³
Área Superficial	0.0504852864 (+/- 1.6e-010)m ²
Temperatura nodal por defecto (inicial)	22.1°C
Tipo de elementos	Ladrillo (Brick) Térmico
Modelo del material	Isotrópico
Densidad másica	1018.0 kg/m ³
Conductividad térmica	0.588 J/(s °C m ²)
Calor específico	3692.3 J/(kg °C)
Tiempo de elevación (CUT)	504 s
Temperatura de esterilización	116 °C
Tiempo de proceso	4196 s

a) Condiciones uniformes y constantes. En este caso los valores del coeficiente global de transferencia de calor son constantes para cada etapa, como es clásico encontrar en la bibliografía especializada. Los valores del coeficiente U a utilizar en la simulación corresponderán a los valores máximos encontrados experimentalmente para la etapa de calentamiento y enfriamiento, éstos son 488,9 y 225,6 $W/m^2 K$, respectivamente.

b) Condiciones de simetría térmica y variables con el tiempo. En el CUADRO 11 se muestran las condiciones del coeficiente global de transferencia de calor en relación al tiempo de proceso obtenidos experimentalmente (Sección 3.3.2.9). El coeficiente global de transferencia de calor es variable con la temperatura y se considera que es el mismo para ambas superficies del modelo, es decir, se asume condiciones de simetría térmica.

CUADRO 10. Valores del coeficiente global de transferencia de calor en función del tiempo.

Tiempo (s)	Coef. Global ($W/m^2 K$)
0	110,5
88	116,8
352	200,8
504	488,9
2584	488,9
2666	400,2
3000	300,8
4196	225,6

c) Condiciones de asimetría térmica y variables con el tiempo. En este caso se plantea que hay coeficientes globales de transferencia de calor distintos en ambas superficies, es decir, que la transferencia de calor es asimétrica en las

superficies del alimento. Esto puede presentarse debido a la disposición de los productos en el interior del autoclave, así como también al diseño del equipo que hace que un lado reciba mayor cantidad de vapor. Para lograr esta situación se asignó dos curvas de coeficientes globales de transferencia de calor variables con la temperatura para cada superficie del alimento (CUADRO 11).

CUADRO 11. Valores del coeficiente global de transferencia de calor variables con el tiempo para condiciones asimétricas.

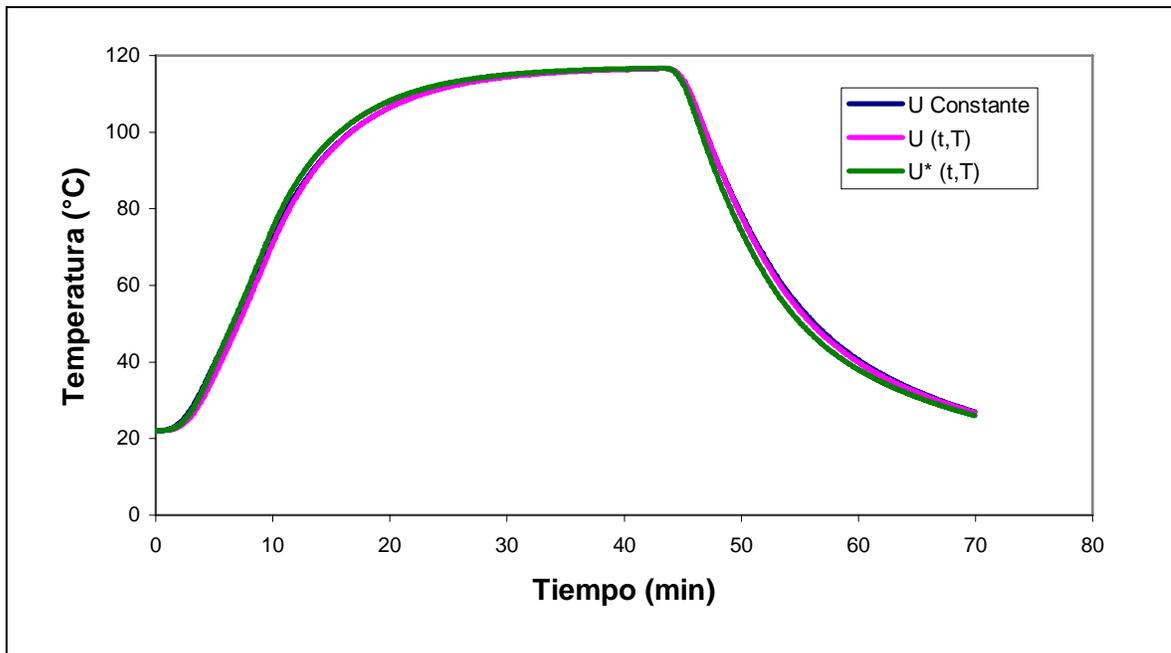
Tiempo (s)	Coef. Global ^a (W/m ² K)	Coef. Global ^b (W/m ² K)
0	110,5	107,7
88	116,8	110,5
352	200,8	297,8
504	488,9	436,8
2584	488,9	436,8
2666	400,2	245,5
3000	300,8	161,1
4196	225,6	144,7

^a Carga aplicada a la superficie superior del modelo.

^b Carga aplicada a la superficie superior del modelo.

De la FIGURA 63 se puede observar que las curvas de los 3 casos evaluados muestran ciertas diferencias. Considerando los casos (a) y (b) se observa visualmente que las curvas se superponen en gran parte del tiempo de proceso. Considerando los casos (b) y (c) se observa que hay cierta diferencia visual entre las curvas que puede atribuirse a las condiciones de asimetría térmica. Al respecto los valores de F_0 calculados son 4.86, 5.00 y 5.18 min para las curvas de los casos (a), (b) y (c) respectivamente. Lo anterior indica que es necesario considerar los casos (b) y (c) cuando se requiera optimizar los procesos térmicos. El caso (c), donde se considera la asimetría térmica, debe tenerse

presente cuando se evalúe procesos térmicos a nivel industrial, donde la distribución de las condiciones de calentamiento/enfriamiento no son uniformes en todo el autoclave y las condiciones de carga del equipo son mayores a las pruebas de planta piloto.



U*: Coeficiente global de transferencia de calor, para ambas caras del modelo digital simulado.

FIGURA 63. Curvas simuladas para distintas condiciones de coeficiente global de transferencia de calor.

En el presente trabajo de investigación se consideró el caso (b), donde se considera la simetría térmica, es decir, se considera que las dos caras de la bolsa esterilizable reciben las mismas condiciones de calentamiento/enfriamiento. Esto debido a que las experiencias se realizaron con poca carga produciendo una distribución uniforme del vapor/agua durante el proceso.

4.3 Conos de jurel envasados el vacío en bolsas esterilizables.

Los resultados obtenidos para estos cortes se presentan a continuación:

4.3.1. Modelo digital 3D. Uno de los modelos 3D de las muestras de conos de jurel envasados al vacío en bolsas esterilizables obtenidos de la digitalización y posterior modelado tridimensional se puede observar en la FIGURA 64. Los demás modelos digitales para las muestras restantes de conos de jurel se pueden encontrar en el ANEXO 1.

4.3.2 Modelo mallado. Uno de los modelos digitales de las bolsas esterilizables conteniendo un cono de jurel, con su respectiva malla generada en ALGOR®, se pueden observar en la FIGURA 65. Los modelos mallados para las otras muestras de bolsas esterilizables conteniendo conos de jurel se pueden encontrar en el ANEXO 2. El hecho que ALGOR® haya podido generar la malla indica que el modelo digital capturado es válido para realizar un análisis de transferencia de calor por el método de elementos finitos.

4.3.3 Diagrama de contorno. En la FIGURA 66, se pueden apreciar un corte longitudinal obtenido de la simulación térmica en ALGOR®. Los resultados se muestran en forma de diagramas de contorno en colores, donde cada color indica un rango de temperatura que se presenta en el extremo superior derecho. Se puede avanzar en cada paso de tiempo (*Time Step*, extremo inferior izquierdo) para ver cómo el calor va penetrando en el producto, mostrándose colores rojizos para las temperaturas más altas y en morados tenues para las más bajas. Los demás cortes longitudinales correspondiente a los conos evaluados se pueden apreciar en el ANEXO 3.

4.3.4 Estadísticas del modelo en ALGOR®. En el CUADRO 15, se presentan las estadísticas resultantes en los análisis realizados en ALGOR® para cada cono envasado al vacío en bolsas esterilizables.

CUADRO 12. Estadísticas de los modelos digitales de conos de jurel envasados al vacío en bolsas esterilizables en ALGOR®.

<i>Item</i>	Conos de jurel		
	"1"	"3"	"4"
Números de elementos generados	15805	21539	14785
Números de nodos generados	9723	8472	9138
Espacio ocupado en disco duro (GB)	4,7	4,66	3,86
Tiempo total simulación (<i>min</i>)	658,557 (~11 h)	802,427 (~13,4h)	587,000 (~9,78 h)

Se puede observar en el CUADRO 12, que para las bolsas esterilizables rotuladas 1 y 4 la cantidad de elementos generados es similar, alrededor de 15 mil elementos y el producto 3 tiene aproximadamente 6 mil elementos más. Esta diferencia se debe a que la bolsa esterilizable "3" presenta un volumen de $0,002720415\text{m}^3$, en relación a las dos restantes las cuales muestran un volumen aproximado de $0,0023\text{m}^3$. Lo anterior se refleja en un mayor tiempo de cálculo o gasto computacional para la bolsa "3".

4.3.5 Comparación de perfiles de temperatura experimentales y simulados.

En las pruebas experimentales las termocuplas fueron insertadas en los conos de jurel envasados al vacío en bolsas esterilizables en diferentes posiciones. Es así que para cada modelo digital en ALGOR® se debió localizar aquel nodo que correspondiera en su ubicación espacial (x , y , z) al punto evaluado en el producto. La localización del punto fue lograda con la ayuda de dos tomas de Rayos X bidimensionales en los planos XY y XZ. Seguidamente se pudo encontrar sin mayores complicaciones la localización del nodo en el modelo digital que corresponde al punto evaluado en el alimento (FIGURA 67 y FIGURA 68). Las radiografías así como la localización de los nodos evaluados para los conos de jurel restantes se pueden encontrar en el ANEXO 4. Las

coordenadas (x, y, z) del nodo evaluado para las 3 muestras de conos se detallan en el CUADRO 13.

CUADRO 13. Coordenadas del nodo evaluado para los 3 conos de jurel.

Item	Conos de Jurel			
		"1"	"3"	"4"
Número del nodo		7677	6023	8463
Ubicación espacial del nodo evaluado (x, y, z) (m)	x	-0,0125912	-0,0109173	0,0103416
	y	0,0882609	-0,00454791	-0,0102453
	z	-0,00387694	0,000343921	0,000945162

La bondad del ajuste entre las curvas simuladas y experimentales fue expresada mediante el estadístico RMSE tanto en términos absolutos (°C) como relativos (%). Los valores se pueden observar en el CUADRO 14, CUADRO 15 y CUADRO 16.

En el CUADRO 14, se puede observar que para las tres muestras de conos evaluadas los mayores errores se observan para la etapa del CUT y la etapa de enfriamiento. Sin embargo, este error todavía está por debajo del criterio ingenieril establecido (< 10%). Para el caso de la etapa correspondiente al tiempo del operador (temperatura de autoclave constante), que es la etapa más importante, los errores porcentuales son de 1%, es decir, aproximadamente 1°C, lo que implica un excelente ajuste entre los resultados simulados y experimentales.

En el CUADRO 15, la etapa de calentamiento muestra que a temperaturas mayores de 100 °C, es decir, temperaturas con real importancia letal, el valor de RMSE es de 1% aproximadamente llegando en algunos casos a 0,9 °C de error promedio. En la etapa de enfriamiento, para temperaturas mayores de 100 °C,

el valor de RMSE aumenta, pero aun cae dentro del criterio ingenieril establecido ($< 10\%$).

Finalmente, el CUADRO 16 muestra los valores de RMSE globales del proceso, es decir involucra el calentamiento (CUT y tiempo del operador) y enfriamiento. Se observa que el mayor error es reflejado en el cono "3" con un grado de desajuste de 5,25%, es decir 3 °C. El cono "1" refleja el menor error entre las muestras con un 3,70% lo que implica RMSE absoluto de 1,97 °C.

En la FIGURA 69, se puede apreciar el ajuste entre la curva experimental y simulada para el cono "1". Las curvas de validación para los conos "3" y "4" se pueden encontrar en el ANEXO 5. Una vez validado los resultados experimentales se puede determinar la ubicación del punto de más lento calentamiento (punto más frío) a partir del modelo FEA de ALGOR®.

CUADRO 14. Valores de RMSE por etapas para el proceso de esterilización de conos de jurel.

Conos	Tiempo de Elevación (CUT)		Tiempo del Operador		Tiempo de Enfriamiento	
	<i>RMSE</i> (°C)	<i>RMSE</i> (%)	<i>RMSE</i> (°C)	<i>RMSE</i> (%)	<i>RMSE</i> (°C)	<i>RMSE</i> (%)
1	2,28	6,71	1,10	1,14	2,63	4,45
3	2,27	5,30	1,20	1,07	4,48	7,83
4	0,58	1,35	0,99	0,98	2,64	6,88

CUADRO 15. Valores de RMSE para el proceso de esterilización considerando temperaturas con ($T > 100^{\circ}\text{C}$) y sin ($T < 100^{\circ}\text{C}$) importancia letal en conos de jurel.

Conos	Calentamiento				Enfriamiento			
	$T < 100^{\circ}\text{C}$		$T > 100^{\circ}\text{C}$		$T > 100^{\circ}\text{C}$		$T < 100^{\circ}\text{C}$	
	<i>RMSE</i> ($^{\circ}\text{C}$)	<i>RMSE</i> (%)						
1	1,88	4,94	1,01	0,89	2,52	2,37	2,65	4,61
3	2,17	5,01	1,19	1,05	8,86	8,48	4,40	7,84
4	0,86	1,31	0,96	,086	1,36	1,27	2,74	7,38

CUADRO 16. Valores de RMSE global para el proceso de esterilización en conos de jurel.

Conos	"1"		"3"		"4"	
	<i>RMSE</i> ($^{\circ}\text{C}$)	<i>RMSE</i> (%)	<i>RMSE</i> ($^{\circ}\text{C}$)	<i>RMSE</i> (%)	<i>RMSE</i> ($^{\circ}\text{C}$)	<i>RMSE</i> (%)
	1,97	3,70	3,0	5,25	1,80	4,35

4.3.6 Ubicación del punto más frío. A continuación en el CUADRO 17, se muestra la ubicación tridimensional en coordenadas (x, y, z) del punto de mas lento calentamiento para los tres modelos FEA de los conos evaluados.

CUADRO 17. Coordenadas correspondientes al nodo más frío en conos de jurel.

<i>Item</i>	Conos de Jurel			
		"1"	"3"	"4"
Número nodo medido		8716	7173	8112
Ubicación espacial del nodo medido (x, y, z) (m)	x	-0,00857307	0,0257391	0,0241452
	y	0,0989861	0,00674465	-0,00162419
	z	-0,00828073	0,0129848	0,00301282

Para el centro térmico ó nodo más frío ubicado se obtuvo los datos tiempo/temperatura, a partir del cual se calcularon los valores F_0 considerando los parámetros cinéticos del *C. botulinum*. En el CUADRO 18 se presenta los valores de F_0 por etapas de proceso mientras que en el CUADRO 19 se presenta los valores de F_0 para las etapas de calentamiento y enfriamiento, agrupándolos a su vez en temperaturas menores a 100 °C ($T < 100$ °C) y temperaturas mayores a 100 °C ($T > 100$ °C).

En el CUADRO 18 se puede observar que todos los conos de jurel cumplen con el F_0 (requerido), es decir, los valores F_0 calculados son mayores a 3,0 min, por lo tanto, las muestras evaluadas cumplen con el requisito de esterilidad comercial.

Tomando en cuenta los valores de F_0 por etapas del tratamiento térmico, se puede observar claramente que el aporte del CUT al F_0 del proceso total es despreciable, ya que sus valores tienden a cero. En cambio el tiempo del operador (etapa de temperatura de autoclave constante) es la etapa que tiene una mayor incidencia en el valor de F_0 del proceso global. Por otro lado, la etapa de enfriamiento aporta en forma apreciable al valor de F_0 del proceso global. Así, la etapa de enfriamiento no puede despreciarse en la evaluación de un tratamiento térmico.

A partir de los datos del CUADRO 18, se pueden hacer correcciones al proceso de manera tal de optimizar el tiempo de proceso en función del aporte de la etapa de enfriamiento, es decir, se podría acortar el tiempo del operador lo necesario para obtener un valor F_0 de proceso similar al F_0 requerido cumpliéndose aún la esterilidad comercial.

Otro Punto a considerar es la influencia de las temperaturas con importancia letal en el cálculo de F_0 . Del CUADRO 19 se puede observar que las

temperaturas mayores a 100 °C aportan en mayor proporción al valor del F_0 global siendo mayor el aporte para el caso de la etapa de calentamiento.

CUADRO 18. Valores de F_0 (min) para la esterilización de conos de jurel.

Etapa	Conos de jurel		
	"1"	"3"	"4"
CUT	1,027E-08	3,460E-09	1,163E-08
Etapa tiempo del operador	3,827	2,122	3,870
Etapa de Enfriamiento	1,223	1,219	1,245
Global	5,080	3,341	5,115

CUADRO 19. Valores de F_0 para el proceso de esterilización considerando temperaturas con ($T > 100^\circ\text{C}$) y sin ($T < 100^\circ\text{C}$) importancia letal en conos de jurel.

Conos	Calentamiento		Enfriamiento	
	$T < 100^\circ\text{C}$	$T > 100^\circ\text{C}$	$T > 100^\circ\text{C}$	$T < 100^\circ\text{C}$
1	4,120E-04	3,827	0,845	0,408
3	3,993E-05	2,122	0,699	0,549
4	4,490E-04	3,869	0,845	0,399

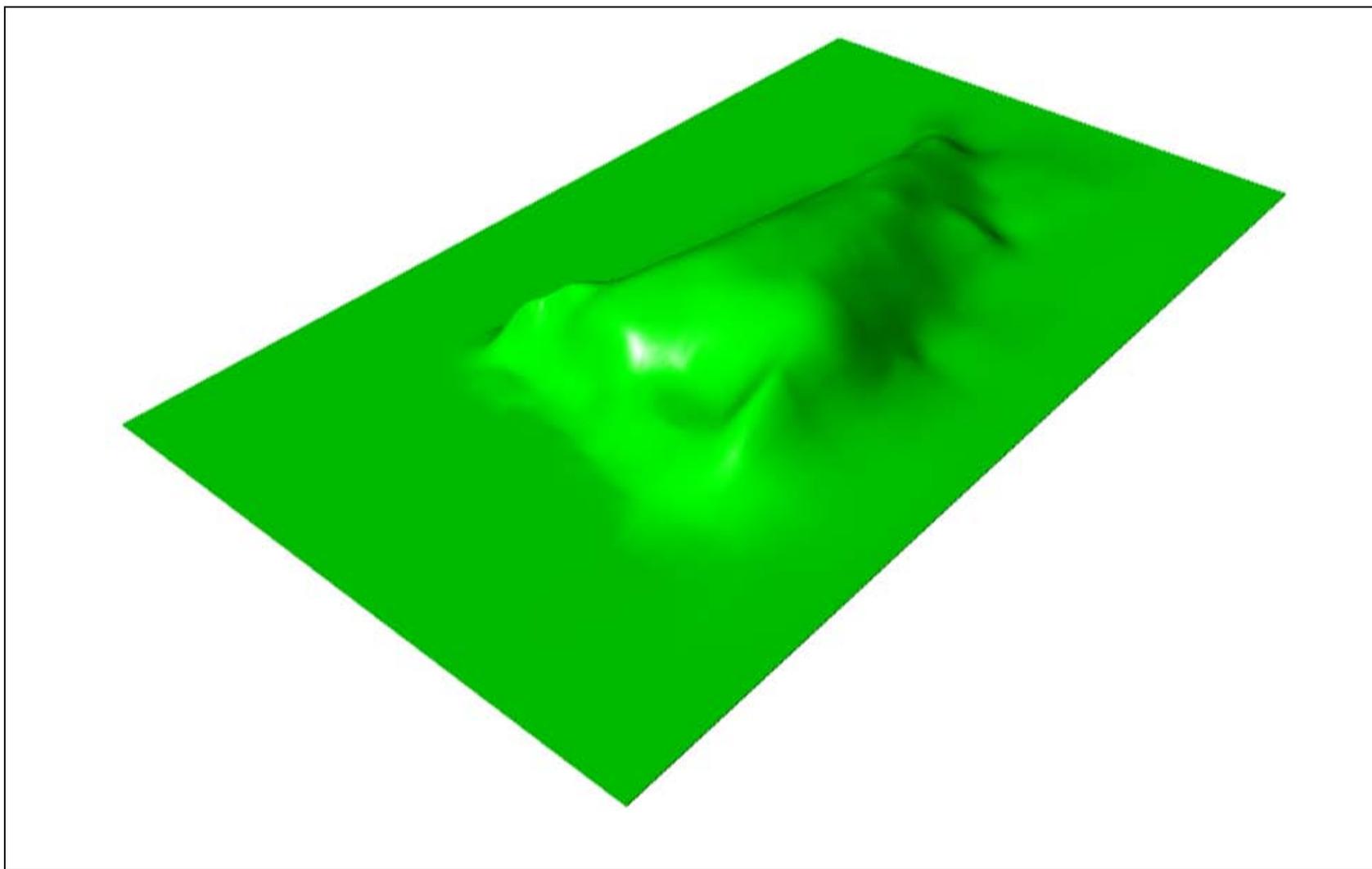


FIGURA 64. Modelo digital 3D del cono "1" envasado al vacío en bolsas esterilizables en Rhinoceros®.

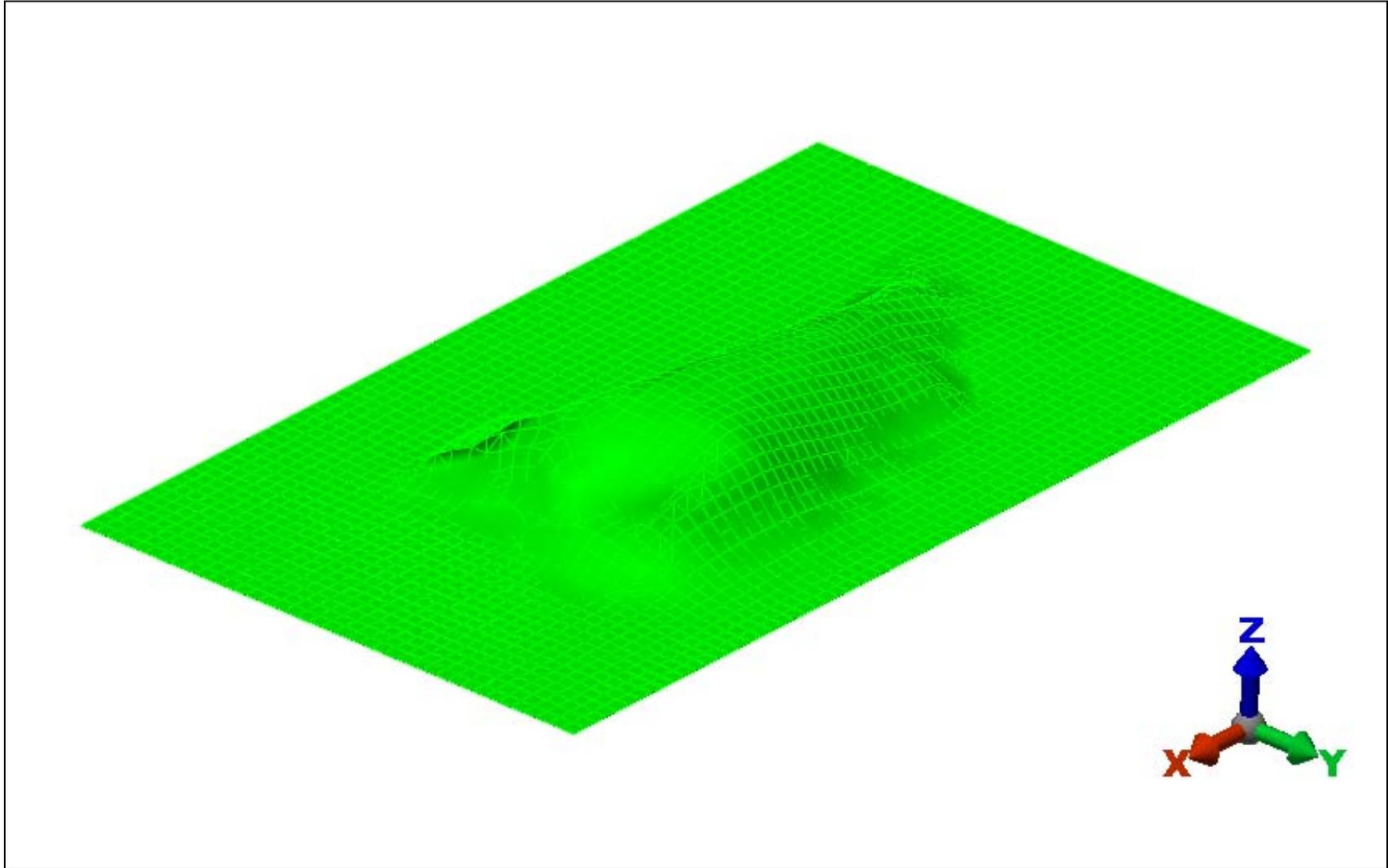


FIGURA 65. Modelo mallado (FEA) del cono "1" envasado al vacío en bolsas esterilizables en ALGOR®.

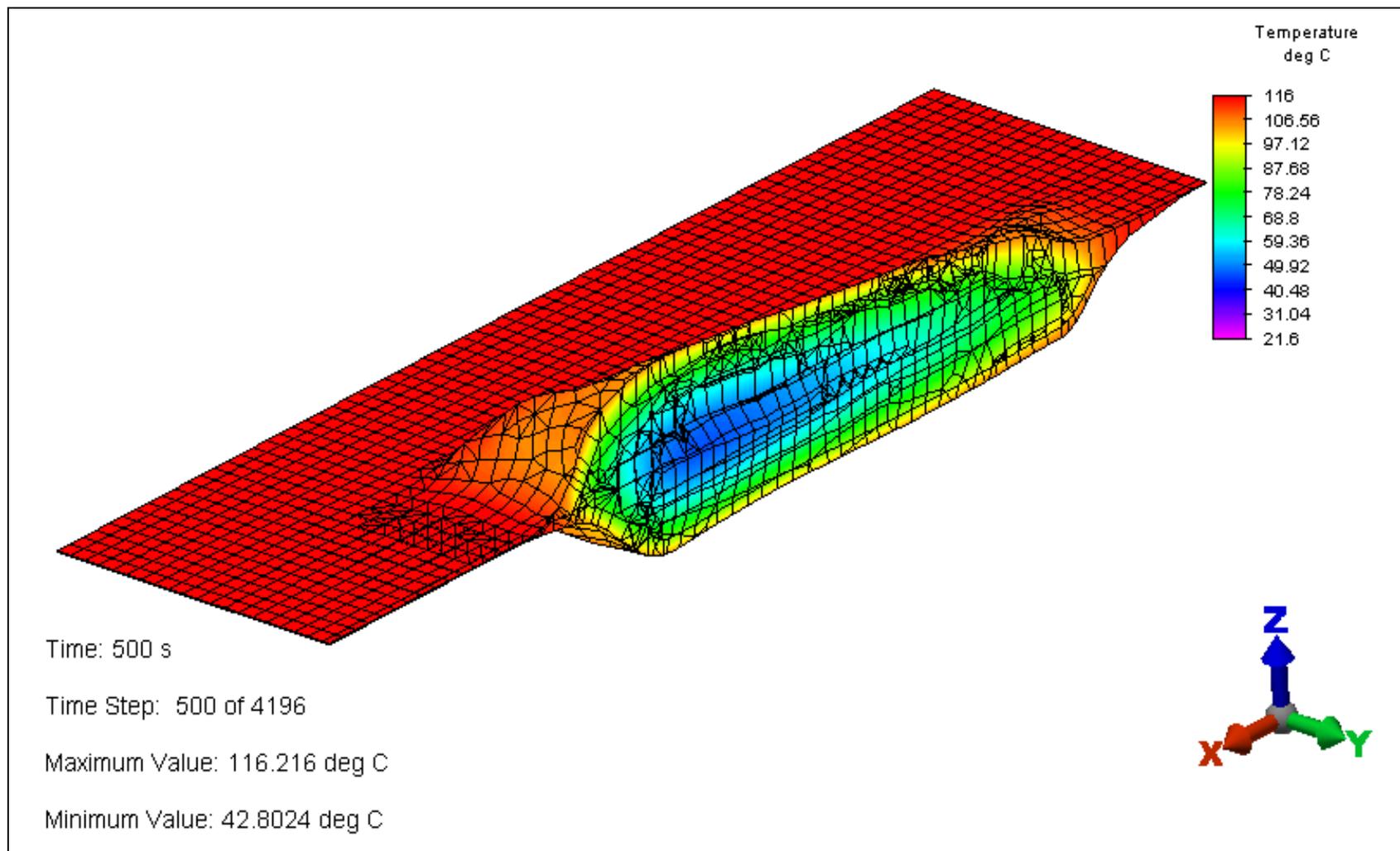
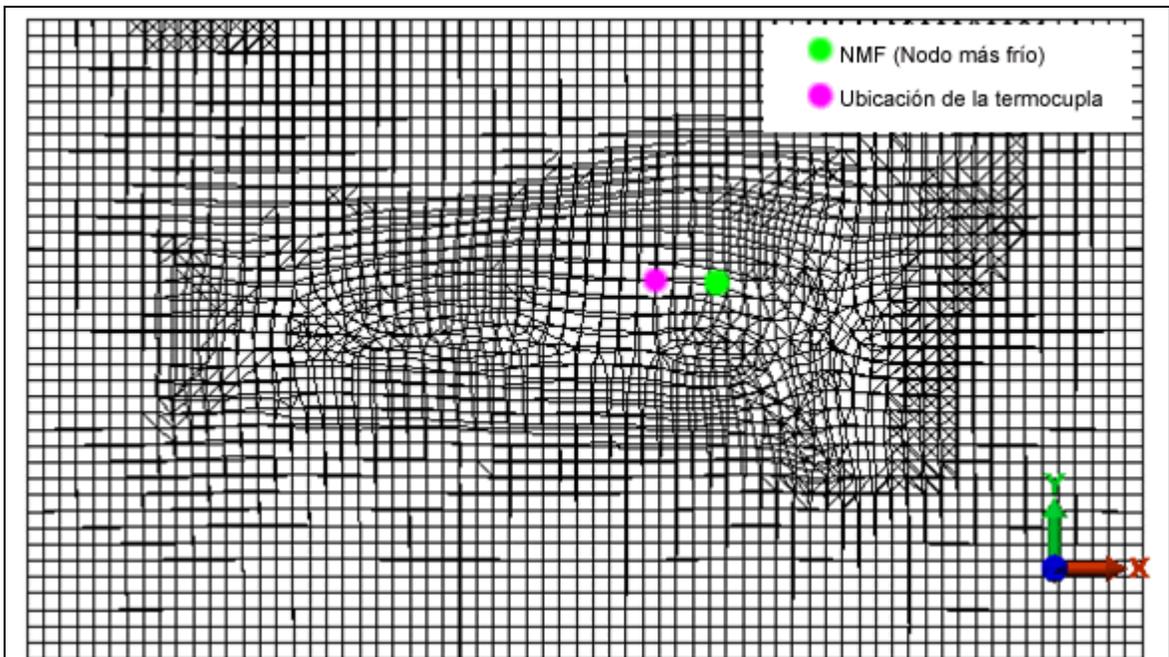
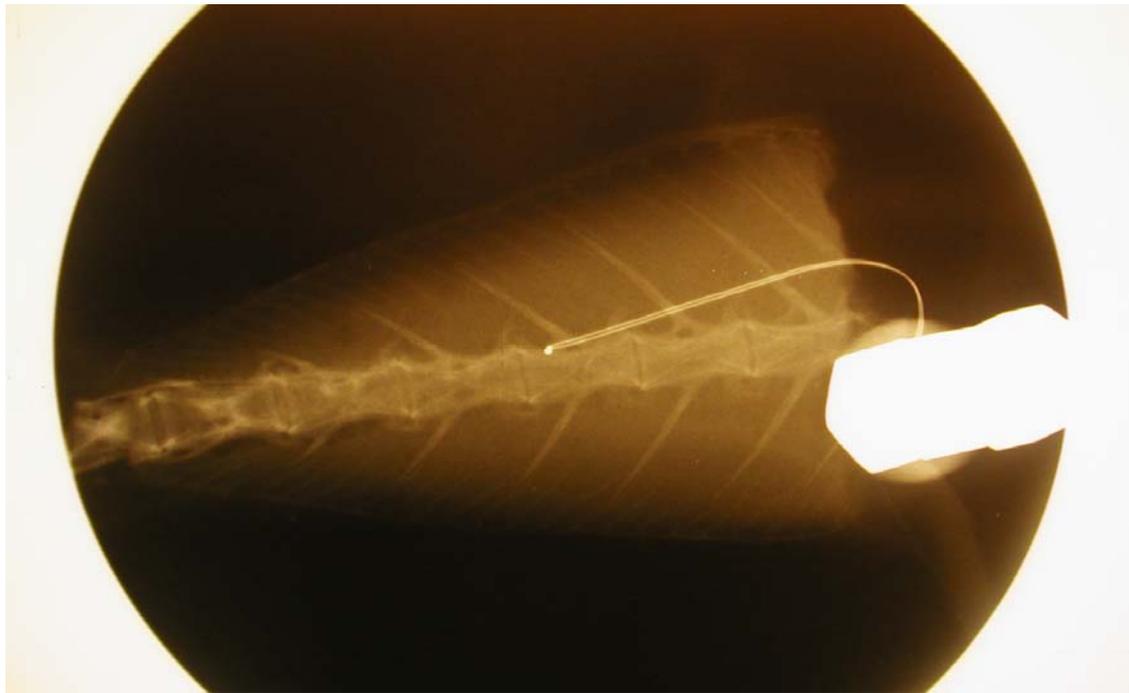


FIGURA 66. Corte longitudinal del diagrama de contorno del cono "1" envasado al vacío en bolsas esterilizables en ALGOR®.



(a) Coordenada (x,y) en ALGOR[®]



(b) Coordenada (x,y) en la radiografía

FIGURA 67. Localización de las coordenadas (x,y) de la termocupla insertada en el cono "1".

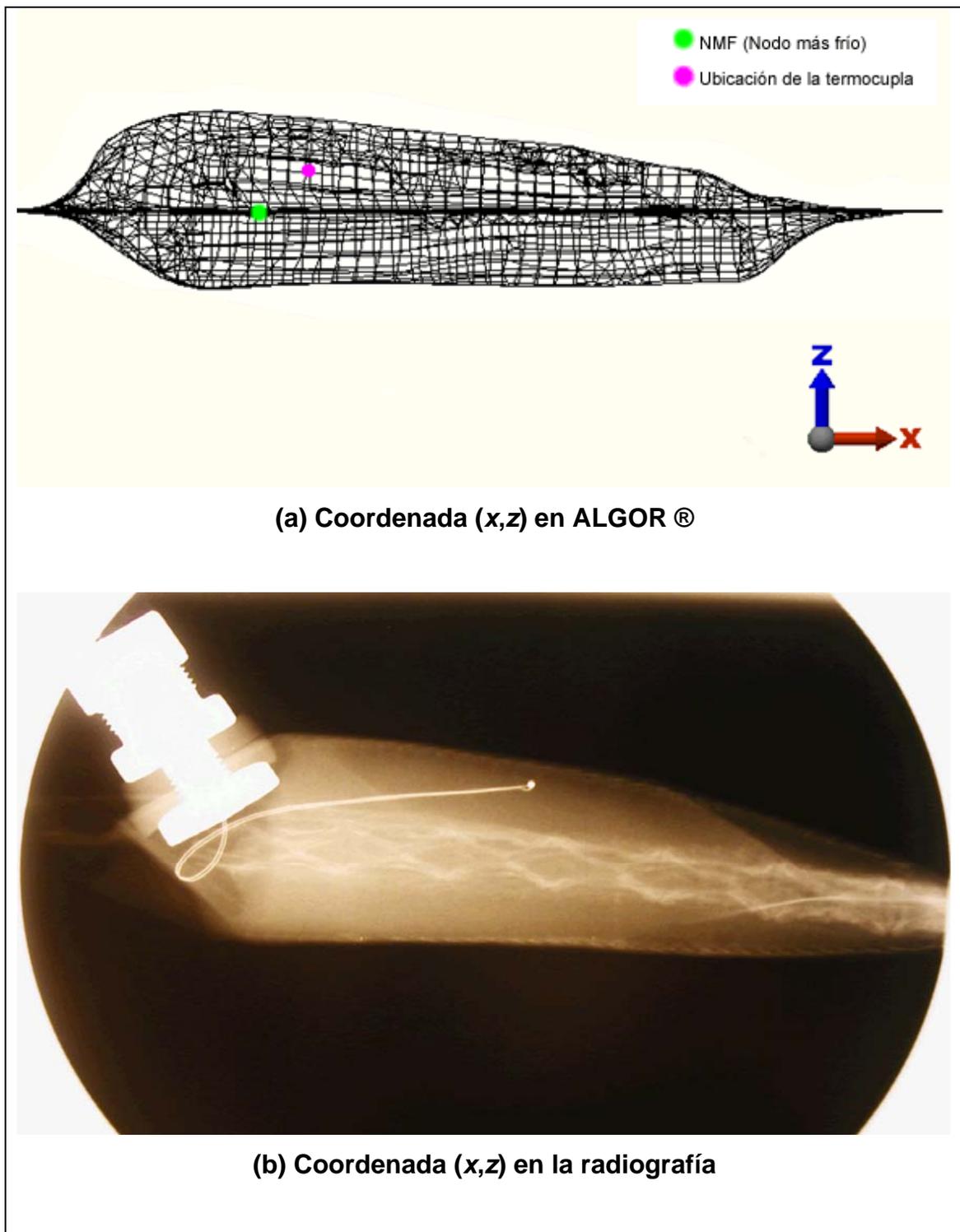


FIGURA 68. Localización de las coordenadas (x,z) de la termocupla, insertada en el cono "1".

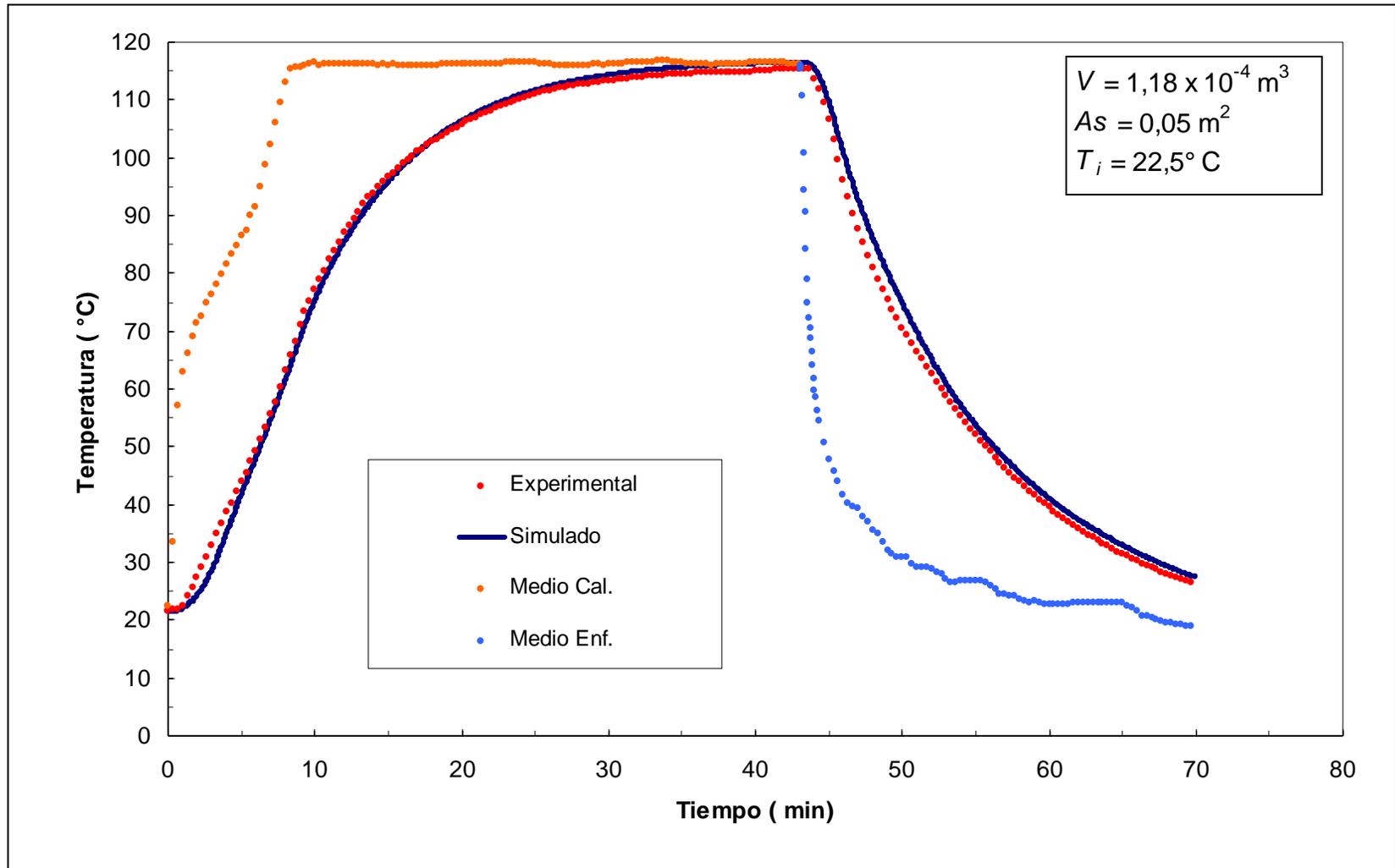


FIGURA 69. Perfiles de temperaturas experimental y simulado para el proceso térmico del cono “1” envasados al vacío en bolsas esterilizables.

4.4 Filetes de jurel envasados al vacío en bolsas esterilizables.

Los resultados obtenidos para los filetes de jurel se presentan a continuación:

4.4.1. Modelo digital 3D. El modelo 3D de una muestra de filete de jurel envasado al vacío en bolsa esterilizable obtenido de la digitalización y posterior modelación tridimensional se puede observar en la FIGURA 70. Otros modelos digitales de las muestras restantes de los filetes de jurel se pueden encontrar en el ANEXO 1.

4.4.2 Modelo mallado. Los modelos digitales de los filetes con su respectiva malla generada en ALGOR®, se pueden observar en la FIGURA 71. Los modelos mallados para las otras muestras de filete de jurel se pueden encontrar en el ANEXO 2. El hecho que ALGOR® haya podido generar la malla indica que el modelo digital capturado es válido para realizar un análisis de transferencia de calor por el método de elementos finitos.

4.4.3 Diagramas de contorno. En la FIGURA 72, se puede apreciar un corte longitudinal obtenido de la simulación térmica en ALGOR®. Los resultados se muestran en forma de diagramas de contorno, en colores, donde cada color indica un rango de temperatura que se presenta en el extremo superior derecho. Se puede avanzar en cada paso de tiempo (*Time Step*, extremo inferior izquierdo) para ver cómo el calor va penetrando en el producto, mostrándose colores rojizos para las temperaturas más altas y morados tenues para las más bajas. Los demás cortes longitudinales correspondiente a los filetes evaluados se pueden apreciar en el ANEXO 3.

4.4.4 Estadísticas de los modelos de ALGOR®. En el CUADRO 20, se presentan las estadísticas resultantes para los modelos digitales en los análisis realizados en ALGOR® para cada filete envasado al vacío en bolsas esterilizables.

CUADRO 20. Estadísticas de los modelos digitales de filetes de jurel envasados al vacío en bolsas esterilizables en ALGOR®.

<i>Item</i>	Filetes de jurel		
	"1"	"2"	"6"
Número de elementos generados	17272	42079	26151
Número de nodos generados	8389	19661	13634
Espacio ocupado en disco duro (GB)	2,98	7,14	4,63
Tiempo total simulación (<i>min</i>)	500,583 (~8,34 h)	1247,239 (~20.78 h)	870,945 (~14,5 h)

Se puede observar en el CUADRO 20, la gran diferencia entre el número de elementos generados para los filetes de jurel evaluados. Esto es entendible debido a las diferencias de espesor y tamaño de cada una de las muestras que se ve reflejada en sus volúmenes que son $0,003278989\text{m}^3$, $0,003078188\text{m}^3$ y $0,0037132278\text{m}^3$, respectivamente. Además, cada filete presenta una irregularidad superficial particular para cada caso. Las diferencias mencionadas demuestra que cada muestra (filete) es única e irrepetible.

4.4.5 Comparación de perfiles de temperatura experimentales y simulados.

En las pruebas experimentales las termocuplas fueron insertadas en los filetes de jurel envasados al vacío en bolsas esterilizables en diferentes posiciones. Es así que para cada modelo digital en ALGOR® se debió localizar aquel nodo que correspondiera en su ubicación espacial (x , y , z) al punto evaluado en el producto. La localización del punto fue lograda con la ayuda de dos tomas de Rayos X bidimensionales en los planos XY y XZ . Seguidamente se pudo encontrar sin mayores complicaciones la localización del nodo en el modelo digital que corresponde al punto evaluado en el producto (FIGURA 73 y FIGURA 74). Las radiografías así como la localización de los nodos evaluados para los filetes de jurel restantes se pueden encontrar en el ANEXO 4. Las

coordenadas (x, y, z) del nodo evaluado para las 3 muestras de filetes se detallan en el CUADRO 21.

CUADRO 21. Coordenadas del nodo evaluado para los 3 filetes de jurel.

<i>Item</i>	Filetes de jurel			
		"1"	"2"	"3"
Número nodo medido		8038	18166	10260
Ubicación espacial del nodo medido (x, y, z) (m)	x	0,0166159	-0,00407801	0,00350966
	y	0,00225103	-0,00515570	-0,0104379
	z	-0,00021623	0,0023143	-0,00116333

La bondad del ajuste entre las curvas simuladas y experimentales fue expresada mediante el estadístico RMSE tanto en términos absolutos (°C) como relativos (%). Los valores de RMSE se pueden observar en el CUADRO 22, CUADRO 23 y CUADRO 24.

En el CUADRO 22, se puede ver que para las tres muestras de filete los errores absolutos son de alrededor de 2 °C, con excepción de la muestra "3", donde tiene un error de 5 °C, pero solo en la etapa del tiempo de elevación (CUT). En las demás etapas del proceso térmico el valor de RMSE absoluto es bajo, lo cual implica un buen ajuste entre las curvas simulada y experimental.

En el CUADRO 23, la etapa de calentamiento muestra que para temperaturas mayores de 100 °C, es decir, con real importancia letal, el valor de RMSE es de 2% aproximadamente llegando en algunos casos a valores absolutos de alrededor 0,28 °C. En la etapa de enfriamiento el error aumenta, pero no considerablemente, es decir hay menor ajuste entre las curvas experimental y simulada, pero aun cae dentro del criterio ingenieril establecido (< 10%).

Finalmente, el CUADRO 24 muestra los valores de RMSE globales del proceso, es decir, involucra el calentamiento (CUT y tiempo del operador) y enfriamiento. Se observa que el mayor error es reflejado en el filete "3" con un grado de desajuste de 5,73%, es decir 2,77 °C. El filete "2" refleja el menor valor de RMSE de las muestras con 1,97%, lo que equivale a un error absoluto de 1,27 °C.

CUADRO 22. Valores de RMSE por etapas para el proceso de esterilización de filetes de jurel.

Filetes	Tiempo de Elevación (CUT)		Tiempo del Operador		Tiempo de Enfriamiento	
	<i>RMSE</i> (°C)	<i>RMSE</i> (%)	<i>RMSE</i> (°C)	<i>RMSE</i> (%)	<i>RMSE</i> (°C)	<i>RMSE</i> (%)
1	1,04	3,81	2,18	2,05	2,87	5,38
2	0,79	2,52	0,76	0,79	2,12	3,19
3	5,95	13,80	1,38	1,65	2,46	4,20

CUADRO 23. Valores de RMSE para el proceso de esterilización considerando temperaturas con (T>100°C) y sin (T<100°C) importancia letal en filetes de jurel.

Filetes	Calentamiento				Enfriamiento			
	T < 100 °C		T > 100 °C		T > 100 °C		T < 100 °C	
	<i>RMSE</i> (°C)	<i>RMSE</i> (%)	<i>RMSE</i> (°C)	<i>RMSE</i> (%)	<i>RMSE</i> (°C)	<i>RMSE</i> (%)	<i>RMSE</i> (°C)	<i>RMSE</i> (%)
1	1,21	2,82	2,41	2,23	2,13	1,95	3,07	6,10
2	0,83	1,92	0,72	0,64	1,84	1,70	2,23	3,61
3	4,86	10,52	0,31	0,28	2,41	2,25	2,48	4,40

CUADRO 24. Valores de RMSE global para el proceso de esterilización en filetes de jurel.

Filetes	"1"		"2"		"3"	
	RMSE (°C)	RMSE (%)	RMSE (°C)	RMSE (%)	RMSE (°C)	RMSE (%)
	2,27	3,47	1,27	1.97	2,77	5,73

En la FIGURA 75, se puede apreciar el ajuste entre la curva experimental y simulada para el filete "2". Las curvas de validación para los filetes "1" y "3" se pueden encontrar en el ANEXO 5. Una vez validado los resultados experimentales se puede determinar la ubicación del punto de más lento calentamiento (punto más frío) a partir del modelo FEA de ALGOR®.

4.4.6 Ubicación del punto más frío. A continuación en el CUADRO 25, se muestra la ubicación tridimensional en coordenadas (x, y, z) del punto de más lento calentamiento para las tres modelos FEA de los filetes evaluados.

CUADRO 25. Coordenada correspondiente al nodo más frío en filetes de jurel.

Item	Filetes de jurel			
		"1"	"2"	"3"
Número nodo medido		8197	17319	10727
Ubicación espacial del nodo medido (x, y, z) (m)	x	0,0213792	0,00985278	0,0268786
	y	-0,00727552	0,0112028	-0,0280909
	z	0,00260198	0,000707933	0,0127331

Para el centro térmico o nodo más frío ubicado se obtuvo los datos tiempo/temperatura, a partir del cual se calcularon los valores F_0 , considerando los parámetros cinéticos del *C. botulinum*. En el CUADRO 26 se presenta los valores de F_0 por etapas de proceso mientras que en el CUADRO 27 se presenta los valores de F_0 para las etapas de calentamiento y enfriamiento,

agrupándolos a su vez en temperaturas menores a 100 °C ($T < 100$ °C) y temperaturas mayores a 100 °C ($T > 100$ °C).

En el CUADRO 26 se puede observar que todos los filetes de jurel cumplen con el F_0 (requerido), es decir, que los valores de F_0 (proceso) son mayores a 3,0 min, por lo tanto las muestras tratadas cumplen con la esterilidad comercial. Tomando en cuenta los valores de F_0 por etapas del tratamiento térmico, se puede observar claramente que el aporte del CUT al F_0 del proceso total es despreciable, ya que sus valores tienden a cero. En cambio el tiempo del operador (etapa de temperatura de autoclave constante) es la fase que tiene una mayor incidencia en el F_0 de proceso global. Por otro lado, la etapa de enfriamiento aporta en forma apreciable al valor de F_0 del proceso global. Así, la etapa de enfriamiento no puede despreciarse en la evaluación de un tratamiento térmico.

Con respecto a las temperaturas con importancia letal en el cálculo de F_0 (CUADRO 27) se puede observar que las temperaturas mayores de 100 °C de la etapa de calentamiento son las que aportan mayoritariamente al F_0 , aproximadamente entre un 68 a 85%.

CUADRO 26. Valores de F_0 (minutos) para la esterilización de filetes de jurel.

Etapa	Filetes de jurel		
	"1"	"2"	"3"
CUT	1,48E-07	4,70E-08	7,94E-08
Tiempo del operador	4,352	3,768	2,170
Tiempo de Enfriamiento	0,786	0,957	0,853
Global	5,138	4,752	3,023

CUADRO 27. Valores de F_0 para el proceso de esterilización considerando temperaturas con ($T > 100^\circ\text{C}$) y sin ($T < 100^\circ\text{C}$) importancia letal en filetes de jurel.

Filetes	Calentamiento		Enfriamiento	
	$T < 100^\circ\text{C}$	$T > 100^\circ\text{C}$	$T > 100^\circ\text{C}$	$T < 100^\circ\text{C}$
1	0,005	4,386	0,729	0,016
2	0,002	3,804	0,870	0,048
3	0,003	1,980	0,857	0,180

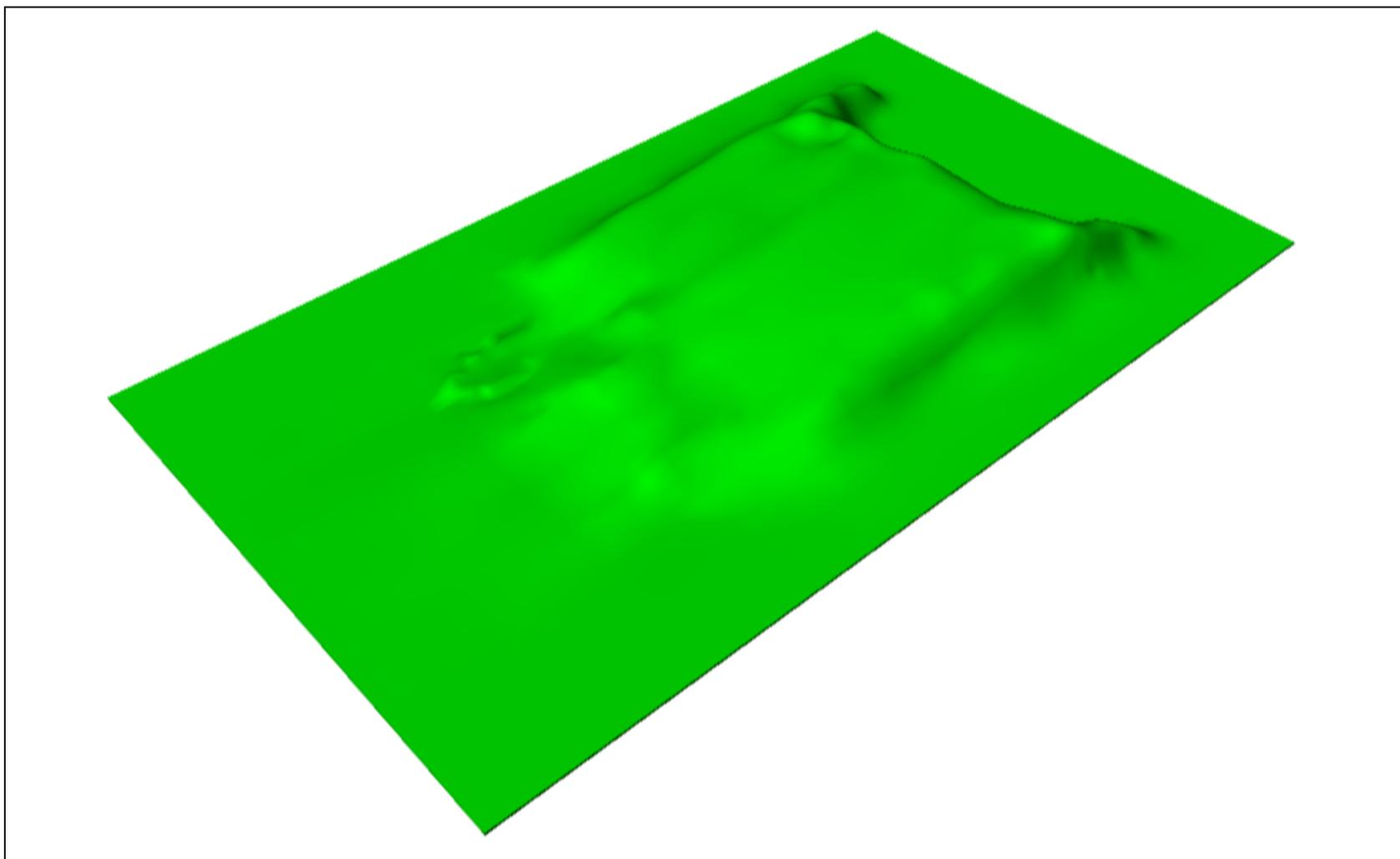


FIGURA 70. Modelo digital 3D del filete “2” envasado al vacío en bolsas esterilizables en Rhinoceros®.

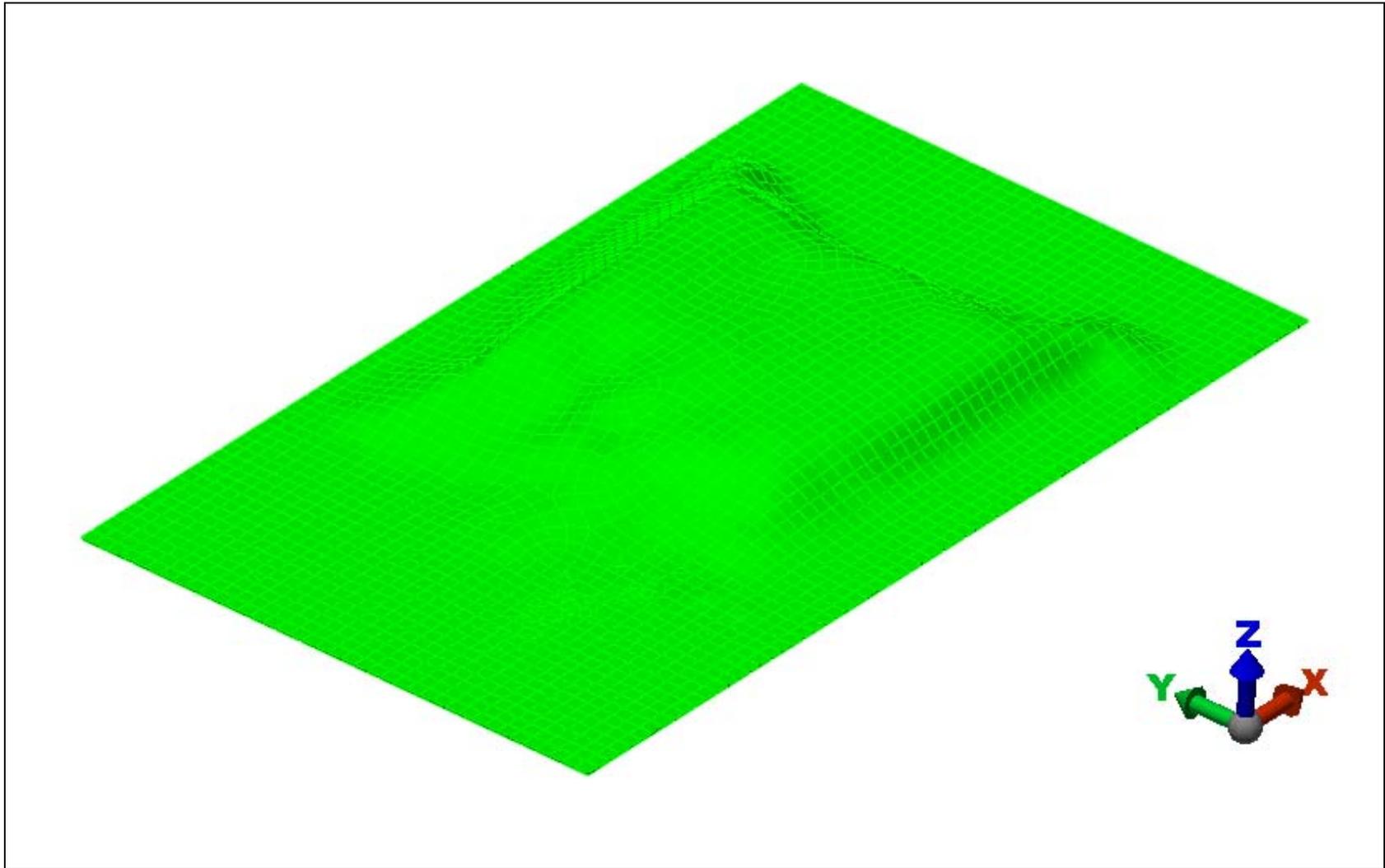


FIGURA 71. Modelo mallado (FEA) del filete “2” envasado al vacío en bolsas esterilizables en ALGOR®.

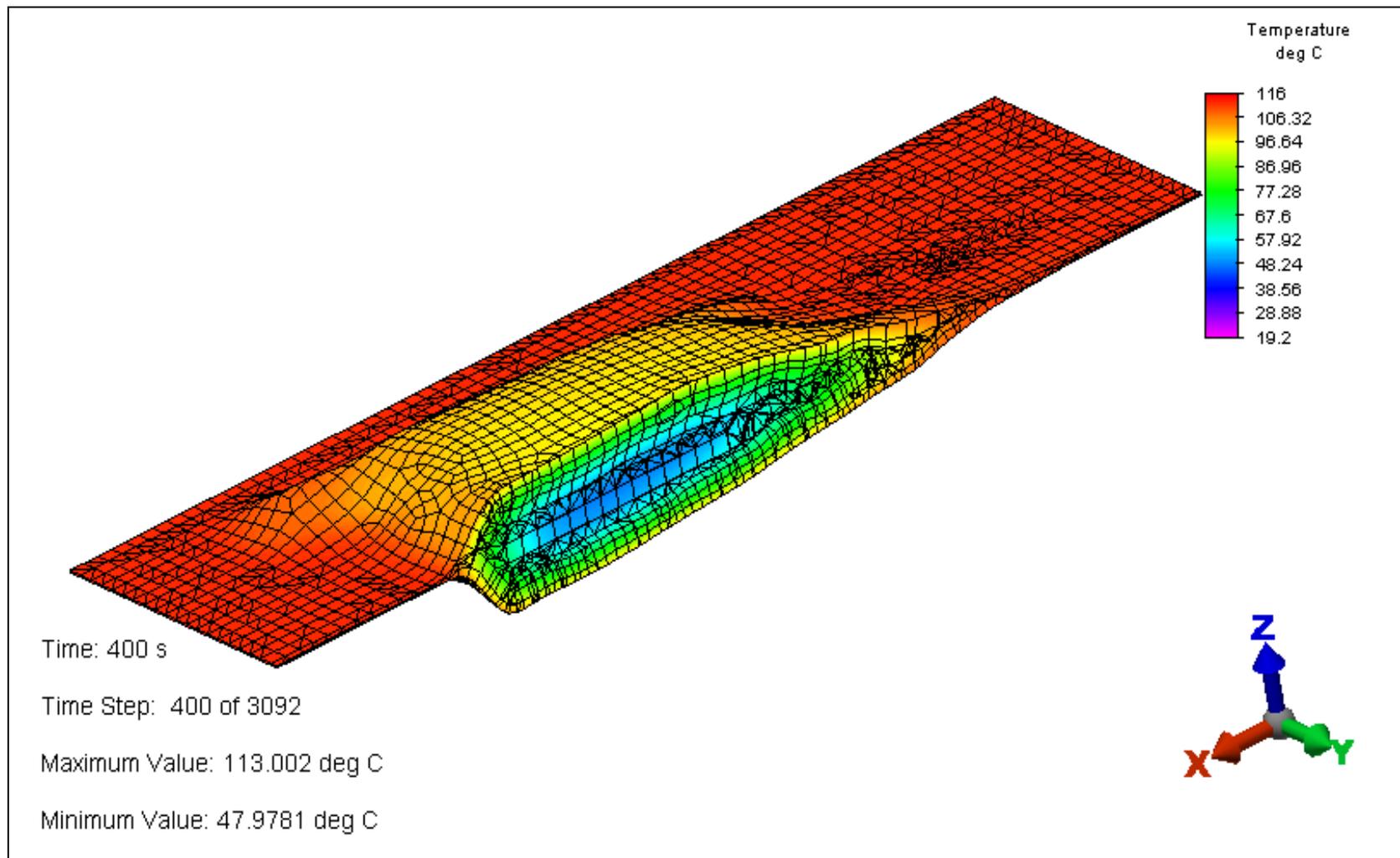


FIGURA 72. Corte longitudinal del diagrama de contorno del filete “2” envasado al vacío en bolsas esterilizables en ALGOR®.

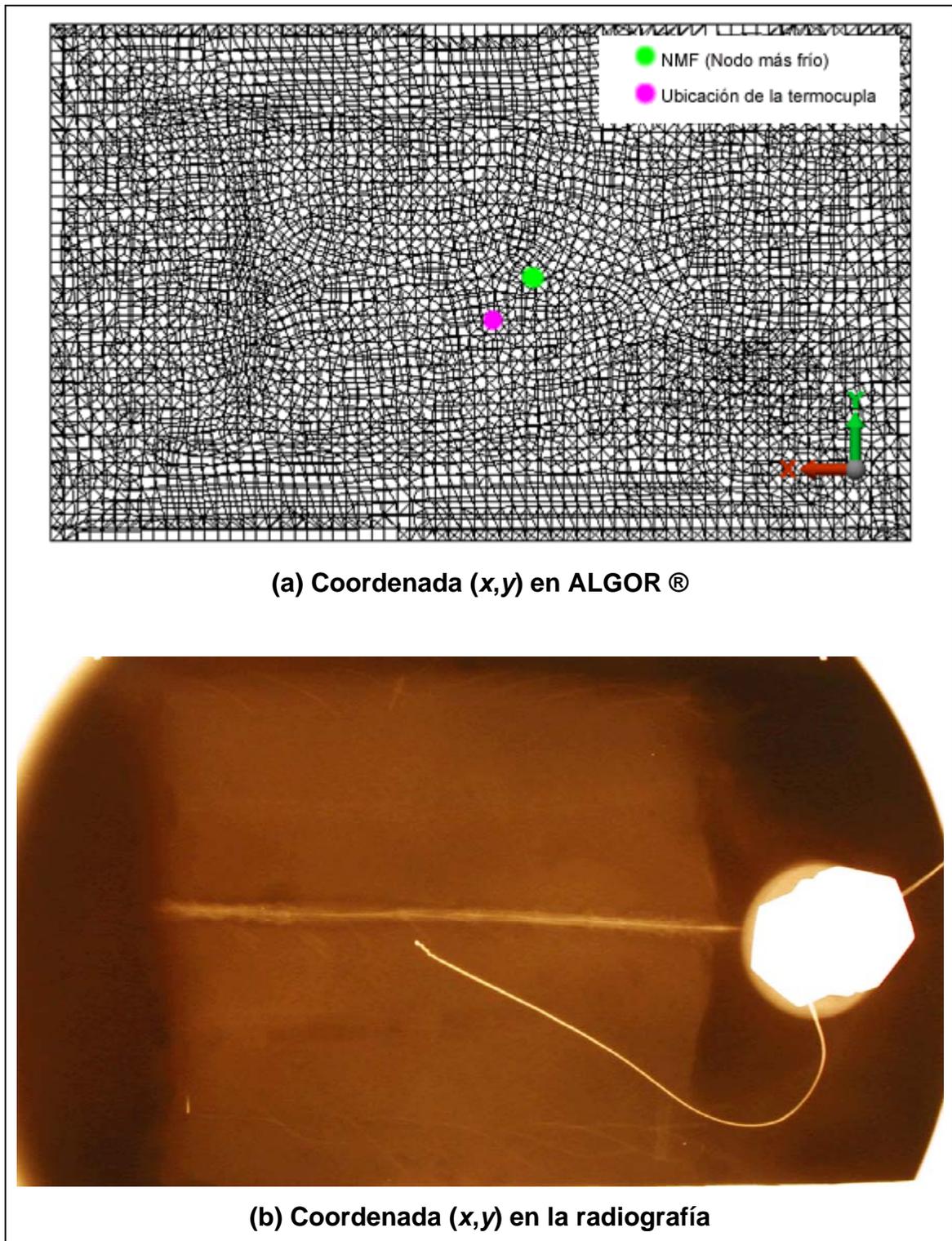


FIGURA 73. Localización de la coordenada (x,y) de la termocupla insertada en el filete "2".

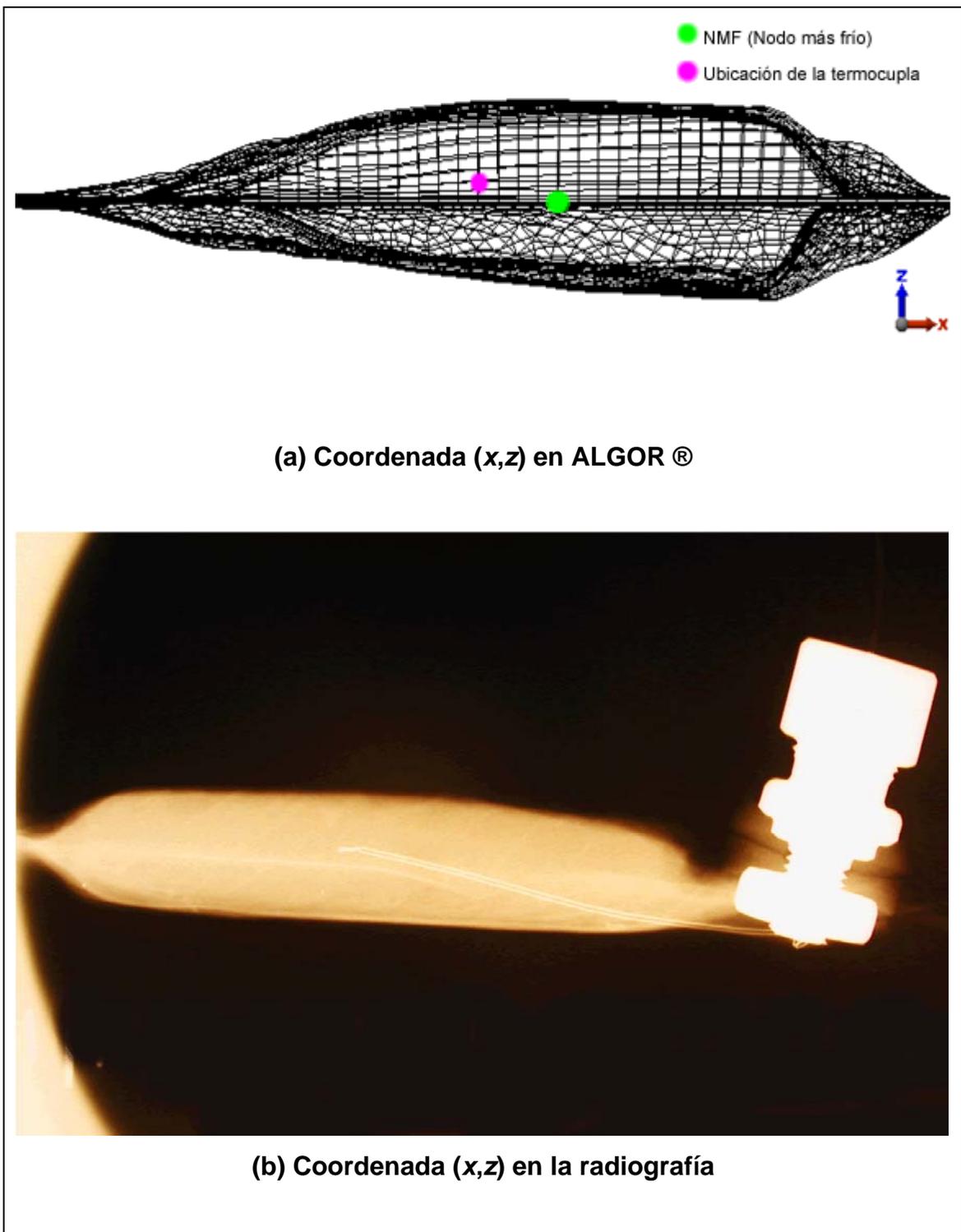


FIGURA 74. Localización de la coordenada (x,z) de la termocupla insertada en el filete "2".

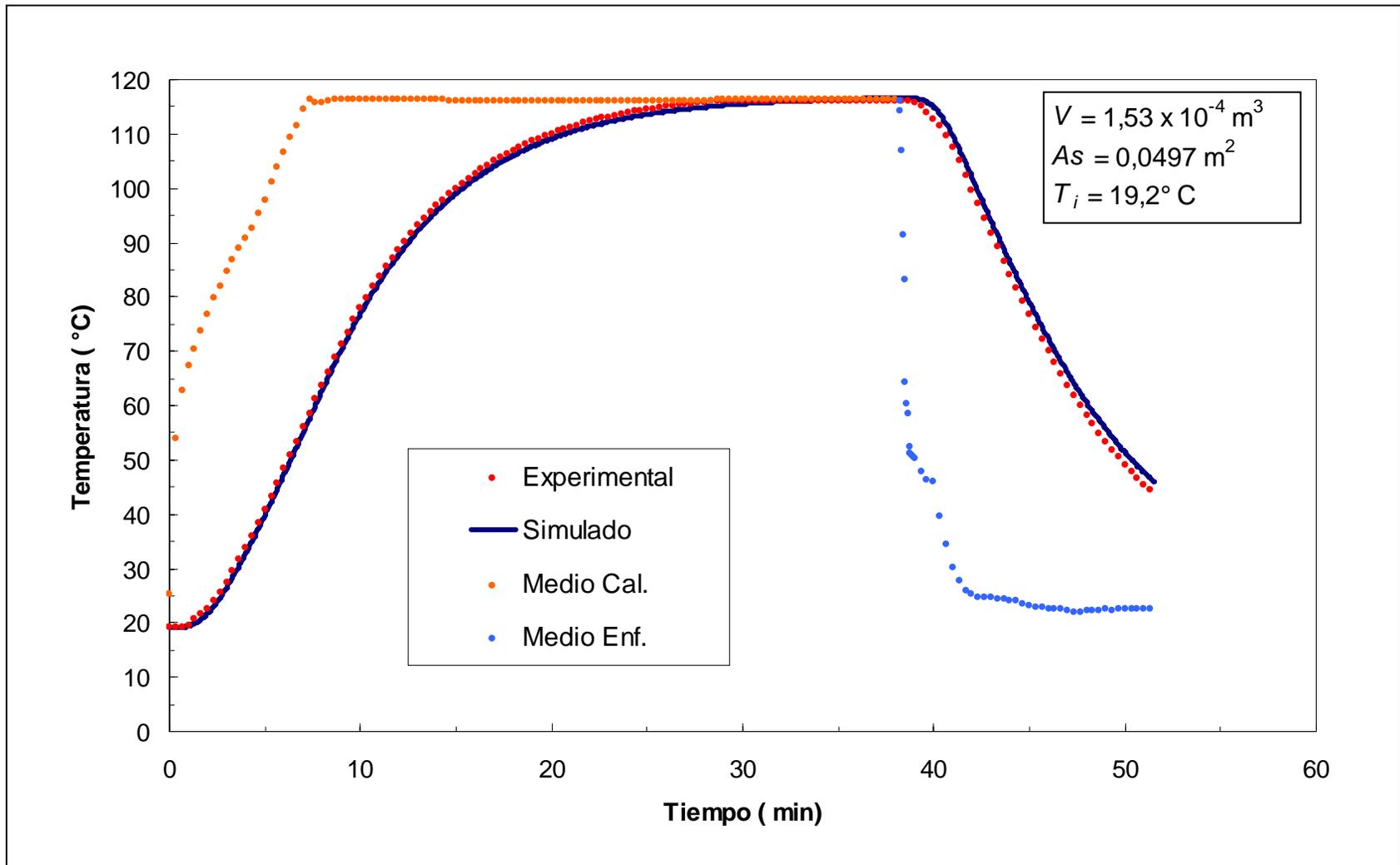


FIGURA 75. Perfiles de temperatura experimental y simulado para el proceso térmico del filete “2” envasado al vacío en bolsas esterilizables.

4.5 Medallones de jurel envasados al vacío en bolsas esterilizables.

Los resultados obtenidos para los cortes de rodajas o medallones de jurel envasados al vacío en bolsas esterilizables se presentan a continuación.

4.5.1. Modelo digital 3D. El modelo 3D de las muestras de medallones de jurel envasados al vacío en bolsa esterilizable obtenidos de la digitalización y posterior modelación tridimensional se puede observar en la FIGURA 76. Otros modelos digitales para las restantes bolsas esterilizables conteniendo medallones de jurel se pueden encontrar en el ANEXO 1.

4.5.2 Modelo mallado. Uno de los modelos digitales de las bolsas esterilizables, conteniendo los medallones de jurel, con su respectiva malla generada en ALGOR®, se puede observar en la FIGURA 77. Los modelos mallados para las otras muestras de bolsas esterilizables conteniendo los medallones se pueden encontrar en el ANEXO 2. Al igual que los casos de los conos y filetes, el hecho que ALGOR® haya podido generar la malla indica que el modelo digital capturado es válido para realizar un análisis de transferencia de calor por el método de elementos finitos.

4.5.3 Diagramas de contorno. En la FIGURA 78, se puede apreciar un corte longitudinal de la simulación térmica en ALGOR ®. Los resultados se muestran en forma de diagramas de contorno, en colores, donde cada color indicar un rango de temperatura que se presenta en el extremo superior derecho. Se puede avanzar en cada paso de tiempo (*Time Step*, extremo inferior izquierdo) para observar cómo el calor va penetrando en alimentos, mostrándose colores rojizos para las temperaturas más altas y moradas tenues para las más bajas. Los demás cortes longitudinales correspondiente a las muestras restantes de medallones envasados en bolsas esterilizables se pueden apreciar en el ANEXO 3

4.5.4 Estadísticas del modelo en ALGOR®. En el CUADRO 28, se presentan las estadísticas resultantes para los modelos digitales en los análisis realizados en ALGOR® para cada muestra de bolsa esterilizable conteniendo medallones de jurel.

CUADRO 28. Estadísticas de los modelos digitales de medallones de jurel envasados al vacío en bolsas esterilizables en ALGOR®.

<i>Item</i>	Medallones de jurel		
	"1"	"2"	"3"
Número de elementos generados	14833	12214	17292
Número de nodos generados	8969	9034	10170
Espacio ocupado en disco duro (GB)	3,20	2,89	3,68
Tiempo total simulación (<i>min</i>)	484,636 (~8,07 h)	373,098 (~6.2 h)	568,466 (~9,5 h)

Como en los casos vistos para conos (CUADRO 12) y filetes de jurel (CUADRO 20), las diferencias en el número de elementos generados para las distintas muestras analizadas de bolsas esterilizables conteniendo medallones de jurel se debe exclusivamente a las irregularidades de las superficies del producto así como también a la relación de su volumen y área que hacen variar la generación de elementos en ALGOR®.

4.5.5 Comparación de perfiles de temperatura experimentales y simulados.

En las pruebas experimentales las termocuplas fueron insertadas en los medallones de jurel envasados al vacío en bolsas esterilizables en diferentes posiciones. Es así que para cada modelo digital en ALGOR® se debió localizar aquel nodo que correspondiera en su ubicación espacial (x , y , z) al punto evaluado en el producto. La localización del punto fue lograda con la ayuda de dos tomas de Rayos X bidimensionales en los planos XY y XZ. Seguidamente

se pudo encontrar sin mayores complicaciones la localización del nodo en el modelo digital que corresponde al punto evaluado en el producto (FIGURA 79 y FIGURA 80). Las radiografías así como la localización de los nodos evaluados para las bolsas esterilizables restantes conteniendo medallones de jurel se pueden encontrar en el ANEXO 4. Las coordenadas (x, y, z) del nodo evaluado para las 3 muestras de medallones envasados en bolsas esterilizables se detallan en el CUADRO 29.

CUADRO 29. Coordenadas del nodo evaluado para medallones.

<i>Item</i>	Medallones de jurel			
		"1"	"2"	"3"
Número nodo medido		7846	8295	5178
Ubicación espacial del nodo medido (x, y, z) (m)	x	0,0157159	0,0152108	0,0345897
	y	0,0421798	-0,00501058	0,00262529
	z	0,0004620	0,00723411	-0,00425256

Igual que para el caso de conos y filetes de jurel la bondad del ajuste entre las curvas simuladas y experimentales fue expresada mediante el estadístico RMSE tanto en términos absolutos (°C) como relativos (%). Los valores de RMSE obtenidos se pueden observar en el CUADRO 30, CUADRO 31 y CUADRO 32.

En el CUADRO 30 se puede observar que para las tres muestras de medallones el mayor valor de RMSE porcentual corresponde a la etapa del tiempo de elevación (CUT) de las muestras "2" y "3". Sin embargo este error todavía se encuentra por debajo del criterio ingenieril establecido (< 10%). Para el caso de la etapa de temperatura de autoclave constante (tiempo del operador) los valores de RMSE se encuentran en alrededor del 1%, salvo la muestra "2" donde su error porcentual presenta un valor aproximado de 2%. De esta forma se observa que todas las curvas simuladas de las muestras de

medallones envasadas en bolsas esterilizables presentan un buen ajuste con las curvas experimentales.

En el CUADRO 31, la etapa de calentamiento muestra que para temperaturas mayores de 100 °C, es decir, con real importancia letal, el valor máximo de RMSE es de 1,38% aproximadamente lo que implica un error absoluto de 1,52 °C. En la etapa de enfriamiento el error porcentual no aumenta considerablemente, salvo la muestra “3” que llega hasta un máximo de RMSE de 5,48%, lo que implica un 2,13 °C de desajuste.

Finalmente, el CUADRO 32 refleja los RMSE globales del proceso, es decir, involucra el calentamiento (CUT y tiempo del operador) y enfriamiento. Se observa que el mayor error es reflejado en el medallón “3” con un valor de RMSE de 3,58% equivalente a 1,84 °C. El medallón “1” refleja el menor valor de RMSE entre las muestras con valores de 2,16%, lo que equivale a un error absoluto de 1,44 °C. Por lo tanto, todos los valores de RMSE para las muestras de medallones envasados en bolsas esterilizables cumplen con el criterio ingenieril impuesto (< 10%) como limite en la presente investigación.

CUADRO 30. Valores de RMSE por etapas para el proceso de esterilización de medallones de jurel.

Medallones	Tiempo de Elevación (CUT)		Tiempo del Operador		Tiempo de Enfriamiento	
	RMSE (°C)	RMSE (%)	RMSE (°C)	RMSE (%)	RMSE (°C)	RMSE (%)
1	0,79	2,06	1,39	1,84	1,78	2,76
2	1,90	5,14	2,08	2,58	0,65	0,90
3	2,97	5,85	1,32	1,17	2,0	5,01

CUADRO 31. Valores de RMSE para el proceso de esterilización considerando temperaturas con ($T > 100^{\circ}\text{C}$) y sin ($T < 100^{\circ}\text{C}$) importancia letal en medallones de jurel.

Medallones	Calentamiento				Enfriamiento			
	$T < 100^{\circ}\text{C}$		$T > 100^{\circ}\text{C}$		$T > 100^{\circ}\text{C}$		$T < 100^{\circ}\text{C}$	
	<i>RMSE</i> ($^{\circ}\text{C}$)	<i>RMSE</i> (%)						
1	1,98	2,96	0,45	0,40	1,41	1,30	1,99	3,99
2	2,89	5,01	1,21	1,11	0,76	0,67	0,70	1,02
3	2,73	6,07	1,52	1,38	1,22	1,10	2,13	5,48

CUADRO 32. Valores de RMSE global para el proceso de esterilización en medallones de jurel.

Medallones	"1"		"2"		"3"	
	<i>RMSE</i> ($^{\circ}\text{C}$)	<i>RMSE</i> (%)	<i>RMSE</i> ($^{\circ}\text{C}$)	<i>RMSE</i> (%)	<i>RMSE</i> ($^{\circ}\text{C}$)	<i>RMSE</i> (%)
	1,44	2,16	1,77	2,80	1,84	3,58

En la FIGURA 81 se puede apreciar el ajuste entre la curva experimental y simulada para la muestra "medallón 1". Las otras gráficas de validación para las muestras de medallones restantes se pueden encontrar en el ANEXO 5.

Una vez validado los resultados experimentales se puede determinar la ubicación del punto de más lento calentamiento (punto más frío) a partir del modelo FEA de ALGOR®.

4.5.6 Ubicación del punto más frío. A continuación en el CUADRO 33, se muestra la ubicación tridimensional en coordenadas (x, y, z) del punto de mas lento calentamiento para las tres muestras de medallones obtenidos de ALGOR®.

CUADRO 33. Coordenadas correspondiente al nodo más frío en medallones de jurel.

Item	Medallones de jurel			
		"1"	"2"	"3"
Número nodo medido		7884	8255	8900
Ubicación espacial del nodo medido (x, y, z) (m)	x	-0,0042736	0,00676888	0,00355404
	y	0,0501756	-0,00237047	0,000875455
	z	0,000462032	0,00710641	0,01247

Para el centro térmico o nodo mas frío ubicado para el modelo evaluado se obtuvo la curva tiempo/temperatura, a partir del cual se calcularon los valores de F_0 , considerando los parámetros cinéticos del *C. botulinum*. En el CUADRO 34 se presenta los valores de F_0 por etapas de proceso, mientras que en el CUADRO 35 se presenta los valores de F_0 para las etapas de calentamiento y enfriamiento, agrupándolos a su vez en temperaturas menores a 100 °C ($T < 100$ °C) y temperaturas mayores a 100 °C ($T > 100$ °C).

En el CUADRO 34 se puede observar que todos los medallones de jurel cumplen con el F_0 (requerido), es decir, que los valores de F_0 de proceso son mayores a 3,0 min, por lo tanto las muestras tratadas cumplen con el requisito de esterilidad comercial. A partir de los valores de F_0 por etapas del tratamiento térmico, se puede observar claramente que el aporte del CUT al F_0 del proceso total es despreciable. Lo anterior es coincidente lo visto para las muestras de conos y filetes de jurel. En cambio la etapa de temperatura de autoclave constante (tiempo del operador) es la fase que tiene una mayor incidencia en el F_0 del proceso global. Por otro lado, la etapa de enfriamiento aporta en forma apreciable al valor F_0 del proceso global. Así, la etapa de enfriamiento no puede despreciarse en la evaluación de cualquier tratamiento térmico.

En base a la información suministrada en el CUADRO 35, se puede rescatar

información muy valiosa en términos de optimización de tiempos de proceso, al igual que en el caso de los conos y filetes de jurel. Con la información de la curva simulada se podría ajustar tiempos de proceso para una letalidad (F_0) preestablecida con la finalidad de optimizar las propiedades sensoriales del producto. Asimismo, se podría elaborar Programas de Tratamiento Térmico para adecuar los procesos térmicos en función del espesor del producto.

Con respecto a las temperaturas con importancia letal en el cálculo de F_0 (CUADRO 35) se puede observar que las temperaturas mayores de 100 °C de la etapa de calentamiento son las que aportan en mayor grado al valor de F_0 del proceso global.

CUADRO 34. Valores de F_0 (minutos) para la esterilización de medallones de jurel.

Etapa	Medallones de jurel		
	"1"	"2"	"3"
CUT	2,30E-08	3,94E-08	2,09E-09
Tiempo del Operador	5,023	5,215	2,47
Tiempo de Enfriamiento	1,781	1,760	1,69
Global	6,8	6,976	4,170

CUADRO 35. Valores de F_0 para el proceso de esterilización considerando temperaturas con ($T > 100^\circ\text{C}$) y sin ($T < 100^\circ\text{C}$) importancia letal en medallones de jurel.

Medallones	Calentamiento		Enfriamiento	
	$T < 100^\circ\text{C}$	$T > 100^\circ\text{C}$	$T > 100^\circ\text{C}$	$T < 100^\circ\text{C}$
1	0,00161	5,021	1,765	0,016
3	0,0023	5,213	1,748	0,012
4	0.00005	2,479	1,626	0,069

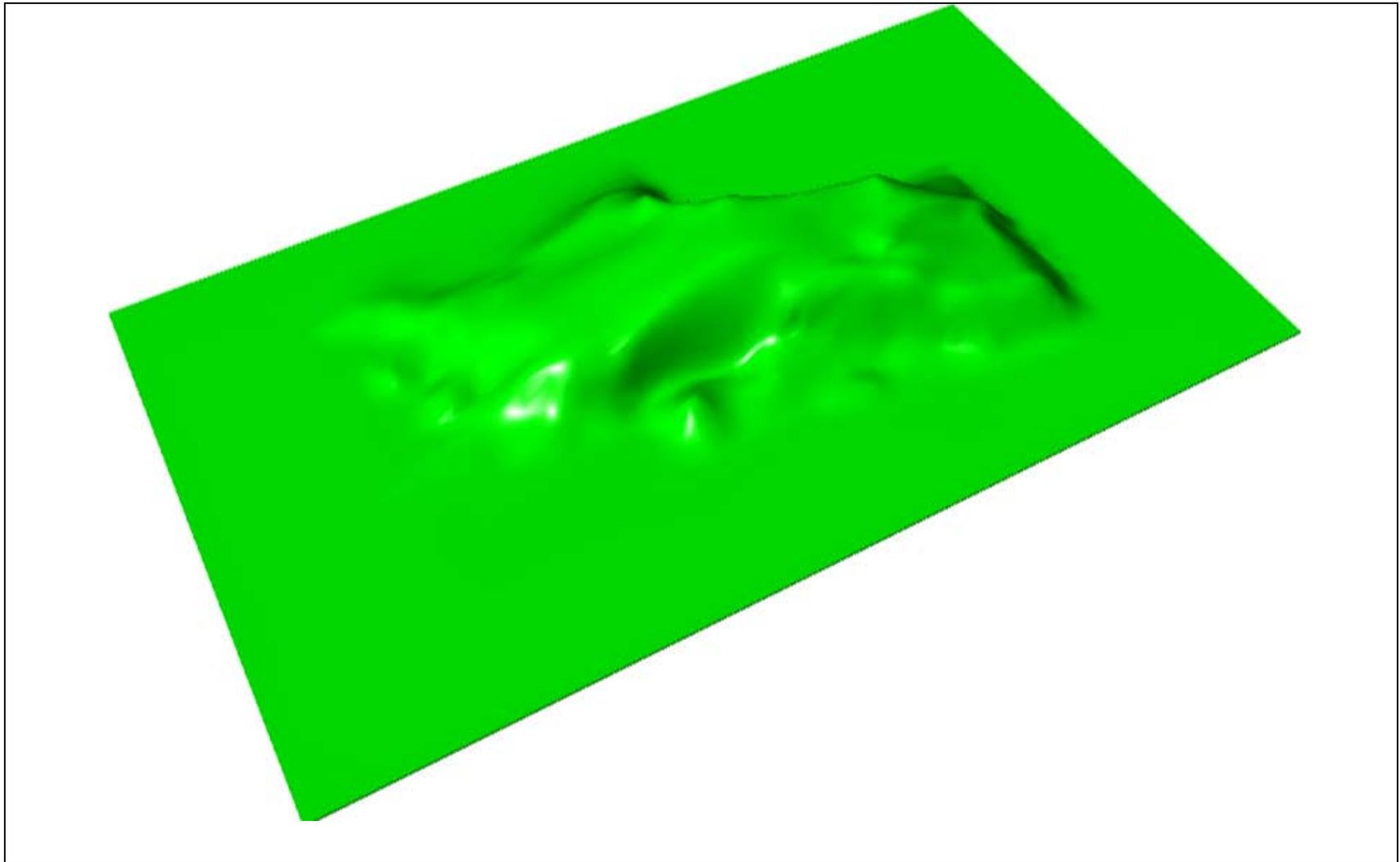


FIGURA 76. Modelo digital 3D del medallón “1” envasado al vacío en bolsas esterilizables en Rhinoceros®

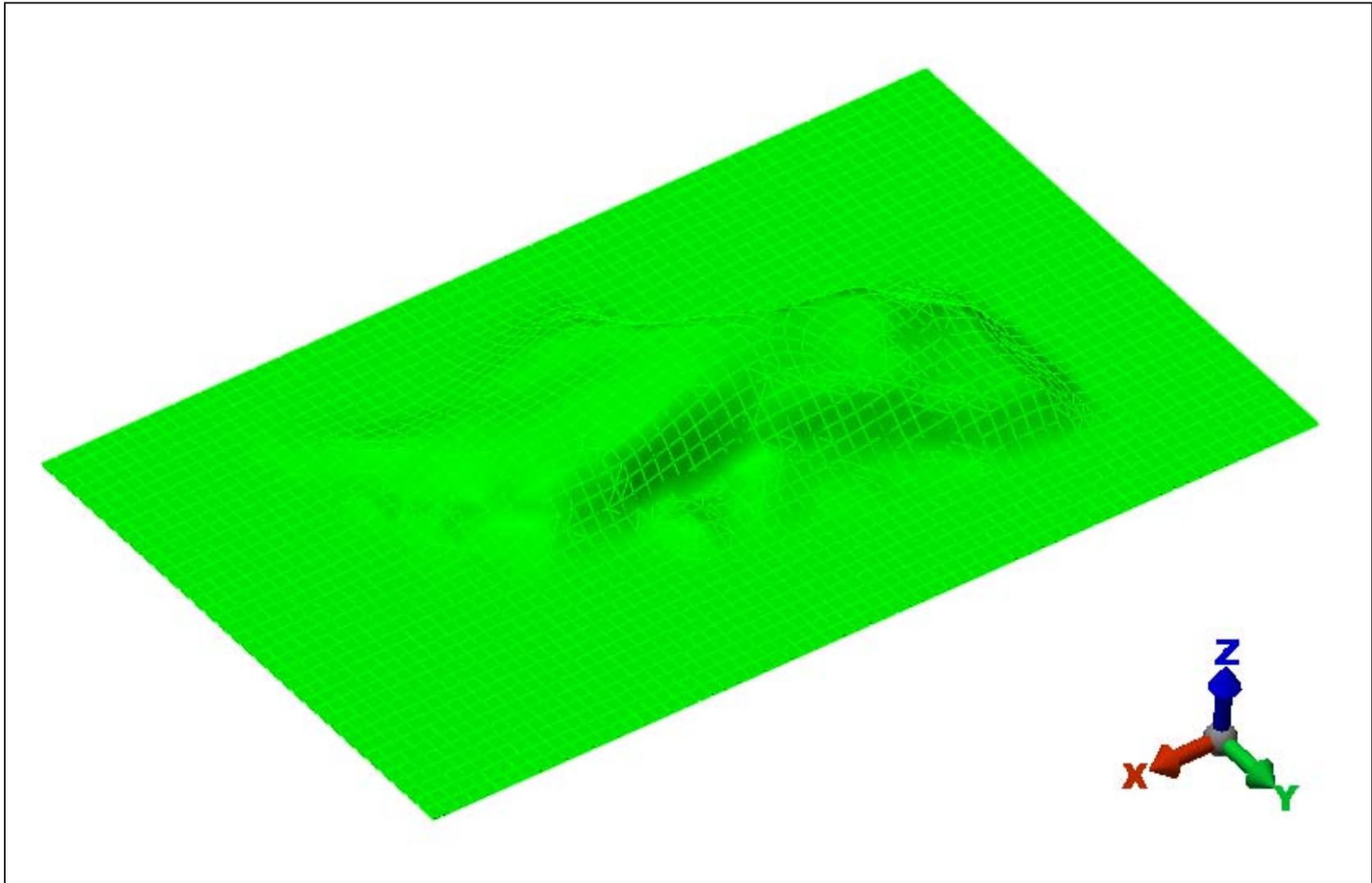


FIGURA 77. Modelo mallado (FEA) del medallón “1” envasado al vacío en bolsas esterilizables en ALGOR®.

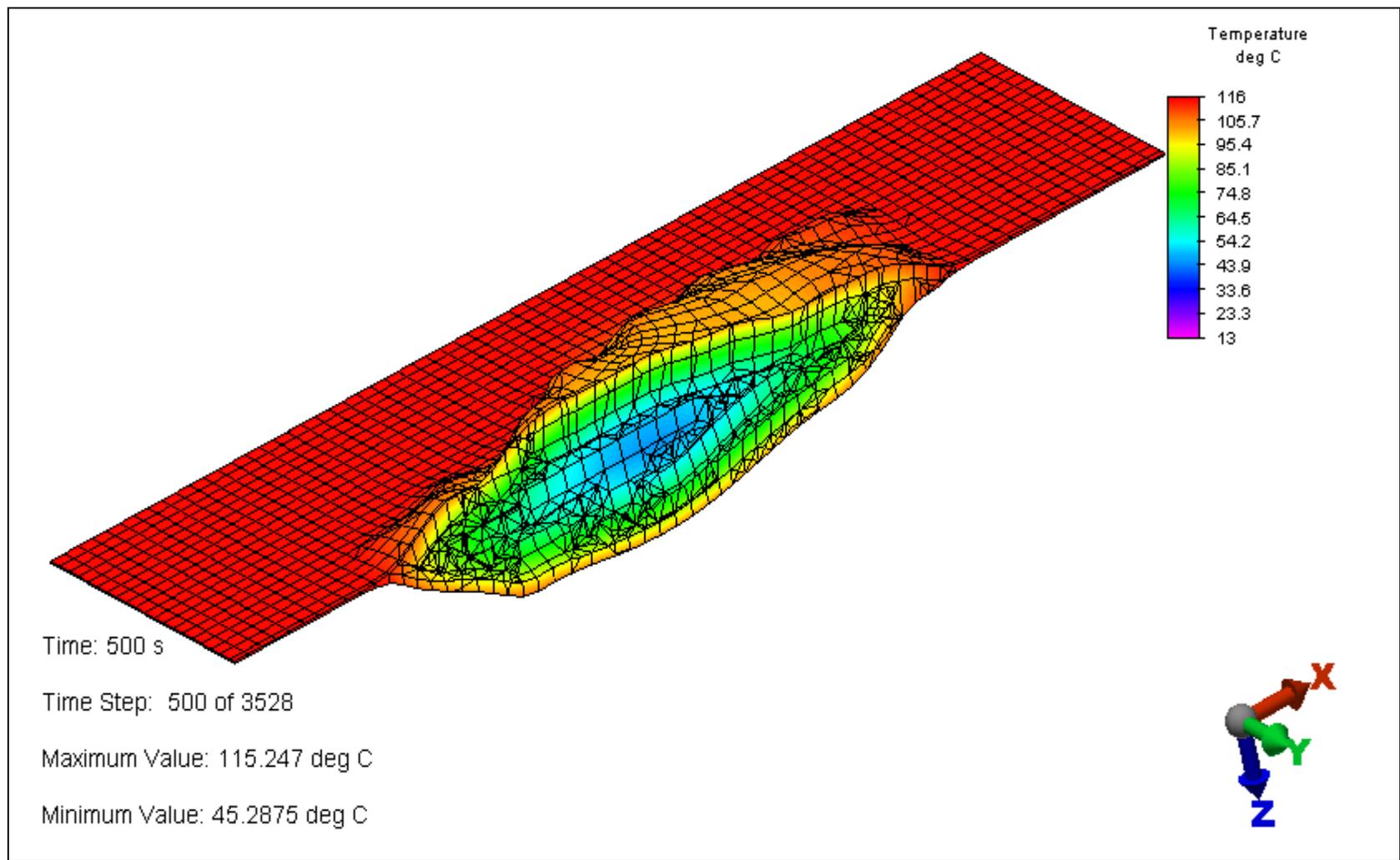
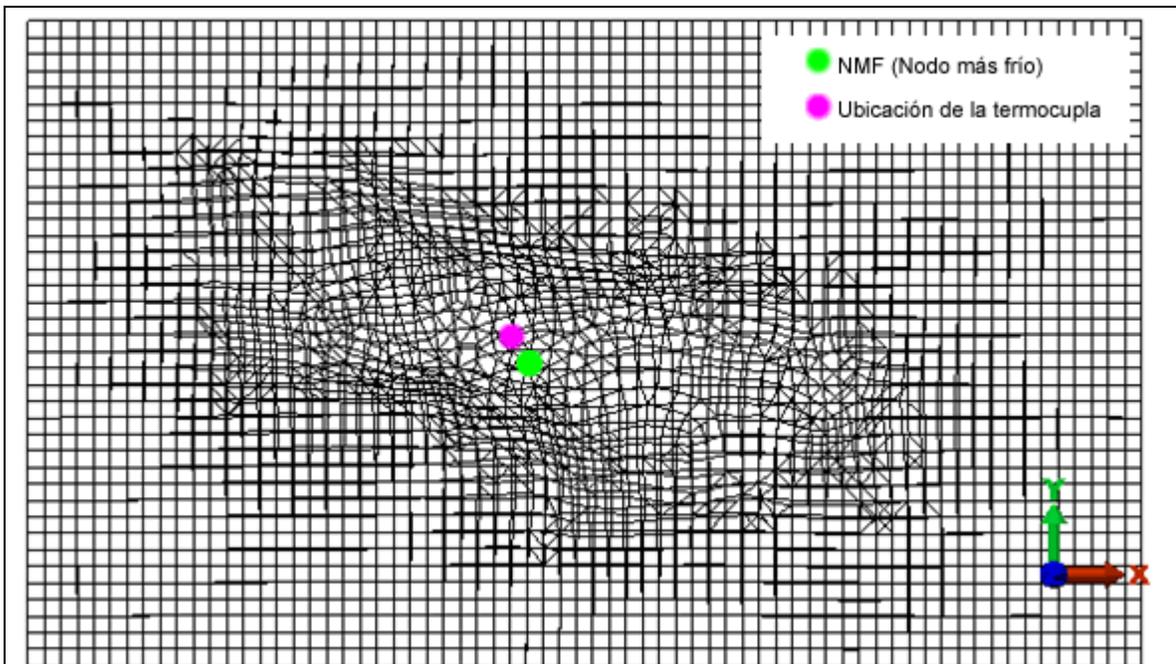


FIGURA 78. Corte longitudinal del diagrama de contorno del medallón “1” envasado al vacío en bolsas esterilizables en ALGOR®.



(a) Coordenada (x, y) en ALGOR[®]



(b) Coordenada (x, y) en la radiografía

FIGURA 79. Localización de la coordenada (x,y) de la termocupla insertada en el medallón "1".

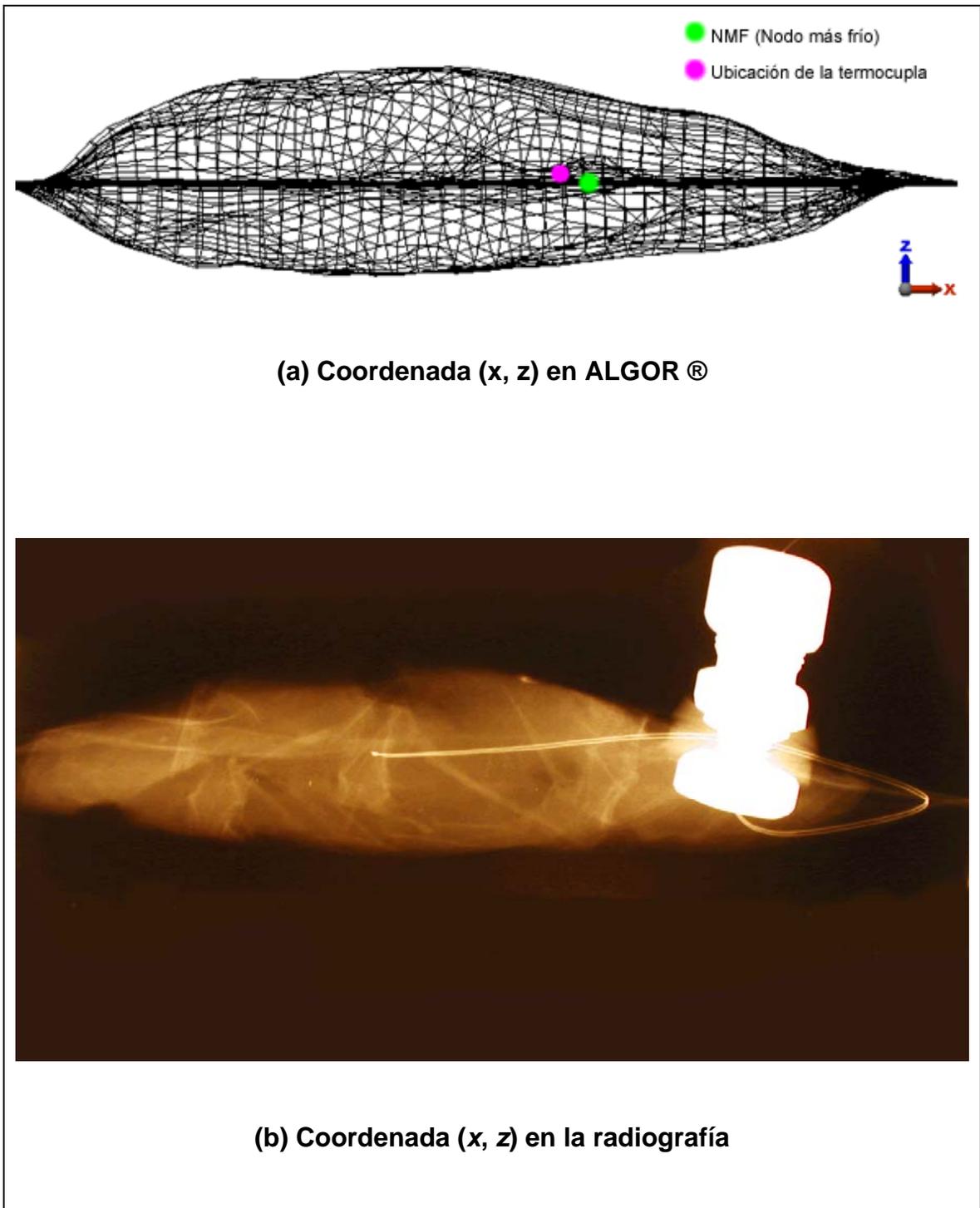


FIGURA 80. Localización de la coordenada (x,z) de la termocupla insertada en el medallón "1".

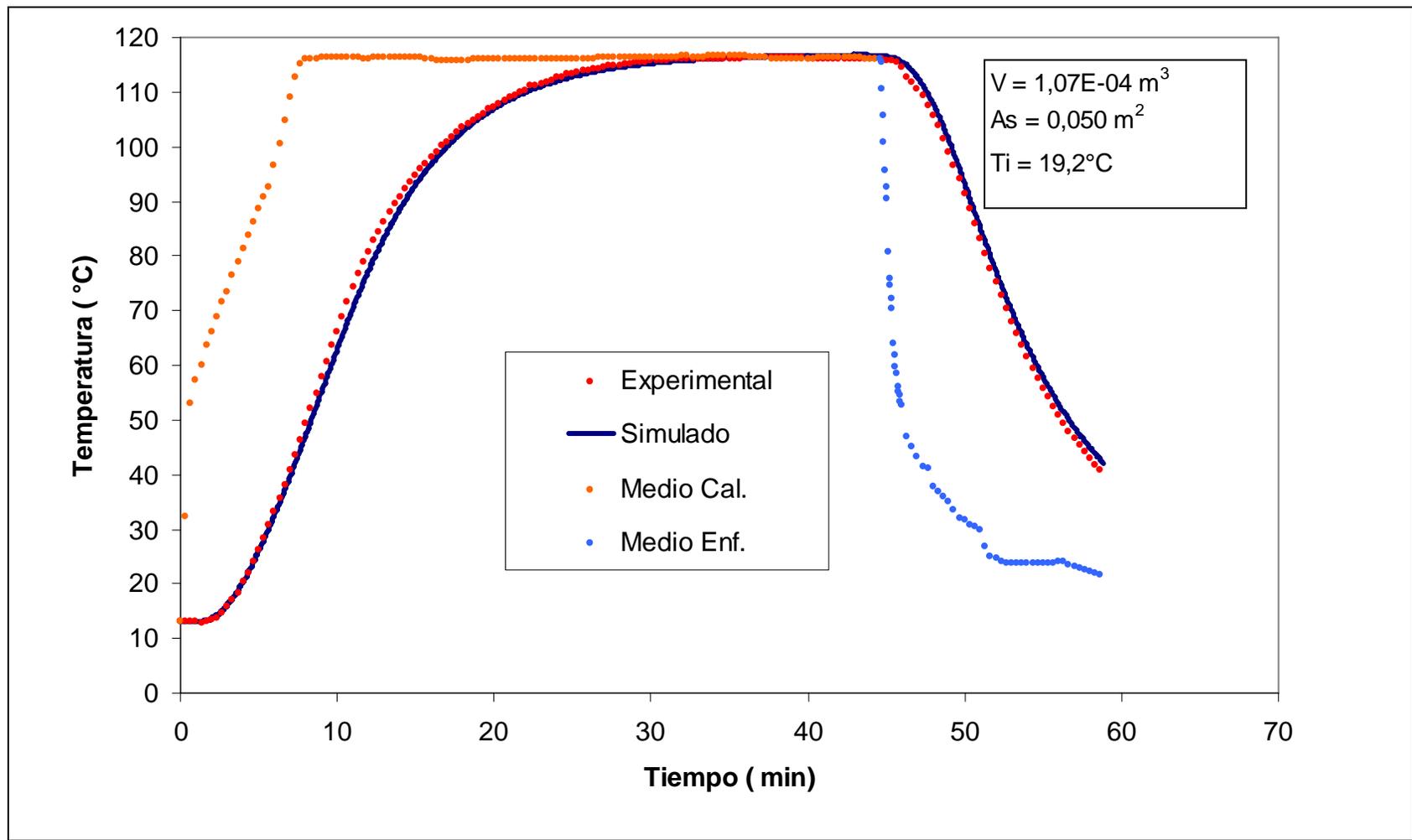


FIGURA 81. Perfiles de temperatura experimental y simulado para el proceso térmico del medallón “1” envasado al vacío en bolsas esterilizables.

5. CONCLUSIONES

- La plataforma computacional de alta tecnología conformada por el digitalizador Microscribe-3DL, el software Rhinoceros® (CAD) y el software ALGOR® (CAE), permitió simular el proceso de conducción de calor en alimentos envasados en bolsas esterilizables considerando asimetría térmica y geométrica. Esto demuestra la versatilidad de la metodología propuesta para trabajar con formas irregulares complejas sometidos a condiciones de borde variables y asimétricas, posibilitando ubicar el punto de más lento calentamiento/enfriamiento además de entregar información de cualquier punto o nodo evaluado con información gráfica y numérica bien detallada.
- Utilizando la técnica de digitalización 3D, se podría evitar la realización de aproximaciones de la geometría de los alimentos a formas regulares (esferas, cilindros, planchas, paralelepípedos, rodajas, cubos, entre otros) e irregulares simples (conos, conos truncados, elipsoides, entre otros), ya que estas aproximaciones tendrían información muy limitada de la forma real por ser en todos los casos geoméricamente simétricas.
- En relación a la asimetría geométrica, para el caso de “conos” de jurel la diferencia de asumir una forma irregular simple (cono truncado) con respecto a la forma real irregular compleja produce diferencias en la ubicación del punto más lento calentamiento/enfriamiento, por ende en el perfil de temperaturas y en la magnitud del valor F_0 del proceso térmico.

- En relación a la asimetría térmica, hay que considerar que el coeficiente global de transferencia de calor es siempre variable con el tiempo y la temperatura y debe ser representativo del proceso térmico. Este fenómeno podría ser apreciado con mayor amplitud cuando se trabaje con mayores volúmenes de cargas en los equipos, donde claramente no todos los productos inicialmente están expuestos a las mismas condiciones de trabajo, esto producto de la distribución de carga del equipo y la irregularidad intrínseca de los alimentos. Tomando en cuenta lo anterior se pueden calcular valores de F_0 más precisos, asegurando la calidad microbiológica y optimizando la calidad sensorial del alimento evaluado.

- Los resultados demostraron un buen ajuste entre los perfiles experimentales y simulados para los puntos evaluados del producto siendo los valores de RMSE inferiores al criterio adoptado de 10% en todos los tratamientos térmicos evaluados. Los valores de RMSE ó Error Estándar de Estimación máximo y mínimo fueron de 3,7 y 5,25% para el caso de conos; 1,97 y 5,73 % para el caso de filetes; y, 2,16 y 3,58% el caso de medallones de jurel.

- Con la información de la curva simulada para el punto de más lento calentamiento/enfriamiento se podría ajustar tiempos de proceso para una letalidad (F_0) preestablecida, el cual estaría en función del microorganismo indicador del tratamiento térmico, con la finalidad de optimizar las propiedades sensoriales del producto. Asimismo, se podría elaborar Programas de Tratamiento Térmico con letalidad (F_0) equivalente para adecuar los procesos térmicos en función del tamaño y forma del producto.

- La metodología propuesta en el presente trabajo de investigación basada en los principios de la ingeniería reversa y la tecnología CAD/CAE es válida para diseñar o evaluar procesos de esterilización de alimentos de formas irregulares complejas considerando asimetría térmica y geométrica.

6. RESUMEN

El objetivo de esta investigación fue el de realizar una simulación mediante el método de elementos finitos para predecir la distribución de temperaturas durante el proceso de conducción de calor en alimentos de formas complejas envasadas al vacío en bolsas esterilizables, con condiciones de borde variable, y además considerando asimetría térmica y geométrica en el proceso de transferencia de calor. Los tipos de cortes analizados fueron: conos, filetes y medallones de jurel. Con las muestras ya envasadas al vacío se realizó una reconstrucción de superficie y la forma de los productos usando un brazo digitalizador 3D de precisión, con exactitud de punta de aguja de 0,64 mm (Microscribe-3D™, Immersion Co., San José, CA) y un software de modelado basado en NURBS (Non-Uniform Rational B-spline) (Rhinoceros®, Robert MacNeel&Associates, Seattle, WA). Esta técnica reconstruye superficies 3D directamente de los modelos físicos capturando puntos en 3D (x , y , z). Luego, el modelo matemático para la conducción de calor para productos envasados de formas complejas sujeto a condiciones de borde convectivas variables con el tiempo y temperatura, fue resuelto usando un software de simulación basado en el Método de Elementos Finitos (ALGOR®, ALGOR Inc., Pittsburg, PA). Los resultados para el punto evaluado de cada producto mostraron un buen ajuste entre los perfiles de temperatura experimentales y simulados. Los valores del error estándar de estimación ó RMSE (*Root Mean Square Error*) obtenidos expresados en porcentaje, fueron menores al 10,0%. El método propuesto basado en los principios de ingeniería reversa y tecnología de intercambio de datos CAD/CAE, pueden usarse para optimizar procesos térmicos de alimentos envasados en bolsas esterilizables respecto a su temperatura y tiempo.

SUMMARY

The purpose of this study was carry out a simulation by using the Finite Element Method to predict the temperature distribution during the heat conduction process in odd-shaped products vacuum-packed in retortable pouches, all this under convective boundary conditions, also considering both thermal and geometric nonsymmetrical heat transfer process. The analyzed cuts were: cones, fillets and medallions of Jack Mackerel. Once the samples were vacuum-packed, a product surface and shape reconstruction was carried out using a 3D precision Digitizer Arm, (Microscribe-3D™, Immersion Co., San José, CA) accuracy of stylus tip 0.64 mm and a modelling software based on NURBS (Non- Uniform Rational B-Spline) (Rhinoceros®, Robert MacNeel & Associates, Seattle, WA). This technique recovers the exact shape of the surface capturing 3D data points (x, y, z) directly from physical models. After this, the mathematical model for heat conduction of odd-shaped food products, under variable boundary convective conditions with time and temperature, was solved using simulation software based on the Finite Element Method (ALGOR®, ALGOR Inc., Pittsburg, PA). The results for each point of different products showed a good fitting between the profiles of experimental and simulated temperatures. The RMSE values (Root Mean Square Error) were lower than 10.0%. The proposed method based on reverse engineering and data-exchange technology CAD/CAE can be used to optimize the thermal process of food-products packed in sterilized bags according to its time and temperature.

7. BIBLIOGRAFÍA

- ALDAYA, V. 1998. Elementos Finitos en Análisis Estructural. Available in http://www.cecalc.ula.ve/documentacion/presentaciones/cecalcula/ingenieria/introef_www_07_98/ (Accessed at 18/12/2005)
- ALFARO, W. V. 2003. Simulación de Procesos. Available in <http://www.monografias.com/trabajos6/sipro/sipro.shtml> (Accessed at 18/12/2003)
- ALAGASUNDARAM, K., JAYAS, D. S., WHITE, N. D. G. & MUIR, W. E. 1990. Threedimensional Finite Element Heat Transfer Model of Temperature Distribution in Grain Storage Bins. *Trans ASAE*, 33: 577-584.
- ALGOR. 2006. ALGOR User's Guide. ALGOR, Inc.
- ALMEIDA L., GAMEIRO S., MADEIRA J. y TEIXERA J. 2000. Shoelat 3D – Sistema para Modelação de Formas para Calçado. Trabajo del Centro de Computação Gráfica. Coimbra. Portugal. Available in http://www.ccg.pt/Publications/Communications/Communication_2000.asp (Accessed at 30/09/2004)
- BARREIRO, J.; LABARGA, J.; RIOS, J.; VIZÁN, A. 1999. Modelo para el Intercambio de Información en la Inspección Automática de Piezas. Universidad de León, Universidad Politécnica de Madrid, España. Available in: http://taylor.unileon.es/investigacion/publicaciones/cidim_99_cicyt.pdf (Accessed at 21/12/2005).

- BARTON, M. y RAJAN, S. D. 2000. Finite Element Primer for Engineers. Term paper for the author's graduate course in the FEM, CEE598, ASU, Fall.
- BIZOT, M. 1983. Using The "G.A.B." Model to Construct Sorption Isotherms. En: Physical Properties of Foods. Applied Science Publishers Ltd. London, England. pp. 43-54.
- BLAKISTONE, B. 2003. Retortable Pouches. In: Encyclopedia of Agricultural and Food Engineering. ed Marcel Dekker Inc. New York 6 p.
- BOSINCO, P., DURAND, G., GOUSSARD, J., LIEUTER, A. y MASSABO, A. 1998. Complex Shape Modifications. 2nd International Conference on Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering (IDMME98). UTC, COMPIEGNE, FRANCE. Available in <http://rkk.mv.uni-kl.de/FIORES/publication.html> (Accessed at 10/11/2003)
- BORDEGONI, M. y FILIPPI, S. 2001. Reverse Engineering for Molding. Available in <http://www.kaemart.it/html/publications.php> (Accessed at 30/09/2005)
- BRODY, A. 2003. The Return of the Retort Pouch. FoodTechnology 56. 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.
- CAESOFT. 2006. Herramientas de Mallado y Preparación de Modelos FEA con ALGOR©. Available in: <http://www.caesoft.es/productos/algor/mallado/mallado.htm> (Accessed at 17/08/2005).

- CANADIAN FOOD INSPECTION AGENCY (CFIA-ACIA). 2002. Flexible Retort Pouch Defects. Available in <http://www.inspection.gc.ca>. (Accessed at 28/09/2004).
- CAPS, A. y ABRIL, J. 1999. Procesos de conservación de alimentos. Madrid, España. Vicente/Mundi Prensa. 479p.
- CARSLAW, H. y JAEGER, J.C. 1959. Conduction of Heat in Solids. Oxford University Press, London.
- CATALA, R. 1982. Bolsas flexibles esterilizables, características y usos específicos. Revista Agroquímica y Tecnología de Alimentos (España) 22 (2): 163-177.
- CLAYTON, M., AMOS, N., BANKS, N. y MORTON, R. 1995. Estimation of Apple Fruit Surface Area. New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science 23: 345-349.
- CLELAND, A.C. y EARLE, R.L. 1984. Assessment of Freezing Time Prediction Methods. J. Food Science 49:1034-1042.
- CRISTIANINI, M y RODRIGUEZ, P. 2002. Thermal Process Evaluation of Retortable Pouches Filled with Conduction Heated Food. J Food Process Engeneering 25: 395-405.
- CHILE, MINISTERIO DE SALUD, 2003. Reglamento Sanitario de los Alimentos. Editorial Publiley. Santiago. Chile. pp. 77.

CHILE. SERVICIO NACIONAL DE PESCA (SERNAPESCA). 2004. Anuarios estadísticos de pesca 2004. Available in <http://www.sernapesca.cl> (Accessed at 20/02/06)

CHILE. SUBSECRETARIA DE PESCA (SUBPESCA). 2004. Informes sectoriales. Informe Sectorial Consolidado 2004. Available in <http://www.subpesca.cl> (Accessed at 01/03/06)

CHOI, Y. y OKOS, M.R. 1986. Effects of Temperature and Compositions on the Thermal Properties of Foods. In: Food Engineering and Process Application. Vol I. Transport phenomena. Le Maguer, M. and Jelen, P. (eds). Elsevier Applied Science Co., Inc. New York, USA. pp. 93-101.

DATTA, A. K., SUN, E. y SOLIS, A. 1995. Food Property Data and their Composition-based Prediction. Engineering Properties of Foods. Ed. M. A. Rao and S.S.H. Rizvi, Marcel Dekker. New York, USA.

_____. 1998. Computer-Aided Engineering in Food Process and Product Design. Food Technology 52(10):44-52.

DE LA CRUZ, L. M. 2002. Generación de Mallas Usando Mapeo Ortogonal y Algunas Aplicaciones. Available in:
<http://uxmcc1.iimas.unam.mx/~lmd/Proyectos/gema/tesis/tesis.htm>
(Accessed at 30/09/2005)

DÍAZ, C. 2000. Análisis Teórico Experimental del Coeficiente Convectivo de Transferencia de Calor durante los Procesos de Hidrocalentamiento e Hidroenfriamiento de Alimentos. Tesis Lic. Ing. Alimentos Valdivia. Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias.

ESTADOS UNIDOS. Food and Drugs Administration (FDA). 2002. Code Federal Regulations 21 CFR 113 – Thermally Processed Low-Acid Food Packaged in Hermet. Available in <http://www.cfsan.fda.gov/~lrd/cfr113.html> (Accessed at 11/05/06).

FOODDIGICAE LAB, 2006. Laboratorio de Digitalización 3D e Ingeniería Asistida por Computador para el Procesamiento y Preservación de Alimentos. Available in: <http://fooddigicaelab.uach.cl> (Accessed at 20/03/2006)

GAFFNEY, J.J., BAIRD, C. C. y CHAU, K. V. 1985. Methods for Calculating Heat and, Mass Transfer in Fruits and Vegetables Individually and in Bulk. ASHRAE Trans. 85(3):333.

GALLO, M. 2002. Envases Flexibles Retortables una Alternativa para el Envasado de Productos Pesqueros. Primer seminario virtual de ciencias del mar Oannes. Available in <http://www.oannes.org.pe/seminario/itp/retortables/envasesflex.htm> (Accessed at 30/09/2004)

GUNDERSEN, G. y STEIHAUG T. 2002. Data Structures in Java for Matrix Computations. Department of Informatics, University of Bergen. Noruega. Available in: <http://www.iu.uib.no/forskningsgrupper/opt/forskning/papers/NIK2002.pdf> (Accessed at 17/09/2003)

GUSTAFSON, R. J., THOMPSON, D.R. y SOKHANSANJ, S. 1979. Temperature and Stress Analysis of Corn Kernels – Finite Element Analysis. Trans ASAE 22:955-960.

- HAYAKAWA, K. y SUCCAR, J. 1982. Heat Transfer and Moisture Loss from Spherical Cal Fresh Produce. *J. Food Science* 47:596-605.
- HONMING, J., THOMPSON, R., MOREY, V. 1987. Finite Element Model of Temperature Distribution in Broccoli Stalks During Forced-Air Precooling. *American Society of Agricultural Engineers*. 30: 1473-1477.
- KARDESTUNCER, H. 1987. *Finite Element Handbook*, McGraw-Hill, New York, USA.
- KEMOCHI, Y. y KLETTE, R. 2000. Surface Area Estimation for Digitized Regular Solids. Computer Science Department of the University Auckland. Available in <http://www.citr.auckland.ac.nz/techreports/?year=2000> (Accessed at 30/09/2004)
- LAMPI, R. 1977. Flexible Packaging for Thermoprocessed Foods Adv. In *Food Research*, vol 23, pág: 306-429
- LARA, R. 2003. Cálculo de Estructuras Mediante el Empleo de Elementos Finitos. Comité español de iluminación. Available in <http://www.ciesp.com> (Accessed at 01/10/2004).
- LEWIS, M.J. 1990. *Physical Properties of Foods and Food Processing System*. Ellis Horwood Ltd. New York, USA. 465 p.
- MACCABE, W. 2002. *Operaciones unitarias en ingeniería química*. México. Mac Graw Hill. 119p.
- MACIVER M. y NELSON M. 2000. Body modeling and model-based tracking for neuroethology. *Journal of Neuroscience Methods*. 95: 133-143.

- MAESMANS, G., HENDRICKX, M., DECORT, S., FRANSIS, A. y TOBBACK, P. 1992. Fluid-To-Particle Heat Transfer Coefficient Determination of Heterogeneous Foods: A Review. *J. Food Processing and Preservation*.16:29-69.
- MAO, W., WATANABE, M., SAKAY, N. 2005. Analysis of Temperature Distributions in Kamaboko During Microwave Heating. *Journal-of-Food-Engineering*. 71: 187-192.
- MERMELSTEIN, N. 1976. An overview of the Retort Pouch in the U.S. *J. Food Technology* 30: 28-37
- MISRA, R. N. y YOUNG, J. H. 1979. Finite Element Approach for Solution of Transient Heat Transfer in Spheres. *Tras ASAE* 22: 944-949.
- 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, Departamento de Procesos Químicos, Biotecnológicos y Ambientales. Universidad Técnica Federico Santa María, Viña del Mar
- MOLERO, B. 2001. El MEF en el Proceso de Diseño. Available in TECNOCAE: http://www.protorapid.com/reportaje_mef.htm (Accessed at 12/25/2005)
- MOHSENIN, N. N. 1980. Thermal Properties of Foods and Agricultural materials. Gordon and Breach Science Publishers, Inc. New York, USA.
- 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. XVI Jornadas de Transferencia de Calor y Materia. Santiago, Chile. p.197.

MORALES-BLANCAS, E. y TORRES, J. 2003a. Thermal Resistance Constants. In: Encyclopedia of Agricultural and Food Engineering. Heldman, D.R. ed Marcel Dekker Inc. New York 4 p.

_____. 2003b. Determination of thermal resistance parameters. In: Encyclopedia of Agricultural and Food Engineering. Heldman, D.R. ed Marcel Dekker Inc. New York 6 p.

NESVADBA, P., HOUSKA, M., WOLF, W., GEKAS, V., JARVIS, D., SADD, P.A., JOHNS, A.I. 2004. Database of Physical Properties of Agro-Food Materials. J. Food Engineering 61(4):497-503.

NICHOLAS, J. V. y WHITE, D. R. 1994. Traceable Temperatures: An Introduction to Temperature Measurement and Calibration. John Wiley & Sons. Chichester. England. 357 p.

NUÑEZ, H. 2004. Desarrollo de Producto Sobre la Base de Salmón Procesado en Bolsas esterilizables; Comparación con Producto Fresco y Esterilizado en Envase de Hojalata. Tesis Lic. Ing. Alimentos, Departamento de Procesos Químicos, Biotecnológicos y Ambientales.. Universidad Técnica Federico Santa María, Viña del Mar.

OJEDA, C. 2006. Variación de Firmeza en Filetes de Jurel (*Trachurus Symmetricus* Murphy) Envasados en Bolsas Flexibles Sometidos a Diversos Tratamientos de Esterilización. Tesis Lic. Ing Alimentos (En redacción), Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Austral de Chile, Valdivia.

- OKOS, M. R. 1986. Physical and Chemical Properties of Foods. American Society of Agricultural Engineering (ASAE). St. Joseph. Michigan, USA.
- ORDOÑEZ, J. 1996. Determinación y evaluación del coeficiente convectivo de transferencia de calor en procesos continuos de escaldado e hidrogenfriado de productos vegetales. Tesis Lic. Ing. Alimentos Valdivia. Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias.
- OWEN, S. 2003. An Introduction to Unstructured Mesh Generation. Pre-Conference Short Course: Mesh Generation and Automated Simulation. Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico, U.S.A. Available in:
http://andrew.cmu.edu/user/sowen/usnccm03/short_course.html
(Accessed at 21/08/2003)
- PACKAGING DIGEST, 1998. Retortable Salmon Pouch Spawns Process or Benefits . Available in
<http://www.packagingdigest.com/articles/199801/54.html> (Accessed at 25/09/2004).
- PEREZ, A. 2004. Geometría Descriptiva. Available in:
<http://webdelprofesor.ula.ve/nucleotrujillo/alperez/texto/04-Marte.pdf>
(Accessed at 30/10/2004)
- PERRY, R. H., GREEN, D. W. y MALONEY, J. O. 1984. Perry's Chemical Engineers Handbook. McGraw-Hill. New York, USA.
- PFLUG, I. J. 1987. Calculating F_T -Values for Heat Preservation of Shelf-Stable, Low-Acid Canned Foods using the Straight-Line Semilogarithmic Model¹. Journal of Food Protection. 50: 608-620.

- PIEGL, L. 1991. On NURBS: A Survey. IEEE Computer Graphics and applications 11(1): 55-71.
- PINO, F. 2004. Obtención de Modelos Digitales de Alimentos de Formas Irregulares Complejas mediante Digitalización Tridimensional. Tesis Lic. Ing. Alimentos, Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Austral de Chile, Valdivia.
- POTLURI, P. L. 1985. Modeling Temperature and Surface Heat Transfer coefficient in Beef Carcass Cooling Using Finite Element Technique. Ph.d. dissertation, Texas A & M University, College Station, TX, USA.
- RAHMAN, S. 1996. Food Properties Handbook. CRC Press, Inc. Boca Raton, FL, USA.
- RAO, M. A. y RIZVI S. S. H. 1995. Engineering Properties of Foods. Marcel Dekker, Inc. New York, USA.
- RHINOCEROS. 2006. NURBS Modeling for Windows. User's Guide Version 3.0. Robert McNeel & Associates. USA.
- RODRIGUEZ, C. 2005. Simulación Computacional de Procesos de Conducción de Calor en Alimentos de Formas Irregulares Complejas. Tesis Lic. Ing Alimentos, Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Austral de Chile, Valdivia.
- SCHMIDT-HEBBEL, H., PENNACCHIOTTI, M., MASSON, L., MELLA, M., ZUCCARELLI, T., CARRASCO, C., JAÑA, W., OLIVER, H., GUZMAN, M. 1985. Tabla de composición química de los alimentos chilenos. 7ª Ed. Fac. De Cs. Químicas y Farm., Universidad de Chile.

SCHNEIDER, P.J. 1957. Conduction heat transfer. Addison-Wesley Publishing Company, Inc. Reading, Massachusetts. 395 p.

SEGERLIND, L. J. 1976. Applied Finite Element Analysis. John Wiley & Sons, Inc. New York, USA.

_____. 1984. Applied Finite Element Analysis. John Wiley & Sons, Inc. New York, USA.

SIMPSON, R., ALMONACID, S., 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. 153-162.

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

_____. 1995. Food properties database. Versión 2.0 para Windows. CRC Press, Inc. Boca Ratón, FL, USA.

SINGH, R.P y HELDMAN, D.R. 1993.. Introduction to Food Engineering. Academic Press, Inc. San Diego, CA, USA . 499 p.

STEEL, R.G. y TORRIE, J.H. 1960. Principles and procedures of statistics. McGraw-Hill Book Co. Inc. New York, USA.

STUMBO, C.R. 1973. Thermobacteriology in food processing. Academic Press, New York.

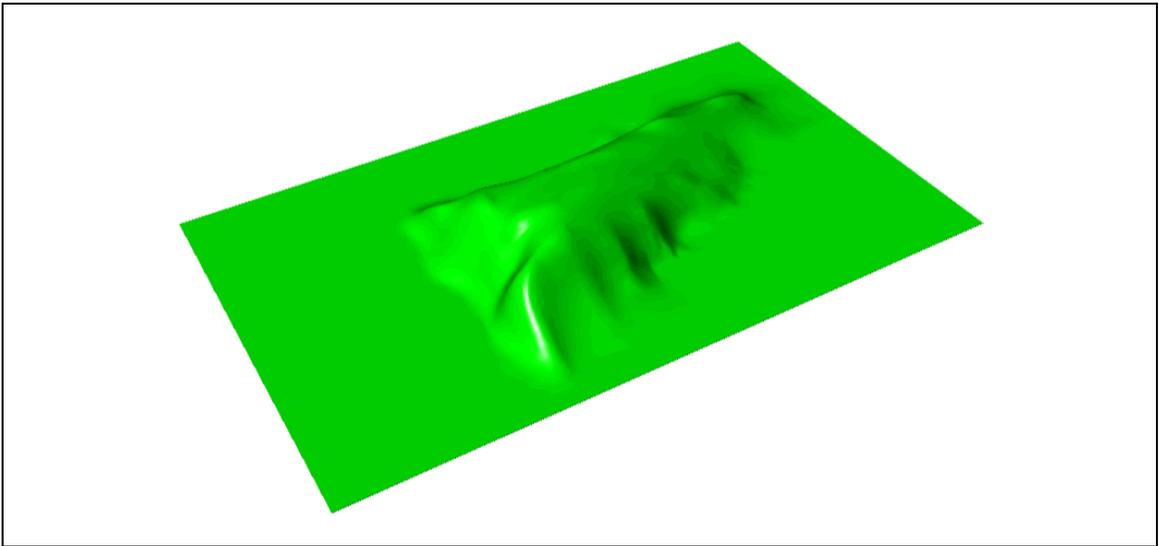
- SWEAT, V.E. 1974. Experimental value of thermal conductivity of selected fruits and vegetables. J. Food Science 39 : 1080-1083.
- TINGA, W. R. y NELSON, S. Q. 1973. Dielectric Properties of Materials for Microwave Processing. Tabulated J. Microwave Power 8(1): 24-65.
- VÁRADY, T., MARTIN, R. y COX, J. 1997. Reverse Engineering of Geometric Models – An Introduction. Computer-Aided Design 29(4): 255-269
- WILHITE, R. 2003. Digitizing Large Fossil Skeletal Elements for Three-Dimensional Applications. Paleontología Electrónica 5(1):10pp.
- WILSON, J. 2001. An Introduction to Rhino. CADALYST Magazine. Available in <http://cadence.advanstar.com/2001/1201/thirddimension1201.html>
(Accessed at 19/08/2004)
- 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.
- ZURITZ, C.A. y SASTRY, S. K. 1990. Convective Heat transfer Coefficients for Irregular Particles Immersed in Non-Newtonian Fluid During Tube Flow. J Food Eng. 11: 159-174.

ANEXOS

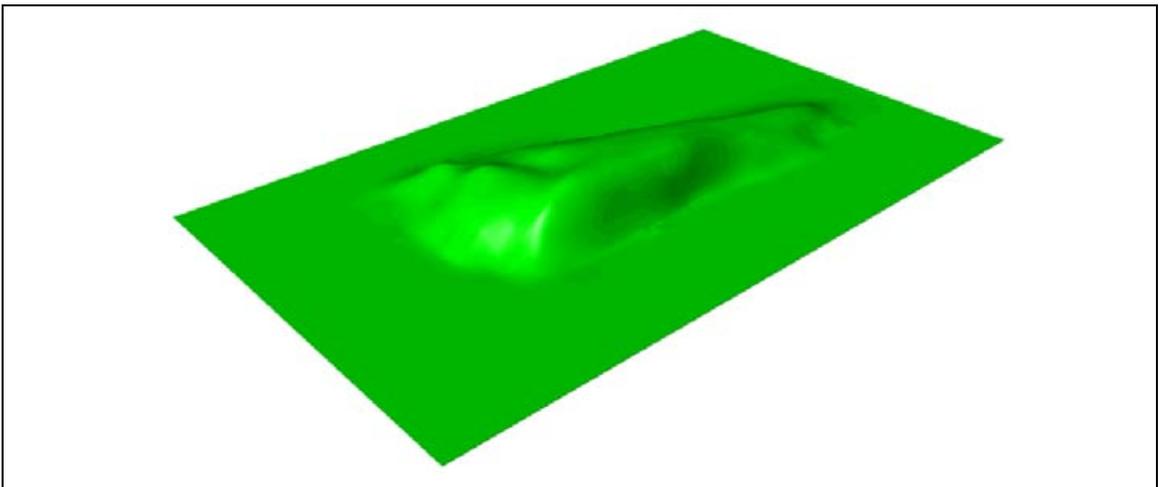
ANEXO 1

Modelos digitales 3D obtenidos en Rhinoceros®

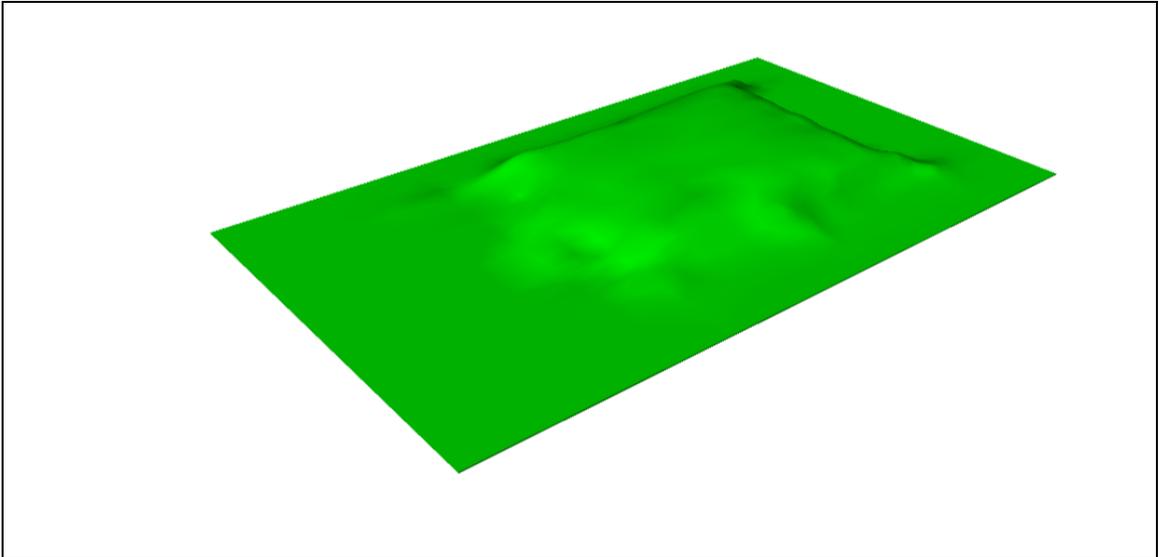
ANEXO 1.1 Modelo digital 3D del cono “3” envasado al vacío en bolsas esterilizables en Rhinoceros®.



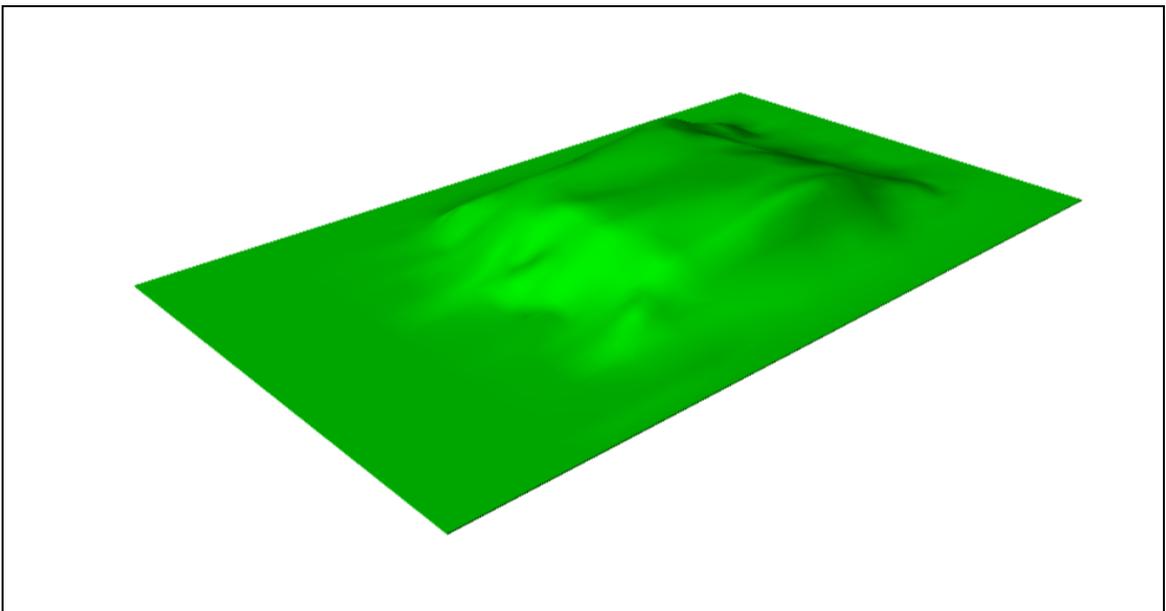
ANEXO 1.2 Modelo digital 3D del cono “4” envasado al vacío en bolsas esterilizables en Rhinoceros®.



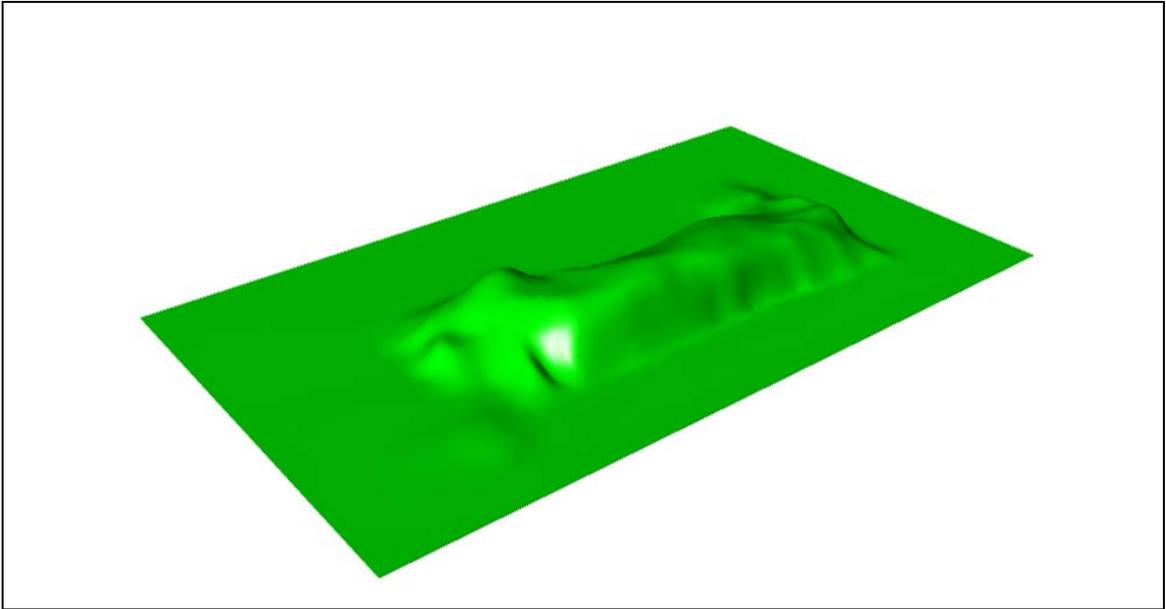
ANEXO 1.3 Modelo digital 3D del filete “1” envasado al vacío en bolsas esterilizables en Rhinoceros®.



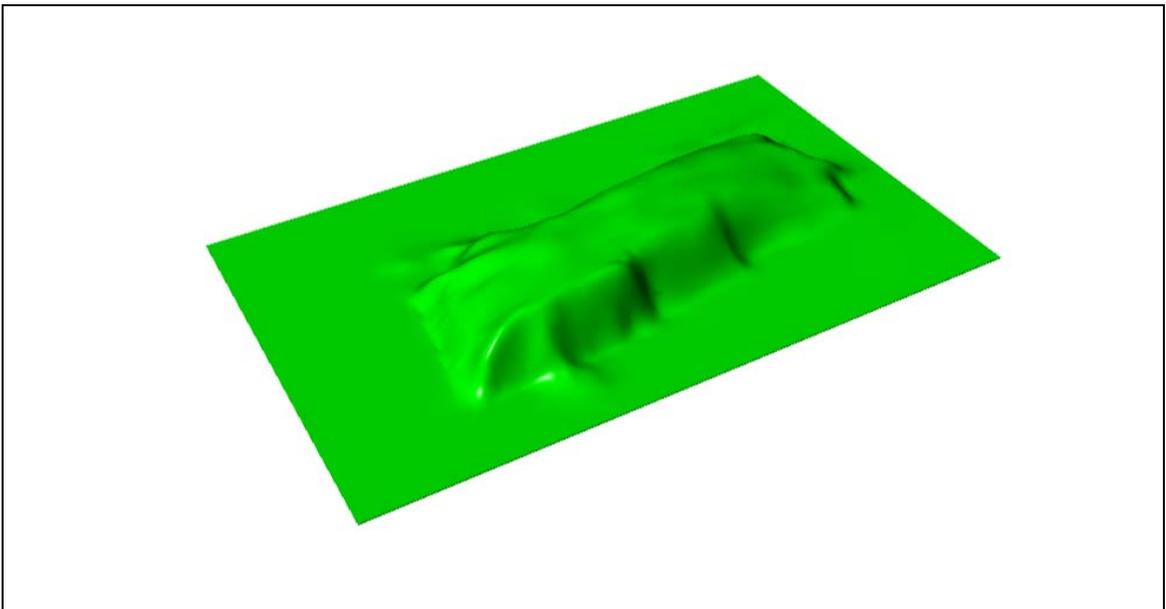
ANEXO 1.4 Modelo digital 3D del filete “3” envasado al vacío en bolsas esterilizables en Rhinoceros®.



ANEXO 1.5 Modelo digital 3D del medallón “2” envasado al vacío en bolsas esterilizables en Rhinoceros®.



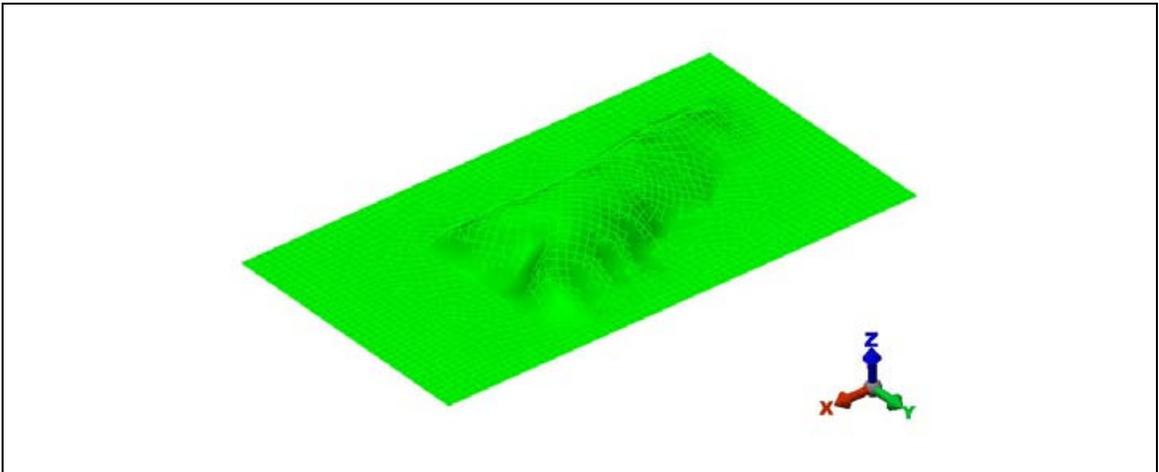
ANEXO 1.6 Modelo digital 3D del medallón “3” envasado al vacío en bolsas esterilizables en Rhinoceros®.



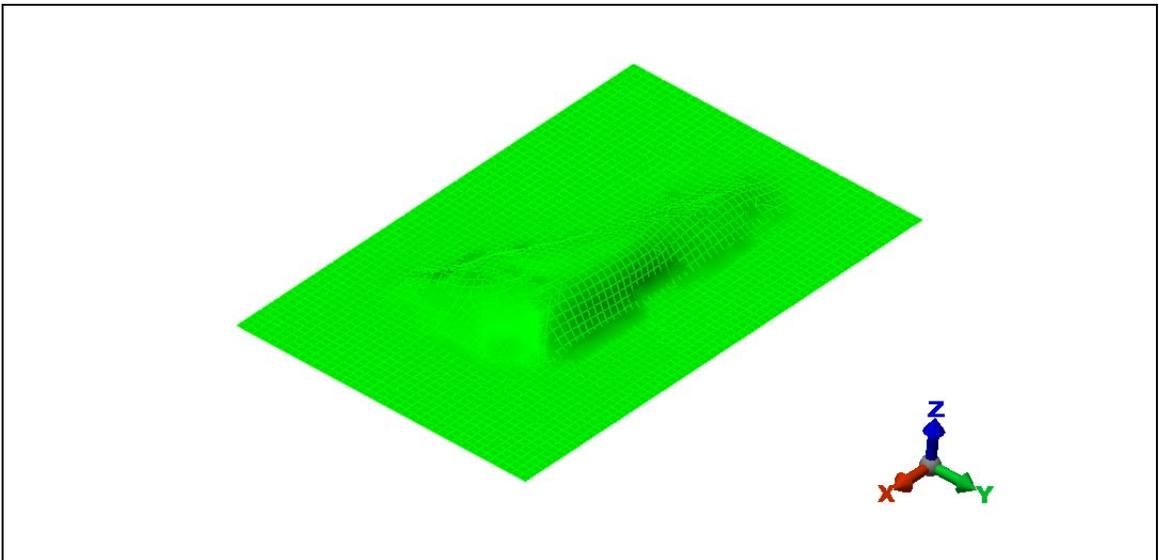
ANEXO 2

Modelos digitales con su respectiva malla generada en ALGOR®

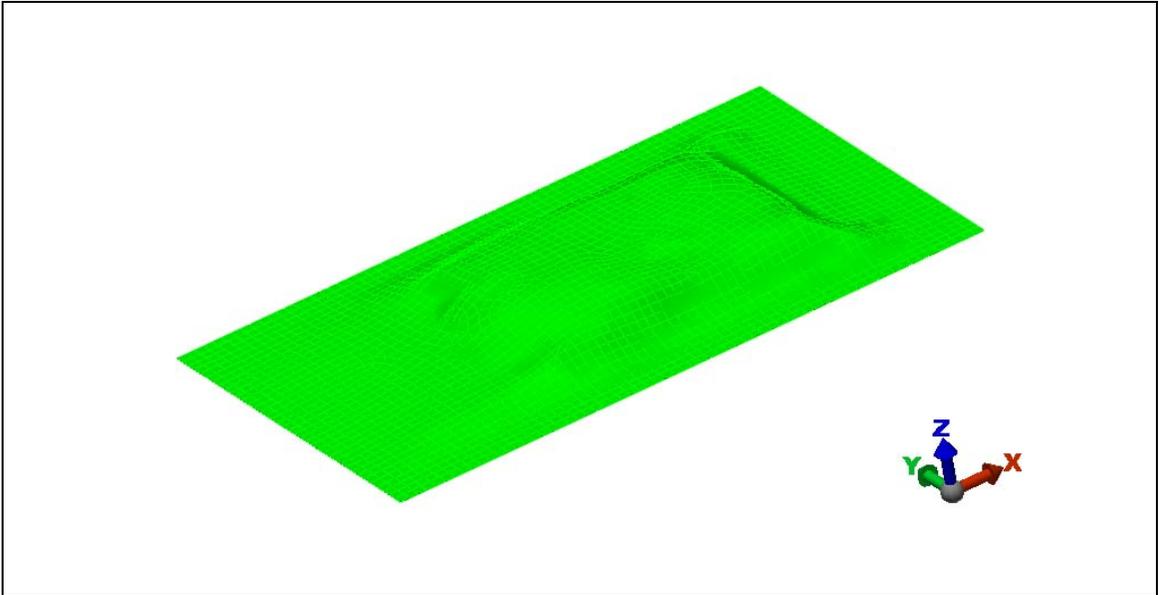
2.1 Modelo mallado (FEA) del cono “3” envasado al vacío en bolsas esterilizables en ALGOR®.



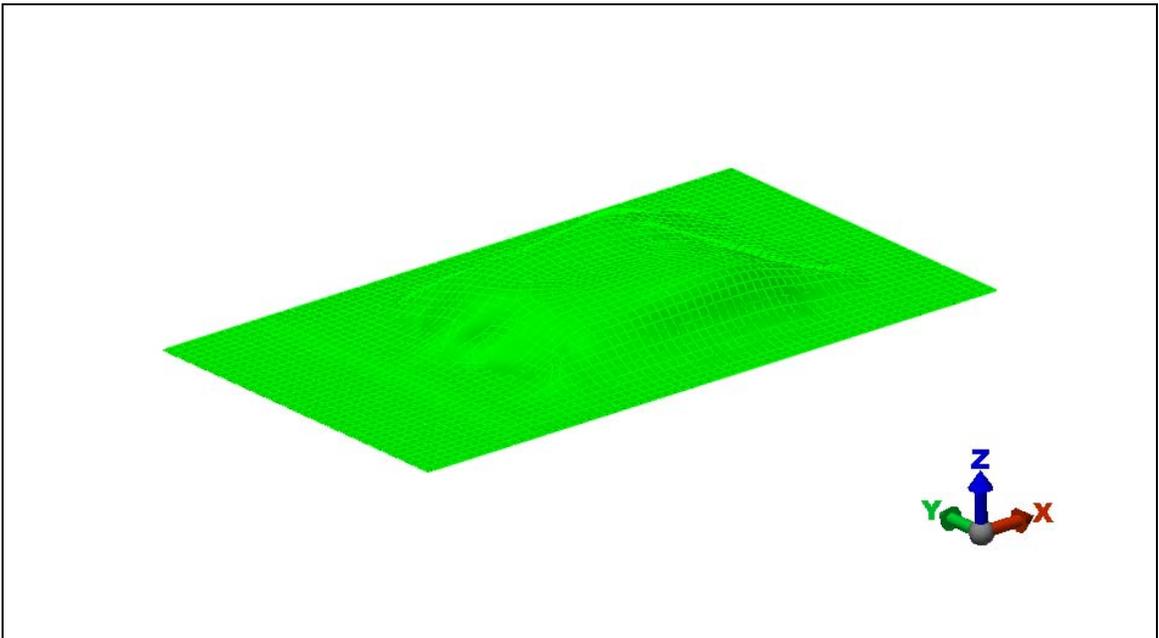
2.2 Modelo mallado (FEA) del cono “4” envasado al vacío en bolsas esterilizables en ALGOR®.



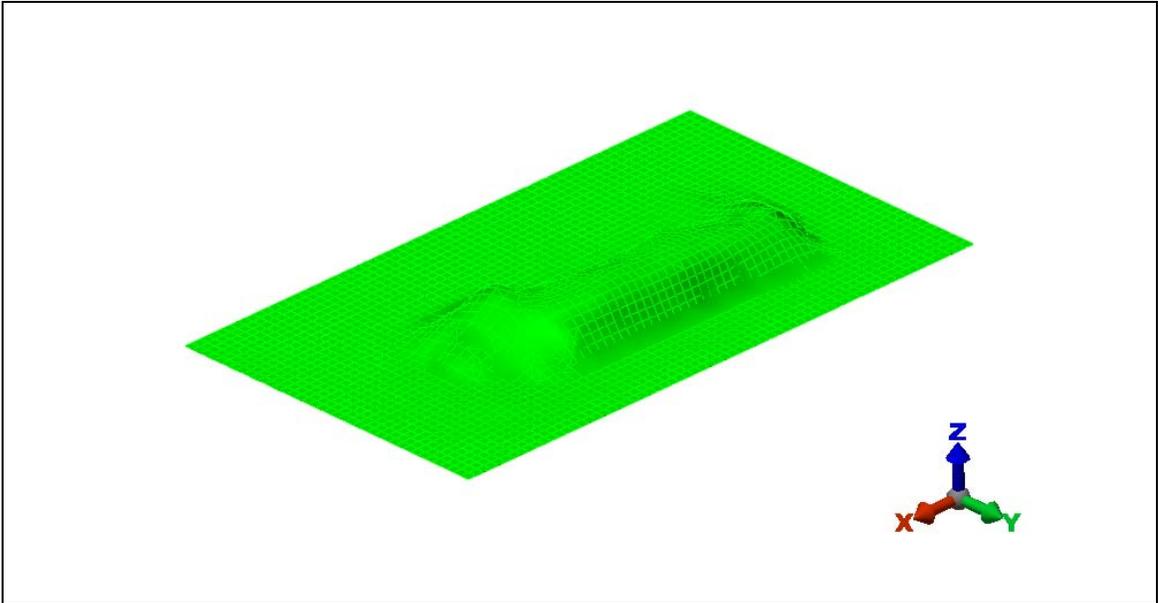
2.3 Modelo mallado (FEA) del filete “1” envasado al vacío en bolsas esterilizables en ALGOR®.



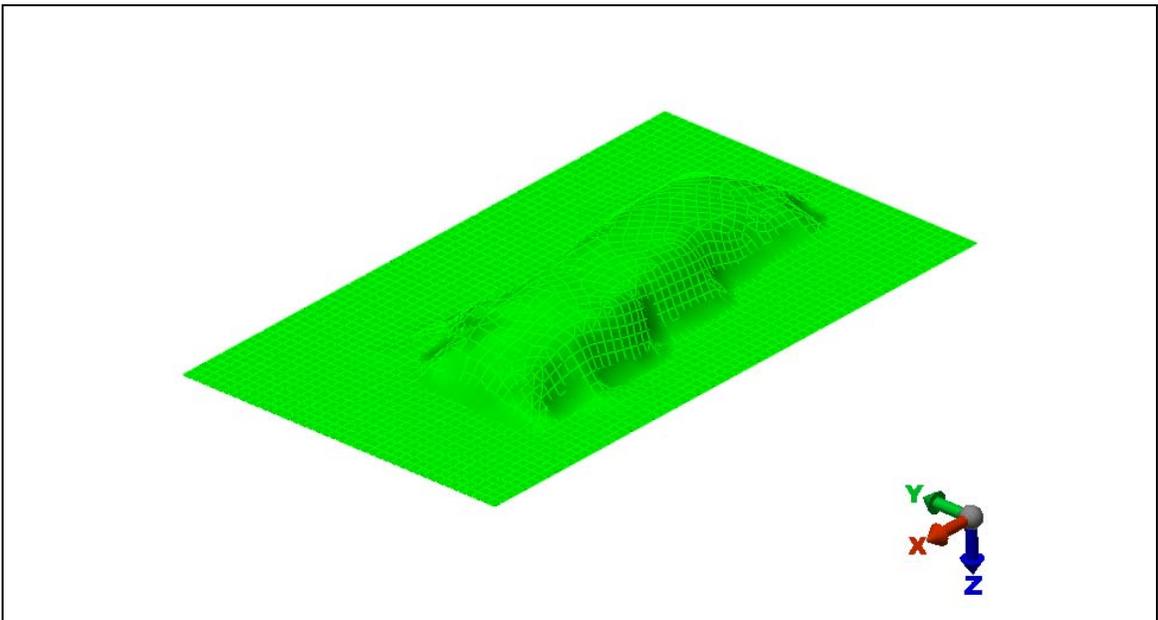
2.4 Modelo mallado (FEA) del filete “3” envasado al vacío en bolsas esterilizables en ALGOR®.



2.5 Modelo mallado (FEA) del medallón “2” envasado al vacío en bolsas esterilizables en ALGOR®.



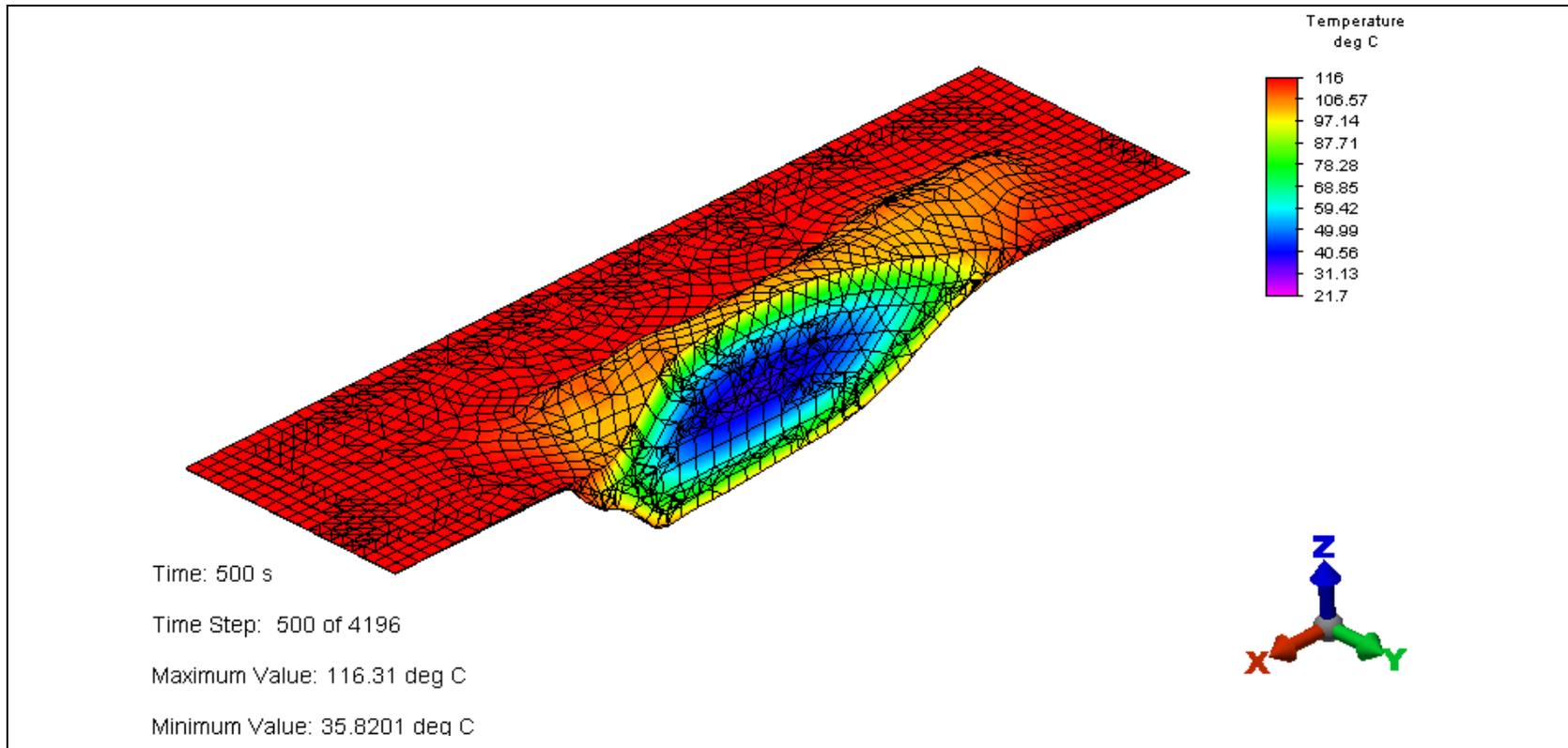
2.6 Modelo mallado (FEA) del medallón “3” envasado al vacío en bolsas esterilizables en ALGOR®.



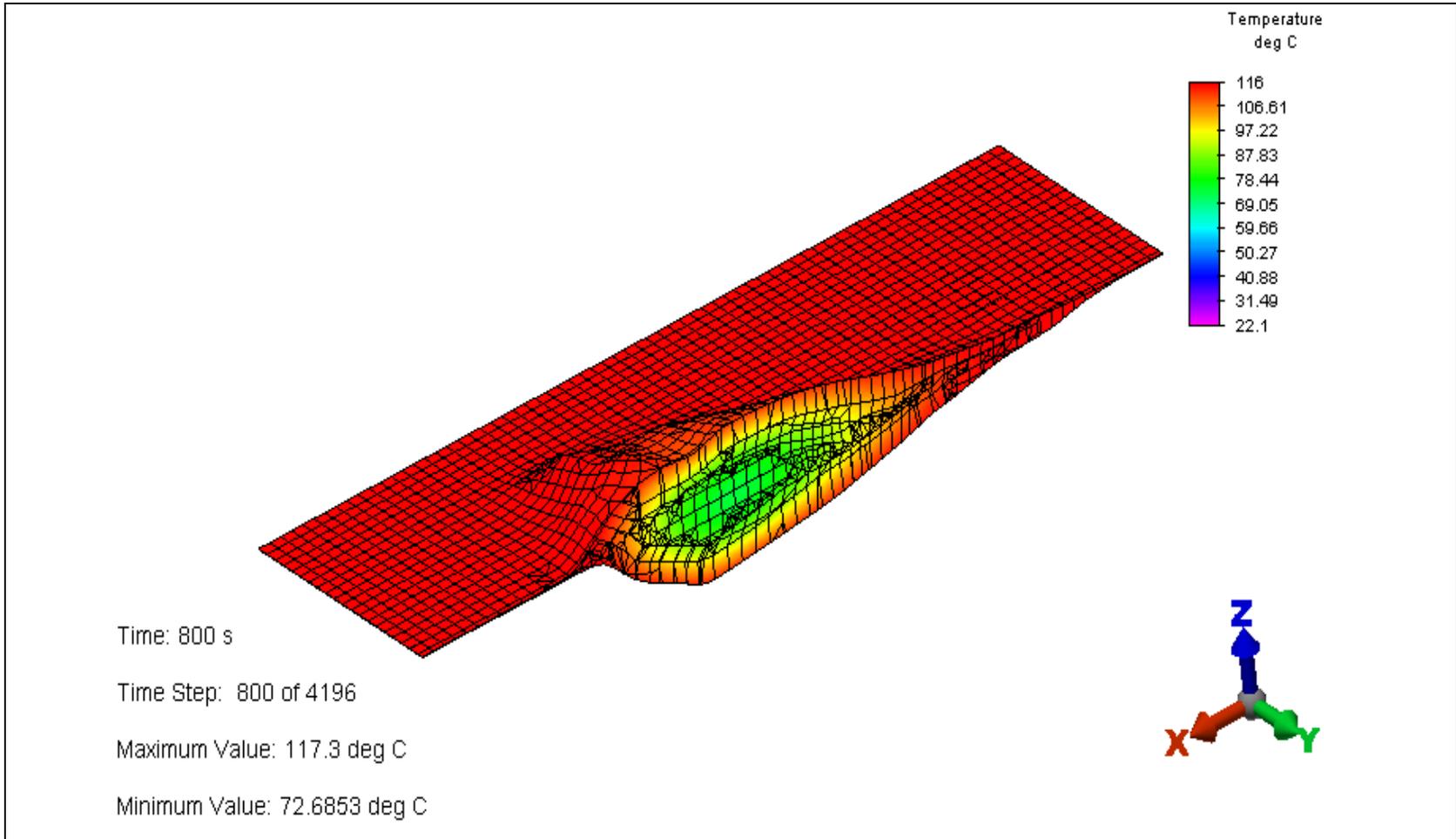
ANEXO 3

Diagrama de contorno de cada corte de jurel en los tratamientos simulados en ALGOR®.

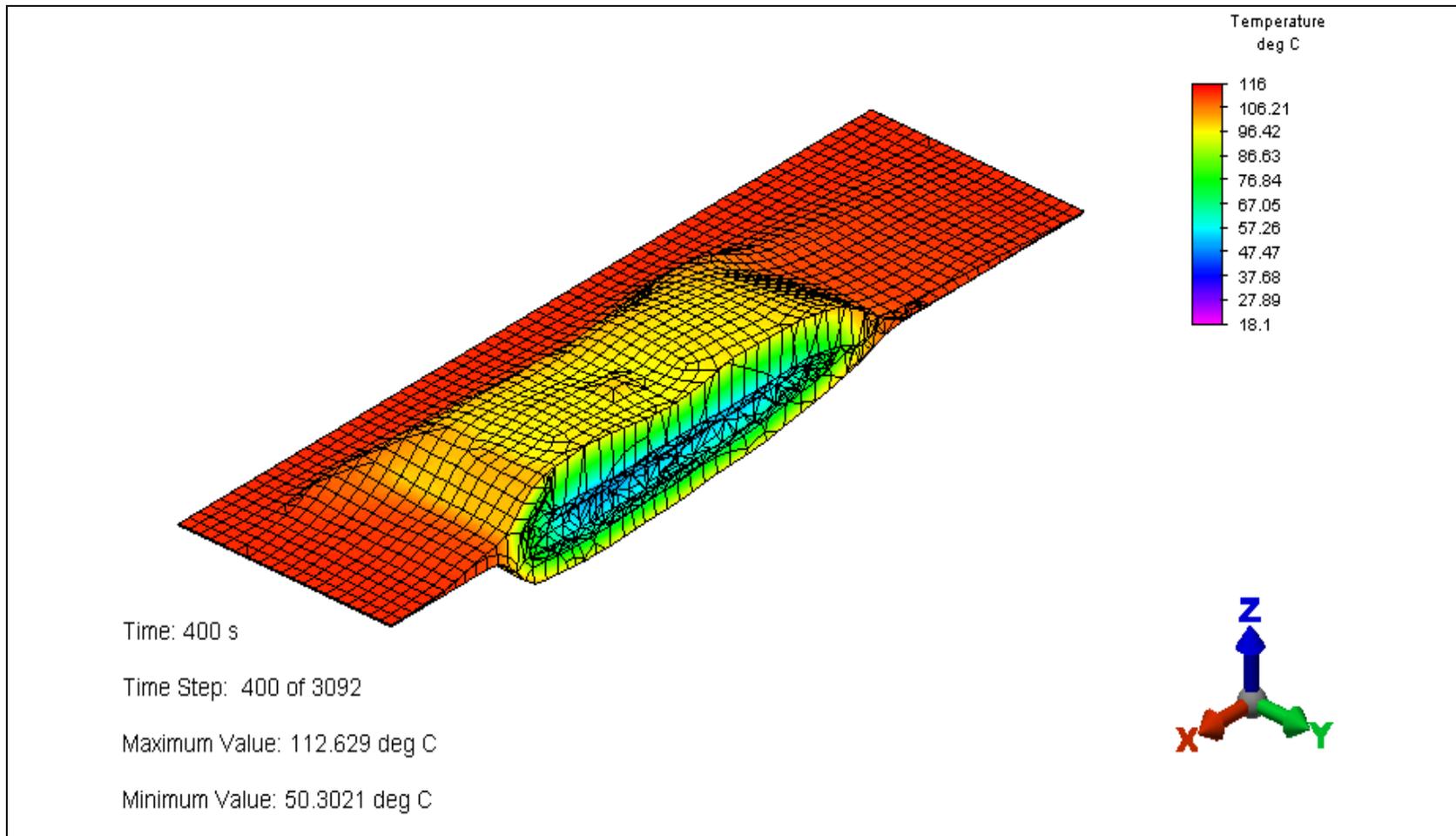
ANEXO 3.1 Corte longitudinal del diagrama de contorno del cono “3” envasado al vacío en bolsas esterilizables en ALGOR®.



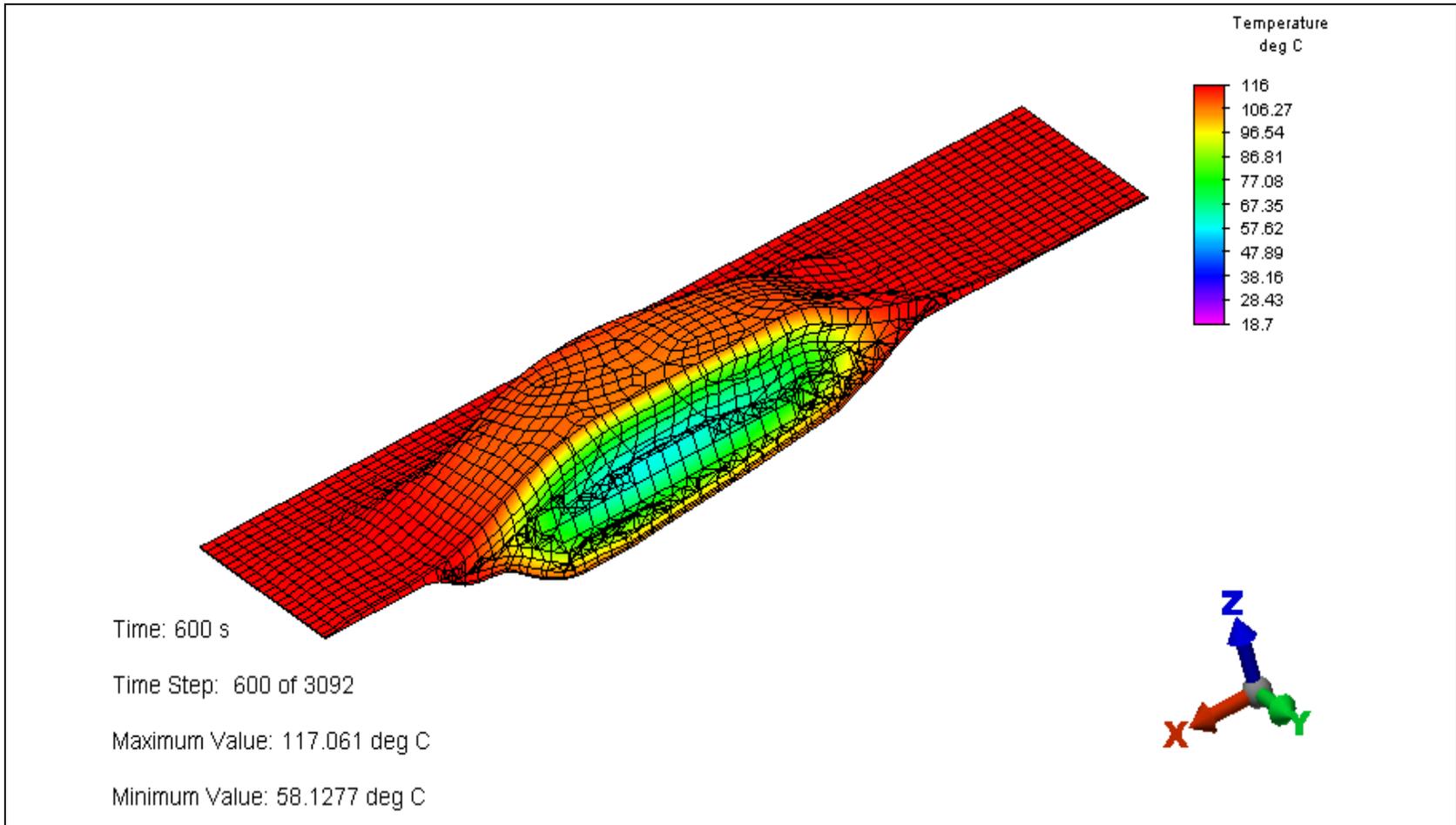
ANEXO 3.2 Corte longitudinal del diagrama de contorno del cono “4” envasado al vacío en bolsas esterilizables en ALGOR ®.



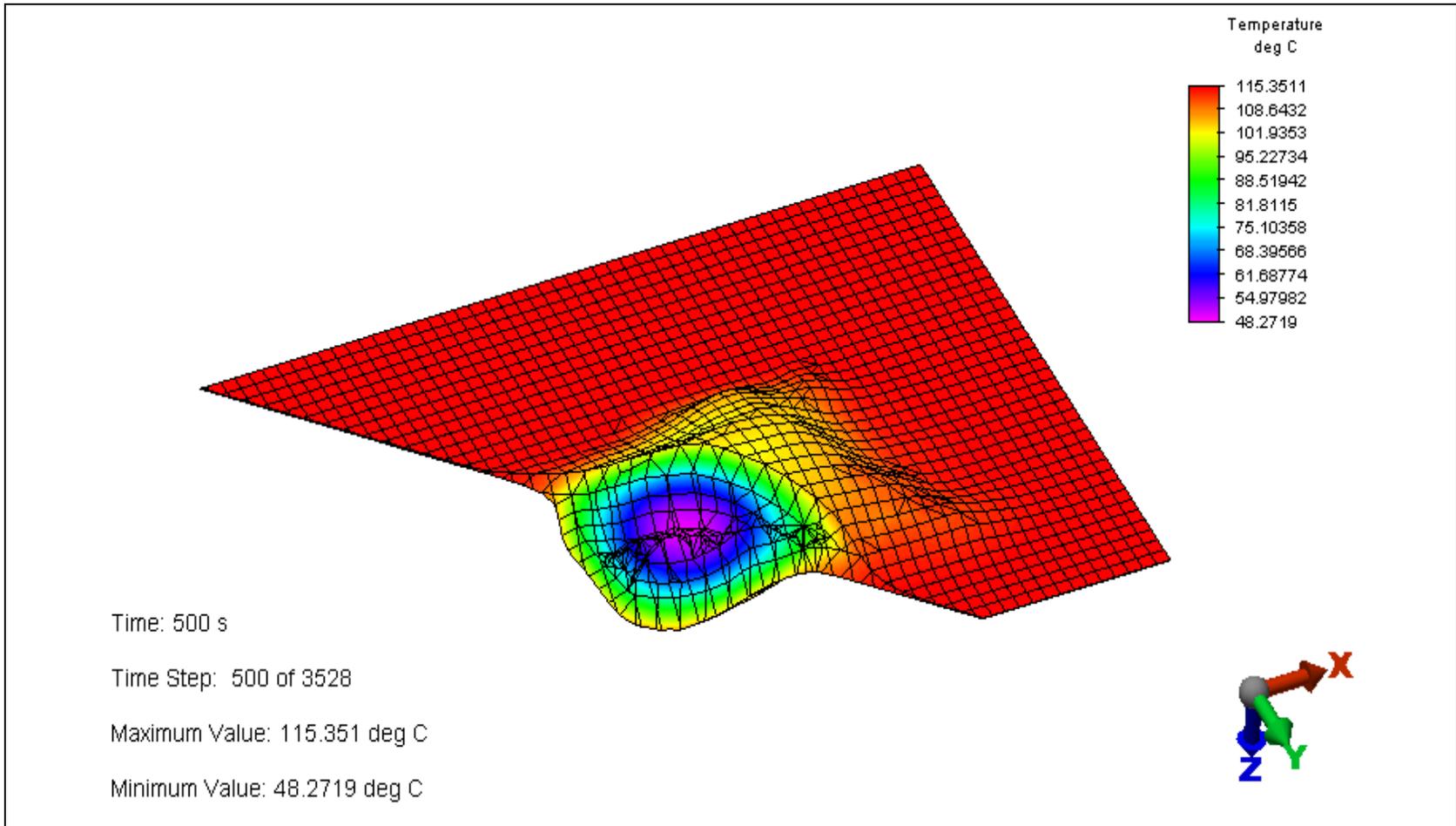
ANEXO 3.3 Corte longitudinal del diagrama de contorno del filete “1” envasado al vacío en bolsas esterilizables en ALGOR ®.



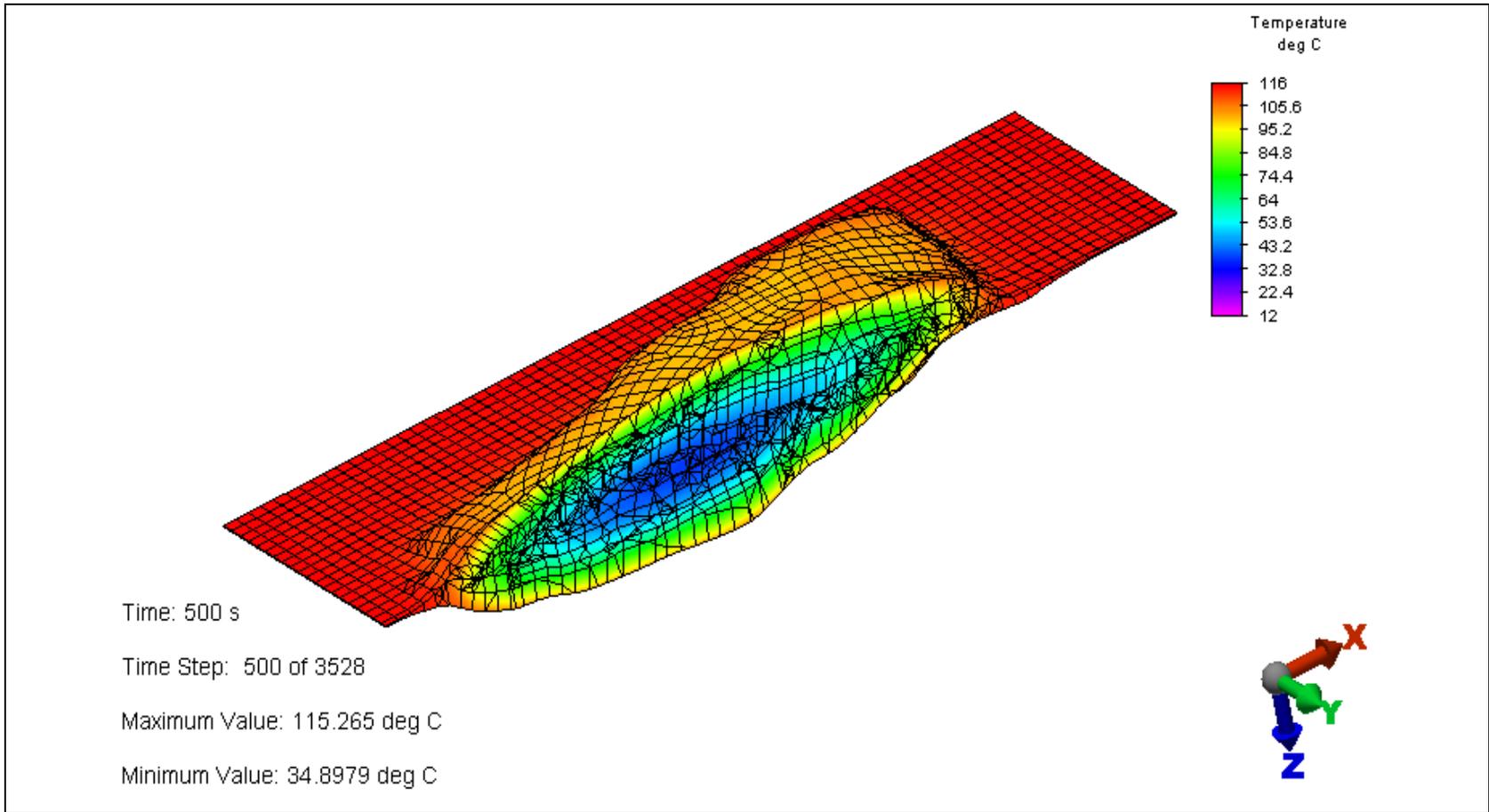
ANEXO 3.4 Corte longitudinal del diagrama de contorno del filete “3” envasado al vacío en bolsas esterilizables en ALGOR ®.



ANEXO 3.5 Corte longitudinal del diagrama de contorno del medallón “2” envasado al vacío en bolsas esterilizables en ALGOR ®.



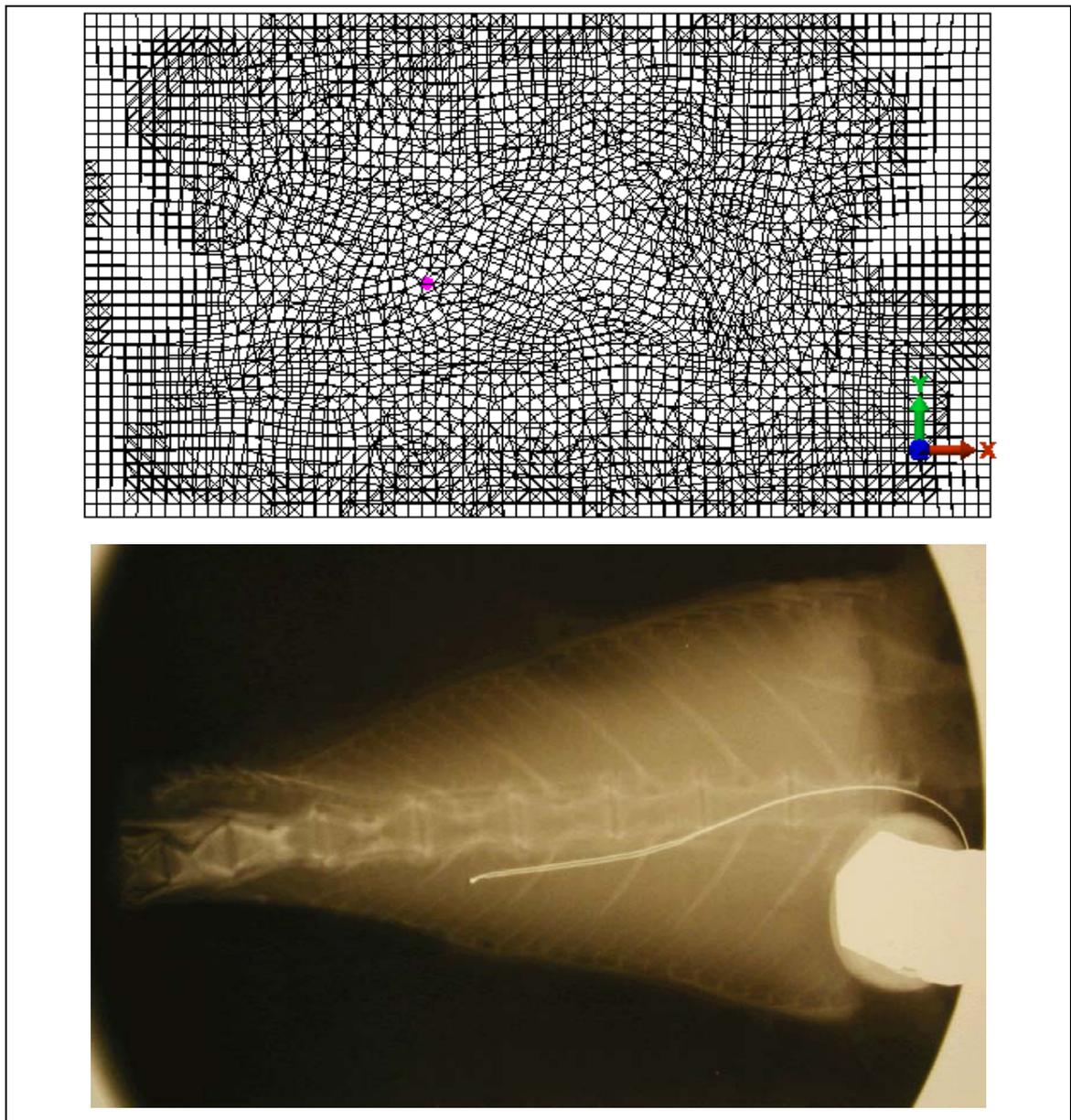
ANEXO 3.6 Corte longitudinal del diagrama de contorno del medallón “3” envasado al vacío en bolsas esterilizables en ALGOR ®.



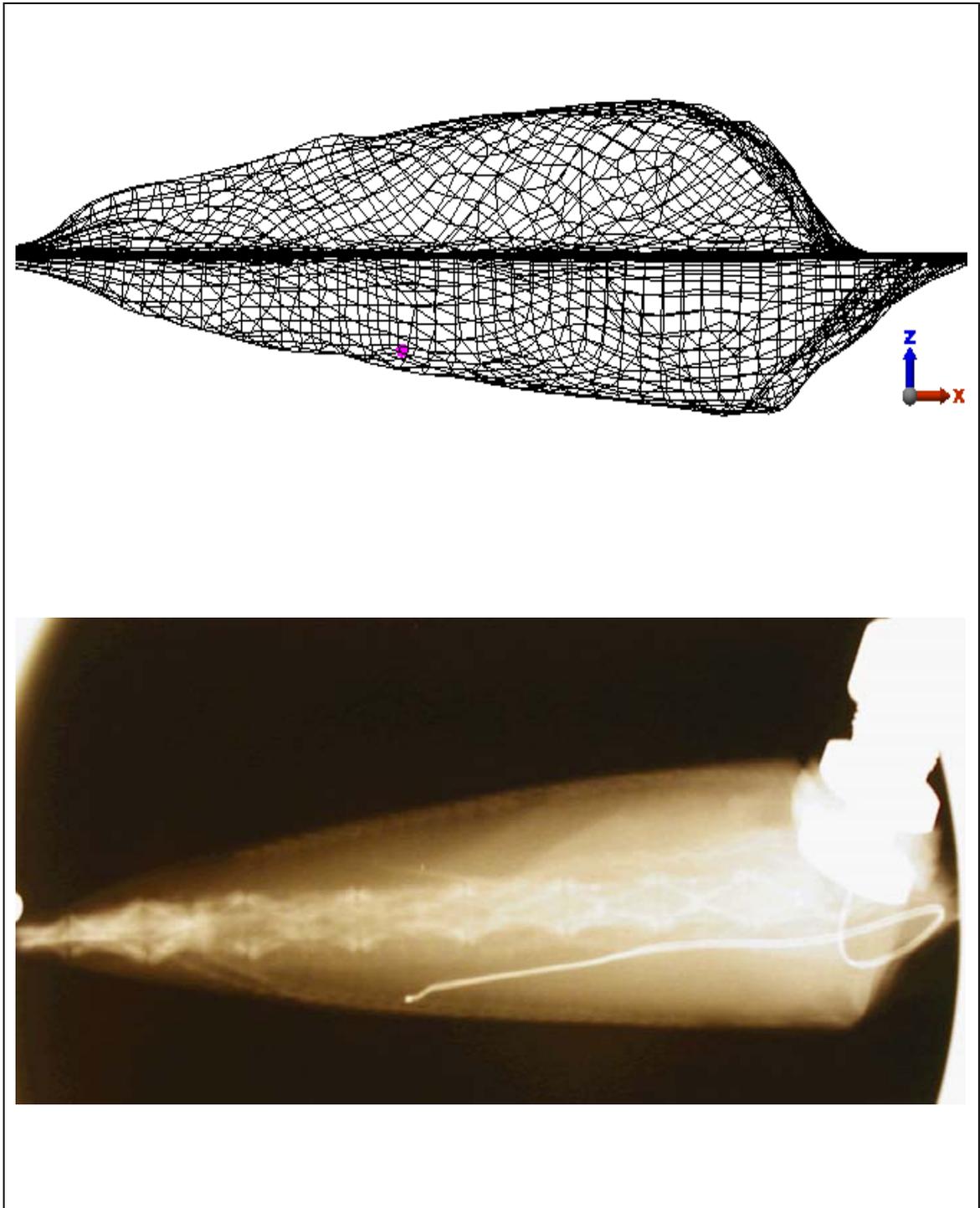
ANEXO 4

Validación de la ubicación del nodo evaluado mediante radiografías

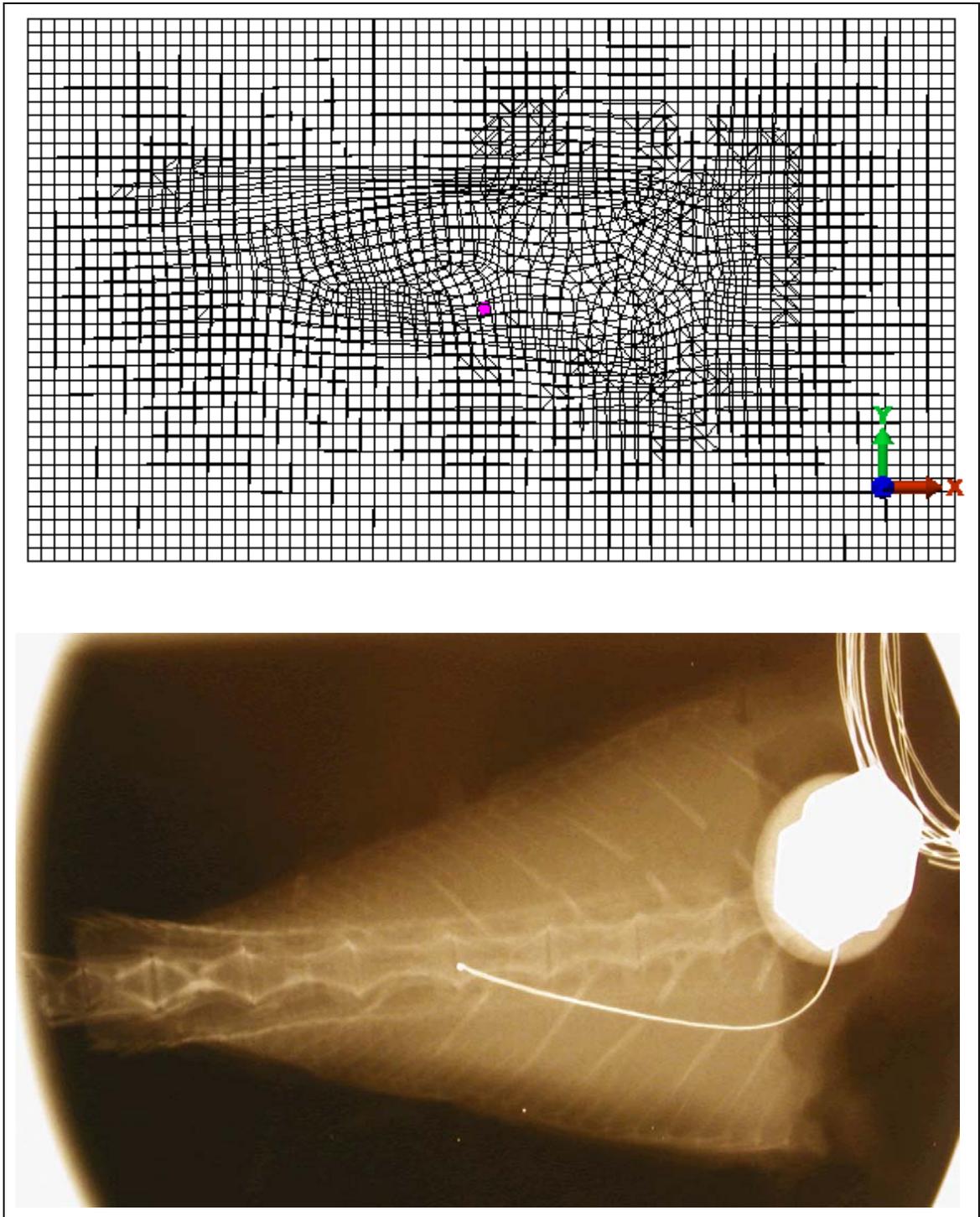
ANEXO 4.1 Localización de la coordenada (x,y) , de la termocupla insertada en el cono "3".



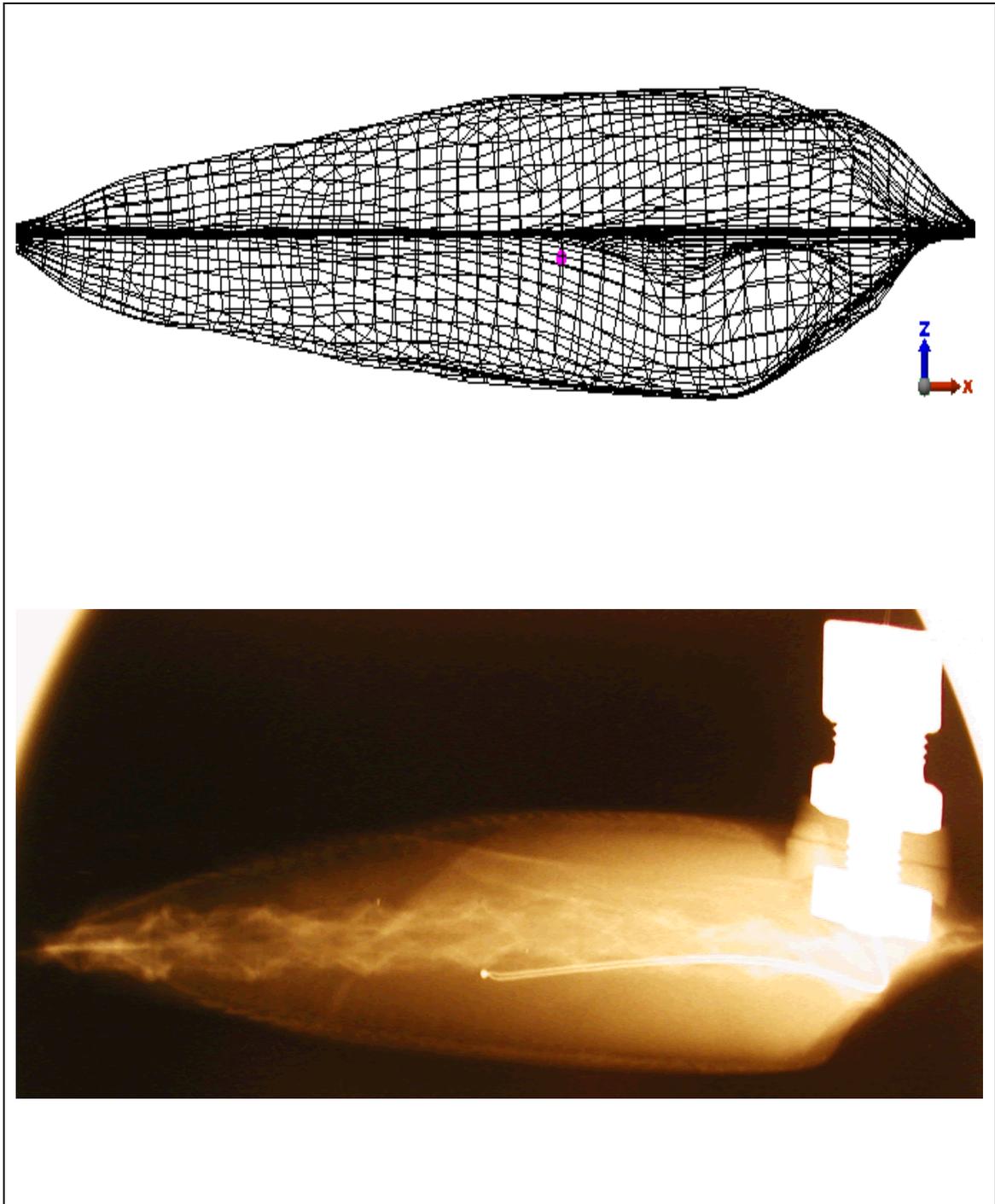
ANEXO 4.2 Localización de la coordenada (x,z), de la termocupla insertada en el cono "3".



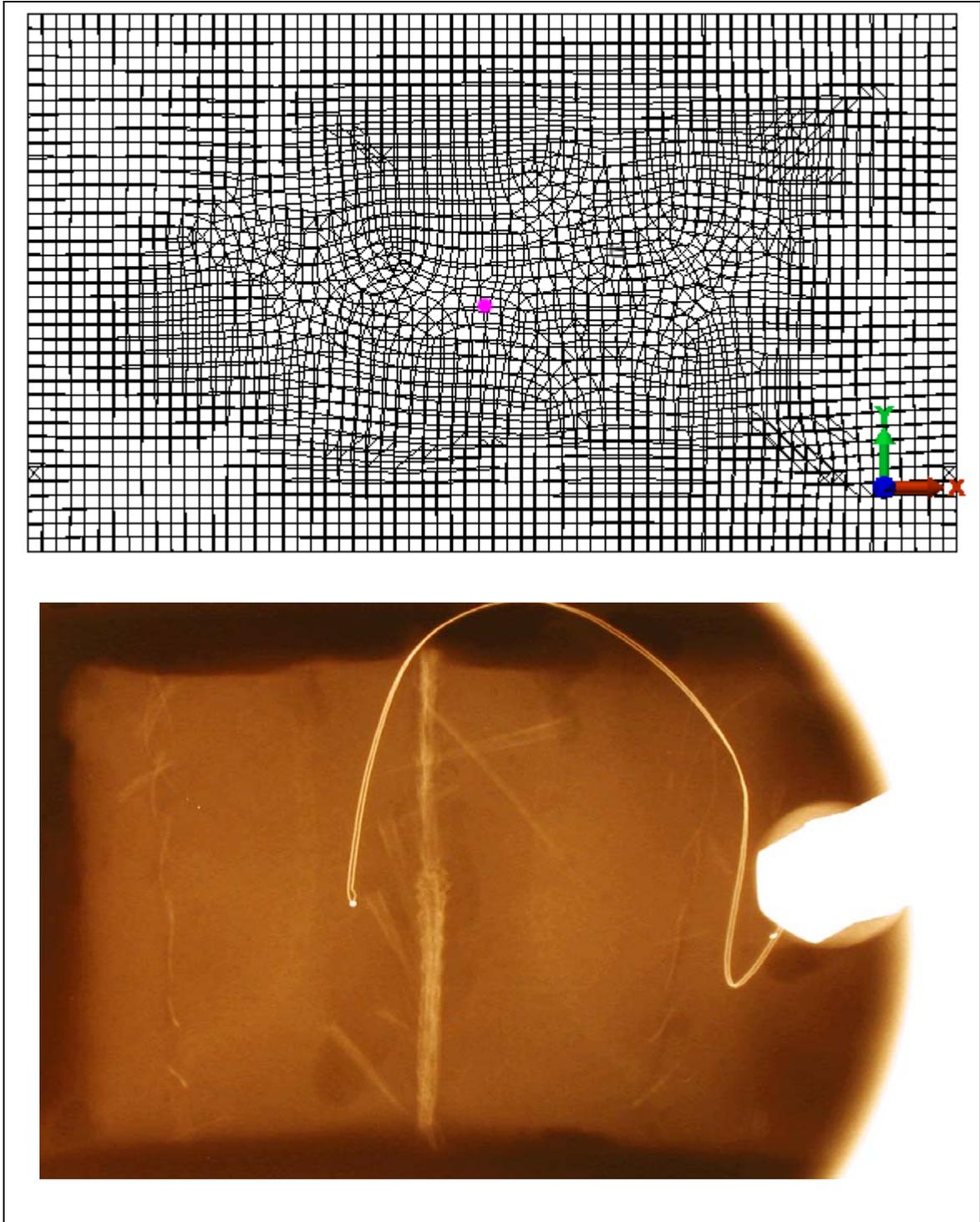
ANEXO 4.3 Localización de la coordenada (x,y) de la termocupla insertada en el cono "4".



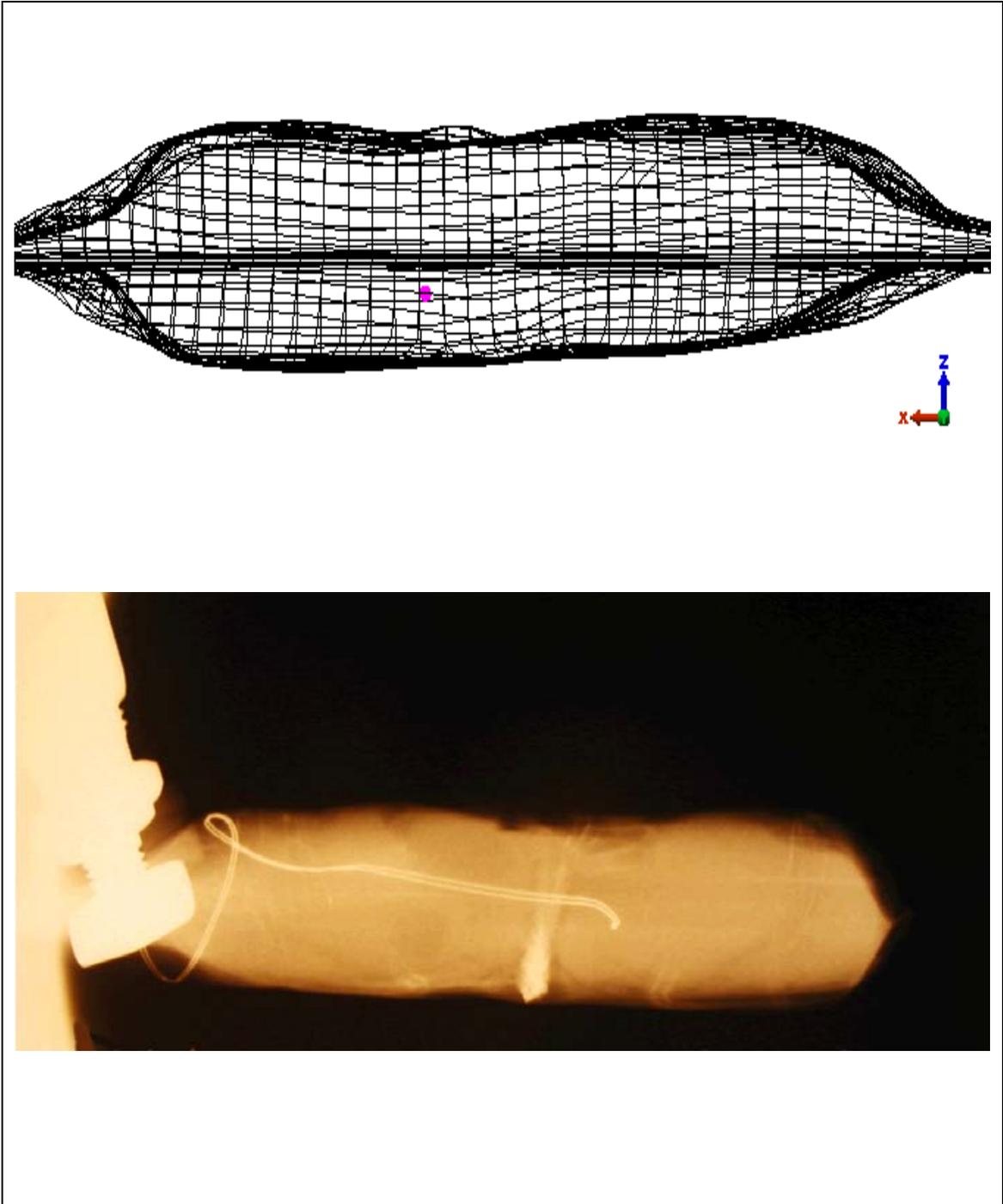
ANEXO 4.4 Localización de la coordenada (x,z) de la termocupla insertada en el cono "4".



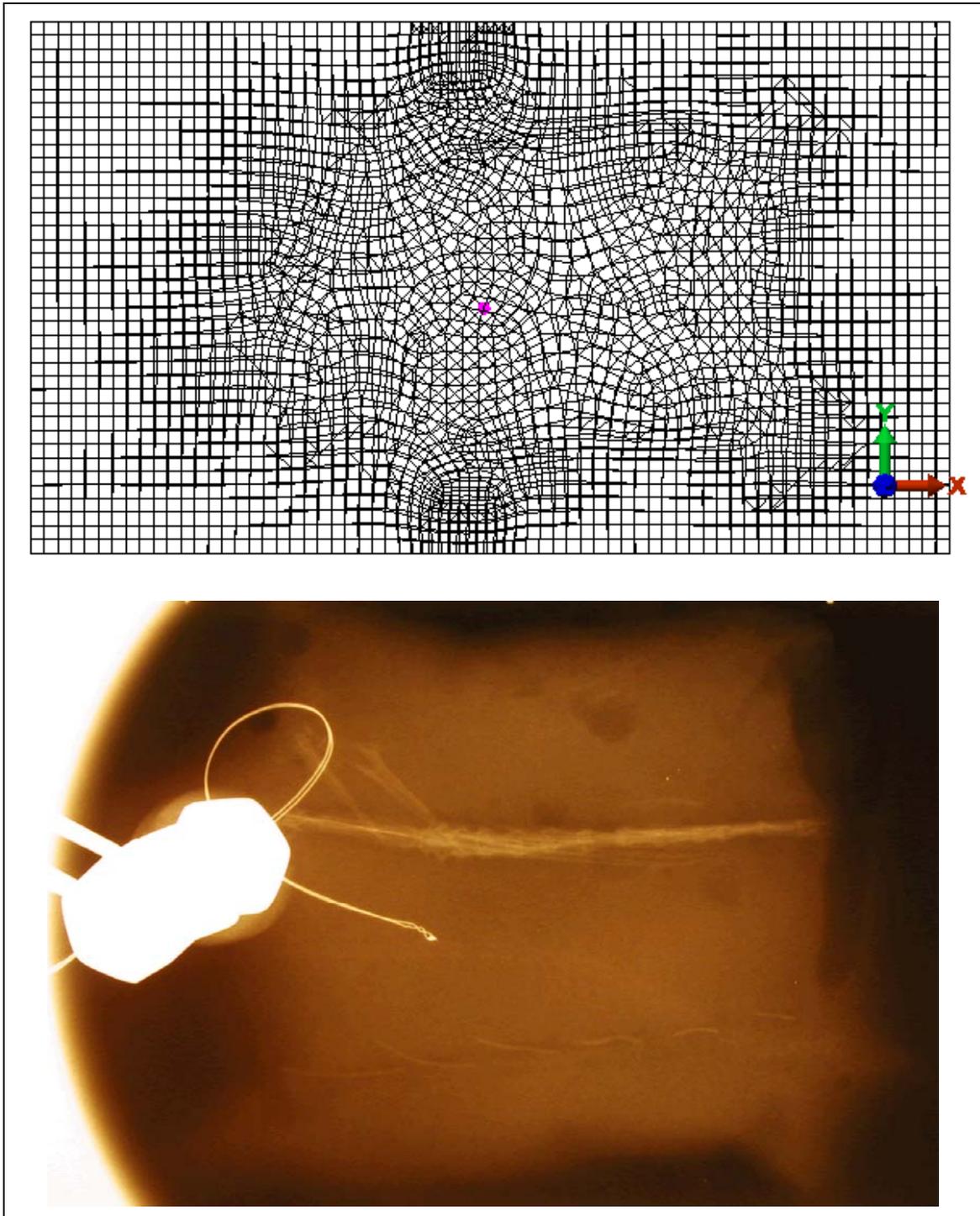
ANEXO 4.5 Localización de la coordenada (x,y) de la termocupla insertada en el filete “1”.



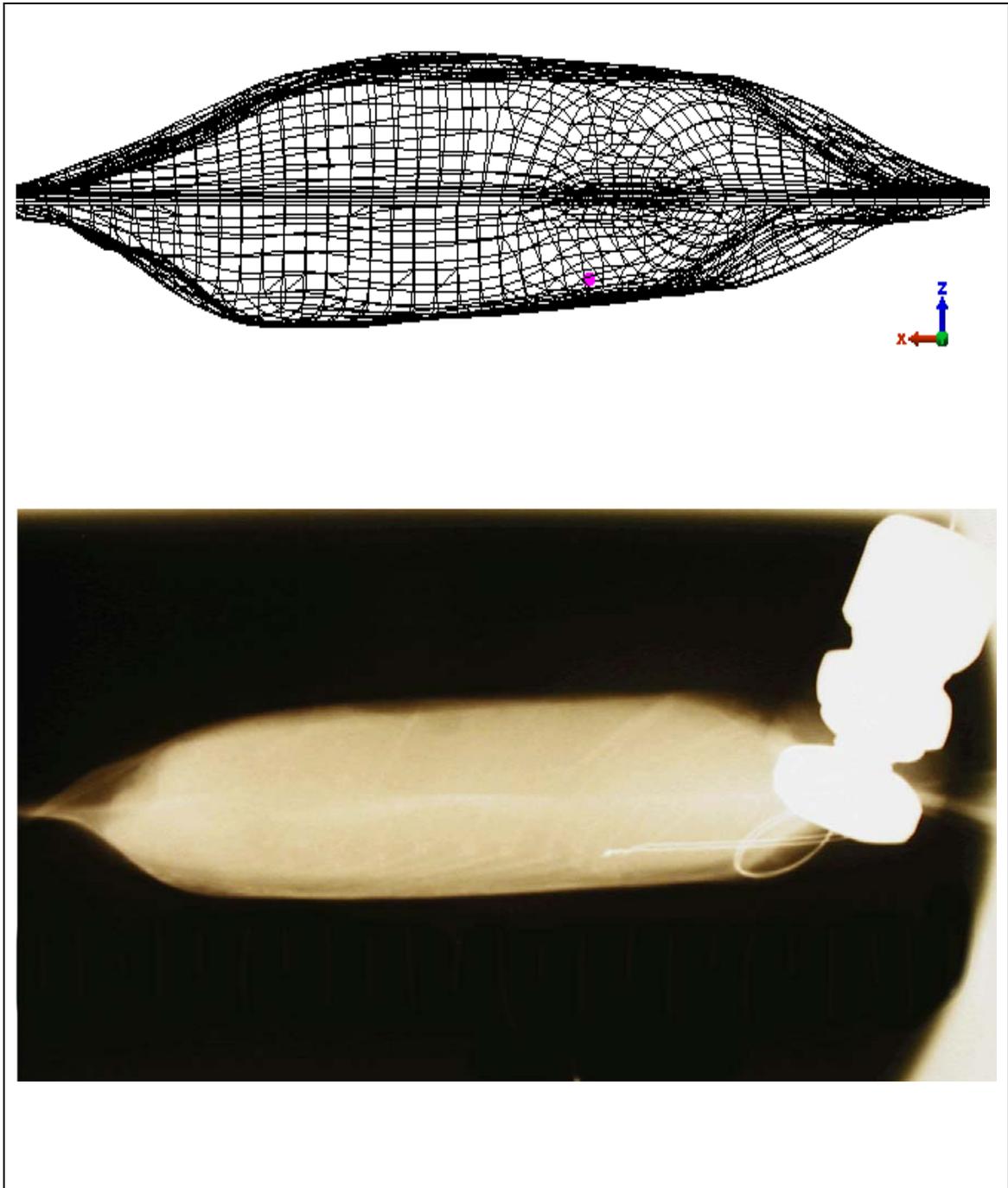
ANEXO 4.6 Localización de la coordenada (x,z) de la termocupla insertada en el filete “1”.



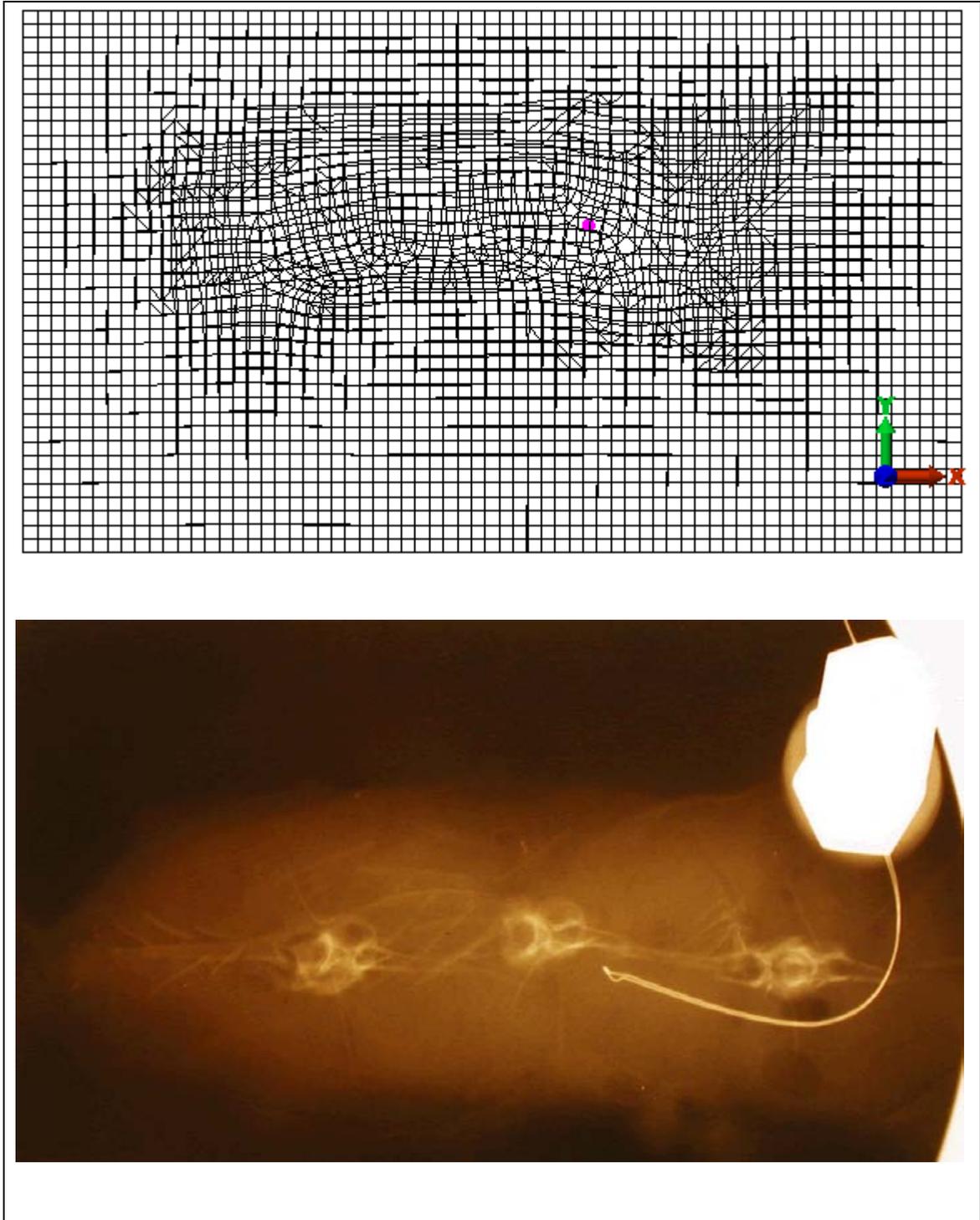
ANEXO 4.7 Localización de la coordenada (x,y) de la termocupla insertada en el filete “3”.



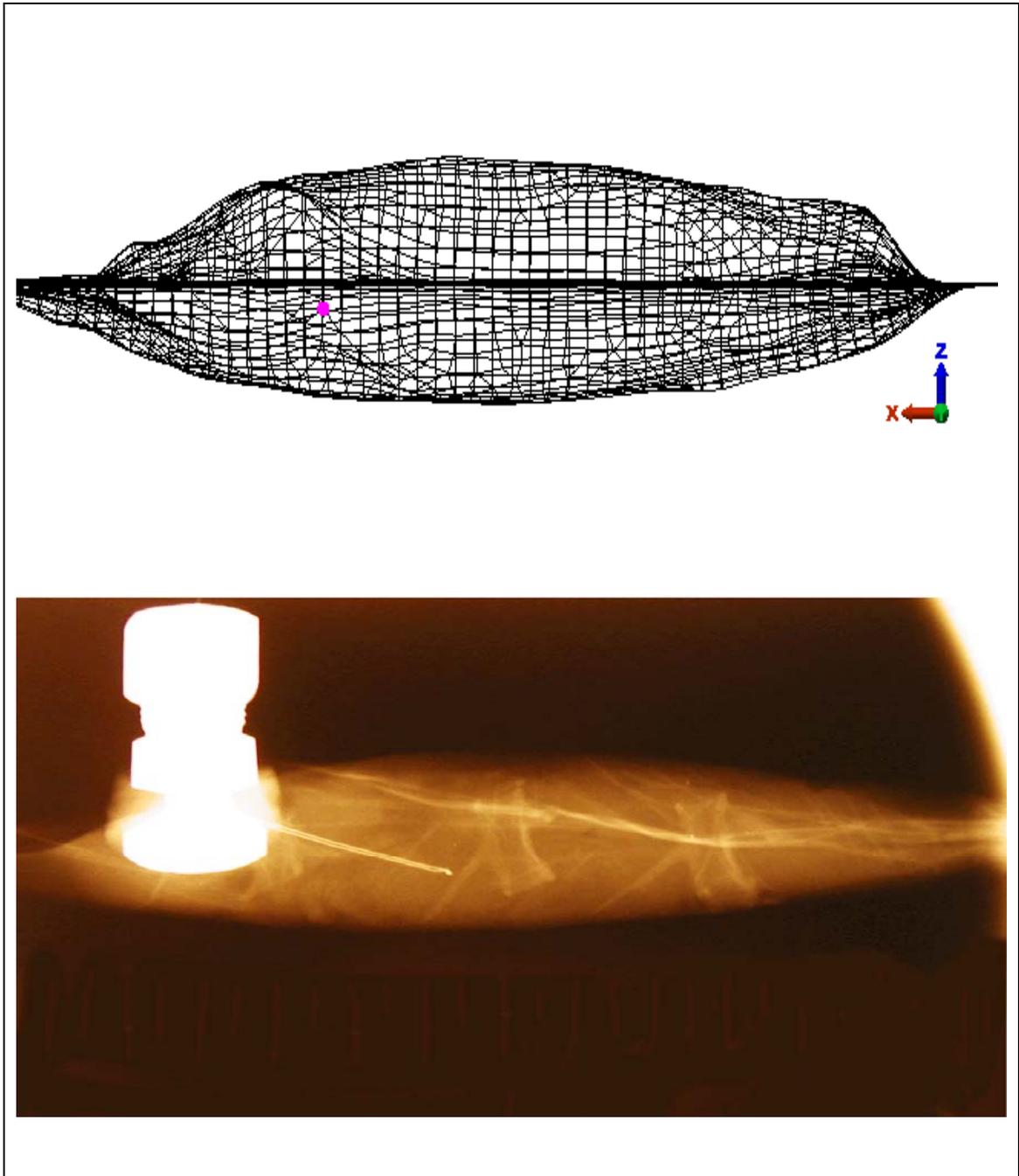
ANEXO 4.8 Localización de la coordenada (x,z) de la termocupla insertada en el filete “3”.



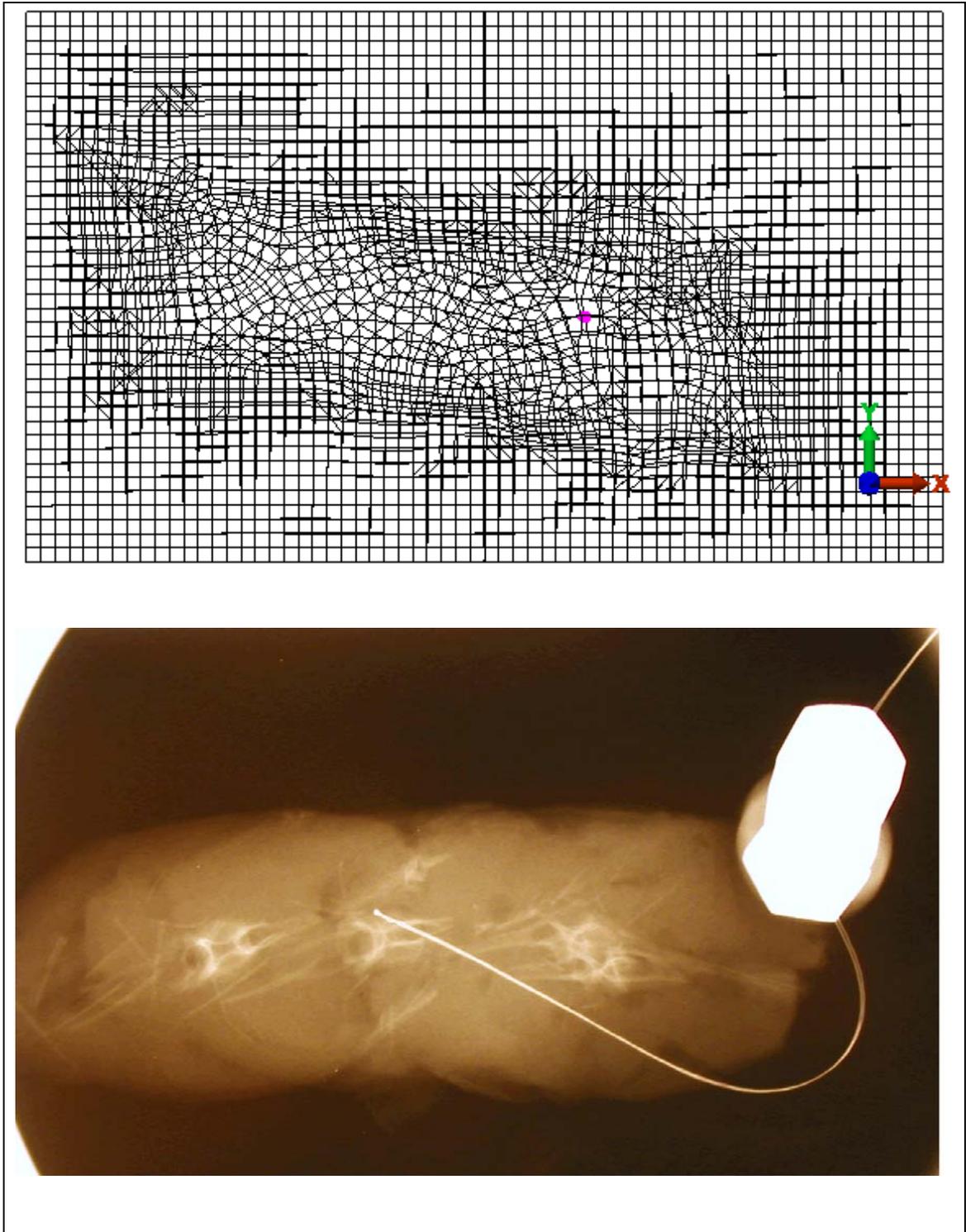
ANEXO 4.9 Localización de la coordenada (x,y) de la termocupla insertada en el medallón "2".



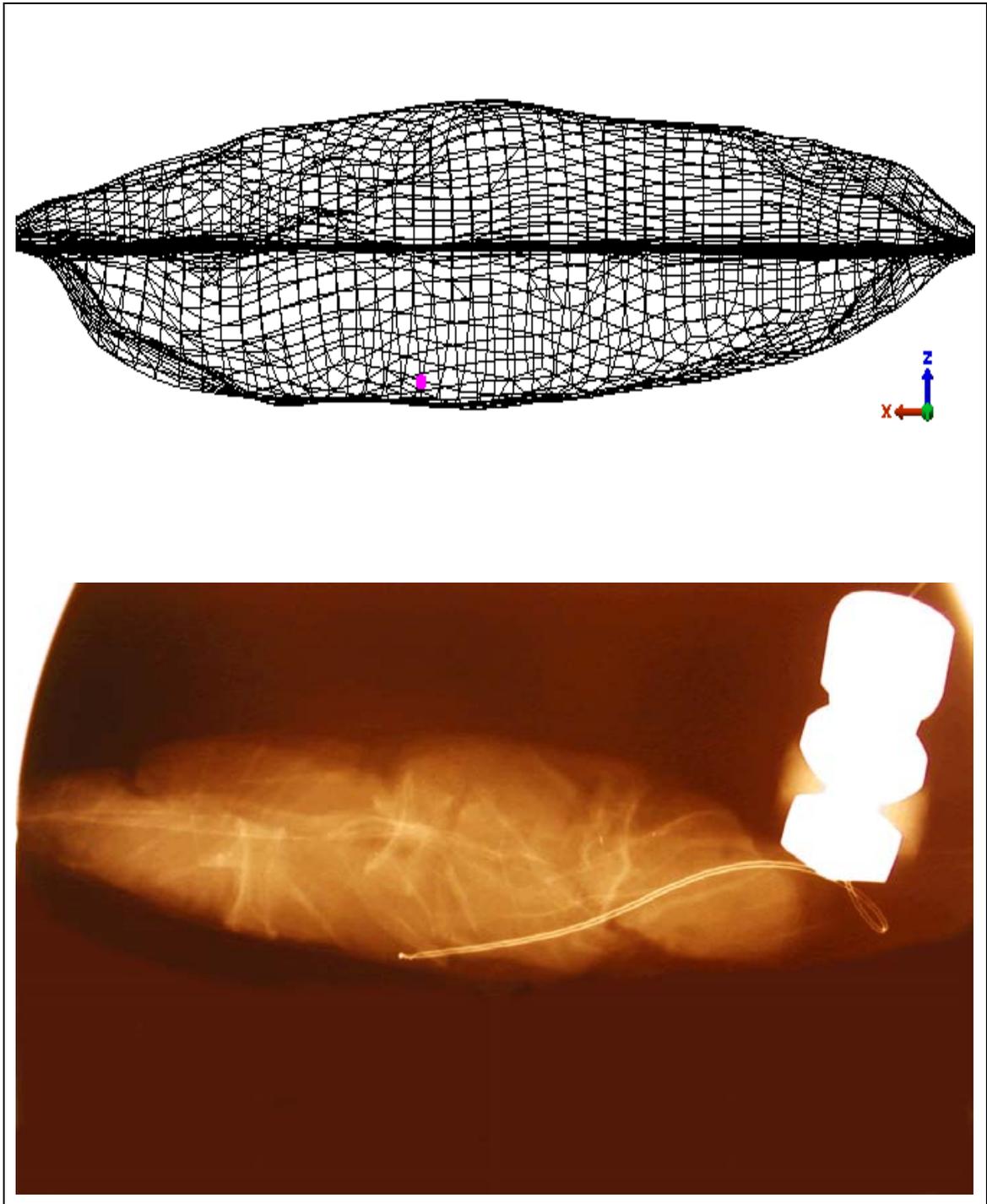
ANEXO 4.10 Localización de la coordenada (x,z) de la termocupla insertada en el filete "2".



ANEXO 4.11 Localización de la coordenada (x,y) de la termocupula insertada en el medallón "3".



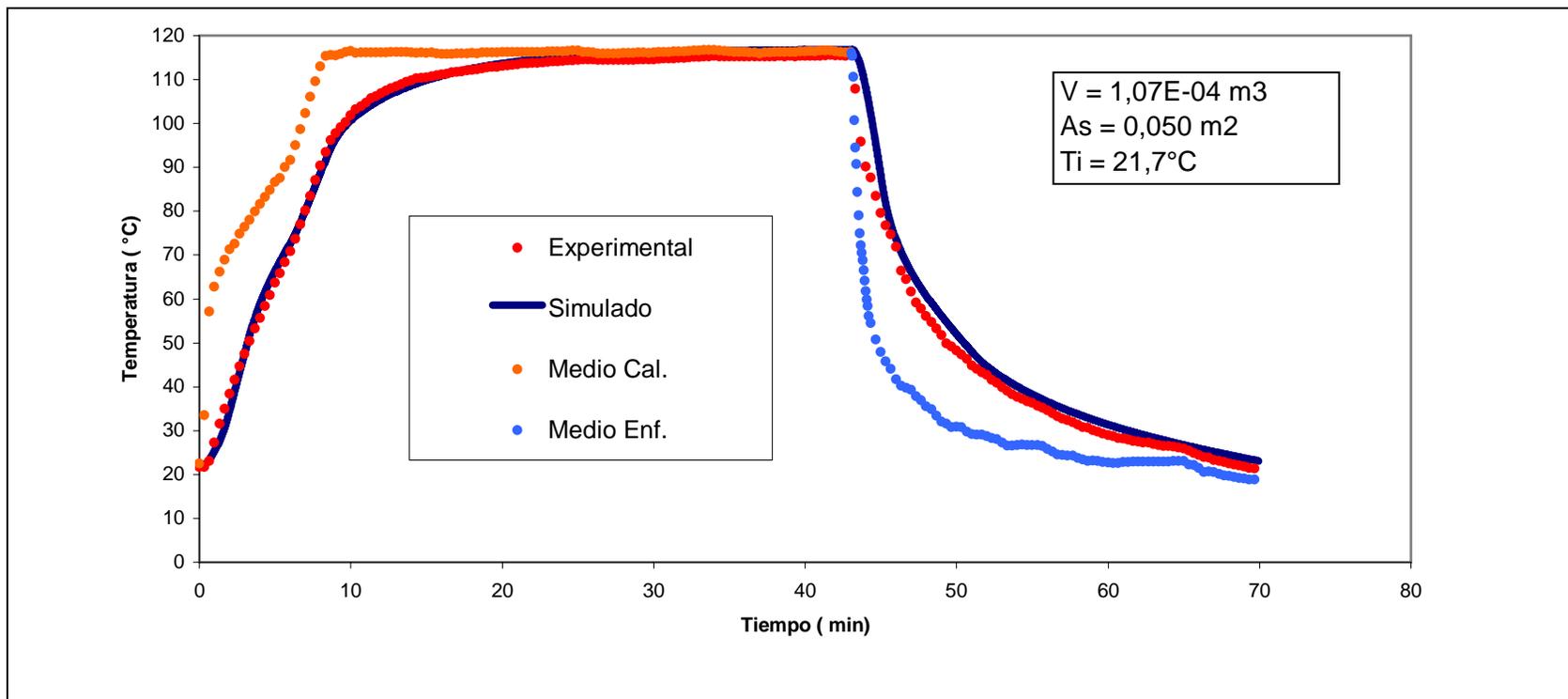
ANEXO 4.12 Localización de la coordenada (x,z) de la termocupla insertada en el medallón "3".



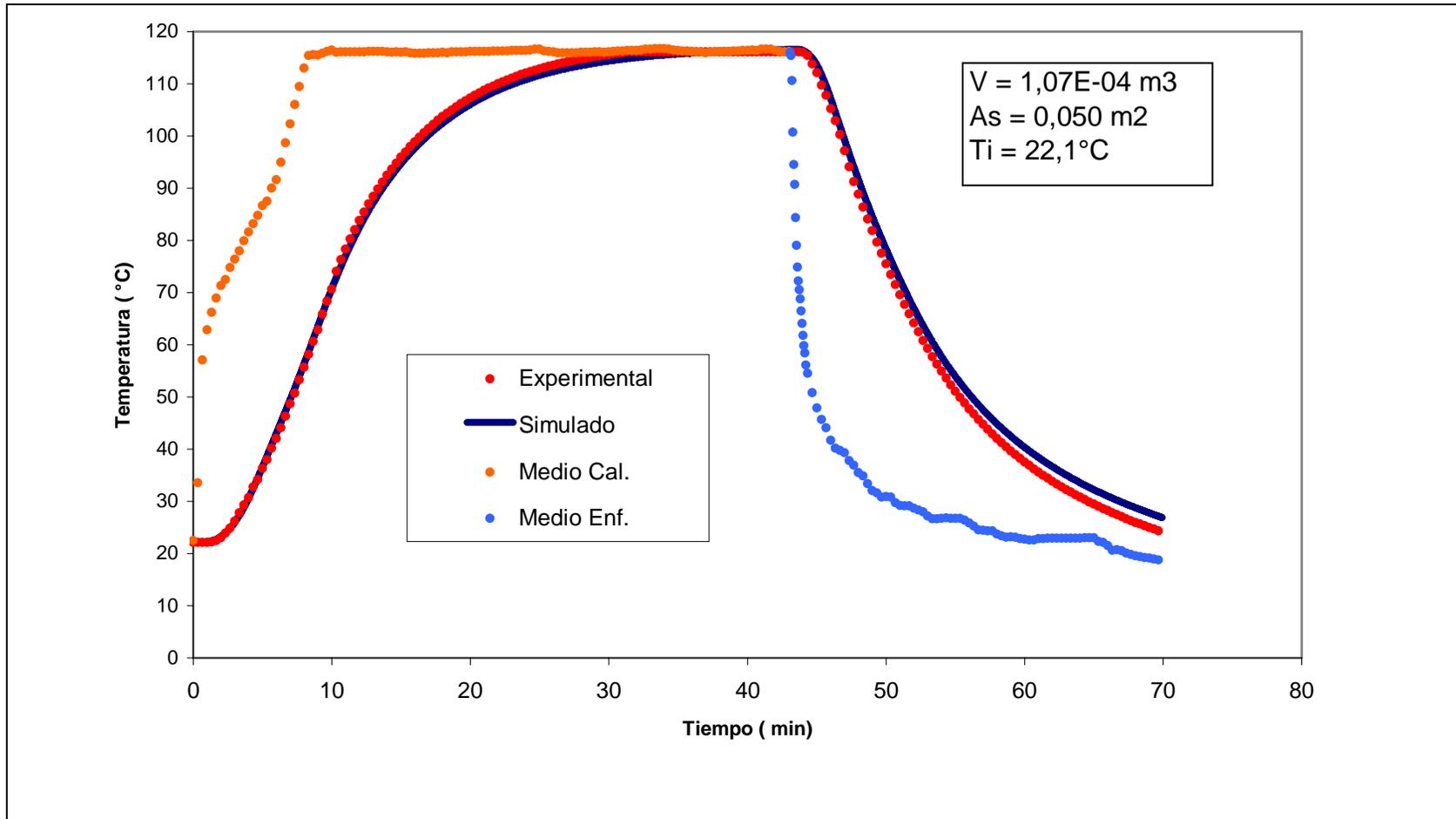
ANEXO 5

Perfiles de temperatura experimentales y simulados para el proceso térmico de distintos cortes de jurel envasado al vacío en bolsas esterilizables.

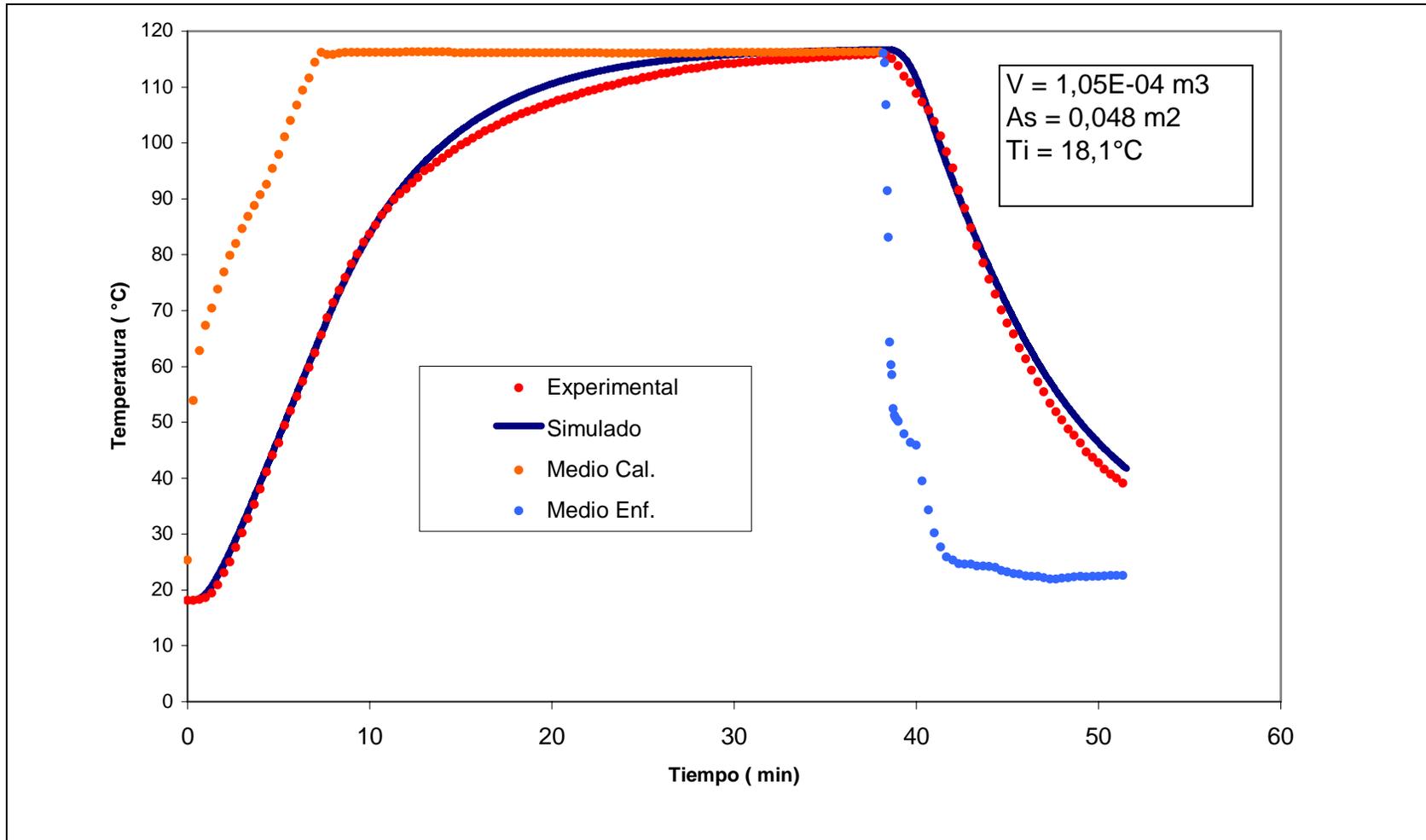
ANEXO 5.1 Perfiles de temperatura experimental y simulado para el proceso térmico del cono "3" envasado al vacío en bolsas esterilizables.



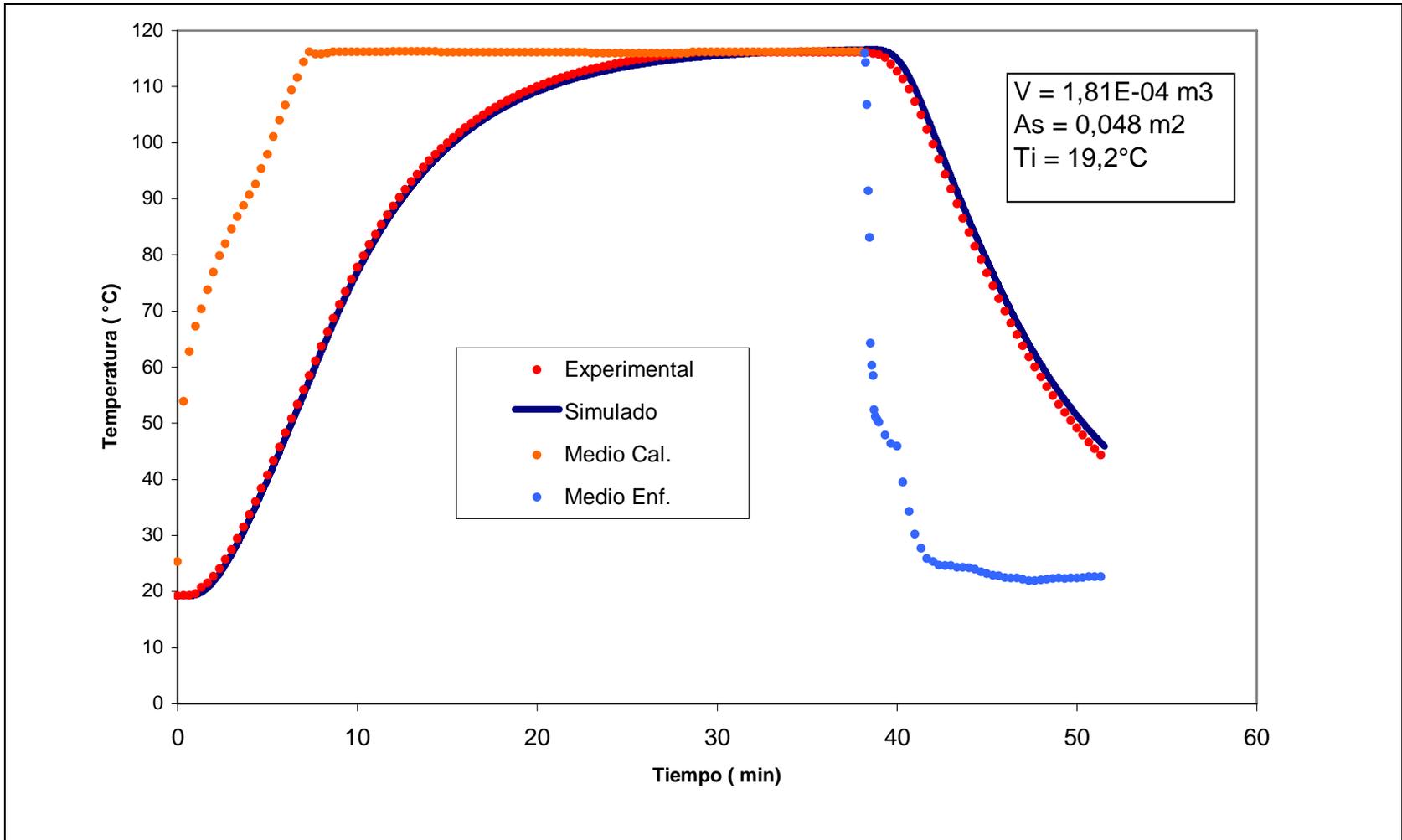
ANEXO 5.2 Perfiles de temperatura experimental y simulado para el proceso térmico del cono “4” envasado al vacío en bolsas esterilizables.



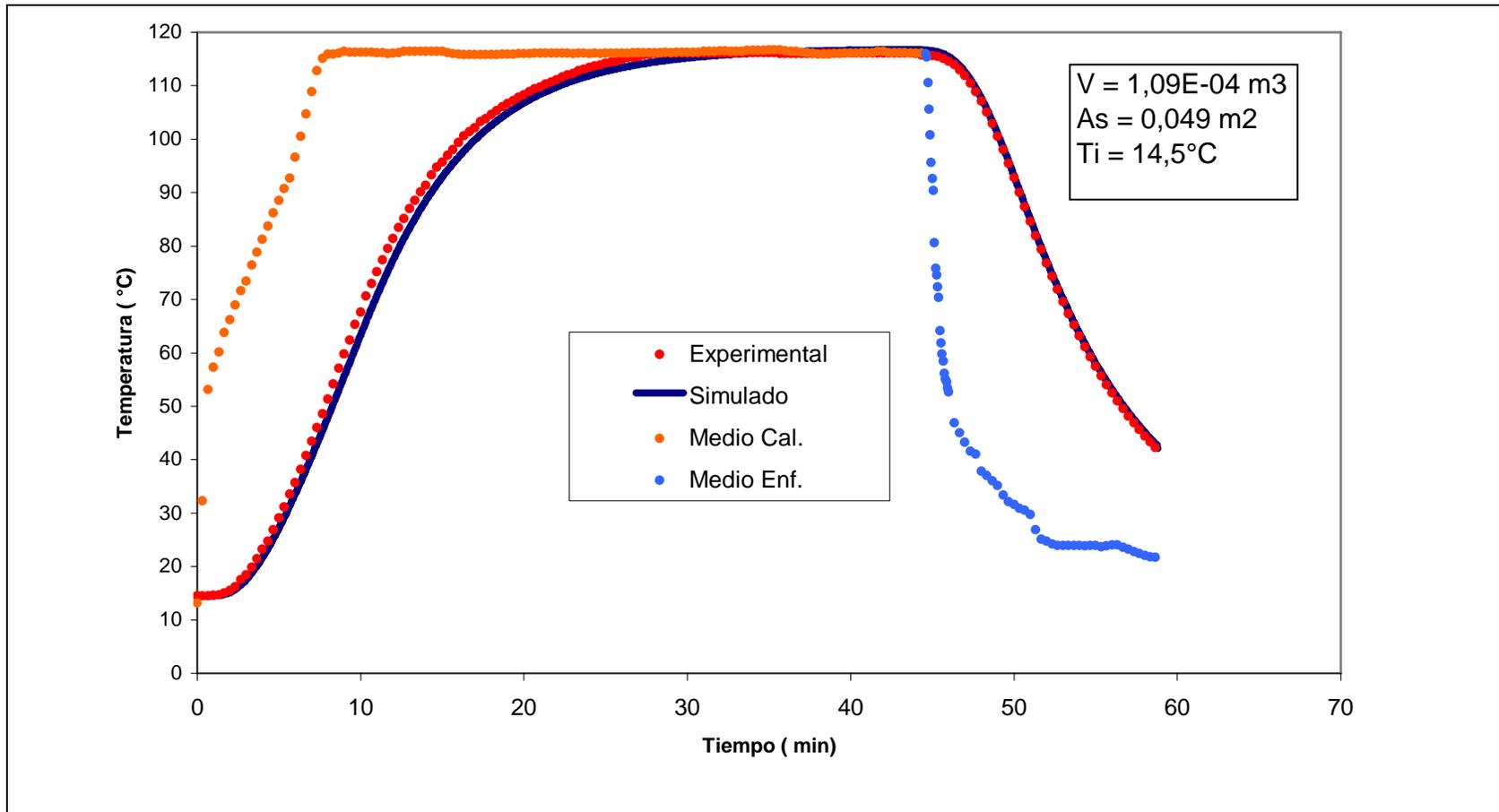
ANEXO 5.3 Perfiles de temperatura experimental y simulado para el proceso térmico del filete “1” envasado al vacío en bolsas esterilizables.



ANEXO 5.4 Perfiles de temperatura experimental y simulado para el proceso térmico del filete “3” envasado al vacío en bolsas esterilizables.



ANEXO 5.5 Perfiles de temperatura experimental y simulado para el proceso térmico del medallón “2” envasado al vacío en bolsas esterilizables.



ANEXO 5.6 Perfiles de temperatura experimental y simulado para el proceso térmico del medallón “3” envasado al vacío en bolsas esterilizables.

