



***Universidad Nacional de La Plata
Facultad de Ingeniería***

***DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN
DEL PROCESAMIENTO TÉRMICO DE
ALIMENTOS ENVASADOS***

María Roberta Ansorena

***Tesis presentada para optar al grado de
DOCTOR EN INGENIERÍA***

Marzo de 2009

El presente trabajo de Tesis para optar al título de Doctor en Ingeniería fue realizado en el Centro de Investigación y Desarrollo en Criotecnología de Alimentos (CIDCA), Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de La Plata-CONICET La Plata, conjuntamente con el Grupo de Investigación en Ingeniería en alimentos, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Mar del Plata bajo la dirección de la Dra. Viviana O. Salvadori y la codirección del Ing. Carlos del Valle[†]

Parte de los resultados obtenidos en esta tesis fueron publicados en los siguientes trabajos:

Ansorena, M. R., del Valle, C. E. & Salvadori, V. O. (2004). Modelado de penetración de calor mediante función de transferencia en variable discreta: Efecto de las dimensiones del producto. En: *I Congreso Internacional de Ciencia y Tecnología de los Alimentos 2004*. Córdoba, Argentina, 24 al 26 de noviembre de 2004. Trabajo (póster). Panel S, póster 4-32.

Ansorena, M. R., del Valle, C. E. & Salvadori, V. O. (2005). Thermal processing of seafood: Effect of container size. En: *Proceedings of ENPROMER 2005, 2nd Mercosur Congress on Chemical Engineering, 4th Mercosur Congress on Process Systems Engineering 2005*. Río de Janeiro, Brasil. 14 al 18 de agosto de 2005. Trabajo 738, 10 páginas.

Ansorena, M. R.; del Valle, C. E. & Salvadori, V. O. (2006). Estudio de la transferencia de calor mediante función de transferencia en variable discreta en el enfriamiento de papas. En: *Actas de X Congreso Argentino de Ciencia y Tecnología de Alimentos (CYTAL)*. Mar del Plata, Argentina, 18 al 20 de mayo de 2005. Tomo 4: 1321-1328.

Ansorena, M. R., del Valle, C. E. & Salvadori, V. O. (2007). Aplicación de Funciones de transferencia en la simulación del procesamiento térmico de conservas de pescado. En: *Actas de XI Congreso Argentino de Ciencia y Tecnología de Alimentos (CYTAL)*. Buenos Aires, Argentina, 14 al 17 de septiembre de 2007. Tomo Ingeniería de Alimentos, trabajo 13.3, 10 páginas.

Ansorena, M. R., del Valle, C. E. & Salvadori, V. O. (2009). Transfer functions of canned seafood: Effect of container size and sampling interval. *Food Science and Technology International* (aceptado para su publicación).

1. INTRODUCCION

1.1. Orígenes de la conservación de alimentos mediante tratamientos térmicos	1
1.1.1. Nicolás Appert y los orígenes de una industria	2
1.2. Fundamentos de los tratamientos térmicos	3
1.3. Termodestrucción de los microorganismos causantes de alteraciones	7
1.3.1. Efectos de los cambios de temperatura	9
1.3.2. Efecto del calor sobre las propiedades nutritivas y organolépticas	11
1.4. Importancia de las conservas de pescado	12
1.5. Importancia económica de la producción de conservas de pescado y mariscos en Argentina	13

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general	19
2.2. Objetivos específicos	19
2.2.1. Diseño del procesamiento térmico	19
2.2.2. Optimización del procesamiento térmico	21

3. DISEÑO DEL PROCESAMIENTO TÉRMICO: ANTECEDENTES

3.1. Introducción	22
3.2. Antecedentes en el procesamiento térmico de alimentos	24
3.2.1. Sistemas conductivos	24
3.2.2. Sistemas mixtos	34

4. DISEÑO DEL PROCESAMIENTO TÉRMICO: MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Formulación matemática del problema	37
4.1.1. Sistemas conductivos	37
4.1.2. Sistemas mixtos	38
4.2. Función de transferencia	40
4.2.1. Formulación matemática	41
4.2.2. Cálculo de los coeficientes de la función de transferencia	46
4.3. El método de los elementos finitos	46
4.3.1. El método de elementos finitos en el procesamiento de alimentos	46
4.3.2. Fundamentos básicos del método de elementos finitos	47
4.3.3. El método de Elementos Finitos aplicado a problemas de transferencia de calor con conducción pura	49
4.3.4. Software Comercial de elementos finitos FEMLAB	50
4.3.4.1. Creación o importación de la geometría	51
4.3.4.2. Definición de las propiedades en el dominio y en el entorno	51
4.3.4.3. Mallado de la geometría	52
4.3.4.4. Procesamiento	53
4.3.4.5. Post-procesamiento	54
4.4. Determinaciones experimentales	54
4.4.1. Sistemas Conductivos	54
4.4.2. Sistemas mixtos	57
4.5. Cálculo de la letalidad acumulada (F)	59

5. DISEÑO DEL PROCESAMIENTO TÉRMICO:**RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

5.1. Sistemas conductivos	60
5.1.1. Cálculo de la función de transferencia por vía experimental	60
5.1.2. Cálculo de la función de transferencia por métodos numéricos	62
5.1.3. Validación del método de elementos finitos	64
5.1.4. Cálculo de los coeficientes f_n	65
5.1.4.1. f_n para distintas posiciones dentro de un mismo envase	65
5.1.4.2. f_n para el centro térmico de distintos tamaños de envases	67
5.1.5. Validación de funciones de transferencia	75
5.1.6. Vinculación de respuestas térmicas con letalidad acumulada	78
5.2. Sistemas mixtos	80
5.2.1. Determinación de dimensiones características de los mejillones	80
5.2.2. Determinación de la ubicación del centro térmico	80
5.2.3. Cálculo de los coeficientes f_n	84
5.2.4. Validación de funciones de transferencia	91
5.2.5. Vinculación de respuestas térmicas con letalidad acumulada	93
5.3. Conclusiones	94

6. OPTIMIZACIÓN DEL PROCESAMIENTO TÉRMICO: INTRODUCCIÓN

6.1. Introducción	96
6.2. Antecedentes en optimización de tratamientos térmicos en alimentos	99

7. OPTIMIZACIÓN DEL PROCESAMIENTO TÉRMICO: MATERIALES Y MÉTODOS

7.1. Formulación de los problemas de optimización	102
7.1.1. Sistemas conductivos	104
7.1.1.1. Formulación de la optimización del procesamiento CRT	104
7.1.1.2. Formulación de la optimización del procesamiento VRT	105
7.1.1.2.1. Perfiles de temperatura de autoclave	107
7.1.1.2.1.1. Escalones sucesivos	107
7.1.1.2.1.2. Rampas sucesivas	108
7.1.1.2.1.3. Función exponencial	108
7.1.1.3. Materiales y Métodos	109
7.1.1.3.1. Simulaciones numéricas	109
7.1.1.3.2. Esquemas de optimización	110
7.1.1.3.2.1. Procesamiento CRT	110
7.1.1.3.2.2. Procesamiento VRT	111
7.1.2. Sistemas mixtos	112
7.1.2.1. Formulación de la optimización del procesamiento CRT	112
7.1.2.2. Formulación de la optimización del procesamiento VRT	114
7.1.2.3. Materiales y Métodos	115
7.1.2.3.1. Simulaciones numéricas	115
7.1.2.3.2. Esquemas de optimización	115
7.1.2.3.2.1. Procesamiento CRT	116
7.1.2.3.2.2. Procesamiento VRT	117
7.2. Funciones de penalización para optimización en procesamiento VRT	118

8. OPTIMIZACIÓN DEL PROCESAMIENTO TÉRMICO: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

8.1. Sistemas conductivos	121
8.1.1. Temperatura de autoclave constante (CRT)	121
8.1.1.1. Retención global de tiamina	124
8.1.1.2. Retención superficial de tiamina	128
8.1.2. Temperatura de autoclave variable (VRT)	132
8.1.2.1. Retención global de tiamina	132
8.1.2.2. Retención superficial de tiamina	141
8.1.2.3. Tiempo de proceso	148
8.2. Sistemas mixtos	151
8.2.1. Temperatura de autoclave constante (CRT)	151
8.2.2. Temperatura de autoclave variable (VRT)	157
8.3. Conclusiones	161
9. CONCLUSIONES GENERALES	163
BIBLIOGRAFIA	166
ANEXOS	179

INTRODUCCIÓN

CAPITULO I

Introducción

1.1. Orígenes de la conservación de alimentos mediante tratamientos térmicos

Todos nuestros alimentos derivan de las plantas o de los animales, son por lo tanto de origen biológico y es precisamente esta naturaleza biológica la causa del desarrollo de una serie de transformaciones que no sólo modifican sus características originales, sino que llegan a producir deterioro. En estas transformaciones se incluyen reacciones químicas y bioquímicas, pero además los alimentos que el hombre utiliza, son también adecuados como alimento para muchos de los microorganismos y por lo tanto en el deterioro de los alimentos intervienen también procesos microbianos.

El procesamiento térmico de alimentos comenzó a principios del siglo XIX, después de una serie de descubrimientos que permitieron sentar las bases científicas y técnicas para dicha tecnología. A pesar del completo desconocimiento que se tenía en la antigüedad de las principales causas de degradación de los alimentos, nuestros antepasados desarrollaron muchos métodos de conservación más o menos efectivos, que se emplearon durante cientos de años, siendo los más comunes el secado, el ahumado, el salado, el encurtido y cuando las temperaturas eran lo suficientemente bajas, la congelación (Fellows, 1994).

Los métodos tradicionales de conservación de alimentos se desarrollaron por prueba y error y conducían a productos de características variables y de vida útil fluctuante. Aunque fueron refinándose con el paso del tiempo, muchos de ellos no producían alimentos adecuadamente

seguros que fuesen además nutritivos y apetitosos y en general estaban muy limitados a productos específicos. Hacia finales del siglo XVIII la industrialización y los largos viajes por mar produjeron la necesidad de conseguir técnicas de procesamiento aplicables a una mayor variedad de productos.

En la historia de la conservación de alimentos encontramos un punto de inflexión alrededor del año 1860. Antes de esa fecha, las conservas de alimentos eran caras, dirigidas hacia los consumidores de alto poder adquisitivo y las expediciones navales. A partir de 1860 estos alimentos comienzan a producirse donde la materia prima era barata y abundante, por ejemplo Australia y América del Sur. La introducción de las técnicas de producción en masa tiene como consecuencia una reducción rápida de los costos de manufactura. Casi al mismo tiempo comienzan a conocerse las causas del deterioro microbiano de los alimentos y los procesos empíricos de la tecnología empiezan a apoyarse en bases científicas.

1.1.1 Nicolás Appert y los orígenes de una industria

Aunque el embotellado de frutas fue practicado a escala doméstica desde principios del siglo XVII, el proceso comercial de conservación de alimentos por esterilización, aplicado a otros productos además de frutas, fue desarrollado por Nicolás Appert, un pastelero de París, a principios del siglo XIX. Appert no tenía conocimientos de bacteriología, pero con cuidadosos y extensos experimentos sentó él sólo las bases para el comienzo de una industria. A partir de observaciones completamente empíricas, llegó a conclusiones correctas sobre el tiempo de calentamiento necesario para conseguir el efecto de conservación deseado y sorprendentemente fue muy insistente en la necesidad de extremar las condiciones higiénicas, que entonces estaban lejos de ser consideradas como criterio universal en la manipulación de alimentos.

Muchas mejoras de este proceso de conservación, incluyendo la introducción de los envases metálicos, fueron trabajo de otros, pero fue Appert quien demostró que se pueden producir alimentos seguros y de calidad aceptable, calentándolos en recipientes cerrados.

La primera mejora importante en el proceso fue patentada en 1840, cuando John Wertheimer comprobó que incrementando la temperatura de calentamiento de los alimentos envasados, se reducía considerablemente el tiempo de tratamiento y se conseguía una mejora notable de la calidad. En 1841 Goldner y Wertheimer presentaron dos patentes para el calentamiento de alimentos envasados en baños con soluciones salinas, cuyo punto de

ebullición se situaba a temperaturas superiores a 100°C, aplicando el principio que establece que el punto de ebullición de una solución salina es más alto que el del agua pura. Los baños de cloruro cálcico se consideraron rápidamente como el método estándar de calentamiento de los envases, debido a que permitían una considerable reducción de los tiempos de calentamiento, pasando de 4-5 horas a 1 hora.

Goldner y Wertheimer además decidieron ensayar temperaturas del orden de 132 a 150°C, a pesar de los riesgos de explosión de los envases a estas temperaturas originado por las altas presiones que pueden llegar a deformar los envases y hasta hacer saltar los cierres.

La solución que encontraron a este problema, fue calentar los envases en un recinto cerrado que contuviera vapor a presión, un autoclave, de esta forma la presión desarrollada en el interior del envase se contrarresta con la del vapor del interior del recinto y el riesgo de explosión se reduce. La primera patente de un autoclave específico para calentar envases de alimentos se debe a un sucesor de Appert, Raymond Chevallier-Appert.

En la segunda mitad del siglo XIX se introdujeron múltiples mejoras, no sólo en el desarrollo de los autoclaves sino también en los envases, mejoras que han continuado en el siglo XX hasta llegar a los diferentes tipos de equipos y de envases que se conocen actualmente.

1.2. Fundamentos de los tratamientos térmicos

El objetivo principal del tratamiento térmico de los alimentos envasados es asegurar la destrucción de todos los organismos vivos capaces de deteriorarlos o de perjudicar la salud del consumidor. Es necesario, además, conservar al máximo las cualidades organolépticas y nutritivas de la materia prima original y determinar con precisión el tiempo de tratamiento, que depende de la termorresistencia de los microorganismos contaminantes, la naturaleza química y física del alimento y la velocidad de penetración del calor hasta el punto de calentamiento más lento (Fellows, 1994).

Bajo el título de tratamientos térmicos se suelen englobar todos los procedimientos que tienen entre sus fines la disminución de la carga microbiana y cambios físicos y/o químicos del sistema por la acción del calor. Entre ellos se encuentran la pasteurización, la esterilización, el escaldado, la cocción, etc. Los dos primeros tienen como objetivo principal la destrucción de parte de la flora microbiana, y en los últimos, si bien la aplicación no posee como finalidad la muerte de microorganismos igual se consigue cierta disminución de la carga.

El calentamiento puede, además de reducir la población microbiana del alimento, inactivar enzimas, coagular proteínas, etc. El tratamiento térmico es sólo una parte del proceso global, que puede incluir también, por ejemplo, la adición de conservadores químicos, el adecuado envasado del producto, o el almacenamiento a temperaturas reducidas. No es requisito imprescindible que el calentamiento elimine la totalidad de los gérmenes viables. En cambio sí es necesario que el producto resultante sea aceptable para el consumidor e inocuo tras un determinado período de almacenamiento en condiciones definidas.

A los efectos prácticos, es conveniente dividir los tratamientos térmicos en dos categorías, de acuerdo a la temperatura de trabajo:

- 1) temperaturas inferiores a 100°C
- 2) temperaturas superiores a 100°C

Los tratamientos inferiores a 100°C suelen denominarse procesos de *pasteurización* y están generalmente destinados a higienizar el producto, a librarlo de todos los gérmenes patógenos y algunos, pero no necesariamente todos, los microorganismos alterantes que, de estar presentes, serían capaces de crecer en las condiciones de almacenamiento. Un buen ejemplo de esto lo encontramos en la tecnología láctea: la pasteurización puede destruir todos los gérmenes patógenos de la leche afectando muy poco el resto de los componentes, conservando prácticamente todos los nutrientes.

En el enlatado comercial de productos ácidos, como frutas ($3.7 < \text{pH} < 4.5$) todavía se utilizan procesos de esta naturaleza. Cuando se trata de productos menos ácidos los tiempos de permanencia a 100°C necesarios para obtener un producto microbiológicamente aceptable son demasiado largos y es deseable calentar por encima de 100°C para acortar el proceso y obtener un producto de mejor calidad.

Como ya se ha señalado el pH influye considerablemente en la naturaleza del tratamiento térmico requerido para la obtención de un producto aceptable. Los productos industrializados ofrecen distintos pH dentro del rango 3-7.

El efecto inhibitor de los ácidos empieza a manifestarse a pH 5.3, y el desarrollo de *Clostridium botulinum* y otros microorganismos patógenos sólo son inhibidos a pH inferiores a 4.5. Por debajo de pH 3.7 sólo pueden desarrollarse los hongos. Por lo tanto el punto clave que permite dividir la intensidad del tratamiento térmico es el pH 4.5.

Vemos entonces que es posible clasificar a los alimentos de acuerdo al grado de acidez y en función de dicha clasificación, predecir el tipo de organismo de deterioro responsable de su alteración. Dicha clasificación se muestra en la tabla 1.1.

Tabla 1.1 Clasificación de los alimentos envasados por su acidez

Acidez del alimento	Ejemplos
Alimentos poco ácidos (pH > 5)	Productos cárnicos, productos marinos, leche y ciertas hortalizas
Alimentos semiácidos (4.5 < pH < 5)	Mezclas de carne y vegetales, sopas y salsas
Alimentos ácidos (3.7 < pH < 4.5)	Tomates, peras, higos, ananá y otras frutas
Alimentos muy ácidos (pH < 3.7)	Encurtidos, pomelo y jugos cítricos

En los productos de baja acidez (pH > 4.5) el tratamiento térmico debe ser capaz de inactivar los microorganismos más termorresistentes, lo que exige el uso de tratamientos a temperaturas superiores a 100°C, proceso que habitualmente se denomina “**esterilización**”. Este término, estrictamente hablando, resulta incorrecto porque implica la ausencia total de gérmenes viables y como la termodestrucción de los microorganismos sigue un curso logarítmico la esterilidad total es imposible de alcanzar, aunque el tiempo de tratamiento se prolongue al infinito. Es por ello que es más correcta la denominación “**esterilización comercial**” que puede definirse como el tratamiento térmico diseñado para destruir prácticamente la totalidad de los microorganismos y sus esporas que, de estar presentes, serían capaces de crecer en el alimento en las condiciones en que se va a almacenar y está asociado al riesgo de alteración que el industrial está dispuesto a asumir. La estabilidad significa, por tanto, que la gran mayoría de los envases son estériles pero que existe, no obstante, la probabilidad de que en algunos de ellos, algún microorganismo no patógeno sobreviva al tratamiento.

La intensidad del tratamiento se halla determinada por el tipo de microorganismo eventualmente presente en la materia prima. Entre los microorganismos patógenos esporulados eventualmente presentes en los alimentos de baja acidez (pH > 4.5) el *Clostridium botulinum* es el más peligroso ya que en su desarrollo anaeróbico elimina al medio una toxina muy potente. Aquellos alimentos en los que existe riesgo de contaminación por *Clostridium botulinum* se someten a procesos de esterilización equivalentes a doce reducciones decimales en la población de esporas de *Clostridium*

botulinum. Existe suficiente evidencia experimental que indica que el tratamiento 12 D (como se lo conoce) es suficientemente seguro. Desde un punto de vista estadístico, suponiendo una carga inicial de 1 espora/envase, la probabilidad de supervivencia de esporas es de una en un billón. Esto implica que por cada billón de envases que reciben un tratamiento de 12 D, si la carga inicial fuera de 1 espora/envase, existiría la probabilidad de que un único envase contuviera una espora superviviente.

En los alimentos moderadamente ácidos ($3.7 < \text{pH} < 4.5$), para calcular los tiempos y temperaturas de tratamiento se emplean otros microorganismos (como mohos y levaduras) o enzimas termorresistentes. El objetivo del tratamiento por el calor en los alimentos ácidos ($\text{pH} < 3.7$) consiste en inactivar sus enzimas y es por ello que en estos alimentos los tratamientos aplicados son más suaves.

El pH no es el único factor que influye sobre la naturaleza del tratamiento térmico requerido por el producto. La presencia de ingredientes osmóticamente activos como sal o azúcar afectará el crecimiento y las propiedades de la microflora.

En función de lo anteriormente mencionado podemos definir a la esterilización como aquella operación unitaria en la que los alimentos son calentados a una temperatura suficientemente elevada y durante un tiempo suficientemente largo, como para disminuir en los mismos la actividad microbiana y enzimática. Los alimentos, estabilizados por este sistema poseen una vida útil superior a seis meses. La esterilización de alimentos envasados provoca cambios sustanciales en su valor nutritivo y características organolépticas. Las mejoras en los procesos tecnológicos de esterilización van encaminadas, por lo tanto, a reducir efectos no deseados sobre los componentes nutritivos y las características organolépticas de los alimentos.

Durante la elaboración de diversos productos envasados, se requiere decidir con respecto a los tiempos adecuados de calentamiento por diferentes razones. Entre ellas:

- Mantener la calidad del producto
- Evitar daños irreversibles
- Ahorrar energía
- Disminuir costos
- Lograr las condiciones adecuadas para continuar con la siguiente operación

y como ya vimos, el tiempo de esterilización de un alimento depende de:

- La termorresistencia de los microorganismos y enzimas eventualmente presentes
- Los parámetros de la esterilización
- El pH del alimento
- El tamaño del envase
- El estado físico del alimento

Para determinar el tiempo de tratamiento necesario de un alimento para alcanzar la esterilidad comercial es preciso conocer la termorresistencia, tanto de los microorganismos, como de las enzimas presentes en el mismo, así como también disponer de datos para determinar la velocidad de penetración de calor en el envase durante el tratamiento térmico.

1.3. Termodestrucción de los microorganismos causantes de alteraciones

Tanto la estabilidad microbiológica como la calidad comestible de los alimentos tratados térmicamente resultan afectadas por la temperatura y duración del tratamiento térmico. Cuando el tratamiento es insuficiente pueden sufrir deterioro microbiano y por el contrario, si el tratamiento es excesivo, se ven reducidos su valor nutritivo y calidad organoléptica.

A los fines prácticos se puede suponer que la termodestrucción de las esporas bacterianas sigue un curso logarítmico, es decir, cuando una cantidad de esporas dada se mantiene a una temperatura constante suficientemente alta para que tenga lugar la destrucción térmica, el número de esporas por unidad de volumen decrece como se indica en la figura 1.1.

Entonces es válido asumir que la destrucción microbiana sigue una cinética de primer orden (Esty & Meyer, 1992), se obtiene:

$$-\frac{dC}{dt} = k_T \cdot C \quad (1.1)$$

Definiendo $D = \ln 10/k_T$ la expresión anterior se reduce a:

$$-\frac{d(\log C)}{dt} = \frac{1}{D} \quad (1.2)$$

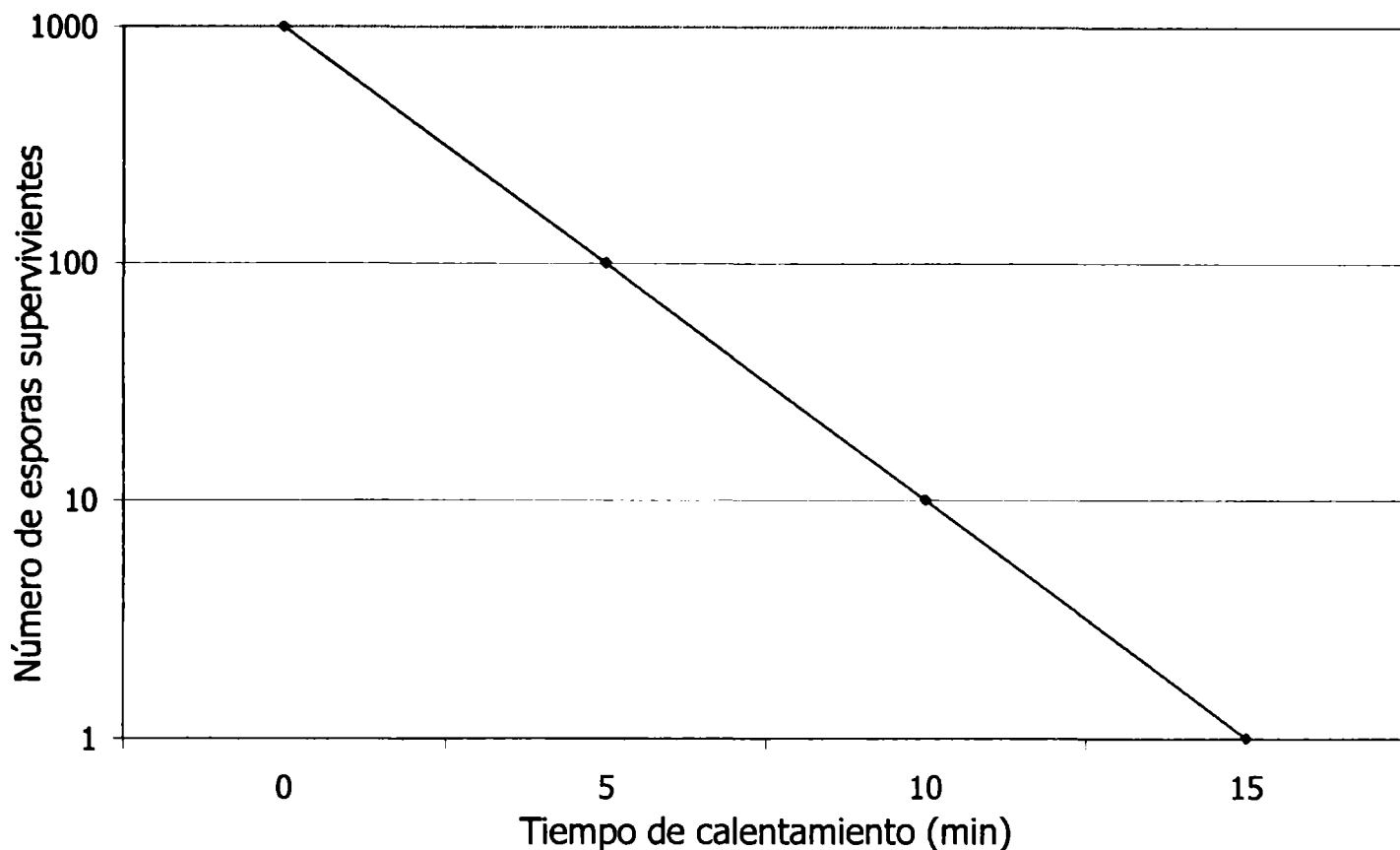


Figura 1.1. Gráfica de supervivencia de microorganismos

De ella se deduce que si la concentración de esporas es N_1 esporas/ml de suspensión en el tiempo $t = 0$ y N esporas/ml al tiempo $t = t$:

$$\log \frac{N}{N_1} = -\frac{t}{D} \quad (1.3)$$

Al tiempo de calentamiento necesario para la destrucción del 90% de los microorganismos presentes (reducción del número de microorganismos por un factor de 10) se le denomina "**tiempo de reducción decimal**" o valor D . La pendiente de la gráfica de supervivencia es $-1/D$. El valor D es una constante que depende de las diferentes especies microbianas (tabla 1.2). En particular, en la tabla 1.3, se presentan los valores de D para bacterias importantes en el diseño de procesos térmicos en conservas de pescado. Para efectuar los cálculos del tratamiento térmico se supone que el tiempo de reducción decimal es independiente de la concentración inicial de esporas y que depende de la temperatura. Un valor de D elevado indica una gran resistencia al calor (termorresistencia).

Del estudio de la ec. (1.3) se deduce que como N sólo puede hacerse igual a cero cuando t se haga infinito, es imposible esterilizar por completo una suspensión de esporas, de donde ha surgido el concepto ya mencionado de "esterilidad comercial". Si la concentración de una cepa dada de bacterias o esporas bacterianas en un producto

alimenticio se reduce por debajo de cierto valor lo suficientemente bajo como para que presente un riesgo de deterioro comercialmente aceptable, se dice que el producto es "comercialmente estéril" con respecto a aquel microorganismo. Si N_1 es la concentración inicial de un determinado tipo de espora en un producto alimenticio dado, antes de ser tratado térmicamente, el valor m se denomina exponente de reducción ya que indica el número de reducciones decimales que se logran con el tratamiento térmico. Si $m = 5$, por ejemplo, el tratamiento reduce la concentración por un factor de 10^5 .

$$m = \log \frac{N_1}{N_0} \quad (1.4)$$

La tabla 1.2 recoge los valores de m sugeridos de acuerdo al microorganismo responsable del deterioro. Debe observarse que estas cifras se basan en un valor de N_1 que exige una buena higiene en la preparación del producto.

1.3.1. Efectos de los cambios de temperatura

La velocidad de destrucción de los microorganismos además depende de la temperatura: a temperaturas elevadas mueren más rápidamente. Si se representan los valores de D a diferentes temperaturas, frente a los distintos tiempos de reducción decimal se obtiene una curva ó recta (figura 1.2) a cuya pendiente se le denomina z , que se define como el incremento de temperatura necesario para reducir a la décima parte el tiempo de reducción decimal.

De la figura 1.2 se puede observar que para dos valores cualquiera de D y sus correspondientes temperaturas T , se puede determinar z a partir de la siguiente relación:

$$\log(D_1 / D_2) = (T_2 - T_1) / z \quad (1.5)$$

Al valor de D medido a la temperatura de referencia (121.1°C) se lo suele designar como D_{ref} , por lo que la ecuación anterior queda definida como:

$$\log(D / D_{ref}) = -(T - T_{ref}) / z \quad (1.6)$$

que es equivalente a:

$$D = D_{ref} \cdot 10^{(T_{ref}-T)/z} \quad (1.7)$$

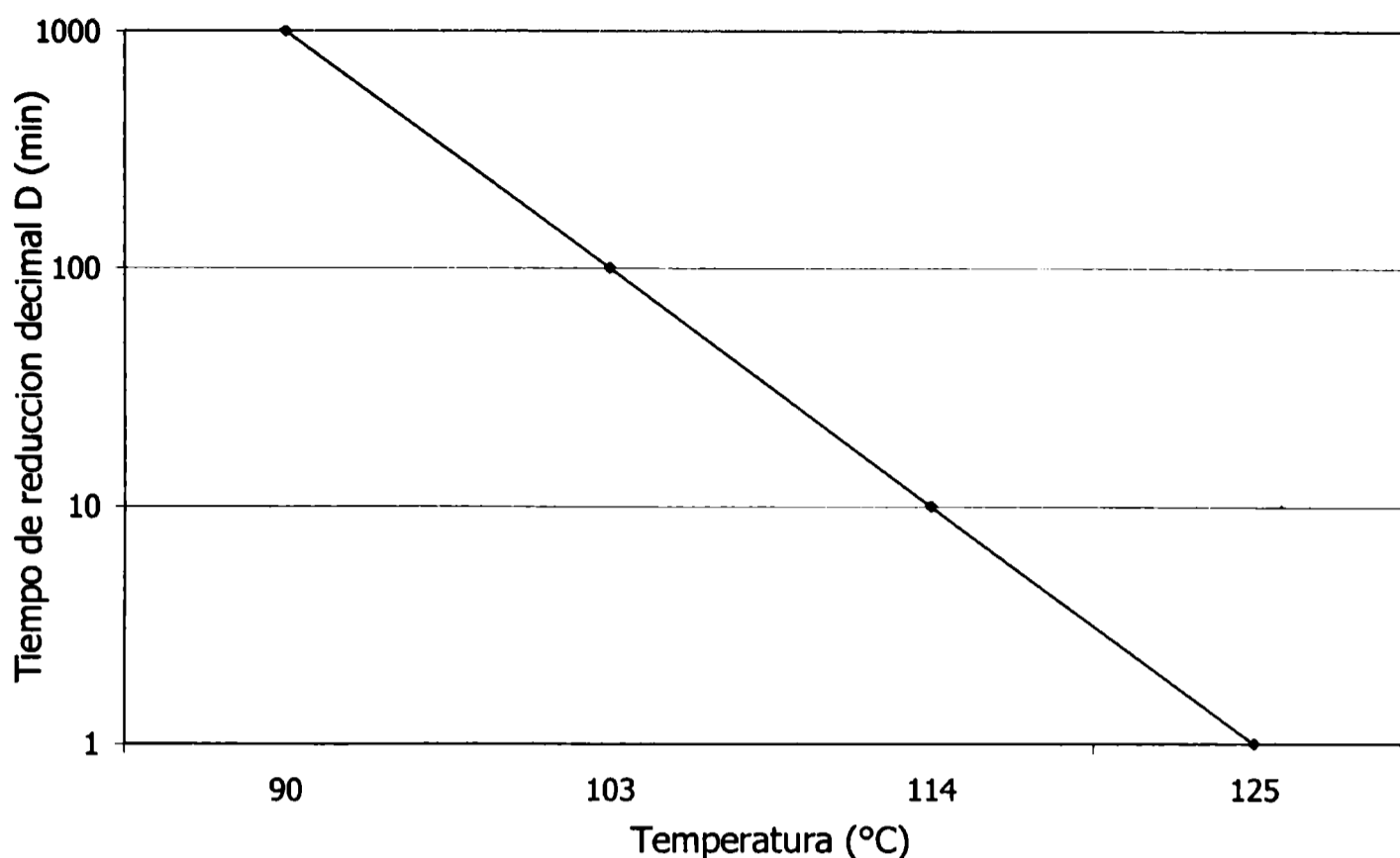


Figura 1.2. Gráfica de letalidad térmica

Los valores D y z se utilizan para caracterizar la resistencia frente al calor de una enzima, un determinado microorganismo o un componente de un alimento.

Tabla 1.2. Datos aproximados relativos al tratamiento térmico de algunos microorganismos de importancia en la alteración de alimentos

Microorganismo	T_{ref} (°C)	D(min) a T_{ref}	z (°C)	m	Tipo de producto
<i>C. botulinum</i>	121.1	0.1-0.3	8-11	12	Poco ácidos (pH>4.5)
<i>C. sporogenes</i>	121.1	0.8-1.5	9-11	5	Carnes
<i>B. stearothermophilis</i>	121.1	4-5	9.5-10	5	Leche y hortalizas
<i>C. thermosaccharolyticum</i>	121.1	3-4	7-10.5	5	Hortalizas
<i>B. subtilis</i>	121.1	0.4	6.5	6	Productos lácteos
<i>B. coagulans</i>	121.1	0.01-0.07	10	5	(4.2 < PH < 4.5) por ej. tomates
<i>C. pasteurianum</i>	100	0.1-0.5	8	5	(4.2 < PH < 4.5) por ej. peras

Tabla 1.3. Microorganismos de importancia en conservas de pescado

Organismo	Temperatura óptima aproximada de crecimiento (°C)	Valor D (min) a 121,1°C
<i>B. stearothermophilus</i>	55	4.0 - 5.0
<i>C. thermosaccharolyticum</i>	55	3.0 - 4.0
<i>D. nigrificans</i>	55	2.0 - 3.0
<i>C. botulinum</i> (tipos A & B)	37	0.1 - 0.23
<i>C. sporogenes</i> (PA 3679)	37	0.1 - 1.5
<i>B. coagulans</i>	37	0.01 - 0.07

Una medida del efecto letal de un proceso puede ser obtenida a partir del cociente D_{ref}/D a una dada temperatura, esta variable se conoce como velocidad de letalidad:

$$L = (D_{ref} / D) = 10^{(T - T_{ref})/z} \quad (1.8)$$

Dado que la temperatura en el punto de calentamiento más lento cambia con el tiempo, se hace necesario determinar la contribución de cada temperatura a la letalidad total del proceso. Una propiedad importante de la letalidad es que es aditiva, por lo que es posible cuantificar todo el proceso en todo el rango de temperaturas utilizado. El valor de letalidad integrado o letalidad acumulada es conocido como F.

1.3.2. Efecto del calor sobre las propiedades nutritivas y organolépticas

Las altas temperaturas que se alcanzan en el procesamiento térmico también producen la destrucción de la mayoría de las vitaminas, pigmentos y compuestos aromáticos. De forma semejante a la de los microorganismos, se asume que las cinéticas de deterioro siguen una reacción de primer orden. En la tabla 1.4 se muestran los valores de D y z correspondientes a algunas vitaminas y pigmentos que se definen de manera análoga a los respectivos D y z de los microorganismos. Por lo general estos valores son más elevados que los correspondientes a enzimas y microorganismos y es por ello que las características nutritivas y organolépticas de los alimentos soportan mejor los tratamientos más cortos a temperaturas más elevadas. Ello permite, por tanto, optimizar un tratamiento eligiendo una combinación de tiempo-temperatura (con la misma

capacidad destructora para microorganismos y enzimas) que mejore la retención del valor nutritivo y las características organolépticas del alimento.

Tabla 1.4. Termorresistencia de algunos microorganismos, enzimas, componentes nutritivos y organolépticos.

Componente	Fuente	pH	Z (°C)	D ₁₂₁ (min)	Rango de temperaturas (°C)
<i>C. botulinum</i>	Diversas	>4.5	5.5-10	0.1-0.3	104
<i>B. stearothermophilus</i>	Diversos	>4.5	7-12	4-5	110
Tiamina	Puré de zanahorias	5.9	25	158	109-149
Tiamina	Puré de arvejas	Natural	27	247	121-138
Lisina	Harina de soja	-	21	786	100-127
Clorofila a	Espinacas	6.5	51	13	127-149
Clorofila b	Espinacas	5.5	79	14.7	127-149
Peroxidasa	Guisantes	Natural	37.2	3	110-138

1.4. Importancia de las conservas de pescado

El sector conservero ha sido, es hoy y sin duda alguna, seguirá siendo en el futuro uno de los referentes económicos de la Argentina.

Es un sector de una gran tradición y modernidad, y esta importante tradición histórica se conjuga hoy día con su evolución y la incorporación de modernas tecnologías, mostrando una gran capacidad para adaptarse a lo largo del tiempo a distintas circunstancias.

Es un sector con una gran importancia socio-económica para las zonas en las que se encuentra ubicado y por el gran desarrollo industrial que conlleva, no sólo por su propia importancia, sino por la del número de industrias afines y suministradoras del mismo.

El profundo desarrollo tecnológico experimentado en la industria de conservas de pescados y mariscos, como consecuencia de los amplios estudios científicos realizados, permite afirmar que en las condiciones actuales de fabricación de las conservas de productos de la pesca, se consigue una retención de principios nutritivos tan buena y a veces mejor que la que se obtiene cuando se realiza la preparación culinaria de los mismos productos. El valor nutritivo de las conservas de productos de la pesca depende fundamentalmente del valor nutritivo del producto envasado, y por ello se debe

considerar a este respecto, que el pescado por su contenido en proteínas, materia grasa, vitaminas y sales minerales, constituye uno de los más importantes recursos alimentarios de primer orden.

En el proceso de fabricación de la conserva se eliminan una serie de porciones no comestibles (cabeza, vísceras, conchas, etc.), además de someterse el producto de la pesca a una deshidratación, por todo lo cual se encuentran aumentados los valores de principios nutritivos.

La conserva de pescado constituye una fuente de proteínas, con valores que ordinariamente superan el 20%, de excelente calidad, ya que contienen los aminoácidos esenciales, es decir, aminoácidos que no son sintetizados por el organismo, y que están contenidos en las proteínas de las diferentes conservas de pescados y mariscos.

El contenido en lípidos o materia grasa de las conservas de pescado es muy variable, ya que en ello influyen no sólo los contenidos de forma natural en las diferentes especies envasadas, sino también el aceite que se añade en el momento de fabricación, si la preparación es "en aceite".

En relación con las vitaminas, la aplicación de modernas tecnologías en el proceso de fabricación de conservas de productos de la pesca, ha permitido que su contenido sea el mismo que el de los productos cocinados en forma casera, y en ocasiones superior.

1.5. Importancia económica de la producción de conservas de pescado y mariscos en Argentina

La producción de conservas de productos pesqueros en Argentina se estima entre 50 y 60 millones de latas por año distribuidas según se indica en la tabla 1.5. Esta producción equivale a, aproximadamente, 3.000 toneladas de producto.

Tabla 1.5. Participación de las distintas conservas de productos pesqueros

Producto	Volumen de producción (%)
Atún	40
Caballa	25
Sardinas	20
Variedades	15

El atún es actualmente el producto estrella del sector industrial transformador de productos del mar a nivel mundial. Aspectos como su excelente sabor, su alto valor proteico, el aprovechamiento de gran parte de su carne y su ductilidad para su empleo como ingrediente en distintos platos han hecho que la conserva de atún tenga gran aceptación entre el consumidor y que su captura, transformación y comercialización esté en franca progresión, tanto en Argentina como a nivel mundial. Actualmente supone más del 40% de la producción de conservas de pescados y mariscos (tanto en valor como en volumen), figurando siempre entre las especies más capturadas. Igualmente, tienen gran relevancia el atún congelado y la preparación de lomos de atún congelados.

En lo que respecta a las exportaciones en Argentina, las estadísticas del INDEC hacen factible estimar la participación en valor y volumen por rama (clase) de la Industria de Alimentos y bebidas. Los resultados que se muestran en la tabla 1.6 corresponden al año 2005.

Se destaca la fuerte concentración de las exportaciones en cinco ramas de la industria alimentaria, entre las cuales figura en tercer lugar la rama correspondiente a las conservas de pescado.

Como se mencionó anteriormente los principales productos exportados son: atún y caballa, siendo los principales destinos de exportación los que se muestran en la figura 1.3.

La subsecretaría de Pesca y Agricultura, dependiente de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentos, presenta todos los años datos e información sobre el comercio exterior de productos pesqueros de la República Argentina (SAGPyA, 2007). Se toman como base los datos del INDEC y de la aduana. En la tabla 1.7 se observa la evolución de la exportación de conservas (tanto de pescado como de mariscos) durante los últimos años, tanto en volumen como en valor.

La demanda de productos sofisticados está limitada a sectores de alto poder adquisitivo que la satisfacen a través del consumo de productos importados aunque cada tanto surgen PYMEs orientadas a la producción de especialidades a nivel casi artesanal. En este aspecto deben mencionarse que los principales países proveedores de conservas de productos de mar, mayoritariamente conservas de mariscos y moluscos, son Brasil, Chile y Ecuador (figura 1.4).

Tabla 1.6. Participación en valor y en volumen de las distintas ramas de la industria de Alimentos y bebidas

Rama	Participación en valor	Participación en volumen
Aceites y grasas	62.05 %	83.88 %
Carne y productos cárnicos	11.67 %	2.45 %
Conservas de pescado y productos de pescado	7.37 %	1.65 %
Conservas de frutas, legumbres y hortalizas	4.81 %	2.31 %
Productos Lácteos	4.81 %	0.91 %
Vinos	2.11 %	0.59 %
Productos de molinería	1.80 %	4.26 %
Cacao y chocolate y productos de confitería	1.42 %	0.31 %
Otros productos alimenticios	1.23 %	0.57 %
Bebidas malteadas y de malta	0.68 %	0.85 %
Almidones y productos derivados del almidón	0.45 %	0.64 %
Azúcar	0.44 %	0.74 %
Alimentos preparados para animales	0.41 %	0.33 %
Productos de panadería	0.34 %	0.13 %
Destilación, rectificación de bebidas alcohólicas	0.21 %	0.17 %
Bebidas no alcohólicas	0.11 %	0.13 %
Pastas alimenticias	0.09 %	0.07 %

Tabla 1.7. Volúmenes y valores de exportación de conservas de pescado y mariscos

Descripción	2001		2003		2005		2007	
	Vol.	Valor	Vol.	Valor	Vol.	Valor	Vol.	Valor
Conservas de pescado	846	3737	1556	3681	2167	7494	2795	10050
Conservas de mariscos	348	3667	738	3627	607	3928	250	1952

Nota: Volumen en toneladas y valor en 10³ U\$S

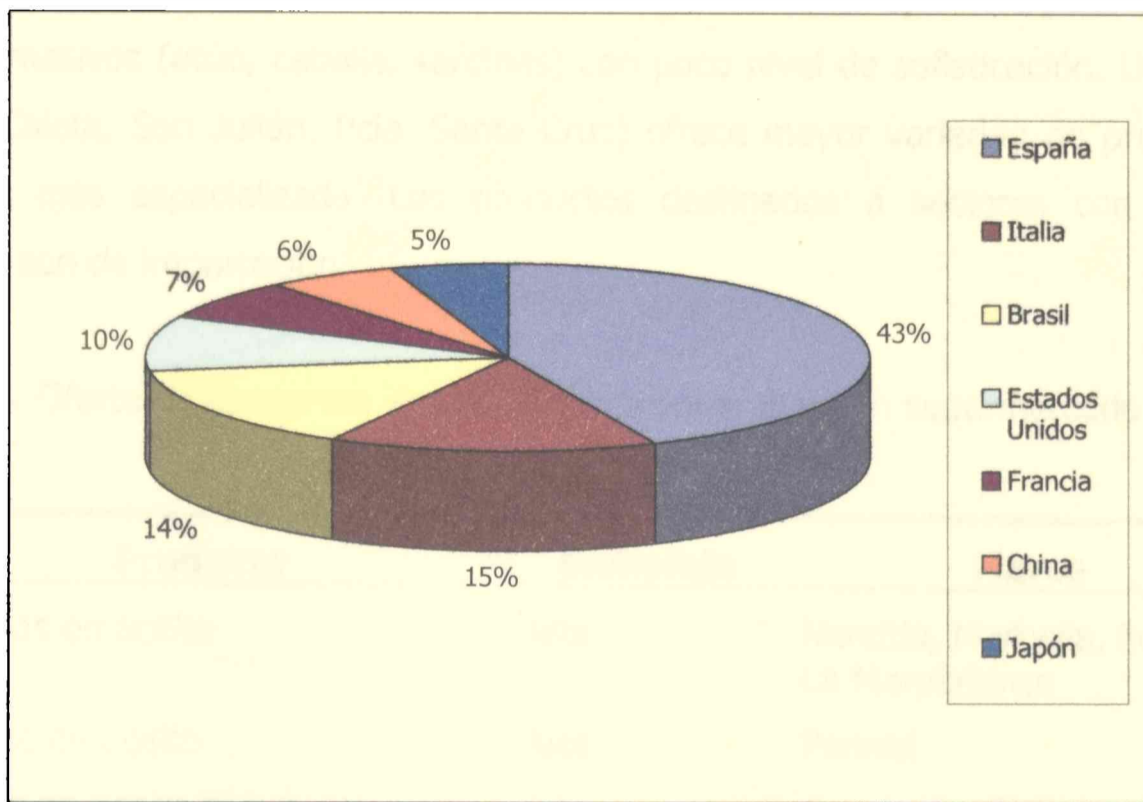


Figura 1.3. Principales destinos de exportación de conservas de productos de mar.

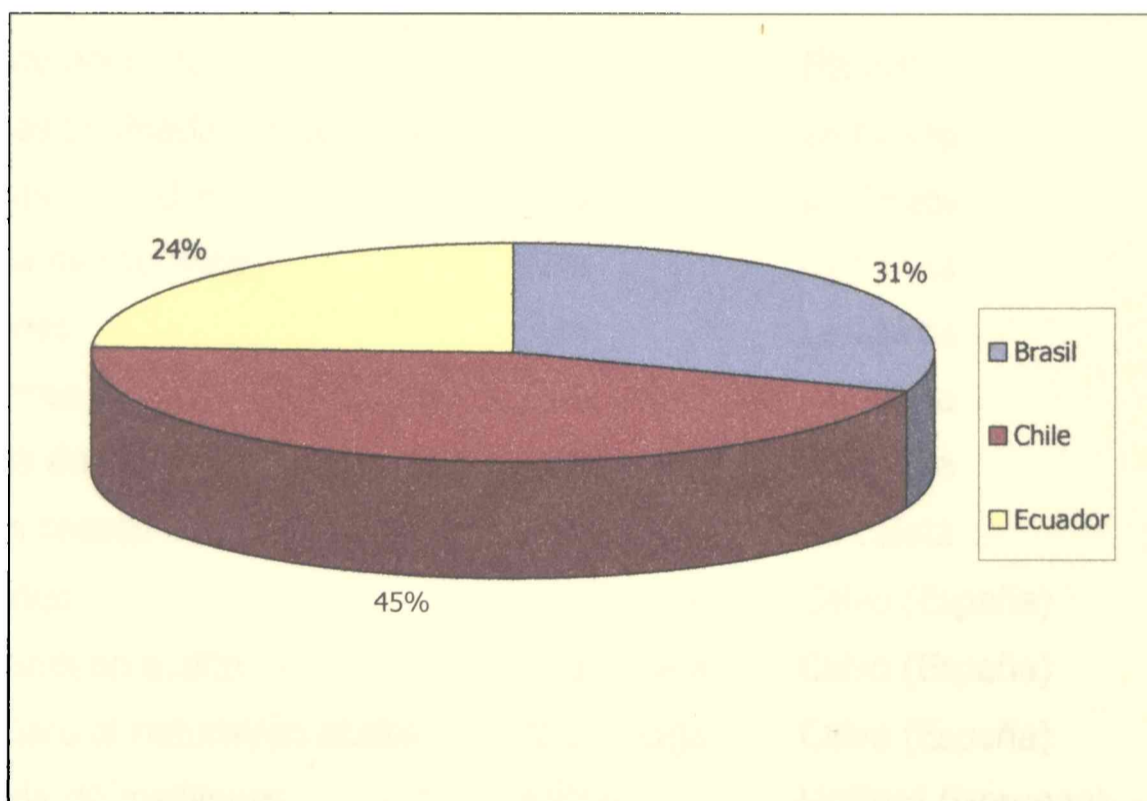


Figura 1.4. Principales proveedores del mercado Argentino de conservas de productos de mar.

En cuanto a la producción argentina, la primera planta elaboradora de conservas de pescado que se estableció en Argentina (Mar del Plata) fue de la firma Benvenuto y lo hizo en 1933. Comercializa los productos La Campagnola y Nereida.

En la tabla 1.8 se muestra la oferta de productos pesqueros en conserva en un supermercado de Mar del Plata. Se observa que las empresas marplatenses ofrecen productos masivos (atún, caballa, sardinas) con poco nivel de sofisticación. Una empresa chica (La Caleta, San Julián, Pcia. Santa Cruz) ofrece mayor variedad de productos con producción más especializada. Los productos destinados a sectores con alto poder adquisitivo son de importación.

Tabla 1.8. Oferta de conservas de productos pesqueros en un supermercado de Mar del Plata.

Producto	Embalaje	Marca
Sardinas en aceite	lata	Nereida, Marbella, Pennisi, La Marplatense
Merluza en aceite	lata	Pennisi
Caballa en aceite/al natural	lata	Pennisi, La Campagnola
Caballa en salsa tomate	lata	La Campagnola
Atún natural/en aceite	lata	La Campagnola, Pennisi
Calamares en aceite	lata	Pennisi
Lomo de anchoita	lata	Pennisi
Sardinas ahumadas en aceite	lata	La Caleta
Sardinas en aceite	lata	La Caleta
Cazuela de mariscos	lata	La Caleta
Mejillones	lata	La Caleta
Calamares en su tinta/en aceite	lata	La Caleta
Cazuela de calamar	lata	La Caleta
Salmón rosado al natural/en aceite	lata	La Caleta
Mejillones	lata + caja	Calvo (España)
Calamares en aceite	lata + caja	Calvo (España)
Atún Claro al natural/en aceite	lata + caja	Calvo (España)
Ensalada de mejillones	vidrio	Linjford (Noruega)
Mejillones marinados	vidrio	Linjford (Noruega)
Atún al natural	lata	Escudo del oro (Brasil)

Otros productos

La oferta de productos pesqueros a nivel mundial es muy variada. Otros productos ofrecidos son: salmón, ostras, mejillones, almejas, calamares, calamaretos, pulpos,

caracoles, langostinos, cangrejo (centolla), langosta, caviar, pastas y untables, platos preparados como cazuela o chupín, etc.

Estos datos evidencian que aún hace falta incorporar mejoras en los procesos y tecnologías aplicadas en el sector a fin de poder ofrecer productos de mayor valor agregado, tanto para abastecer al mercado interno como eventualmente el externo.

Estas características en parte han definido el tema de estudio del presente trabajo de tesis.

OBJETIVOS

CAPITULO II

Objetivos

2.1. Objetivo general

El objetivo general de esta tesis fue:

✓ Caracterizar la respuesta térmica de alimentos envasados, tanto de productos de tipo conductivo como de tipo mixto, procesados en autoclaves batch.

✓ Optimizar del tratamiento térmico de alimentos envasados considerando dos funciones objetivo:

- Maximizar la retención de un determinado parámetro de calidad.
- Minimizar el tiempo de tratamiento.

2.2. Objetivos específicos

2.2.1. Diseño del procesamiento térmico

El objetivo de esta sección es desarrollar un método simplificado de predicción de la temperatura del centro térmico que permita el diseño del proceso considerando tanto condiciones externas constantes como variables. Para ello se procederá a:

-
- Caracterizar, mediante funciones de transferencia discretas, la respuesta térmica de dos productos de interés:
 - **Conductivo:** Se estudiará la respuesta de alimentos sólidos, donde la transferencia de calor se produce totalmente por conducción. En este caso el estudio se realizará sobre el sistema modelo: pasta de atún.
 - **Mixto:** Se estudiará la respuesta de productos particulados que poseen un componente líquido que aporta el carácter convectivo de la transferencia de calor y el alimento sólido que aporta el carácter conductivo. En este tipo de productos los mecanismos de transferencia de calor en el interior del envase son, simultáneamente, conducción y convección. En este caso el estudio se realizará sobre conservas de mariscos: mejillones en salmuera.

 - Determinar las historias térmicas por dos vías:
 - **Experimental:** Se medirá la respuesta térmica mediante termocuplas, en distintos puntos internos del envase frente a una señal escalón de la temperatura externa.
 - **Simulación Numérica:** Se resolvió por elementos finitos el balance de la ecuación de calor. Para ello se utilizó el software comercial FEMLAB, que tiene un módulo específico para la resolución de problemas de transferencia de calor. De esta forma se obtienen de forma numérica los coeficientes de la función de transferencia.

 - Obtener expresiones generales de los coeficientes de la función de transferencia $F(z)$ en función de las dimensiones características de los envases (diámetro y altura) y del intervalo de muestreo, empleando los envases típicos utilizados fundamentalmente en la industria conservera.

 - Vincular las funciones de transferencia del centro térmico al cálculo de la letalidad acumulada, a fin de diseñar correctamente el proceso de esterilización.

2.2.2. Optimización del procesamiento térmico

El objetivo de esta sección es demostrar que realizando el procesamiento térmico bajo condiciones externas variables puede lograrse el mismo efecto preservador que con un tratamiento a temperatura externa constante, con un impacto menos severo sobre la calidad organoléptica del producto. Para ello se procederá a:

- Implementar rutinas de optimización, utilizando las técnicas de optimización multiobjetivo de MATLAB en interfase con FEMLAB para encontrar los valores óptimos deseados que a su vez cumplan con las restricciones del problema.

- Considerar distintas funciones objetivo:
 - **Maximizar la retención global de nutrientes:** Se considerará la retención volumétrica de tiamina en pescado.
 - **Maximizar la retención superficial de tiamina:** Se considerará la retención de tiamina en la superficie del alimento.
 - **Minimizar el tiempo total de proceso**

- Evaluar distintas condiciones de operación del autoclave:
 - **CRT** (temperatura constante de autoclave)
 - **VRT** (temperatura variable de autoclave): Se considerarán escalones sucesivos, rampas sucesivas y función exponencial.

***DISEÑO DEL
PROCESAMIENTO TÉRMICO***

CAPITULO III

Diseño del procesamiento térmico

3.1. Introducción

La figura 3.1 muestra un diagrama esquemático de los elementos clave involucrados en el diseño de un procesamiento térmico. La historia térmica (tiempo-temperatura) del alimento durante el procesamiento térmico debe conocerse y debe ser correctamente acoplada a datos de destrucción microbiana de manera de calcular el efecto del tratamiento térmico sobre la destrucción de los microorganismos. Sin embargo, asociado a la destrucción de los microorganismos o a la destrucción de otros agentes indeseables, el tratamiento térmico presenta efectos negativos ya que la temperatura incide sobre la degradación de nutrientes y otros atributos de calidad. Normalmente los microorganismos son menos resistentes al calor que los distintos parámetros de calidad, lo que permite optimizar el proceso atendiendo a la evolución de la temperatura del mismo. Es por ello que de todas las combinaciones tiempo-temperatura que producen la misma destrucción microbiana, debe elegirse aquella que maximiza la calidad del producto. Esto se logra a través de técnicas de optimización conociendo la cinética de degradación del o de los parámetros de calidad a considerar y del cálculo, para un determinado procesamiento térmico, de la retención de dicho parámetro de calidad. De lo anteriormente mencionado se desprende que previo al diseño del procesamiento térmico debe establecerse el microorganismo de referencia para la obtención de un producto aceptable así como también el o los factores de calidad objetivo a maximizar (Stoforos, 1995).

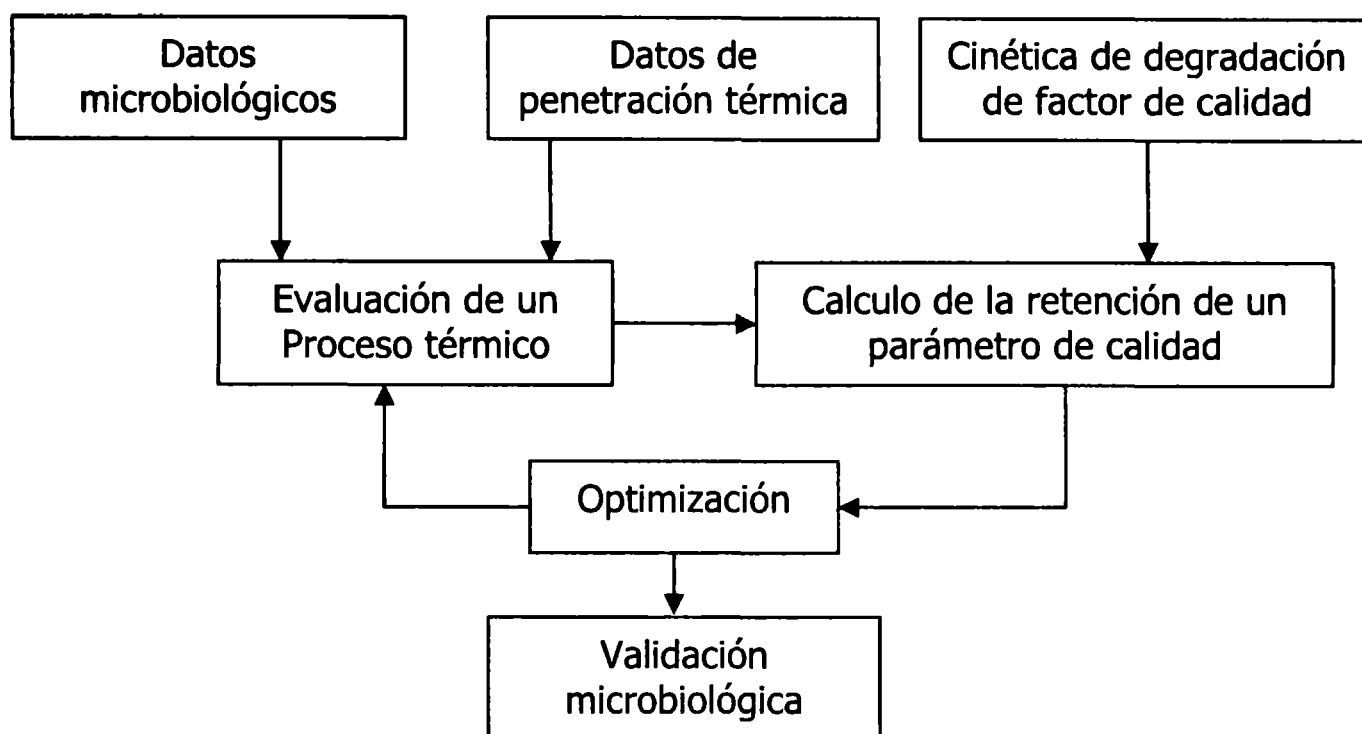


Figura 3.1. Diagrama esquemático de los elementos clave involucrados en el diseño del procesamiento térmico.

En el Capítulo I, se mencionó la importancia del conocimiento de la cinética de destrucción microbiana para llevar a cabo el diseño del procesamiento térmico. También se detallaron las ecuaciones o modelos de inactivación microbiana ampliamente utilizados en el cálculo del procesamiento térmico.

Como se explicó en el Capítulo I, la ec. (1.2) puede cuantificar la destrucción microbiana sólo cuando la temperatura del alimento que está siendo sometido a un determinado tratamiento térmico es constante. Cuando la temperatura del alimento es variable, $T(t)$, la ec. (1.2) debe considerar la dependencia de D con la temperatura. Entonces, incluyendo la ec. (1.7) en la ec. (1.2) e integrando la expresión resultante entre el tiempo inicial (t_a) y el tiempo final de proceso (t_b), se obtiene (Merson y col., 1978):

$$-\int_{C_s}^{C_b} d(\log C) = \frac{1}{D_{ref}} \int_{t_a}^{t_b} 10^{(T(t)-T_{ref})/z} dt \quad (3.1)$$

Como se observa, debe conocerse la funcionalidad de la temperatura del alimento con el tiempo durante el procesamiento para poder evaluar la integral del lado derecho de la ec. (3.1) y de esta manera evaluar los efectos del tratamiento térmico sobre la destrucción microbiana.

Vinculando las ecs. (1.3) a (1.8) con la integral planteada en la ec. (3.1), obtenemos dos expresiones equivalentes para el valor F:

$$F_{T_{ref}}^z = D_{T_{ref}} \cdot (\log C_a - \log C_b) \quad (3.2)$$

$$F_{T_{ref}}^z = \int_{t_a}^{t_b} 10^{(T(t)-T_{ref})/z} dt \quad (3.3)$$

Sin embargo, cada expresión está asociada a conceptos diferentes. La ec. (3.2) define un valor de **F requerido**, es decir el valor **F de referencia** que asegura una determinada reducción en la carga microbiana. Este F requerido depende de las características propias del producto y del microorganismo de referencia y suele simbolizárselo como F_0 cuando $z = 10^\circ\text{C}$ (18°F) y $T_{ref} = 121,1^\circ\text{C}$ (250°F). La segunda expresión (ec. (3.3)), define un valor **F del proceso**, es decir, el valor F obtenido durante la exposición a una determinada combinación tiempo-temperatura.

De esta forma, para evaluar la bondad de un tratamiento térmico determinado deberá calcularse la letalidad del proceso F que deberá ser al menos igual al valor de referencia F_0 .

Es evidente que el conocimiento del perfil de temperatura en el centro térmico del alimento es esencial para el diseño o la evaluación de un proceso térmico particular. Cada perfil de temperatura es una función unívoca de las propiedades térmicas y físicas del alimento, de las características del proceso y de las condiciones de procesamiento. Es inherente, entonces, en el cálculo del procesamiento térmico o en el diseño de procesos óptimos la necesidad de contar con un modelo matemático que permita predecir la evolución de la temperatura en el alimento en función de las condiciones de procesamiento.

3.2. Antecedentes en el procesamiento térmico de alimentos

3.2.1. Sistemas Conductivos

Dado que la conservación de los alimentos por la aplicación de un tratamiento térmico es una de las técnicas de preservación más antiguas, el trabajo desarrollado y por ende los artículos existentes sobre cálculo de tratamientos térmicos son muchos comparados con otros procesos o tratamientos de conservación.

El objetivo de la siguiente sección es exponer una revisión de la literatura existente en lo que es el desarrollo de modelos de predicción de temperatura en el alimento, enumerando y detallando el trabajo realizado en el tema hasta el momento. Es importante tener en cuenta que estos modelos de predicción se basan en ciertas suposiciones que determinan la aplicabilidad y las restricciones a tener en cuenta para cada uno de ellos durante el cálculo del procesamiento térmico.

La primera evaluación cuantitativa realizada sobre la eficiencia de un tratamiento térmico aplicado a alimentos envasados fue inicialmente introducida por Bigelow y co-autores en el año 1920 en lo que se conoce como "Método General". Para el cálculo del valor F de proceso, este método se basa exclusivamente en datos experimentales y discretos de tiempo-temperatura y la evaluación de la integral de la ec. (3.3) se realiza gráficamente. Diversos trabajos complementarios posteriores buscaron hacer menos laborioso el Método General, entre ellos podemos mencionar métodos que incorporaban el uso de un papel especial (Schultz & Olson, 1940; Cass, 1947; Hayakawa, 1973 y Leonhardt, 1978) o trabajos que incorporaban técnicas de integración numérica como la regla trapezoidal (Patashnik, 1953), la regla de Simpson (American Can Co., 1952) o integración Gaussiana (Hayakawa, 1968). En cuanto a la evaluación de un set de datos de tiempo-temperatura se refiere, el Método General es tan exacto y preciso como lo es el método de integración utilizado.

La limitación de este método es suponer que la forma de la curva de letalidad vs. tiempo es única, independientemente del tiempo total de calentamiento. En base a esta "similitud geométrica" el Método General genera datos para tiempos de calentamiento diferentes a los medidos experimentalmente. El error del método es omitir que la forma de la curva de letalidad durante la fase de enfriamiento es una función de la diferencia entre la temperatura máxima del producto y la del medio de calentamiento al tiempo de cerrado de la válvula de vapor.

Para presentar el método con gráficos independientes de la temperatura del autoclave y la temperatura inicial, se trabajó con diferencias de temperatura adimensionales de la forma $(T_{aut}-T)/(T_{aut}-T_i)$ como una función del tiempo (Schultz & Olson, 1940). Es importante destacar que los autores también consideran temperatura de autoclave constante y temperatura inicial del producto uniforme.

Una limitación importante del método General, es que no ofrece procedimientos aceptables para extrapolar datos de temperatura del producto en función del tiempo de proceso.

El trabajo más relevante y referente en el tema fue el comenzado por Ball en el año 1923 (Ball, 1923; Ball, 1928; Ball & Olson, 1957), que sentó las bases para un nuevo grupo de procedimientos de cálculo tradicionalmente denominados "Métodos Fórmula". Este autor, basándose en la observación de que, en un gráfico semilogarítmico, la variación de la diferencia de temperatura entre el medio y el producto vs. tiempo es lineal, luego de una cierta demora inicial, propone expresar la temperatura del producto durante la fase de calentamiento a través de una sola ecuación (ec. 3.4).

$$T = T_{aut} - j_h (T_{aut} - T_i) \cdot 10^{-t_h / f_h} \quad (3.4)$$

En esta expresión f_h y j_h son parámetros empíricos que se obtienen de la representación gráfica de la diferencia de temperatura entre autoclave y producto vs. Tiempo y T_i es la temperatura inicial. El parámetro f_h representa el tiempo en minutos en que esta diferencia de temperatura decae un ciclo logarítmico y j_h es la ordenada al origen que se halla por extrapolación de la parte lineal de la curva de calentamiento y permite calcular la temperatura pseudo-inicial del producto al inicio de la fase de calentamiento, T_A . De esta forma:

$$j_h = \frac{T_{aut} - T_A}{T_{aut} - T_i} \quad (3.5)$$

Gráficos típicos correspondientes a los ciclos de calentamiento y enfriamiento se muestran en la figura 3.2. Los subíndices h y c corresponderán a las zonas de calentamiento y enfriamiento, respectivamente.

El método de Ball no tiene en cuenta la influencia de la temperatura inicial del producto. Aunque bajo las condiciones usuales de procesamiento, la temperatura del producto durante este período inicial de calentamiento es tal que la letalidad acumulada en el producto es despreciable, este período inicial puede ser de importancia en el caso de altas temperaturas iniciales de producto, altos valores de z o procesos con bajos valores requeridos de F.

Como puede observarse en la figura 3.2, una ecuación similar a la ec. (3.4) puede ser utilizada para predecir la temperatura del producto durante la fase de enfriamiento. Al contrario de lo que sucede en la fase de calentamiento, al inicio de la fase de

enfriamiento, la temperatura del centro del producto es elevada y aporta significativamente a la letalidad acumulada del proceso, por lo que la predicción de temperatura debe ser lo más exacta posible. Ball divide la etapa de enfriamiento en dos partes y propone una ecuación de predicción de temperatura para cada una de ellas. Una ecuación es la utilizada para predecir la temperatura del alimento en la porción curva inicial, es decir, para $0 < t_c < f_c \cdot \log(j_c / 0.657)$,

$$T = T_g + 0.3(T_g - T_{cw}) \cdot \left[1 - \left(\frac{1}{0.5275 \cdot \log(j_c / 0.657)} \right)^2 \cdot \left(\frac{t_c}{f_c} \right)^2 \right] \quad (3.6)$$

Y la otra para la parte final, es de decir la parte lineal de la etapa de enfriamiento, que corresponde a $t_c > f_c \cdot \log(j_c / 0.657)$:

$$T = T_{cw} + j_c (T_g - T_{cw}) \cdot 10^{-t_c / f_c} \quad (3.7)$$

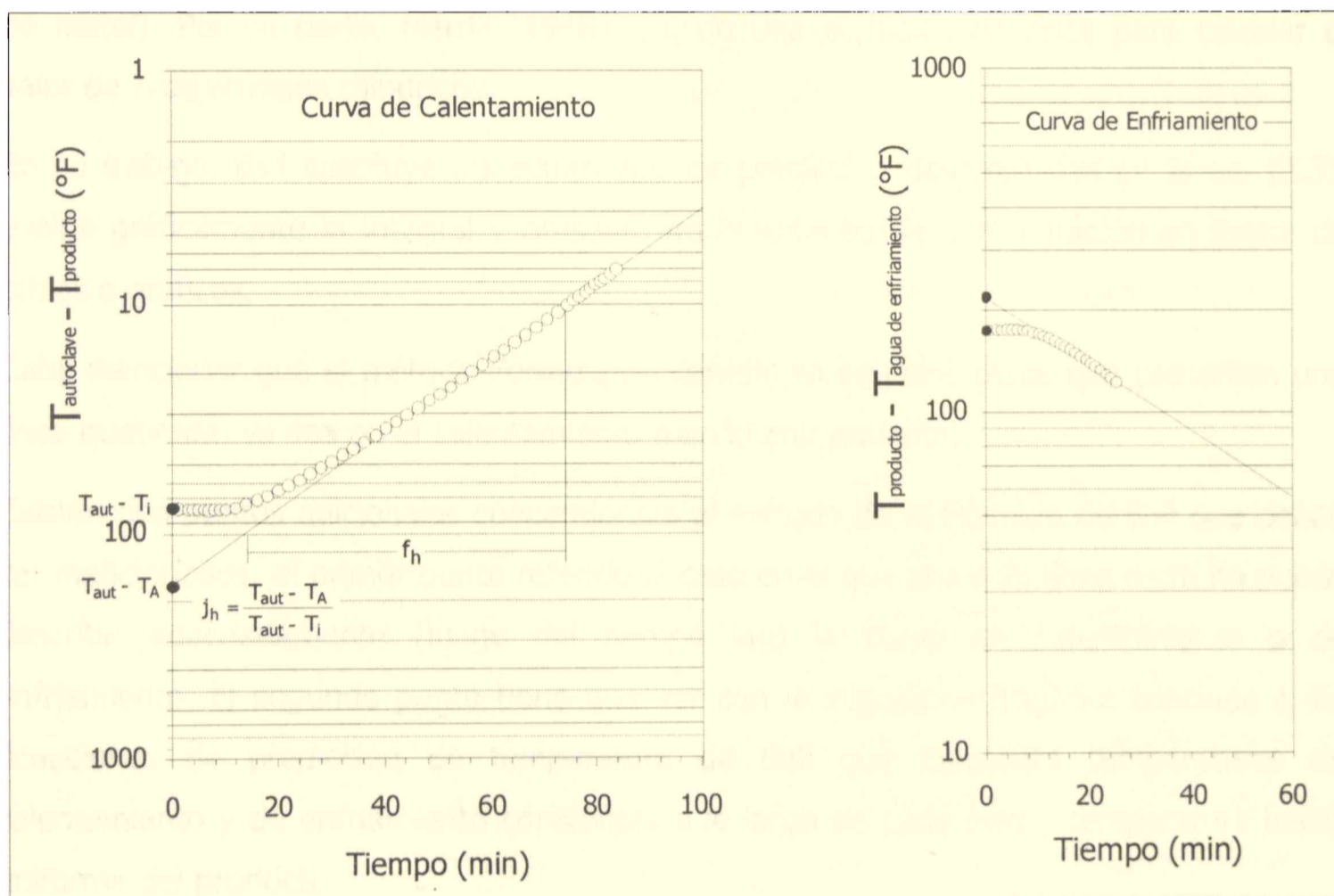


Figura 3.2. Curvas típicas de calentamiento y enfriamiento

Al igual que los parámetros f_h y j_h los valores de f_c y j_c también se determinan experimentalmente a partir de la curva de diferencia de temperatura entre el producto y

el medio vs. tiempo. El subíndice g corresponde a la condición de tiempo de cerrado de la válvula de vapor y el subíndice cw corresponde al agua de enfriamiento.

Debe notarse que varios de los investigadores que posteriormente siguieron el enfoque de Ball basaron sus ecuaciones de predicción de temperatura exclusivamente en los parámetros f_h y j_h para la curva de calentamiento y en los parámetros f_c y j_c para la de enfriamiento. Los métodos que utilizan los parámetros de penetración térmica f y j no están restringidos a un determinado mecanismo de transferencia de calor. Sin embargo, inherente a estos métodos se encuentra la suposición y por lo tanto el requerimiento de que el gráfico semilogarítmico sea lineal. Esta suposición sólo es válida para el calentamiento de productos puramente conductivos o perfectamente mezclados en el caso de convección forzada.

Schultz & Olson (1938) y Kopelman y col. (1981) reportaron factores para convertir el parámetro de penetración térmica f de un tamaño de envase a otro (para el caso de envases metálicos) o de un tipo de envase a otro (por ejemplo entre envases de vidrio y de metal). Por su parte, Merrill (1948), sugirió una ecuación empírica para calcular el valor de f_h de envases cilíndricos.

En su trabajo, Ball sustituye las ecuaciones de predicción desarrolladas en la ec. (3.3), evalúa gráficamente la integral y presenta los resultados de la integración en forma de tablas o gráficos.

Cabe mencionar que el método Fórmula no contempla aquellos casos que presentan una línea quebrada, ya sea en el calentamiento o en el enfriamiento.

Existen dos puntos adicionales concernientes al método de la Fórmula de Ball que deben ser mencionados: el primer punto referido al caso en el que una sola línea recta no puede describir adecuadamente (luego del tiempo lag) la curva de calentamiento o de enfriamiento. El segundo punto tiene que ver con la suposición implícita asociada a las ecuaciones de predicción de temperatura de Ball que considera temperaturas de calentamiento y de enfriamiento constantes a lo largo de cada fase y temperatura inicial uniforme del producto.

Con respecto al come-up time (CUT), es decir el tiempo que necesita el autoclave para alcanzar la temperatura constante de operación durante la fase de calentamiento, Ball considera, basado en observaciones experimentales, que el efecto sobre la letalidad de esta fase es equivalente al efecto de la exposición a la temperatura constante de

operación durante un tiempo igual al 42% del CUT. Sin embargo, el factor del 42% no siempre es aplicable. Varias investigaciones posteriores fueron realizadas para investigar la influencia del come-up time (Alstrand & Benjamin, 1949; Ramaswamy, 1993). No se presentan en el método de Ball correcciones similares para el tiempo lag que necesita el autoclave para alcanzar la temperatura del medio de enfriamiento.

A pesar de sus limitaciones el método de Ball es el método más ampliamente utilizado en la industria de alimentos. Indudablemente es el método que ha recibido más atención. Muchos investigadores se han ocupado de revisar y analizar el mismo en detalle, otros han tratado de simplificarlo para un determinado caso en particular o han tratado de extender su uso a diferente tipo de procesos.

En el año 1957, Ball y Olson (Ball & Olson, 1957) presentaron un nuevo método Fórmula. La principal diferencia entre éste y el original reside en que se provee de un valor de j_c variable. La ecuación de predicción de temperatura del producto durante la fase de calentamiento (ec. (3.4)) se mantiene igual y para la fase de enfriamiento este nuevo método expresa la temperatura en el centro del producto como una función de j_c . Al igual que en el método original de Ball los autores proveyeron una serie de tablas y ecuaciones con los resultados de la integración de la ec. (3.3).

Larkin & Berry (1991) modificaron la función hiperbólica propuesta en el método original de Ball para describir la fase lag inicial de la etapa del enfriamiento de manera de permitir la variación tanto del parámetro f_c como del j_c .

En una serie de tres publicaciones (Herndon y col., 1968; Griffin y col., 1969 y Grimn y col., 1971), Herndon y colaboradores introdujeron un nuevo grupo de tablas para el cálculo del procesamiento térmico. La ecuación de predicción de temperatura del producto durante la fase del calentamiento se mantuvo igual. Sin embargo, para el ciclo de enfriamiento desarrollaron nuevas ecuaciones empíricas basadas en la observación de la forma de varias curvas tanto de calentamiento como de enfriamiento graficadas tanto en coordenadas lineales como semilogarítmicas. Nuevamente los parámetros de penetración de calor f_c y j_c fueron los únicos parámetros utilizados para describir y extrapolar los datos experimentales de temperatura.

Hasta este punto hemos analizado métodos que se basaban en dos parámetros (f y j) determinados experimentalmente para cada una de las curvas (calentamiento y enfriamiento) y en modelos empíricos para la predicción de temperatura. Chiheb y col., (1994) presentaron un nuevo modelo empírico que constituye el primer intento de

aplicación de funciones de transferencia al procesamiento térmico de productos alimenticios. Partiendo de un sistema lineal de entrada-salida de orden n , con un tiempo de demora (d), la temperatura del centro del producto fue expresada como una sumatoria finita de N términos exponenciales.

Para temperatura constante de calentamiento y temperatura inicial uniforme del producto la ecuación durante la etapa de calentamiento para $N > 1$ y $t_h > d$ es:

$$T = T_{aut} - (T_{aut} - T_i) \cdot \sum_{i=1}^N \frac{(\tau_i)^{N-1}}{\prod_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^N (\tau_i - \tau_k)} \cdot e^{-(t_h - d)/\tau_i} \quad (3.8)$$

Para $N=1$, la ecuación se reduce a la ec. (3.4). Y para el caso de tiempos de calentamiento menores o iguales al tiempo de demora, la temperatura del producto no cambia; es decir que para $t < d$, $T = T_i$.

La ecuación de predicción de temperatura para el producto durante la etapa de enfriamiento se obtiene a partir de la ec. (3.8) aplicando el principio de superposición (válido para problemas de transferencia de calor gobernados por ecuaciones diferenciales lineales) considerando dos escalones sucesivos en la temperatura externa. Esto permite incluir temperatura de autoclave variable y además de calcular la temperatura del producto, es posible estimar un factor de corrección para determinar el porcentaje letal que aporta el autoclave durante la etapa del calentamiento inicial (come-up time).

En paralelo a la evolución del método de Ball, en el año 1951 Gillespy introduce un nuevo método para el cálculo del procesamiento térmico para productos de tipo conductivos (Gillespy, 1951). La base de este método es la resolución de la ecuación de conducción de calor en estado transitorio para el caso de un cilindro finito en dos dimensiones. Resuelve la ecuación de conducción de calor asumiendo temperatura inicial del producto uniforme y coeficiente de transferencia de calor infinito entre el medio de calentamiento (mantenido a temperatura constante) y las paredes del cilindro y aproxima la solución como una ecuación expresada como una serie en la que aparecen las funciones de Bessel (Carslaw & Jaeger, 1959). Se puede observar que luego de un cierto tiempo de calentamiento (cuya magnitud depende de las dimensiones del cilindro y de la difusividad térmica del producto) se puede aproximar la solución a un solo término de la serie. La comparación entre la ecuación original de Ball (ec. (3.4)) y la solución aproximada de un término de la serie, da la expresión teórica para los parámetros empíricos de penetración de calor f_h y

j_h . De esta forma se evidencia que el valor de j depende de las coordenadas de posición mientras que el valor de f depende de las dimensiones del envase y de la difusividad térmica del alimento. El valor teórico de j para el centro de la lata o del cilindro era igual a 2.04. Aunque la solución propuesta por Gillespy proviene de la resolución de la ecuación de conducción de calor, debe tenerse en cuenta que la solución está asociada a las condiciones de contorno e iniciales antes mencionadas y por lo tanto cualquier desviación con respecto a estas condiciones deben ser consideradas. En particular deben tenerse en cuenta la subida no instantánea del autoclave (come-up time) o la bajada no instantánea durante el enfriamiento, la existencia de un coeficiente de transferencia de calor finito entre el medio de calentamiento y las paredes del envase (lo que ocurre durante el calentamiento con un fluido que no es vapor y durante la etapa de enfriamiento) y la no uniformidad de la temperatura inicial (lo cual suele ser una situación habitual en la etapa de enfriamiento). El valor de j , se ve afectado en todos los casos anteriormente mencionados, y el valor de f sólo se ve afectado por la magnitud del coeficiente de transferencia de calor. Para superar estas limitaciones se presentan expresiones teóricas del valor de j para distintos perfiles de temperatura del autoclave (Hayaçawa, 1970), ecuaciones analíticas para j y f en el caso de coeficientes de transferencia de calor finito y una expresión general de j para el caso de la presencia de una distribución inicial de temperaturas, es decir para el caso de temperatura inicial no uniforme (Ball & Olson, 1957).

Para la etapa de calentamiento, Gillespy creó su tabla principal basada en la ec. (3.4). A pesar de permitir un valor variable para j_h , él recomendaba el uso del valor teórico de 2.04 de j_h (es decir, el valor de j para procesos sin come-up time y con temperatura inicial de producto uniforme). Para procesos sin come-up time pero con distribución inicial de temperatura en el producto, Gillespy sugería la utilización de una ecuación aproximada que permitía calcular un valor de j_h corregido. Para procesos con come-up time recomendaba la utilización nuevamente del valor teórico de j_h luego de una apropiada corrección del cero en el eje de tiempo (tomada al 50% del CUT).

Para la etapa de enfriamiento Gillespy remarcó la importancia de lo que él llamó como "overshooting", es decir, el aumento de la temperatura del centro del producto al momento del cerrado de la válvula de vapor. Ninguno de los métodos anteriormente mencionados contemplaba este efecto (salvo el método desarrollado por Chiheb). Gillespy asume que el enfriamiento comienza $0.03 f_h$ minutos luego del cerrado de la válvula de vapor y que el producto entero se encuentra a una temperatura uniforme e igual a la del

centro del envase. En términos matemáticos esta temperatura está dada por la ec. (3.4) cuando el tiempo de calentamiento t_h es igual a $t_0 + 0.03 f_h$. Y partiendo de esta temperatura inicial supuesta el producto se enfría siguiendo la forma de la ecuación obtenida por Gillespy a partir de la ecuación de conducción de calor. Como puede verse, el factor $0.03 f_h$ es un factor de corrección que en realidad debería ser una función de la verdadera distribución de temperaturas al momento del cerrado de la válvula de vapor, y la verdadera distribución de temperatura depende principalmente de la diferencia de temperatura entre el producto y el autoclave al tiempo de cerrado de la válvula de vapor así como también del tamaño del envase (Kopelman y col., 1982; Naveh y col., 1983).

Más tarde, Gillespy presenta un método mejorado para el caso de perfiles variables en la temperatura de los autoclaves para el caso de productos conductivos (Gillespy, 1953). De esta forma es posible calcular la temperatura del centro del producto durante todo el procesamiento térmico. La temperatura en el centro del producto puede ser calculada aplicando el teorema de superposición de Duhamel (ec. (3.9)) a la solución analítica para el caso de temperatura constante del medio:

$$u(t) = \int_{\lambda=0}^{\lambda=t} \Phi(\lambda) \frac{\partial}{\partial t} (U(t - \lambda)) d\lambda \quad (3.9)$$

La temperatura normalizada del producto, $U(t)$, se obtiene de la primera solución de la ecuación de conducción de calor presentada por Gillespy, evaluada para el centro del envase ($r=0$). Usando L/D como único parámetro Gillespy tabula las funciones correspondientes de manera tal que para un dado valor de f_h , temperatura inicial y para un dado perfil de temperatura del autoclave era posible calcular la temperatura en el centro del producto. Como un caso especial de temperatura variable de autoclave, Gillespy presenta el efecto de una subida de autoclave de tipo exponencial durante el come-up time.

Jakobsen aproxima las curvas de calentamiento y enfriamiento para el calentamiento de alimentos conductivos a una función secante hiperbólica (Jakobsen, 1954). El autor también describe un procedimiento para calcular la difusividad térmica de un producto a partir de datos experimentales.

Su ecuación de predicción está asociada a temperatura de autoclave constante y temperatura inicial uniforme del producto. Sin embargo, al igual que en el método original de Ball, sugiere correcciones para el caso de CUT del autoclave.

En el año 1973, Stumbo publica una serie de tablas que constituían el final de varias investigaciones (Stumbo & Longley, 1966; Jen y col., 1971; Purohit & Stumbo, 1973; Stumbo, 1973). Si bien el procedimiento para calcular la letalidad acumulada no difiere de la versión original del método fórmula de Ball, Stumbo utilizó la solución analítica de conducción de calor correspondiente a un cilindro finito para simular un gran número de condiciones de procesamiento expresando estos resultados en las tablas anteriormente mencionadas (consideró distintas difusividades térmicas, diferentes tamaños de envase etc). Otra novedad que incorporó en sus tablas fue la utilización de distintos valores del parámetro z .

En una serie de dos publicaciones (Pham, 1987 y Pham, 1990) este autor presenta una versión modificada del método de Stumbo. Al igual que este último autor, Pham también se basó en la ecuación de conducción de calor de un cilindro finito con coeficiente de transferencia de calor infinito en la superficie del mismo y temperatura inicial uniforme del alimento. Nuevamente se tomó en cuenta la variación del parámetro j_c para el cálculo de la temperatura en distintas posiciones del envase. Los resultados finales obtenidos de la integración de la ec. (3.3) fueron presentados de dos formas: en forma de tablas y a través de ecuaciones algebraicas de regresión con parámetros adimensionales. En su presentación, Pham incluyó tablas con parámetros tales como $z/(T_{aut}-T_i)$ y $z/(T_{aut}-T_{cw})$ que no fueron incluidos en las tablas de Stumbo.

Teixeira y colaboradores resolvieron el balance de conducción de calor (Teixeira y col., 1969) para describir la evolución de la temperatura del producto durante la esterilización de alimentos no necesariamente conductivos (Teixeira y col., 1992; Bichier & Teixeira, 1993). Al igual que en los dos métodos anteriores, se podía generar cualquier pendiente de la porción lineal del gráfico semilogarítmico tanto de la curva de calentamiento como de la de enfriamiento a partir del modelo de conducción de calor usando un valor apropiado de difusividad térmica aparente. Teixeira, a diferencia de los dos métodos anteriores, lo que hace es, en lugar de localizar la posición exacta de esta línea recta basada en un valor del parámetro j distinto del correspondiente al punto central, ajusta apropiadamente el tiempo de proceso por un factor equivalente a lo que sería un tiempo de demora. Para la curva de calentamiento este factor era igual a $f_h \log (2.04/j_h)$. De esta forma, las temperaturas calculadas a partir del modelo de conducción de calor para un determinado tiempo t representaban las temperaturas del producto para una dada curva de calentamiento de penetración de calor (caracterizada por determinados valores de f_h y

j_h) para $f_h \log (2.04/j_h)$ minutos antes del tiempo t . Como puede observarse, este procedimiento no podía ser utilizado para el caso en el que j_h fuera mayor que 2.04.

Se introdujo un cambio en el tiempo al inicio de la etapa de enfriamiento, basado en los valores f y j . En este modelo se asumió f_c igual a f_h (lo cual no es completamente cierto, dado que el coeficiente convectivo de transferencia de calor aplicable al enfriamiento no necesariamente debe ser igual al correspondiente a la fase de calentamiento).

Con el desarrollo de la tecnología y la incorporación de las computadoras, surge la implementación de métodos numéricos para la predicción de temperaturas. El primer trabajo que incluye este tema es el de Teixeira y col. (1969). Holdsworth (1997, 2004) y Wang & Sun (2006) presentan una extensa lista con los trabajos que aplican métodos numéricos realizados hasta el momento.

En los últimos años, se presentaron trabajos en los que se modela el proceso de esterilización mediante la utilización de redes neuronales y algoritmos genéticos (Afaghi y col., 2001; Mittal & Zhang, 2002; Goncalves y col., 2005).

3.2.2. Sistemas Mixtos

Existe muy poca información referida al análisis y simulación de este tipo de alimentos donde la transferencia de calor ocurre como consecuencia de la combinación de dos mecanismos: convección en el líquido y conducción en las partículas sólidas. Este tipo de problema es más complicado que el anterior y algunos esfuerzos relacionados con el nivel de esterilidad y con la pérdida de calidad fueron realizados para describir este mecanismo mixto (Welti-Chanes y col., 2005).

Son muy pocos los autores que desarrollaron modelos de predicción de temperatura tanto en la partícula como en el líquido de cobertura cuando la transferencia de calor ocurre en alimentos semilíquidos que presentan convección natural. Algunos de los trabajos se mencionan a continuación:

Ikegami (1977) desarrollo una ecuación basada en los parámetros f_h y j tanto para la fase sólida como para la fase líquida, que permitía predecir los perfiles de temperatura:

$$\frac{T_S - T_R}{T_0 - T_R} = \left(\frac{j \cdot j_2 \cdot f_2}{f_2 - f} \right) \cdot 10^{-t/f_2} \quad (3.10)$$

donde j y f son los parámetros de penetración térmica del sólido y j_2 y f_2 los del líquido. Las temperaturas T_s , T_R Y T_0 son las de la partícula, la del autoclave y la inicial del alimento respectivamente.

Rumsey (1984) se basó en un enfoque numérico para resolver el balance de energía, el cual modificó agregando un término que representa el gradiente de temperatura en la partícula:

$$m_1 c_1 dT_1 / dt + n_p m_p c_p dT_p / dt = U_c A_c (T_R - T_1) \quad (3.11)$$

donde m es la masa, c es el calor específico, n es el número de partículas y los subíndices que se refieren 1 al líquido, p a la partícula, R el autoclave y c en envase. La distribución de temperatura dentro de la partícula T_p era obtenida usando la solución de la ecuación de conducción de calor en estado transitorio para la geometría correspondiente.

Uno de los trabajos más importantes fue el realizado por Lekwauwa & Hayakawa (1986). Estos autores desarrollaron un modelo que incluía las siguientes suposiciones:

- ✓ Temperatura inicial uniforme en las partículas, la cual no necesariamente coincidía con la temperatura del líquido de cobertura
- ✓ Ambos componentes, el sólido y el líquido, tenían propiedades homogéneas, isotrópicas e independientes de la temperatura
- ✓ Los tamaños de partícula estaban estadísticamente distribuidos (gamma)
- ✓ Coeficiente de transferencia de calor constante entre la partícula y el seno del líquido
- ✓ Coeficientes de transferencia de calor distintos para enfriamiento y calentamiento.

La técnica utilizada para determinar la distribución de temperatura de las partículas sólidas fue aplicando el teorema de Duhamel a la respuesta (modelada en términos de f_h y j) obtenida a través del cambio escalón en la temperatura del líquido. Se planteó el balance de energía de todo el sistema considerando la transferencia de calor entre el medio externo de calentamiento y el líquido del envase y entre este último y las partículas.

Otro trabajo que también utilizó el balance de energía fue el de Sastry (1984), el autor propone una correlación para determinar el coeficiente de transferencia de calor de champiñones en agua envasados en envases de aluminio.

Stoforos y Merson (1990) desarrollaron una técnica para determinar el coeficiente de transferencia de calor entre el líquido y la partícula utilizando solo el dato de temperatura del líquido, resolviendo el balance de energía modificado para partículas usando la transformada de Laplace.

Márquez y col. (2003) utilizan funciones de transferencia para simular el procesamiento de conservas de fruta fina en frascos de vidrio, analizando la influencia del tamaño del envase y el tamaño de la fruta en los tiempos de demora.

Como puede verse, poco y nada es lo realizado sobre este tema, dada la complejidad del sistema en estudio. Recién en este último tiempo, con la implementación de los métodos numéricos y mediante el método de volúmenes finitos, Abdul Ghani y col. (2006), utilizan un software comercial de fluidodinámica (CFD) y predicen, por primera vez en este tema, la distribución de temperaturas y la ubicación de la zona de calentamiento más lento de un envase conteniendo rodajas de ananá en un líquido de cobertura. Este trabajo se simplifica asumiendo que las rodajas están dispuestas unas sobre otras formando un cilindro compacto, conductivo, dentro del envase, lo cual facilita la resolución de este tipo de problema. Lespinard y col. (2009) estudiaron el escaldado de champiñones. En su trabajo acoplan una cinética de encogimiento al balance de calor utilizando el método de los elementos finitos con dominio irregular para predecir la distribución de temperaturas en el champiñón. Determinaron experimentalmente el efecto de distintos procesos de escaldado sobre la textura y el color de los champiñones y los compararon con los valores de cocción predichos a partir de las temperaturas simuladas.

No encontramos en la bibliografía especializada trabajos que permitan determinar la ubicación de la zona o punto de calentamiento más lento de un sistema mixto que está conformado por partículas sólidas, de geometría irregular (como en el caso de los mejillones), inmersas en un líquido de cobertura. Es claro que, a diferencia de lo que ocurre en los alimentos puramente conductivos, la ubicación del centro térmico (punto de calentamiento más lento) constituye una tarea difícil que depende de los patrones de flujo transitorios y de los perfiles de temperatura tanto en el líquido como en las partículas sólidas. Debe tenerse en mente que la utilización de los métodos mencionados previamente, como el método fórmula, al diseño del procesamiento térmico de un sistema mixto, introduce un error difícil de cuantificar.

CAPITULO IV

Materiales y Métodos

4.1 Formulación matemática del problema

Como primer paso en el cálculo del valor F de un determinado proceso (ec. (3.3)), tanto con condición externa constante como variable, es necesario evaluar la evolución de la temperatura en el punto más frío del producto. Tal cual se planteó en los objetivos específicos de este trabajo, el análisis se referirá a dos sistemas distintos, de acuerdo al mecanismo de transferencia de calor en el interior del envase: sistemas conductivos y sistemas mixtos.

4.1.1. Sistemas Conductivos

La ecuación diferencial de energía en estado transitorio que gobierna el proceso de transferencia de calor por conducción para un sistema en coordenadas cilíndricas, con simetría axial, es la siguiente (ec. (4.1)):

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (4.1)$$

Esta ecuación es válida para todo el dominio Ω , donde T es la temperatura, k es la conductividad térmica, C_p es el calor específico, ρ es la densidad y r y z son las coordenadas radiales y axiales respectivamente (Carslaw & Jaeger, 1959).

Asumiendo temperatura inicial uniforme, se plantean en su forma más general, las condiciones de contorno e iniciales:

$$-k \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R} = h(T - T_{ext}) \quad ; \quad -k \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0,H} = h(T - T_{ext}) \quad \text{en } \partial\Omega_1 \quad (4.2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad \forall t ; r = 0 \quad \text{en } \partial\Omega_2 \quad (4.3)$$

$$T = T_i \quad t = 0 \quad \text{en } \Omega \quad (4.4)$$

Donde $\partial\Omega_1$ y $\partial\Omega_2$ corresponden a las interfases convectivas y de simetría respectivamente, T_{ext} corresponde a la temperatura externa, T_i es la temperatura inicial, y h es el coeficiente de transferencia de calor en la interfase.

En el presente trabajo de tesis, se adoptó como sistema modelo de alimento puramente conductivo el producto "pasta de atún".

4.1.2. Sistemas Mixtos

Para poder predecir la historia térmica de una partícula sólida suspendida en un fluido (líquido de cobertura), es necesario resolver el sistema de ecuaciones diferenciales parciales (PDE) que describen el mecanismo complejo de transferencia de calor entre el fluido y la partícula. Las ecuaciones diferenciales que describen este sistema derivan de los balances de energía, teniendo en cuenta las siguientes suposiciones:

- ✓ Temperatura uniforme del fluido de cobertura (mezclado perfecto)
- ✓ Coeficientes de transferencia de calor constantes
- ✓ Temperatura inicial uniforme tanto para el fluido como para la partícula
- ✓ Resistencia finita a la transferencia de calor en la superficie de la partícula
- ✓ Propiedades termofísicas constantes tanto para el fluido como para la partícula.

Despreciando la resistencia a la transferencia de calor producida por las paredes de la lata (debido a la alta conductividad del aluminio y el pequeño espesor de la pared) el balance de energía en cada envase puede expresarse como:

$$U_0 A (T_{aut} - T_f) = \rho_f V_{ce} (1 - \varepsilon) C p_f \frac{dT_f}{dt} + \rho_p V_{ce} \varepsilon C p_p \frac{dT_p}{dt} \quad (4.5)$$

válido para el dominio Ω , donde ε es la fracción efectiva de Ω ocupada por las partículas sólidas. En la ec. (4.5) V_{ce} es el volumen efectivo del envase, U_0 es el coeficiente global de transferencia de calor y A es el área superficial del envase. Las temperaturas T_{aut} , T_f y T_p son las del autoclave, la del fluido de cobertura y la de la partícula respectivamente.

El último término de la ecuación anterior es igual al calor transferido desde el líquido de cobertura a la superficie de las partículas:

$$\rho_p V_{ce} \varepsilon C p_p \frac{dT_p}{dt} = h_{fp} A_{pt} (T_f - T_{ps}) \quad (4.6)$$

donde T_{ps} es la temperatura del producto en la superficie y A_{pt} el área superficial total de partículas

Este balance está sujeto a la siguiente condición inicial:

$$T_f = T_{fi} \quad t = 0 \quad (4.7)$$

A su vez, para cada partícula sólida (Ω_1), debemos resolver el balance de energía considerando únicamente el mecanismo de conducción:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha_p \cdot \nabla^2 T \quad (4.8)$$

donde α_p es la difusividad térmica de la partícula sólida (constante). Este balance está sujeto a las siguientes condiciones de contorno (convectiva en $\partial\Omega_3$ y de simetría en $\partial\Omega_4$) e inicial:

$$k_p \cdot \nabla T \cdot n = h_{fp} ((T_f(t) - T_{ps}(t))) \quad en \quad \partial\Omega_3 \quad (4.9)$$

$$\nabla T = 0 \quad en \quad \partial\Omega_4 \quad (4.10)$$

$$T_p = T_{pi} \quad t = 0 \quad (4.11)$$

Donde k_p es la conductividad térmica de la partícula y T_{ps} y T_f son las temperaturas (dependientes del tiempo) de la superficie de la partícula y del fluido respectivamente.

La solución de las ecs. (4.5) y (4.8) da como resultado la distribución de temperaturas tanto para el fluido (uniforme) como para las partículas sólidas. En la mayoría de las situaciones de interés práctico, donde las partículas son sólidos tridimensionales,

generalmente irregulares, no es posible la obtención de una solución analítica al sistema de ecuaciones diferenciales parciales planteado usando procedimientos convencionales de integración.

En este caso, se adoptó como sistema modelo de conserva mixta el producto "mejillones en salmuera".

De acuerdo a los objetivos específicos planteados, la caracterización de la respuesta térmica de los dos sistemas modelos a estudiar, se realizará mediante dos herramientas matemáticas: funciones de transferencia discretas y elementos finitos.

4.2. Función de transferencia

Son numerosos los sistemas multidimensionales de interés práctico en ingeniería de alimentos en que existe transferencia de calor por conducción y convección.

Cuando las condiciones de contorno son constantes, es conocida la solución analítica que generalmente presenta la forma de una sumatoria infinita cuyo cálculo puede resultar muy tedioso para geometrías 3D. Existen también soluciones analíticas para algunas formas de condiciones de contorno variables en el tiempo (Carslaw & Jaeger, 1959).

Normalmente entonces debe recurrirse al empleo de métodos numéricos: diferencias finitas, volúmenes finitos, elementos finitos. La principal dificultad de estos métodos reside en los requerimientos computacionales para llevar a cabo una simulación adecuada. Las primeras soluciones numéricas en este campo empleaban diferencias finitas, las que generalmente estaban restringidas a geometrías unidimensionales regulares. En general, las soluciones eran programadas o codificadas por los propios usuarios, que debían tener un entrenamiento apropiado en la temática. Luego, el avance de la teoría de métodos numéricos y el desarrollo de software comerciales amplió enormemente el campo de usuarios de los mismos. Un punto importante a tener en cuenta en todos los métodos numéricos es que el usuario debe conocer con precisión los valores de todas las propiedades físicas que debe incorporar para que los resultados simulados sean precisos.

No obstante, en el presente trabajo de tesis interesa demostrar la potencialidad de las funciones de transferencia z para caracterizar sistemas multidimensionales sujetos a transferencia de calor, con condiciones de contorno variables en el tiempo. Ésta resulta una herramienta matemática muy sencilla y simple de implementar para predecir respuestas de los sistemas de interés frente a diferentes perturbaciones externas.

La caracterización de sistemas mediante sus respectivas funciones de transferencia ha sido extensamente empleada por la teoría de control automático de procesos. En lo que respecta a problemas de transferencia de calor, la primera aplicación sistematizada aparece en la simulación de paredes multicapa, en el diseño de sistemas de refrigeración y calefacción de edificios (Stephenson & Mitalas, 1971; Seem y col., (1989a, 1989b)). Hoy en día el uso de esta metodología en este campo se encuentra ampliamente difundido (ASHRAE, 2002). Varios autores han aplicado las funciones de transferencia para resolver problemas específicos de transferencia de calor, uni o multidimensionales (Mitalas, 1978; Sanz, 1984; Sanz y col., 1986; Barakat, 1987; Ceylan, 1987; Mascheroni y col., 1987; Salvadori y col., 1994; Vírseda & Pinazo, 1997; Abril y col., 1998; Márquez y col., 1998, 2003).

4.2.1. Formulación matemática

Para un sistema lineal, con propiedades físicas que no varían en el tiempo, la relación existente entre una perturbación $p(t)$ que afecta al sistema y la respuesta del mismo $r(t)$ queda descrita por una ecuación diferencial lineal (ec. (4.12)):

$$a_0 \frac{d^n r(t)}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} r(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_n r(t) = b_0 \frac{d^m p(t)}{dt^m} + b_1 \frac{d^{m-1} p(t)}{dt^{m-1}} + \dots + b_m p(t) \quad (4.12)$$

Considerando que las funciones $p(t)$ y $r(t)$ son continuas y que los coeficientes a_i y b_i son constantes, la ec. (4.12) puede transformarse término a término mediante transformadas de Laplace (ec. (4.13)):

$$(a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + \dots) \cdot R(s) = (b_0 s^m + b_1 s^{m-1} + \dots) \cdot P(s) \quad (4.13)$$

El sistema queda entonces caracterizado por su correspondiente función de transferencia, definida en la ec. (4.14), donde se ha supuesto que las funciones $p(t)$ y $r(t)$ y sus derivadas tienen condición inicial nula:

$$F(s) = \frac{R(s)}{P(s)} \quad (4.14)$$

Muestreando la función continua $p(t)$ a intervalos regulares, siendo Δ el intervalo de muestreo, se obtiene una nueva función, discontinua, que llamaremos $p^*(t)$:

$$p^*(t) = p(t) \delta_\Delta(t) = p(t) \sum_{n=0}^{\infty} \delta(t - n\Delta) \quad (4.15)$$

donde la función impulso o delta de Dirac toma el siguiente valor:

$$\delta_{\Delta}(t) = \begin{cases} 1 & \text{si } t = n\Delta \\ 0 & \text{si } t \neq n\Delta \end{cases} \quad (4.16)$$

La figura 4.1 muestra una función continua cualquiera $p(t)$ y su correspondiente función muestreada $p^*(t)$.

Definiendo una nueva variable compleja $z = e^{\Delta s}$, y calculando la transformada de Laplace de la función muestreada, queda definida la transformada z de la función $p(t)$:

$$Z[p(t)] = L[p^*(t)] = \sum_{n=0}^{\infty} p(n\Delta) e^{-n\Delta s} = \sum_{n=0}^{\infty} p(n\Delta) z^{-n} \quad (4.17)$$

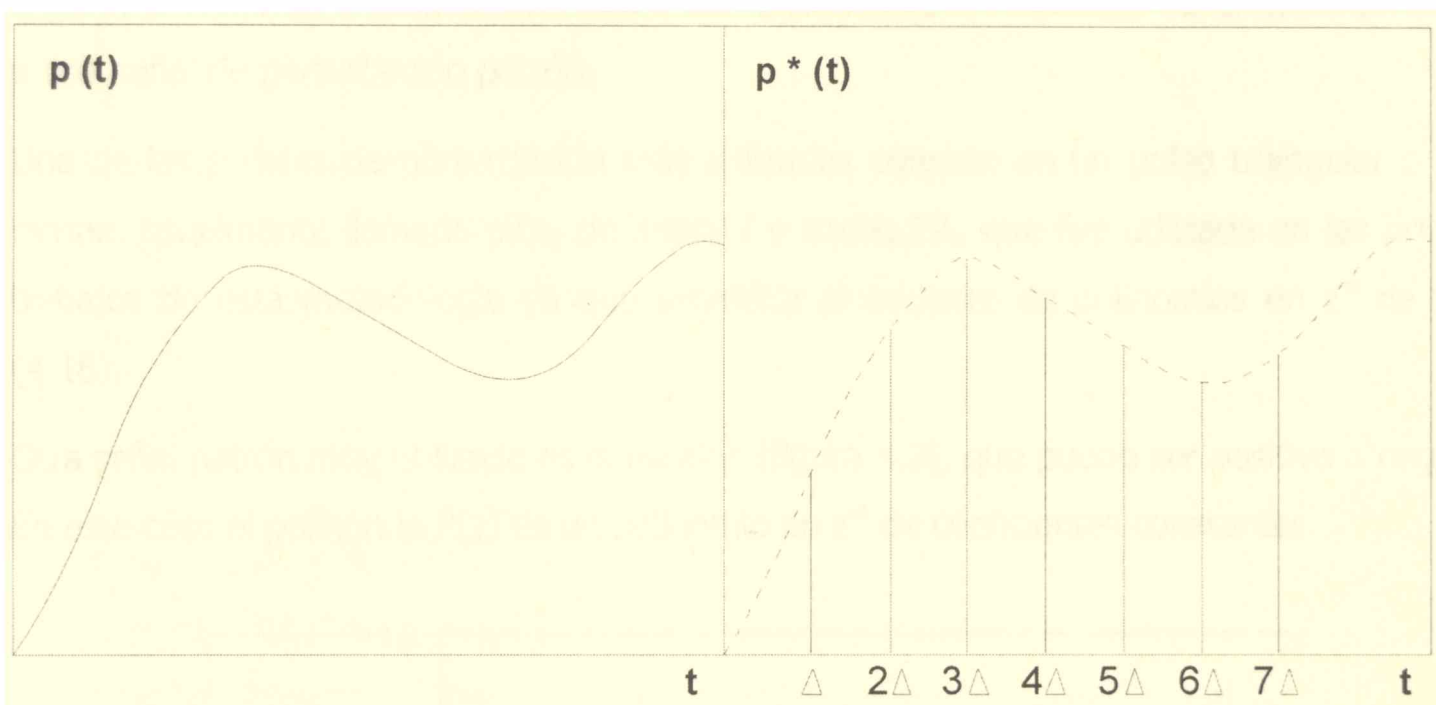


Figura 4.1. Función continua $p(t)$ y función muestreada $p^*(t)$.

La principal ventaja que presenta esta transformación, especialmente en el caso de funciones que no tienen una expresión analítica sencilla, es que puede escribirse la sumatoria conociendo únicamente los valores que toma la función $p(t)$ en los instantes de tiempo $t=n\Delta$. Pero no debe olvidarse que mientras el análisis que se efectúa mediante la transformación de Laplace es exacto y válido para todo valor de tiempo $t \geq 0$, la transformada z es discontinua (sólo proporciona resultados para $t = n\Delta$) y como generalmente no se trabaja con la serie infinita sino que sólo se consideran algunos términos de la misma, la solución obtenida será aproximada.

Para un sistema en particular, la definición de función de transferencia z es análoga a la definición de la función de transferencia s , es decir $F(z)$ es el cociente entre la transformada z de la respuesta $R(z)$ y la transformada z de la perturbación, $P(z)$:

$$F(z) = \frac{R(z)}{P(z)} = \frac{r(0) + r(\Delta) z^{-1} + r(2\Delta) z^{-2} + \dots + r(n\Delta) z^{-n} + \dots}{p(0) + p(\Delta) z^{-1} + p(2\Delta) z^{-2} + \dots + p(n\Delta) z^{-n} + \dots} \quad (4.18)$$

$F(z)$ puede expresarse también como un polinomio en z^{-n} (ec. (4.19)), definiendo los "coeficientes de la función de transferencia" f_n .

$$F(z) = f_1 + f_2 z^{-1} + f_3 z^{-2} + f_4 z^{-3} + \dots = \sum_{n=1}^{\infty} f_n z^{n-1} \quad (4.19)$$

El modo habitual de determinar los coeficientes f_n y por ende $F(z)$, consiste en medir experimentalmente o calcular analítica o numéricamente la respuesta del sistema en estudio a una señal de perturbación patrón.

Una de las señales de perturbación más utilizadas consiste en un pulso triangular o doble rampa, usualmente llamada pico, de altura I y ancho 2Δ , que fue utilizada en los primeros trabajos de esta metodología ya que simplifica el cociente de polinomios en z^{-n} de la ec. (4.18).

Otra señal patrón muy utilizada es el escalón (figura 4.2), que puede ser positivo o negativo. En este caso el polinomio $P(z)$ es un polinomio en z^{-n} de coeficientes constantes.

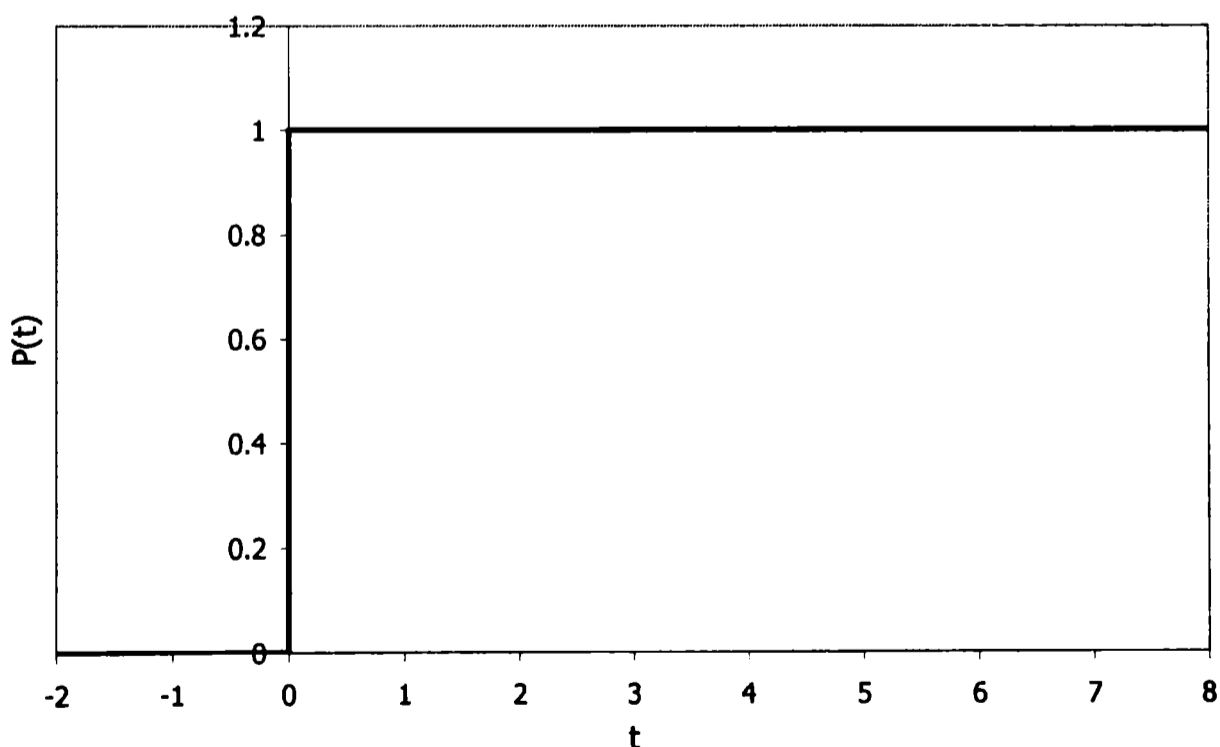


Figura 4.2. Señal escalón

Conocida la función de transferencia del sistema, ésta permitirá predecir la respuesta del sistema frente a cualquier otra perturbación.

De la ec. (4.18) se deduce que la transformada z de la respuesta es igual al producto de la transformada z de la señal de entrada o perturbación y F(z). Para una entrada cualquiera e(t) cuya transformada z es E(z); la transformada z de la respuesta será S(z):

$$S(z) = F(z) \cdot E(z) = \sum_{n=0}^{\infty} s(n\Delta) z^{-n} \quad (4.20)$$

El valor que toma la respuesta s(t) en el instante t = nΔ es el coeficiente de z⁻ⁿ en S(z):

$$s_n = s(n\Delta) = f_1 e(n\Delta) + f_2 e((n-1)\Delta) + \dots + f_{n+1} e(0) = \sum_{i=1}^{n+1} f_i e((n+1-i)\Delta) \quad (4.21)$$

Es importante remarcar que, a pesar de que el cálculo de la respuesta térmica es sencillo, no se puede calcular la respuesta continua sino sólo los valores que toma s(t) en t = nΔ.

En la práctica F(z), en la ec. (4.19), se aproxima por un número finito de coeficientes, N. El valor de N afectará la precisión de los resultados predichos. Como regla práctica se establece N de modo tal que:

$$\sum_{i=1}^N f_i \geq 0.99 \quad (4.22)$$

Si N es pequeño, y se quiere calcular la respuesta a tiempos largos, de modo tal que n sea considerablemente mayor que N, el cálculo de la salida s(t) para dichos tiempos desprecia el efecto de los primeros valores de la señal de entrada, introduciendo un nuevo error:

$$s_n = s(n\Delta) = f_1 e(n\Delta) + f_2 e((n-1)\Delta) + \dots + f_N e((n+1-N)\Delta) \quad (4.23)$$

Si se cumple la ec. (4.22) estaremos despreciando coeficientes de poco peso (en general la serie de la ec. (4.19) es convergente, a medida que se incrementa n los coeficientes tienden a cero) y el error cometido en el cálculo de la respuesta s(nΔ) será mínimo.

El valor del intervalo de muestreo también afecta la precisión de los cálculos, para determinar Δ debe contemplarse la inercia térmica del sistema en estudio. De acuerdo al teorema de muestreo (Luyben, 1973) el período mínimo de muestreo para obtener información dinámica de un proceso debe ser menor que la mitad de la menor constante de tiempo del sistema. Cuando se desconoce por completo la dinámica del proceso térmico a simular, como suele ser nuestro caso de estudio, es necesario realizar algunas pruebas experimentales para determinar el intervalo de muestreo Δ. En general podemos decir que el

mismo deberá ser considerablemente menor que el período en que se observa una evolución macroscópica del sistema.

En los problemas de interés de este trabajo, asociados al procesamiento térmico de conservas, la función perturbación $p(t)$ es la temperatura externa del medio $T_{ext}(t)$ y la respuesta es la temperatura T del punto crítico o característico del envase, es decir el punto de calentamiento más lento. Este punto coincide con el centro geométrico si el alimento tiene una composición homogénea, las condiciones de contorno son simétricas y el mecanismo de transferencia de calor en el alimento es conductivo (Salvadori y col., 1994). En los sistemas mixtos el punto característico puede no coincidir con el centro geométrico y deberá ser determinado para cada situación. Ambas temperaturas se han medido respecto de su valor inicial, para cumplir el requisito, inherente a la teoría de funciones de transferencia, de condición inicial nula.

De esta forma, los coeficientes de los polinomios $P(z)$ y $R(z)$, que son $p(n\Delta)$ y $r(n\Delta)$ respectivamente, evaluados a partir de las correspondientes temperaturas adimensionales en los intervalos de muestreo $n\Delta$, quedan definidos por las siguientes expresiones:

$$P(z) = \sum_{n=0}^{\infty} p(n\Delta)z^{-n} \quad \text{donde} \quad p(n\Delta) = \frac{(T_{ext}(n\Delta) - T_i)}{(T_{ext}(0) - T_i)} \quad (4.24)$$

$$R(z) = \sum_{n=0}^{\infty} r(n\Delta)z^{-n} \quad \text{donde} \quad r(n\Delta) = \frac{(T(n\Delta) - T_i)}{(T_{ext}(0) - T_i)} \quad (4.25)$$

donde T_i es la temperatura inicial, uniforme en todo el sistema.

De acuerdo a esta teoría, conocida la respuesta en cada instante de tiempo $n\Delta$ y desadimensionalizando, puede evaluarse la temperatura del centro térmico T_c , no como función continua sino a los intervalos específicos de muestreo $n\Delta$, de acuerdo a la ec. (4.26):

$$T_c(n\Delta) = T_i + (T_{ext} - T_i)r(n\Delta) \quad (4.26)$$

donde

$$r(n\Delta) = p(0)f_{n+1} + p(\Delta)f_n + \dots + p((n-1)\Delta)f_2 + p(n\Delta)f_1 = \sum_{i=0}^n p(i\Delta)f_{n+1-i} \quad (4.27)$$

4.2.2. Cálculo de los coeficientes de la función de transferencia

El cálculo de los coeficientes f_n que definen a la función de transferencia según la ec. (4.19) requiere realizar el cociente entre un polinomio de perturbación $P(z)$ y su correspondiente respuesta $R(z)$ (ec. (4.18)).

En el presente trabajo, las historias térmicas $T(n\Delta)$ a utilizar en la ec. (4.25) para el cálculo de $R(z)$ se evaluarán por dos vías: mediante determinaciones experimentales frente a una señal patrón y mediante cálculo numérico, empleando el método de elementos finitos. En ambas modalidades (que se describen con mayor detalle a continuación) el cociente de polinomios se realiza mediante un programa codificado en MATLAB (MATLAB 7.0 R14, 2004), empleando la función *stmcb* correspondiente al módulo de procesamiento de señales, esta función resuelve mediante el algoritmo de Steiglitz-McBride la respuesta de un sistema a un impulso (MATLAB 7.0 R14, 2004). El listado de los programas utilizados para el cálculo de los coeficientes de la función de transferencia se encuentra en el ANEXO.

4.3. El método de los elementos finitos

4.3.1 El método de elementos finitos en el procesamiento de alimentos

Las técnicas numéricas empleadas usualmente para resolver ecuaciones diferenciales parciales son los métodos de diferencias finitas y de elementos finitos. También existen otras técnicas, menos usadas, como volúmenes finitos y elementos de borde. Todos estos métodos numéricos son parte de un subconjunto de la técnica general de residuos ponderados o pesados (Puri & Anantheswaran, 1993). Algunas de las principales ventajas y desventajas del método de elementos finitos (MEF) en comparación con el método de diferencias finitas son (Puri & Anantheswaran, 1993):

Ventajas:

- La variación espacial de las propiedades del material pueden ser manejadas con mayor precisión.
- Se pueden modelar regiones irregulares bi y tridimensionales con mayor precisión.
- El MEF está mejor desarrollado para problemas no lineales.
- El tamaño de los elementos puede ser fácilmente variado.

Desventajas:

- Las ecuaciones elementales son usualmente mucho más complejas en términos matemáticos, en comparación con las ecuaciones de puntos de grilla del método de diferencias finitas.
- El MEF es numéricamente intensivo y puede, por lo tanto, tomar más tiempo de máquina y espacio de almacenamiento de memoria, comparado con el método de diferencias finitas, para un mismo problema.

El MEF ha sido usado con éxito en diferentes ramas de la ingeniería, tales como cálculo de estructuras (ing. civil), mecánica y de materiales, química, aeronáutica e hidráulica, así como también en geofísica y otras áreas relacionadas. Respecto al campo del procesamiento de alimentos, el MEF ha sido aplicado al calentamiento y enfriamiento, congelación y descongelación, y transferencia (simultánea o no) de calor, materia y cantidad de movimiento. También se han resuelto modelos incluyendo daño y deformaciones mecánicas. La mayoría de los estudios se han concentrado en regiones bidimensionales (2D) y/o con simetría axial, bajo respuestas transitorias (Puri & Anantheswaran, 1993).

En cuanto al modelado de procesos de transferencia de calor, se han utilizado, casi exclusivamente, los métodos de elementos finitos y de diferencias finitas, para su resolución y simulación. Además, la mayoría de los autores han modelado sobre geometrías regulares, en una y dos dimensiones, y todos hicieron uso de la condición de simetría axial (explícita o implícitamente).

4.3.2 Fundamentos básicos del método de elementos finitos

Si bien muchos libros de texto se refieren al método de elementos finitos y su implementación, a continuación se presentan los principales lineamientos del mismo. Para más profundidad sobre el tema, referirse a Zienkiewicz (1989), Ciarlet & Lions (1991), Brenner & Scott (1994), entre otros. Para describir al MEF, considérese el siguiente problema general estacionario, con condición de contorno convectiva, en una dimensión:

$$-\nabla(a \cdot \nabla u) + c \cdot u = f, \quad \Omega \tag{4.28}$$

$$a \frac{\partial u}{\partial \nu} = g, \quad \partial\Omega \tag{4.29}$$

donde u es la variable dependiente, a y c son coeficientes (pueden ser variables o constantes), f es una fuente que actúa sobre el dominio (Ω), g es el flujo sobre el borde ($\partial\Omega$) y v es la dirección normal al borde. Para resolver el problema diferencial anterior, se debe obtener la forma débil o variacional del mismo. Para esto, se toma una función integrable v , se la multiplica por la ec. (4.28) y se integran ambos miembros de la ecuación sobre el dominio Ω :

$$\int_{\Omega} -\nabla(a \cdot \nabla u) \cdot v + \int_{\Omega} c \cdot u \cdot v = \int_{\Omega} f \cdot v \quad (4.30)$$

Luego, usando el teorema de Green (o de la divergencia) se integra por partes el primer término del miembro izquierdo de la ec. (4.30):

$$\int_{\Omega} -\nabla(a \cdot \nabla u) \cdot v = - \int_{\partial\Omega} a \frac{\partial u}{\partial v} v + \int_{\Omega} a \cdot \nabla u \cdot \nabla v \quad (4.31)$$

Por lo que la ec. (4.30) se puede reescribir de la siguiente forma:

$$\int_{\Omega} a \cdot \nabla u \cdot \nabla v + \int_{\Omega} c \cdot u \cdot v = \int_{\partial\Omega} a \frac{\partial u}{\partial v} \cdot v + \int_{\Omega} f \cdot v \quad (4.32)$$

Por último, usando la condición de borde (ec. (4.29)) se llega a la forma débil del problema diferencial original:

$$\int_{\Omega} a \cdot \nabla u \cdot \nabla v + \int_{\Omega} c \cdot u \cdot v = \int_{\partial\Omega} g \cdot v + \int_{\Omega} f \cdot v \quad (4.33)$$

Puede demostrarse que ambos problemas o formulaciones son equivalentes.

Sin embargo, la forma débil cuenta con ventajas matemáticas para resolver el problema planteado. Básicamente, la solución del problema debe satisfacer menos condiciones que en el caso diferencial. Por lo tanto, ahora se debe resolver otro problema: se debe encontrar una función u tal que se cumpla la ec. (4.33). De hallarse esta función será a su vez la solución del problema general (ec. (4.28)).

Para esto, se debe construir una base para generar un espacio de elementos finitos, de donde saldrá la solución del problema.

Supóngase que el dominio Ω es una recta con límites 0 y 1. Sea δ una partición del dominio en subintervalos de tamaño h :

$$\delta = \{x_0 = 0, x_1, x_2, \dots, x_{n+1} = 1\} \quad (4.34)$$

Entonces, se define, por ejemplo, el siguiente espacio de funciones:

$$m_h = \{\varphi \equiv \text{funciones continuas} : v \in \text{Polinomios de grado 1}\} \quad (4.35)$$

La solución aproximada del problema será una $u_h \in m_h$ que satisfaga la ec. (4.33):

$$u_h = \sum_{j=1}^n u_j \varphi_j \quad (4.36)$$

Donde u_j son las incógnitas del problema (coeficientes constantes) y φ_j son las funciones de la base o de forma definidas en cada subintervalo. Es decir, la solución aproximada es una combinación lineal de la base del espacio de elementos finitos compuesto por polinomios de grado 1.

4.3.3. El método de Elementos Finitos aplicado a problemas de transferencia de calor con conducción pura

Como ya hemos visto al inicio de este capítulo, la ecuación diferencial de calor en estado transitorio que gobierna el proceso de transferencia de calor para un sistema conductivo con simetría axial en coordenadas cilíndricas está descrita por la ec. (4.1) cuyas condiciones de contorno e iniciales están dadas por las ecs. (4.2), (4.3) y (4.4)

Se aplica el método de elementos finitos a la ec. (4.1), usando el método de Galerkin (Bathe, 1996) y aplicando las condiciones de contorno a través del Teorema de Green (o de la divergencia) (Zienkiewics & Taylor, 1994; Bathe, 1996).

El dominio es discretizado en elementos y nodos que forman la grilla. De esta forma la distribución de temperatura en cada elemento puede ser aproximada de la siguiente forma:

$$T^e = \sum_{i=1}^n T_i h_i \quad (4.37)$$

donde h_i se refiere a las funciones de forma y T_i a la temperatura del nodo.

Las ecuaciones que conforman el modelo numérico a resolver son:

$$C \frac{\partial T}{\partial t} + KT = F \quad (4.38)$$

$$C = \sum_{e=1}^n \int_{\Omega_e} (H^T r \rho C_p H) d\Omega_e \quad (4.39)$$

$$K = \sum_{e=1}^n \int_{\Omega_e} (\nabla H^T r k \nabla H) d\Omega_e + \int_{\partial\Omega_{1e}} (H^T r h H) d\partial\Omega_{1e} \quad (4.40)$$

$$F = \sum_{e=1}^n \int_{\partial\Omega_{1e}} (H^T r h H T_{ext}) d\partial\Omega_{1e} \quad (4.41)$$

donde H es el vector que contiene a las funciones de forma, C es la llamada matriz capacitiva y K es una matriz que está formada por la matriz conductiva y la matriz convectiva respectivamente.

Se resuelve el sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias mediante una discretización en el tiempo con el método α (Pham, 2006):

$$\left(\frac{1}{\Delta t} \cdot C + \alpha \cdot K \right) \cdot T^{t+\Delta t} = (1 - \alpha) \cdot F^t + \alpha \cdot F^{t+\Delta t} + \left(\frac{1}{\Delta t} \cdot C - (1 - \alpha) \cdot K \right) \cdot T^t \quad (4.42)$$

De acuerdo al valor de α , el método de resolución puede ser:

- Método explícito ($\alpha=0$)
- Método Crank-Nicolson ($\alpha=0.5$)
- Método implícito ($\alpha=1$)

De esta forma se resuelve el sistema y se encuentra la evolución de la temperatura durante el calentamiento en cada posición o nodo de la grilla.

4.3.4. Software Comercial de elementos finitos FEMLAB

Para resolver las integrales de la forma débil, se utilizará el software comercial FEMLAB. Una versión más nueva de este software, que se denomina COMSOL, ha sido utilizado en el desarrollo de programas genéricos de resolución de problemas de transferencia de calor y materia en alimentos, entre los cuales se encuentra la esterilización (Halder y col., 2007).

El software comercial FEMLAB utiliza un método de cuadratura de Gauss. Por otra parte, cuando se trabaja sobre un problema transitorio, se utiliza un algoritmo de esquema implícito, capaz de resolver un sistema no lineal en cada paso de tiempo, usando la iteración de Newton (para más información, referirse a FEMLAB *User's Guide*).

El modelado y simulación en FEMLAB se realiza cumpliendo varias etapas consecutivas:

- Creación o importación de la geometría
- Definición de las propiedades en el dominio y en el contorno
- Mallado de la geometría
- Procesamiento: Resolución del modelo
- Post procesamiento de la solución

El entorno principal de FEMLAB es el "Model Navigator", donde se define la dimensión del problema así como también el módulo o tipo de aplicación (dentro de las opciones disponibles podemos mencionar transferencia de calor, fluidodinámica, difusión, entre otras). Debe especificarse además si es un problema estacionario o transitorio.

4.3.4.1. Creación o importación de la geometría

El entorno FEMLAB cuenta con un set de herramientas CAD para el modelado de geometrías en 1D, 2D y 3D, las cuales pueden ser utilizadas por el usuario para graficar la geometría deseada así como también permite importar todo tipo de geometrías.

4.3.4.2. Definición de las propiedades en el dominio y en el entorno

Una vez creada la geometría, la creación del modelo cuenta con una gran flexibilidad en la definición de las constantes o propiedades del mismo. Las propiedades físicas pueden definirse como constantes o variables. Las mismas se ingresan entrando a la opción "Subdomain settings" dentro del menú "Physics" del software.

Una vez definido el tipo de geometría e ingresadas las propiedades del dominio, se ingresaran los datos relativos a la ejecución del modelado numérico en sí a través de la opción "Boundary settings" del menú "Physics". En el caso particular de un problema de transferencia de calor en estado no estacionario, se ingresan los datos referidos a la variable temporal, duración del intervalo y número de intervalos de tiempo, así como también las condiciones de contorno del problema. También se pueden especificar condiciones de contorno variables en el tiempo.

4.3.4.3. Mallado de la geometría

Una vez definida la geometría y definidos los parámetros necesarios para la resolución del modelo, FEMLAB procede al mallado de la geometría. El mismo puede realizarse manual o automáticamente. El número de elementos finitos que componen una malla determina, en parte, los grados de libertad del problema. Cuanto más densa es la malla, mayores requerimientos computacionales existen. Esto es, una malla muy densa implica una gran cantidad de parámetros a calcular. Cuando se trabaja con geometrías regulares, la densidad de la malla se controla a través de ciertos parámetros, como el tamaño máximo de los elementos finitos.

Dado que la formación de los elementos finitos es una de las cuestiones más importante del análisis, es conveniente detallar algunas características de las mallas:

- La densidad de la malla es un parámetro que relaciona el número de elementos en proporción al área del modelo.
- Las mallas se usan para definir las superficies en 2D o 3D y utilizarlas para la visualización y el análisis.
- En el diseño y la visualización, la densidad de la malla afecta la exactitud con la que las curvas, bordes y superficies son presentadas.
- Cuando se incrementa la precisión (mediante la densidad de la malla), el tiempo de procesamiento es, por lo general, mayor. Por lo tanto es necesario disminuir la densidad de la malla. El programa permite incrementar la densidad de la malla donde se requiera mayor precisión en los resultados.

En el software comercial FEMLAB, el mallado de la geometría se genera entrando al menú "mesh". En el caso particular de la geometría 3D el software particiona el dominio en tetrahedros y el contorno de la geometría es particionado en elementos de borde triangulares.

La forma de la geometría y determinados parámetros del mallado determinan el número de elementos. Estos parámetros del mallado se determinan entrando a la opción "mesh parameters" dentro del menú "mesh".

En la figura 4.3 se muestra el mallado de un determinado envase de atún de dimensiones $D=0.06$ m y $H=0.06$ m.

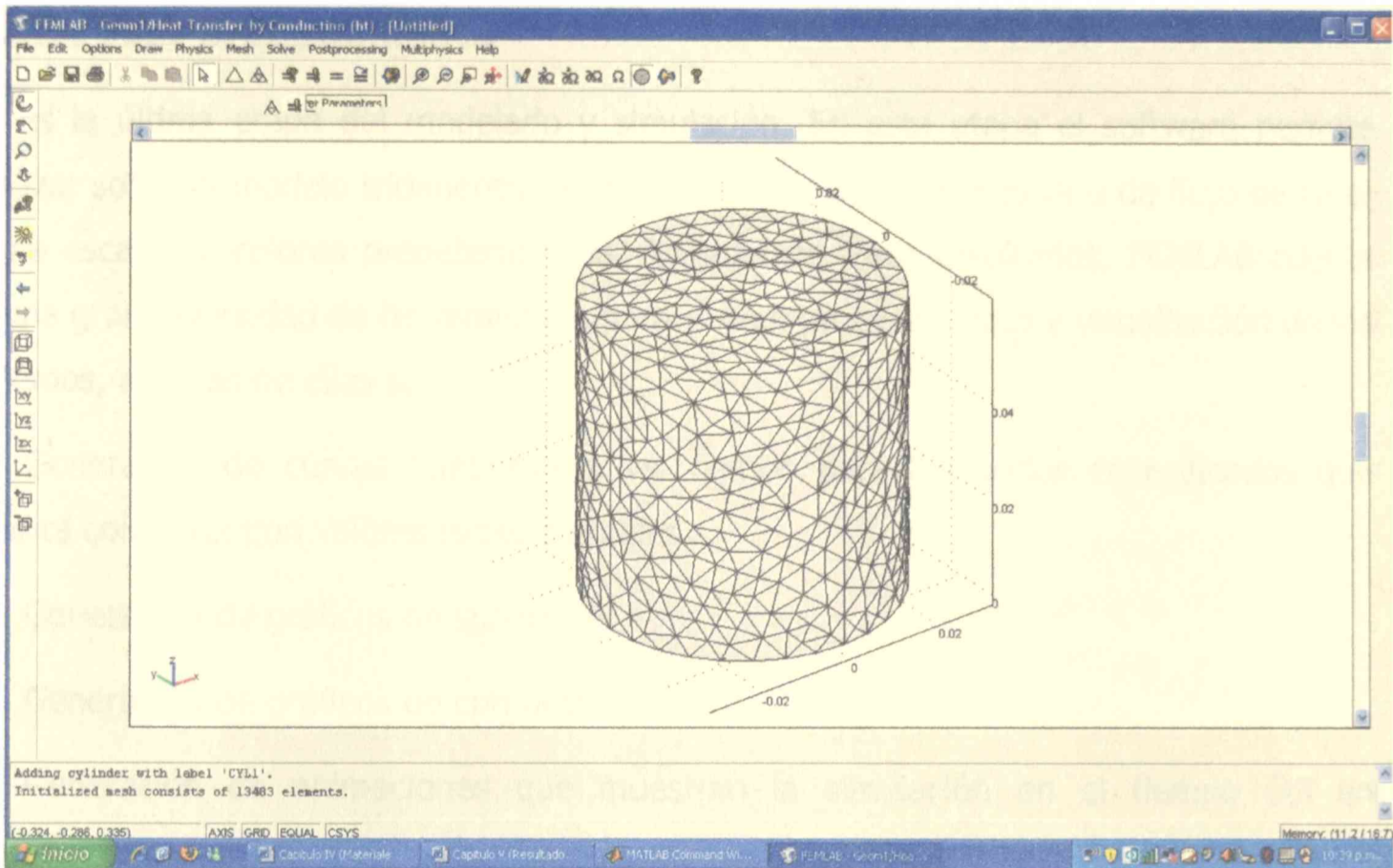


Figura 4.3. Mallado de un envase de dimensiones $D=0.06$ m y $H=0.06$ m.

4.3.4.4. Procesamiento

Una vez ingresadas las propiedades en el dominio y en el contorno y realizado el mallado de la geometría se llega a la etapa de Procesamiento donde se procede a la resolución del modelo.

Se trata de la etapa de cálculo propiamente dicha. La resolución del modelo se lleva a cabo mediante la opción "Solve problem" correspondiente al menú "Solve". Una vez comenzado el análisis, el procesador realiza una verificación de la geometría y del modelo de elementos finitos. Este paso detecta cualquier error en el ingreso de los datos. En esos casos genera mensajes de error, que suspenden el análisis.

La duración de la etapa de análisis depende de la magnitud del modelo, de su complejidad y como mencionamos anteriormente de la densidad del mallado.

Terminada esta etapa, se continúa con la fase de post-procesamiento

4.3.4.5. Post-procesamiento

Esta es la última etapa del modelado y simulación. En esta etapa el software permite visualizar sobre el modelo tridimensional los resultados de temperatura o de flujo de calor en una escala de colores predeterminada. Además de estos resultados, FEMLAB cuenta con una gran diversidad de herramientas para el post procesamiento y visualización de los resultados, algunas de ellas son:

- ✓ Generación de curvas temperatura vs. tiempo para los nodos especificados que posibilita comparar con valores experimentales.
- ✓ Generación de gráficos de superficie
- ✓ Generación de gráficos de contorno
- ✓ Generación de animaciones que muestran la simulación en el tiempo útil en problemas transitorios.
- ✓ Integración de los resultados sobre el volumen o borde de la geometría para obtener valores como por ejemplo flujos totales, áreas, volúmenes, etc.

4.4. Determinaciones Experimentales

4.4.1. Sistemas Conductivos

A fin de estudiar la respuesta de un sistema puramente conductivo y además contar con historias térmicas reales con las cuales contrastar las simulaciones numéricas, se determinó la evolución de la temperatura por vía experimental de uno de los alimentos más populares dentro de las conservas de pescado, atún, utilizando algunos de los envases más frecuentemente utilizados en la industria conservera. Las dimensiones (diámetro y altura) de dichos envases se presentan en la tabla 4.1.

La pasta de atún fue obtenida procesando atún fresco, comprado en el mercado local, con un homogeneizador Braun Minipimer MR 400G de 300 W (Braun, Kronberg, Germany). Luego se llenaron con esta pasta los envases metálicos y se procedió a cerrarlos herméticamente.

Tabla 4.1. Dimensiones (diámetro D y altura H) de los envases de aluminio utilizados para la validación experimental

Muestra	Contenido (g)	Dimensiones : DxH (m)
S1	115	0.050 x 0.072
S2	170	0.073 x 0.057
S3	180	0.087 x 0.044
S4	300	0.087 x 0.068
S5	320	0.073 x 0.095
S6	330	0.087 x 0.072
S7	380	0.073 x 0.113

Ensayos de penetración térmica

Los ensayos de penetración de calor (tanto para sistemas conductivos como para sistemas mixtos) fueron realizados en un autoclave de planta piloto vertical, discontinuo, con generación interna de vapor y capacidad de 60 litros. La temperatura final del autoclave se reguló en forma manual. De esta forma, la temperatura T_{ext} evoluciona desde su valor inicial $T_{ext}(0)$ (que coincidía con la temperatura inicial del producto, T_i) hasta su valor final.

En el desarrollo de las experiencias, se siguió la operatoria estándar de un autoclave batch convencional con esterilización bajo vapor, donde podemos distinguir 5 etapas:

- Preparación y carga
- Venteo
- Subida a condiciones de proceso
- Esterilización
- Enfriamiento

Durante la preparación del autoclave se verifica que estén cerrados los ingresos de agua y aire. Luego se procede a la carga de producto, la que no debe demorar más de una hora después de efectuado el cierre de las latas.

Luego se cierra el autoclave y se procede a ventearlo, es decir comienza el calentamiento sin cerrar la válvula de venteo. Ésta se mantiene abierta hasta que la temperatura del autoclave alcanza una temperatura de entre 100°C -108°C sin desarrollo de presión en el

equipo, lo cual permite el arrastre del aire del equipo. El aire es muy mal conductor de calor y si persistieran bolsones de aire durante la esterilización, los envases afectados por esos bolsones podrían resultar sub-esterilizados.

Una vez que se asegura la eliminación del aire, se procede a cerrar la válvula de venteo para permitir el aumento de presión con el consiguiente aumento de la temperatura, según las condiciones de equilibrio del vapor saturado. Esta etapa corresponde a la subida hasta la temperatura final de proceso, y no es instantánea dependiendo de la capacidad de generación de vapor del autoclave. Durante las etapas de venteo y de subida a condiciones de proceso se inicia el calentamiento del producto y se produce cierto efecto letal sobre las poblaciones microbianas.

Una vez alcanzada la temperatura de proceso (habitualmente entre 110 y 130°C para productos pesqueros) debe mantenerse en dicho valor durante el tiempo necesario para alcanzar la letalidad acumulada requerida F_0 . Cabe destacar que en productos de estas características, debido a la baja difusividad térmica los tiempos de proceso pueden ser excesivamente largos para los valores más bajos de T_{ext} . Por el contrario valores elevados de T_{ext} provocarían características organolépticas indeseables en la superficie del producto. Estos conceptos serán analizados en mayor detalle en los capítulos VI, VII y VIII.

Culminada la esterilización propiamente dicha se procede al enfriamiento. En equipos que cuentan con enfriamiento por agua se debe desplazar en primer lugar el vapor con aire comprimido, teniendo cuidado de no producir la condensación rápida del vapor y luego se hace ingresar el agua de enfriamiento, ya sea por lluvia sobre los envases o por inundación, manteniendo la sobre presión con aire comprimido. Como nuestro autoclave no contaba con enfriamiento con agua, directamente una vez concluida la etapa de esterilización se corta la calefacción, se abre la válvula para que disminuya la presión interna y posteriormente se abre la tapa para lograr el enfriamiento más rápido posible.

En las corridas experimentales realizadas en el autoclave, se ensayaron distintas temperaturas iniciales, entre 20 y 35°C, y de proceso, entre 110 y 130°C, así como también distintas velocidades de subida del autoclave, logradas a través de la regulación manual de la calefacción.

Se registró la evolución de la temperatura del autoclave y del centro geométrico del producto en el interior de los envases utilizando termocuplas Cobre-Constantan tipo T rígidas de 1.0

mm de diámetro (resolución 0.1°C y exactitud $\pm 0.5\%$ del valor medido) conectadas a un adquirente de datos DaqPRO 5300, modelo IN2530 (INSTRU).

Asimismo, se realizaron también experiencias con otro producto pesquero (caballa), para validar los modelos desarrollados con otro producto.

Algunas historias térmicas experimentales se tomaron de base para calcular los coeficientes f_n y otras fueron empleadas para validar la metodología de cálculo propuesta.

4.4.2. Sistemas Mixtos

Como sistema modelo de conserva tipo mixta, se trabajó con conservas de mejillones utilizando salmuera como líquido de cobertura. En la figura 4.4 se muestra la geometría de un mejillón de tamaño estándar utilizado en los ensayos de penetración de calor.



Figura 4.4. Mejillón utilizado en las determinaciones experimentales

Los mejillones utilizados en las corridas experimentales, fueron seleccionados de latas de mejillones enlatados comprados en un supermercado. Cada uno de los mejillones fue pesado, y se determinaron las dimensiones características del mismo con alta exactitud: diámetros de los ejes mayor y menor y profundidad.

En las determinaciones experimentales se utilizaron mejillones en salmuera envasados en distintos tamaños de envases. Los envases metálicos fueron llenados y posteriormente herméticamente cerrados.

Se determinó la evolución de la temperatura por vía experimental utilizando una gran diversidad de envases de hojalata de manera de poder abarcar el mayor rango de tamaños posibles. Las dimensiones (diámetro y altura) de dichos envases se presentan en la tabla 4.2.

Tabla 4.2. Dimensiones (diámetro D y altura H) de los envases

Muestra	Contenido (g)	Dimensiones : DxH (m)
S1	115	0.050 x 0.072
S2	150	0.073 x 0.040
S3	170	0.073 x 0.057
S4	180	0.087 x 0.044
S5	300	0.087 x 0.068
S6	320	0.073 x 0.095
S7	320	0.062 x 0.072
S8	325	0.065 x 0.076
S9	325	0.070 x 0.072
S10	330	0.087 x 0.072
S11	380	0.073 x 0.113
S12	200	0.056 x 0.072

Los ensayos de penetración de calor fueron realizados en dos baños termostatzados, de manera de lograr la perturbación señal patrón deseada (escalón) para obtener los coeficientes de la función de transferencia. Asimismo, se realizaron corridas experimentales en el autoclave para validar los resultados de predicción obtenidos por la función de transferencia.

En estos ensayos se midió la temperatura en distintas posiciones. Para ello se utilizaron termocuplas colocadas en dirección radial, a distintas alturas medidas desde el fondo del envase, cuidando que cada una de ella quedase ubicada en el centro de un mejillón. Una termocupla adicional midió la temperatura del líquido de cobertura, la cual se asume uniforme. Las perforaciones del envase por donde se insertan las termocuplas fueron selladas mediante una goma y colocación de epoxi a alta temperatura. Se midió, además, la temperatura del medio calefactor (autoclave o baño según correspondiera). Para todas las mediciones se utilizaron termocuplas Cobre-Constantan tipo T rígidas (resolución 0.1°C y exactitud $\pm 0.5\%$ del valor medido) conectadas a un adquisidor de datos DaqPRO 5300,

modelo IN2530 (INSTRU). Una vez colocadas las termocupas necesarias se procedió al cerrado de los envases.

Cabe mencionar en este punto, que en conservas mixtas, un factor muy importante a tener en cuenta es el peso escurrido de la misma. La especificación de peso escurrido puede ser importante al momento del envasado en conservas en las que se incorporará fluido de cobertura. En estos casos las corrientes convectivas que se producen en el fluido favorecen la rápida transmisión de calor a la frontera de las piezas sólidas desde donde el calor es conducido más lentamente, por conducción, al interior de los trozos. Si no existe un buen control del peso escurrido puede suceder que algunos envases tengan mayor contenido de sólidos, y en consecuencia menos fluido, dando por resultado una penetración de calor más lenta en el punto de calentamiento más lento. En algunas experiencias se encontró que un incremento en 10% del peso escurrido de conservas mixtas requirió de un incremento del 16% en el tiempo de proceso para alcanzar el mismo valor final de F_0 . Está claro que cada producto tendrá sus propias condiciones de tratamiento térmico.

El Código Alimentario Argentino (CAA), en el artículo 482 dentro de la sección "Conservas de Pescado" perteneciente al Capítulo VI (Alimentos cárneos y afines) define a la Conserva de mariscos como aquella conserva en la que el marisco se encuentra desprovisto de su valva, y a la cual se ha adicionado salmuera o caldo como líquido de cobertura. Establece, además, que la salmuera o caldo no podrá hallarse en proporción superior al 50% del peso total del producto terminado.

4.5. Cálculo de la letalidad acumulada (F)

Para el diseño de un proceso térmico es necesario calcular el tiempo necesario para lograr un determinado valor de letalidad acumulada (F_0). Para ello es necesario determinar el valor F del proceso, el cual se calcula a partir del conocimiento de la historia térmica del producto en el punto crítico, y la integración de la ec. (3.3) hasta el tiempo final de proceso.

Dicha integración fue realizada con un sencillo programa codificado en MATLAB 7.0, utilizando la función *trapz* (perteneciente al directorio *datafun*) que utiliza el método del trapecio para realizar la integración numérica. El programa de MATLAB para el cálculo de la letalidad acumulada del proceso se presenta en el ANEXO.

CAPITULO V

Resultados y Discusión

5.1. Sistemas Conductivos

5.1.1. Cálculo de la función de transferencia por vía experimental

En esta sección se presentan los coeficientes de la función de transferencia obtenidos a partir de los ensayos de penetración de calor cuyas condiciones fueron detalladas en la sección 4.4.1 (Capítulo IV).

Adimensionalizando los datos de temperatura resultantes de las historias térmicas experimentales para el centro térmico en función de las temperaturas inicial y externa (ec. (4.25)), se genera el polinomio $R(z)$. Los coeficientes f_n de la ec. (4.19) se calculan de acuerdo a lo detallado en la sección 4.2.2.

Se puede observar en la figura 5.1 los coeficientes obtenidos experimentalmente para dos tamaños de envase (envases S2 y S3 de la tabla 4.1).

Debido a las dificultades experimentales que se presentaron al realizar los ensayos de penetración térmica, entre las cuales se pueden mencionar el tiempo necesario y el gasto originado en cada uno de los ensayos, se decide simular las corridas y obtener los coeficientes de la función de transferencia a través de métodos numéricos.

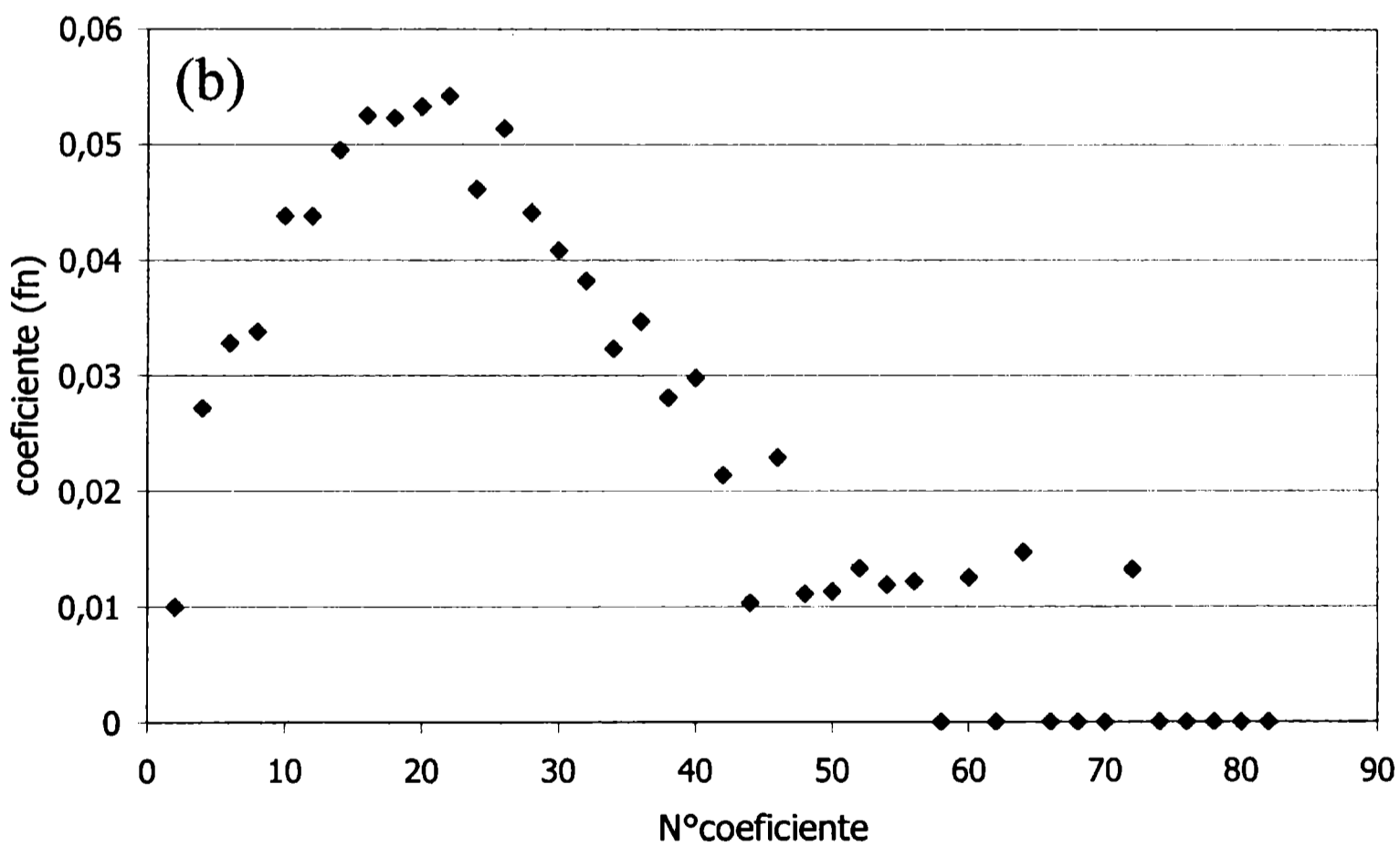
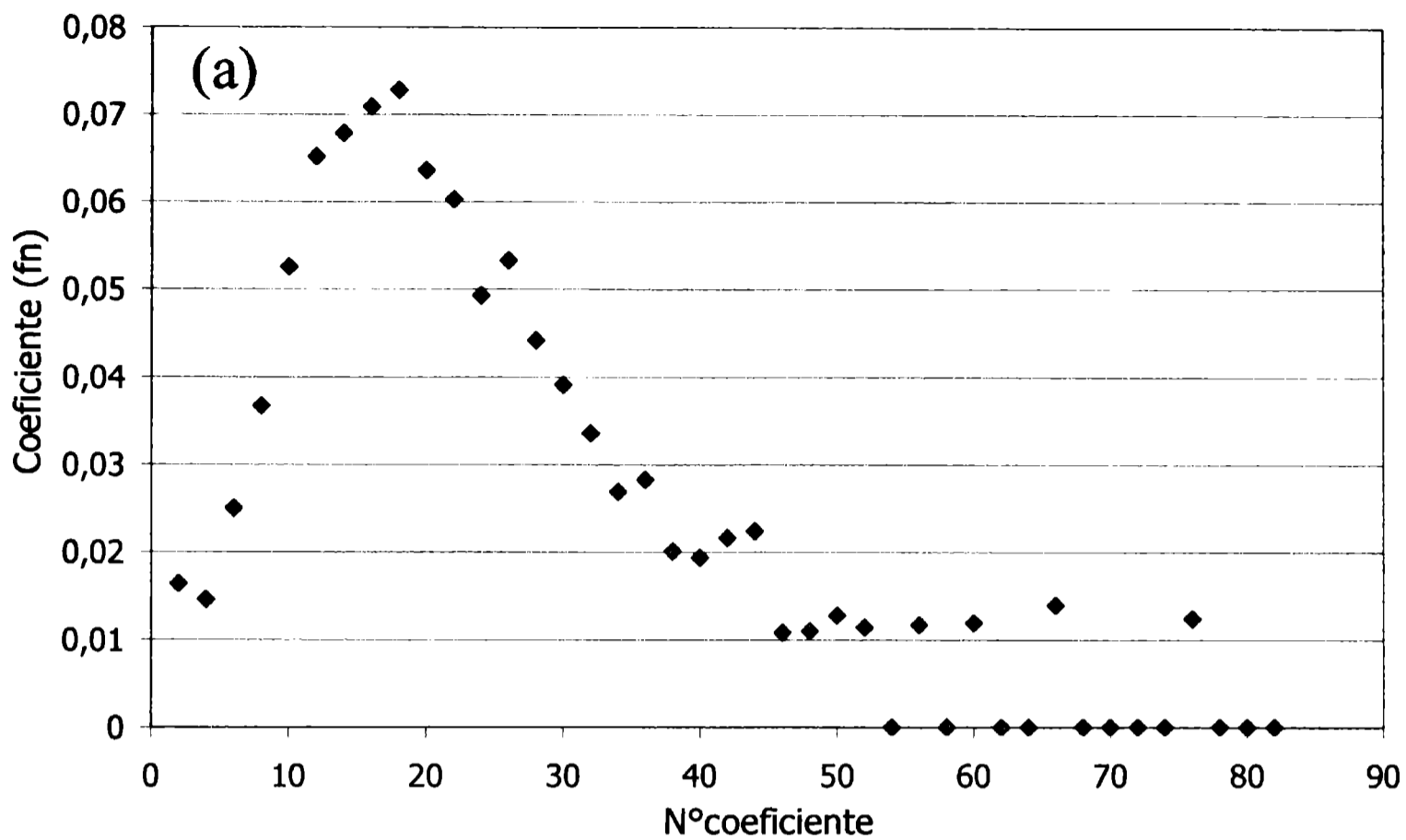


Figura 5.1. f_n experimentales; (a) envase S2 ($D=0.073$ m y $H=0.057$ m); (b) envase S3 ($D= 0.087$ m y $H=0.044$ m)

5.1.2. Cálculo de la función de transferencia por métodos numéricos

Para evaluar los coeficientes de la función de transferencia $F(z)$ de cada tamaño de envase se resolvió el balance de energía dado por la ec. (4.1) en coordenadas cilíndricas. Se considera temperatura inicial uniforme (T_i) y una perturbación escalón: valor constante de la temperatura externa (T_{ext}). De esta forma las condiciones inicial y de borde, mencionadas en forma general en la sección 4.1.1, son:

$$T(r, z, 0) = T_i \quad (5.1)$$

$$\frac{\partial T}{\partial r}(0, z, t) = 0 \quad (5.2)$$

$$T(D/2, z, t) = T_{ext} \quad t \geq 0 \quad (5.3)$$

$$T(r, \pm H/2, t) = T_{ext} \quad t \geq 0 \quad (5.4)$$

En los casos de estudio, el coeficiente de transferencia de calor es lo suficientemente alto como para considerar temperatura prescrita como condición de contorno. También se asume que el mecanismo de transferencia de calor en el interior del producto es principalmente conductivo y que las propiedades físicas son constantes. Como propiedades físicas se adoptaron las correspondientes a atún (asumiendo composición homogénea), obtenidas de bibliografía (Holdsworth, 1997): $\rho = 1003 \text{ kg/m}^3$, $C_p = 3470 \text{ J/(kg}^\circ\text{C)}$ y $k = 0.463 \text{ W/(m}^\circ\text{C)}$.

Si bien este balance tiene solución analítica su implementación resulta muy tediosa cuando se quiere calcular la evolución de la temperatura en el tiempo de un sólido de geometría 3D. Por el contrario, la utilización de un software comercial permite la respuesta de sistemas multidimensionales a distintas condiciones operativas, de manera simple y eficiente. De esta forma se resuelve el balance mediante el software comercial de elementos finitos FEMLAB 3.0 (2004).

Mediante el software mencionado, se simuló el comportamiento de un gran número de envases de distintas dimensiones, de manera de cubrir todos los tamaños de los envases comerciales: el rango de diámetros utilizados en la simulación numérica varió desde 0.04 m hasta 0.09 m mientras que el de alturas utilizadas varió desde 0.03 m hasta 0.113 m.

El número de elementos finitos que componen una malla determina, en parte, los grados de libertad del problema. Cuanto más densa es la malla, mayores requerimientos computacionales existen. Esto es, una malla muy densa implica una gran cantidad de

parámetros a calcular. Cuando se trabaja con geometrías regulares, la densidad de la malla se controla a través de ciertos parámetros, como el tamaño máximo de los elementos finitos. Debido a que en nuestro caso, la geometría del dominio de simulación es regular (cilindro finito) se creó un mallado estándar del dominio utilizando entre 8000 y 10000 elementos tetraédricos dependiendo de las dimensiones de los envases.

En todas las simulaciones se consideró una temperatura inicial uniforme de 25°C y un valor constante (perturbación escalón) de la temperatura externa igual a 110°C. El software permite conocer los perfiles de temperatura en todos los nodos que surgen de la discretización del dominio de simulación, a intervalos de tiempo muy pequeños. En la figura 5.2 se muestra una distribución típica de temperaturas tal cual se obtiene del entorno de FEMLAB, para un tiempo dado, en dos planos del dominio.

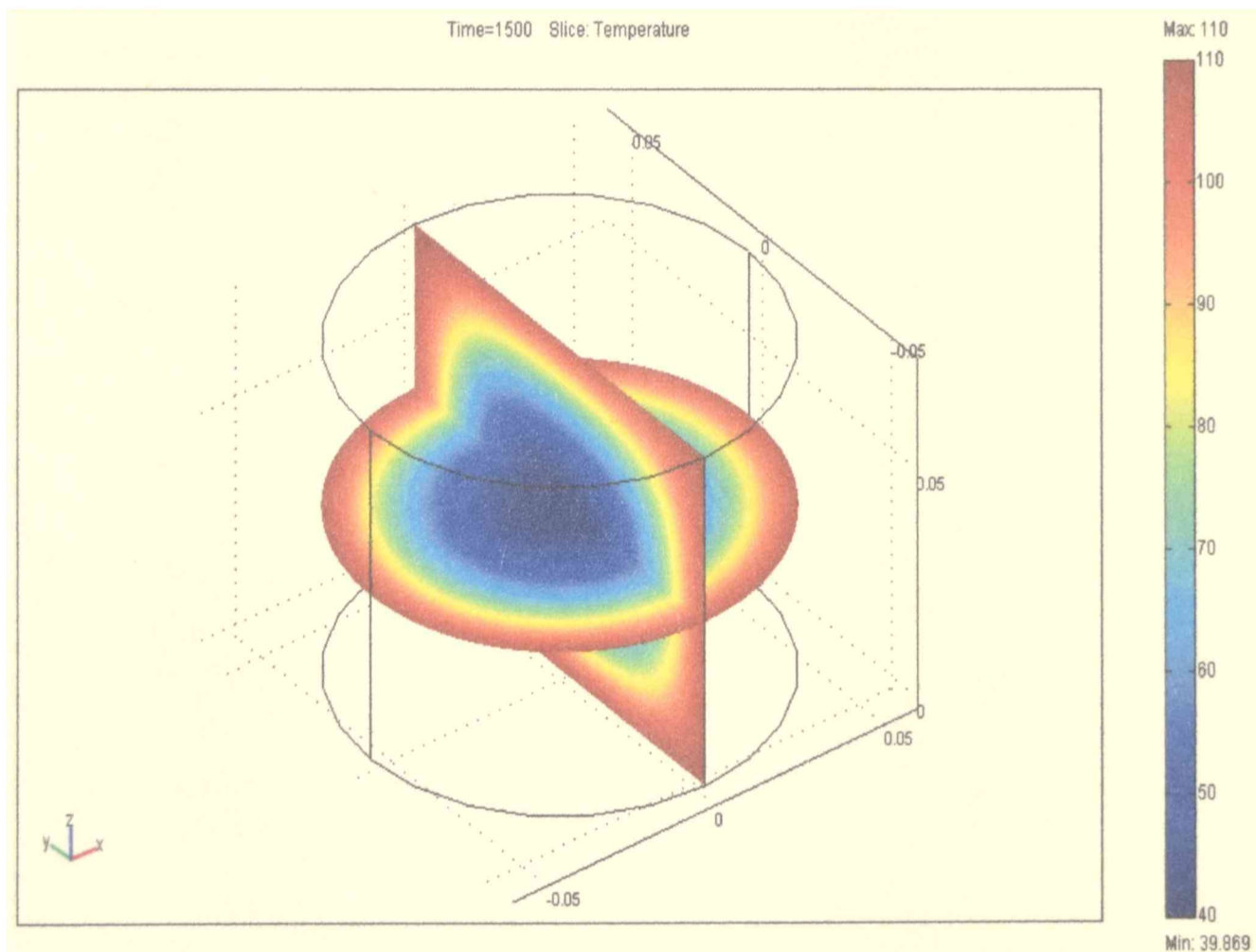


Figura 5.2. Distribución de temperaturas en dos planos del dominio 3D a un tiempo determinado

Sin embargo para el cálculo posterior de los coeficientes f_n se trabajó únicamente con el perfil de temperatura correspondiente al centro térmico, discretizando con un intervalo fijo de muestreo Δ .

5.1.3. Validación del método de elementos finitos

Algunas de las experiencias mencionadas en la sección 4.4.1 fueron simuladas en FEMLAB para chequear la capacidad del software de reproducir con exactitud el comportamiento del sistema a estudiar así como también para verificar la exactitud de los valores de las propiedades físicas adoptadas para simular el comportamiento térmico del atún y la suposición de temperatura prescrita.

La figura 5.3 muestra la evolución térmica, experimental y simulada, del centro térmico de un envase en particular (muestra S7 de la tabla 4.1). Se realizaron varias experiencias, y en todos los ensayos realizados se observa alta correlación entre los datos experimentales y simulados, lo cual confirma la precisión del software de elementos finitos.

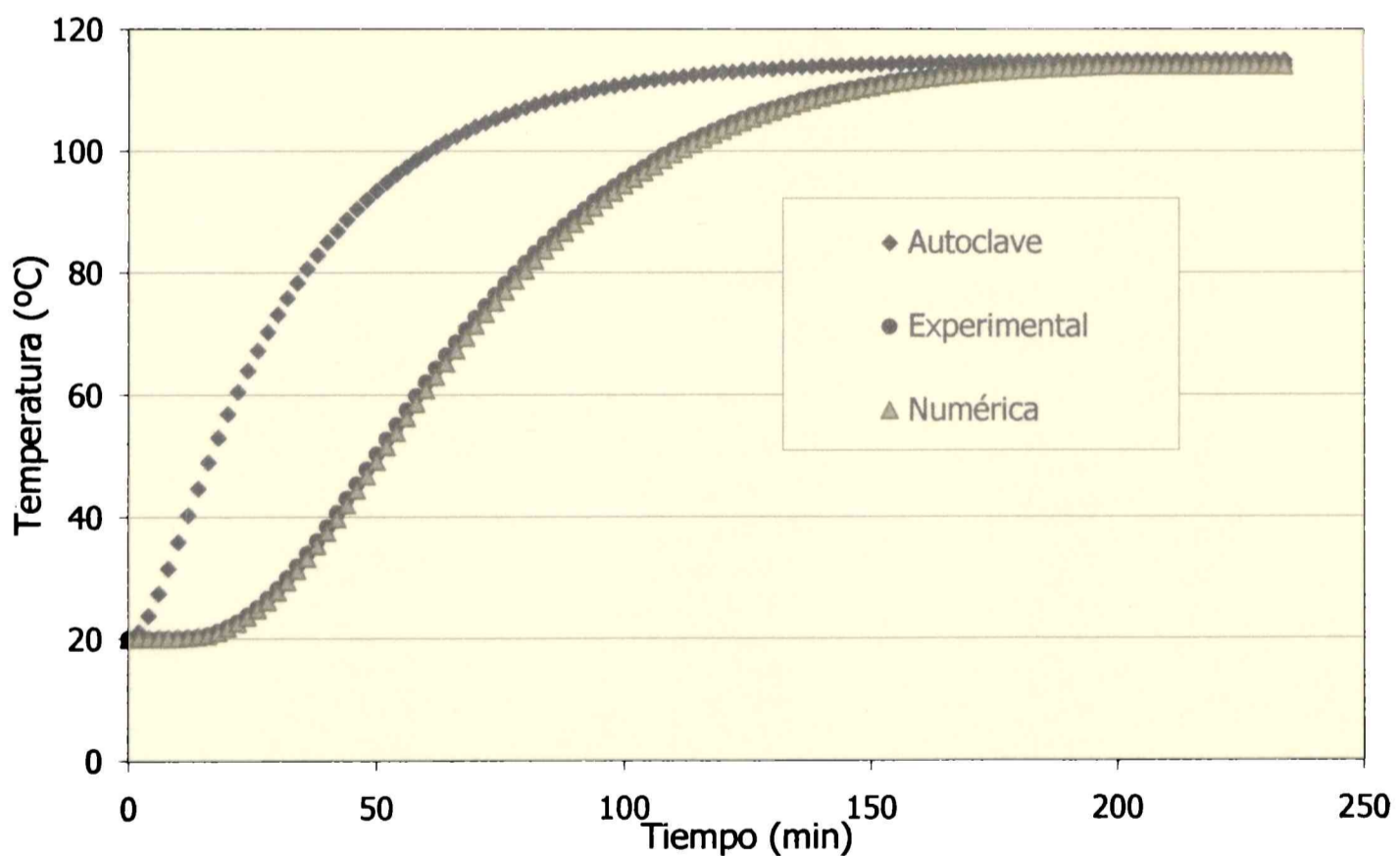


Figura 5.3. Evolución de la temperatura, experimental y simulada, del centro térmico del envase S7 bajo condiciones de temperatura externa variable.

5.1.4. Cálculo de los coeficientes f_n

5.1.4.1. f_n para distintas posiciones dentro de un mismo envase

Si bien el objetivo del presente trabajo de tesis se basa en la caracterización, mediante funciones de transferencia discretas, de la respuesta térmica del centro térmico de distintos tamaños de envases para el desarrollo de métodos simplificados de predicción de temperatura que nos permitan diseñar el procesamiento térmico de este tipo de productos, es importante demostrar la capacidad de las funciones de transferencia z para predecir temperaturas en todo el dominio. Es por ello que se reportan en esta sección resultados adicionales (tanto experimentales como predichos) para distintas posiciones radiales y axiales dentro de un mismo tamaño de envase (envase S1). Los coeficientes de la función de transferencia fueron obtenidos a través de la metodología detallada en la sección 4.2.2 sólo que ahora se utilizan las historias térmicas simuladas pertenecientes a distintas posiciones dentro del envase S1. Se empleó un intervalo de muestreo Δ de 2 minutos.

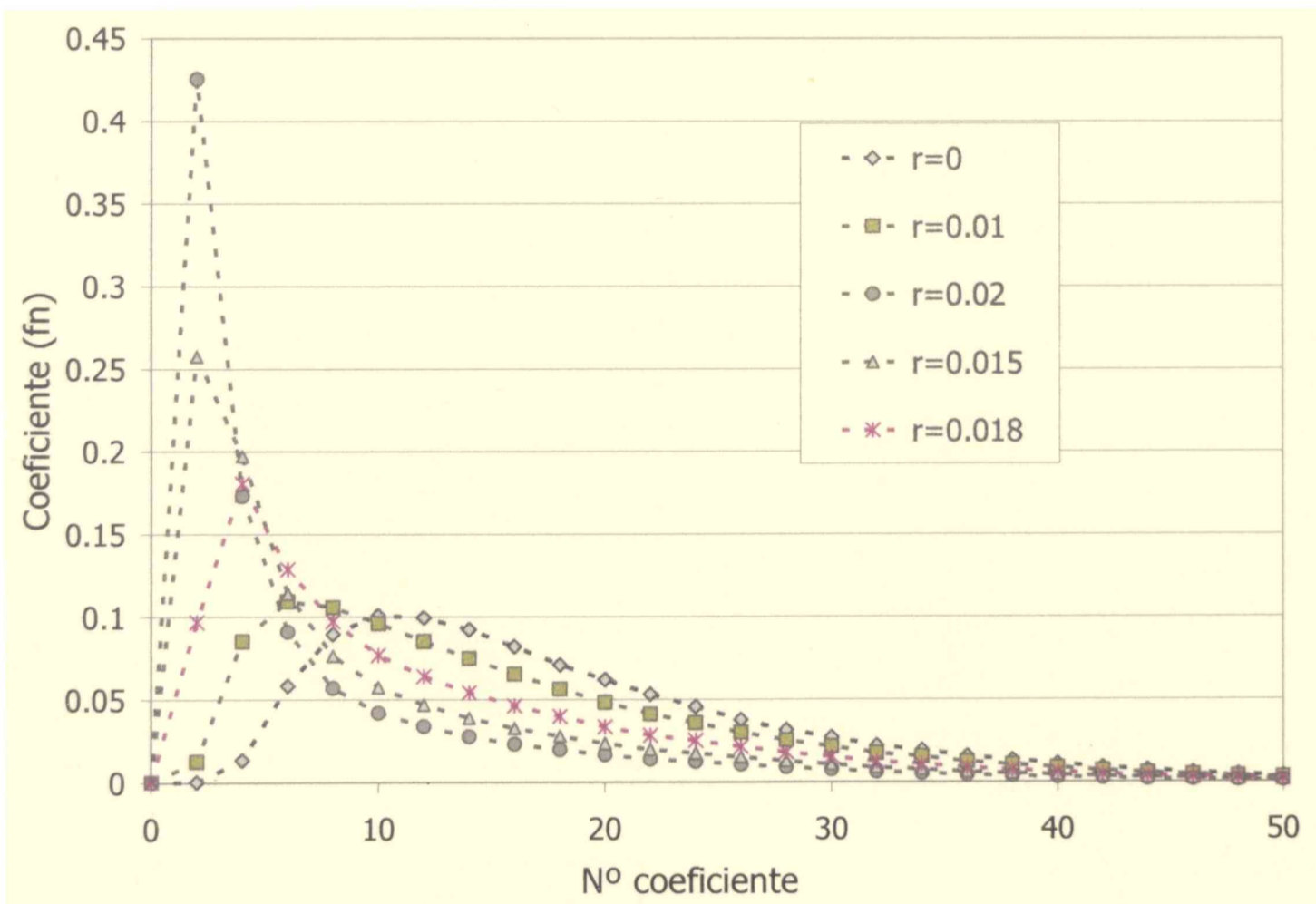


Figura 5.4. Coeficientes f_n obtenidos para distintas posiciones radiales y altura constante (envase S1)

Se muestran en la figura 5.4 los coeficientes de la función de transferencia obtenidos para distintas posiciones radiales dentro del envase S1. La altura se mantuvo constante e igual a 0.036m ($H/2$). Como puede observarse, los coeficientes obtenidos para la posición radial $r=0$ corresponden a los f_n del punto crítico (centro térmico) de ese envase.

A partir de los coeficientes calculados (figura 5.4), se obtiene para cada posición la respuesta térmica predicha bajo condiciones de temperatura variable de autoclave. Estas historias predichas son comparadas con las obtenidas experimentalmente. Los resultados se muestran en la figura 5.5. En todos los casos se observa alta correlación entre temperaturas calculadas y experimentales.

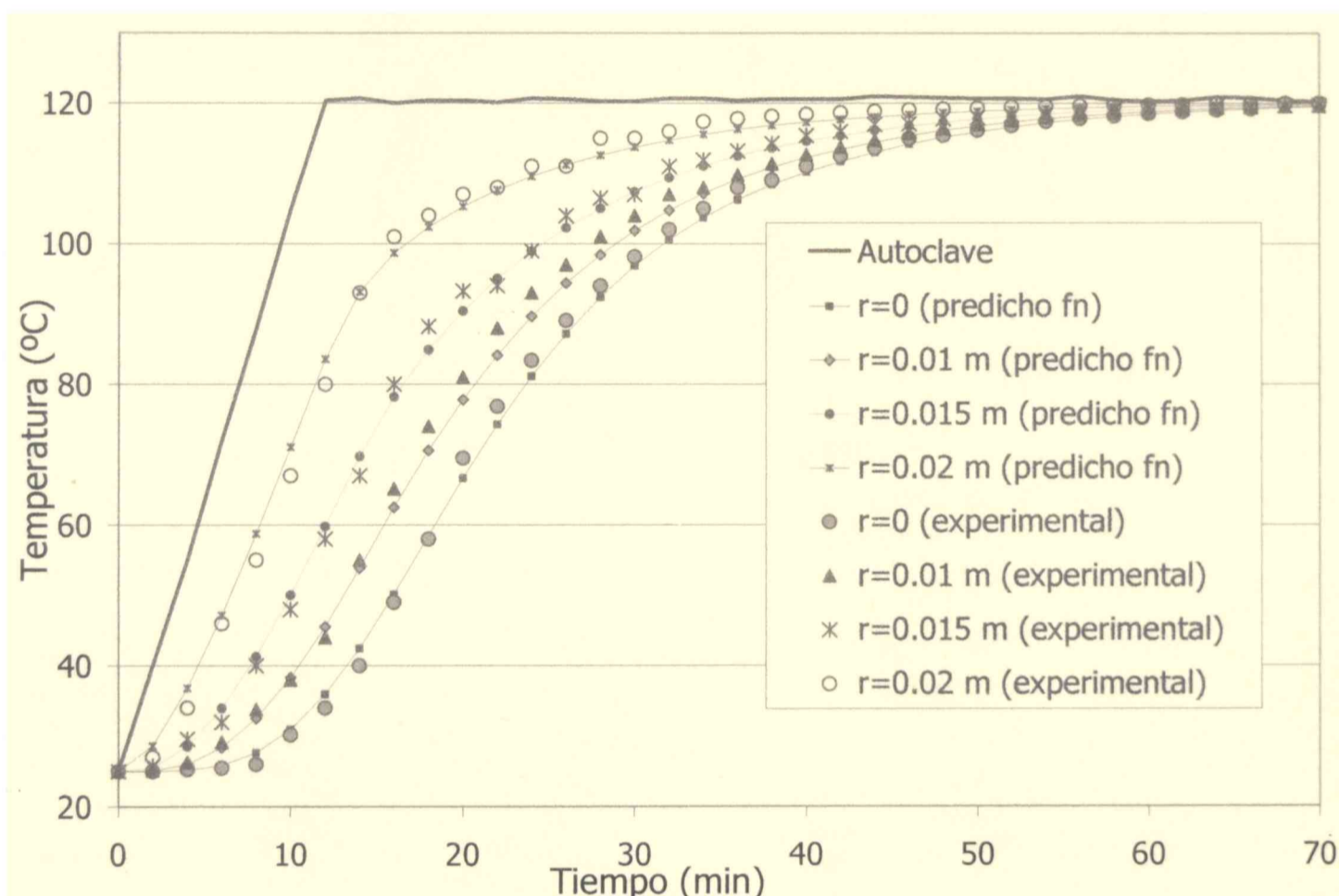


Figura 5.5. Historias térmicas predichas y experimentales para distintas posiciones radiales dentro del envase S1

Idénticos resultados fueron obtenidos para distintas posiciones axiales dentro del envase.

Lo anterior demuestra que la presente metodología es válida para geometrías 3D y que por lo tanto también pueden obtenerse expresiones generales de los coeficientes de la

función de transferencia $F(z)$ en función de las distintas posiciones (radiales o axiales) para cualquier tamaño de envase.

5.1.4.2. f_n para el centro térmico de distintos tamaños de envases

Para obtener los coeficientes de la función de transferencia para el centro térmico a través de la metodología detallada en la sección 5.1.2, se realizaron numerosas simulaciones considerando un total de 60 tamaños distintos de envases.

Las figuras 5.6a y 5.6b presentan los coeficientes f_n del centro térmico calculados para envases cilíndricos de distintos tamaños, empleando un intervalo de muestreo Δ de 2 minutos.

Con el fin de analizar la dependencia de la función $F(z)$ con el intervalo de muestro Δ , se calcularon los valores f_n utilizando otros valores de Δ , 0.5 y 4 minutos respectivamente. Los resultados se obtuvieron para todos los envases simulados pero sólo se muestran para dos de ellos (figura 5.7). Como se puede ver, la forma de las gráficas de f_n vs. n es similar a las mostradas en las figuras 5.4. y 5.6. Sin embargo se encuentra que utilizando $\Delta = 0.5$ minutos se tiene un número excesivamente alto de coeficientes para cada tamaño (alrededor de 160) y el orden de los coeficientes es demasiado pequeño además de generarse valores sucesivos muy similares, lo que "molesta" en la etapa posterior de ajuste de la funcionalidad de f_n vs. D y H . Por el contrario, un valor de $\Delta = 4$ minutos puede enmascarar la respuesta macroscópica del sistema y, dependiendo de la relación D/H , no se evidencia un máximo pronunciado de f_n , y por consiguiente la sumatoria total de f_n (ec. (4.22)) es bastante menor que 0.99.

Basado en principios teóricos de transferencia de calor en sistemas conductivos con propiedades constantes, se desarrollaron y ensayaron dos modelos de regresión (ecs. (5.5) y (5.6)) para describir la influencia del intervalo de muestreo Δ sobre los coeficientes de la función de transferencia f_n :

$$f_n = a(n\Delta)^d \exp(-b(n\Delta - c)) \quad (5.5)$$

$$f_n = a(n\Delta)^d \exp(-b(n\Delta)) \quad (5.6)$$

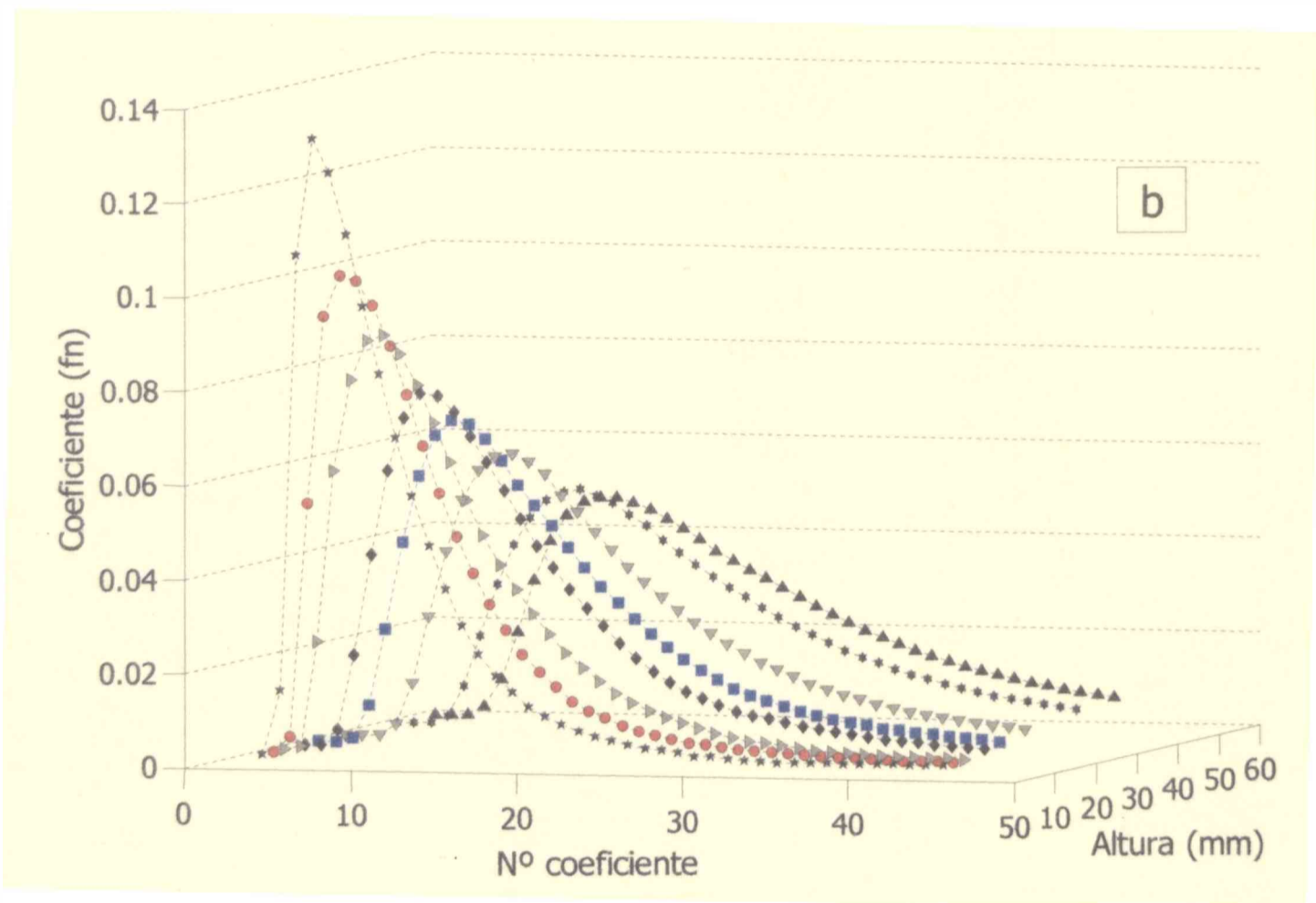
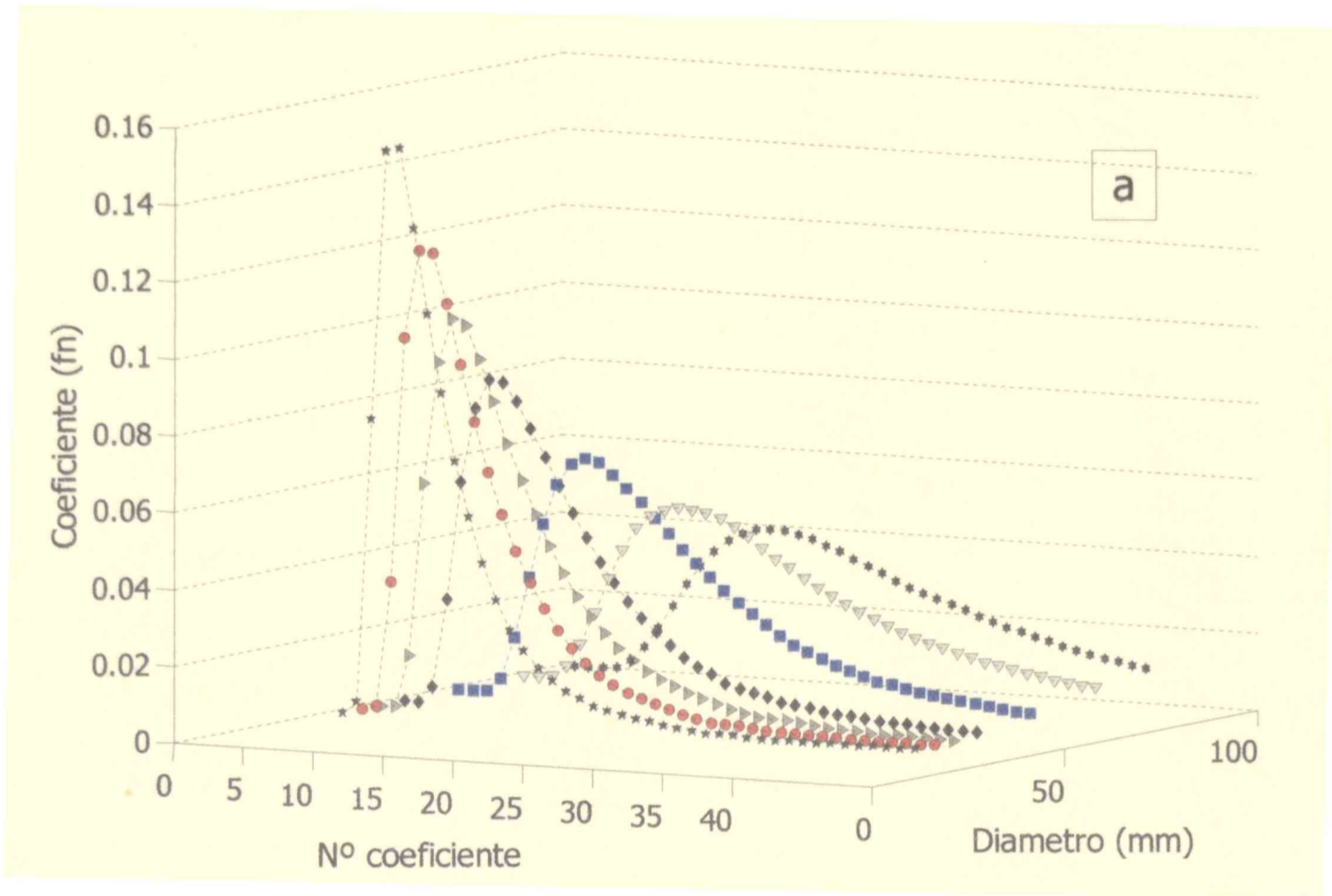


Figura 5.6. Coeficientes de $F(z)$, para atún en envases cilíndricos; (a) $H = 72$ mm y diferentes valores de D ; (b) $D = 73$ mm y diferentes valores de H .

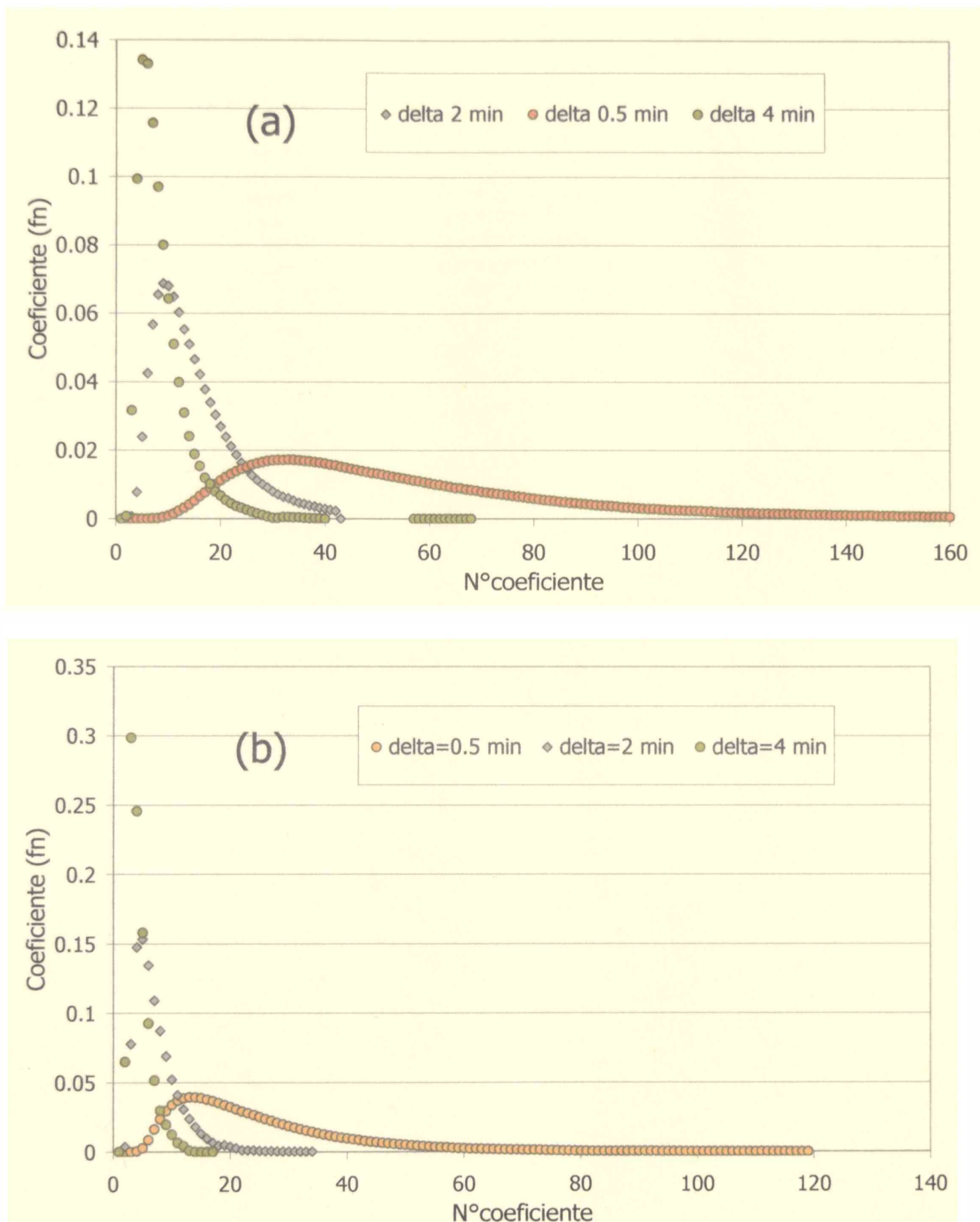


Figura 5.7. Coeficientes f_n calculados a partir de distintos intervalos de muestreo; (a) envase de $D=0.073$ m y $H=0.057$ m; (b) envase de $D=0.04$ m y $H=0.06$ m.

Todos los parámetros de regresión calculados en este capítulo, incluidos los de las ecs. (5.5) y (5.6) fueron obtenidos mediante regresión no lineal empleando la rutina de cuadrados mínimos *lsqcurvefit* (MATLAB 7.0). El listado de los programas utilizados para la estimación de parámetros se encuentra en el ANEXO.

Se muestran en la tabla 5.1 los valores de los parámetros empíricos **a**, **b**, **c** y **d** así como también el valor del r^2 del ajuste de los coeficientes de la función de transferencia con la ec. (5.5) para algunos de los tamaños de envases simulados.

Tabla 5.1. Parámetros empíricos de ajuste para la ec. (5.5)

Dimensión envase (D×H) (m)	Parámetro empírico de ajuste				r^2
	a	b	c	d	
0.040×0.020	0.0948	0.648	$4.15 \cdot 10^{-4}$	2.692	0.9951
0.040×0.040	0.0042	0.410	$4.86 \cdot 10^{-4}$	2.701	0.9806
0.040×0.070	0.0081	0.310	$4 \cdot 10^{-5}$	2.571	0.9778
0.040×0.080	0.0088	0.303	$4.5 \cdot 10^{-5}$	2.498	0.9741
0.040×0.010	0.0088	0.304	$5.27 \cdot 10^{-5}$	2.502	0.9705
0.040×0.113	0.0087	0.306	$1.15 \cdot 10^{-8}$	2.511	0.9707
0.040×0.010	0.0088	0.304	$1.96 \cdot 10^{-6}$	2.502	0.9705
0.060×0.010	$5.716 \cdot 10^{-4}$	0.147	$1.18 \cdot 10^{-7}$	2.564	0.9602
0.080×0.010	$4.7675 \cdot 10^{-5}$	0.099	$3.5 \cdot 10^{-7}$	2.867	0.9615
0.010×0.010	$1.3647 \cdot 10^{-5}$	0.073	$6.8 \cdot 10^{-12}$	2.883	0.9697
0.073×0.050	$8.19 \cdot 10^{-4}$	0.155	$7.2 \cdot 10^{-5}$	2.442	0.9799
0.073×0.057	$4.99 \cdot 10^{-4}$	0.139	$1.15 \cdot 10^{-7}$	2.496	0.9703
0.073×0.070	$3.35 \cdot 10^{-4}$	0.118	$1.96 \cdot 10^{-6}$	2.438	0.9590
0.073×0.080	$3.25 \cdot 10^{-4}$	0.116	$1.18 \cdot 10^{-7}$	2.623	0.9622
0.073×0.095	$1.04 \cdot 10^{-4}$	0.119	$3.5 \cdot 10^{-7}$	2.833	0.9610
0.073×0.113	$1.07 \cdot 10^{-4}$	0.100	$6.8 \cdot 10^{-12}$	2.502	0.9534
0.040×0.072	0.0029	0.330	$4 \cdot 10^{-5}$	2.505	0.9880
0.045×0.072	0.0017	0.248	$4.5 \cdot 10^{-5}$	2.310	0.9764
0.050×0.072	0.0011	0.194	$5.27 \cdot 10^{-5}$	2.177	0.9883
0.056×0.072	0.0007	0.155	$1.15 \cdot 10^{-8}$	2.121	0.9769
0.070×0.072	0.0002	0.112	$1.96 \cdot 10^{-7}$	1.95	0.9709
0.080×0.072	0.0001	0.093	$1.18 \cdot 10^{-8}$	1.87	0.9687
0.087×0.072	0.0002	0.072	$3.5 \cdot 10^{-9}$	1.81	0.9662
0.095×0.072	0.0002	0.064	$3.5 \cdot 10^{-8}$	1.766	0.9561
0.010×0.072	0.0001	0.061	$3.5 \cdot 10^{-10}$	1.76	0.9501

Debido al tamaño de los sistemas bajo estudio, el parámetro empírico **c** de la ec. (5.5), que sería equivalente a una demora, siempre presentó valores prácticamente nulos. Es por ello que el ajuste fue realizado en todos los casos con la ec. (5.6), obteniéndose alta correlación para todos los envases muestreados ($r^2 > 0.95$ en todos los casos).

A partir de los coeficientes calculados con $\Delta = 2$ minutos, se estudió la dependencia de los parámetros de ajuste de la ec. (5.6), **a**, **b** y **d**, con el diámetro y la altura de los envases, con el objetivo de encontrar relaciones sencillas de correlación, que permitan evaluar la función de transferencia $F(z)$ para cualquier otro tamaño de envase sólo conociendo sus dimensiones.

Tabla 5.2. Parámetros empíricos de ajuste

Dimensión envase (D×H) (m)	Parámetro empírico de ajuste		r^2
	a	b	
0.040×0.072	0.0089	0.3037	0.9757
0.045×0.072	0.0043	0.2470	0.9755
0.050×0.072	0.0023	0.2061	0.9751
0.056×0.072	0.0012	0.1709	0.9742
0.070×0.072	$3.6514 \cdot 10^{-4}$	0.1215	0.9659
0.087×0.072	$1.7647 \cdot 10^{-4}$	0.1	0.9718
0.095×0.072	$9.9747 \cdot 10^{-5}$	0.0844	0.9625
0.010×0.072	$7.99 \cdot 10^{-5}$	0.0791	0.9694
0.073×0.030	0.0084	0.3043	0.9514
0.073×0.035	0.0036	0.2375	0.9741
0.073×0.040	0.0019	0.1957	0.9809
0.073×0.050	$7.9259 \cdot 10^{-4}$	0.1520	0.9801
0.073×0.057	$5.2195 \cdot 10^{-4}$	0.1346	0.9700
0.073×0.070	$3.1976 \cdot 10^{-4}$	0.1170	0.9597
0.073×0.095	$2.0351 \cdot 10^{-4}$	0.1036	0.9651
0.073×0.113	$1.7966 \cdot 10^{-4}$	0.1005	0.9534

En este sentido se consideró una amplia variedad de modelos empíricos, contemplando relaciones de tipo exponencial, logarítmica, polinómicas, etc. El primer análisis de los resultados obtenidos del ajuste de la ec. (5.6) a las numerosas series de coeficientes de

funciones de transferencia mostró una variación muy leve del parámetro **d** calculado para distintos tamaños. En consecuencia se adoptó un valor constante, igual a 2.5, de dicho exponente, y se repitió el ajuste de la ec. (5.6) recalculando los valores **a** y **b**, que sí dependen fuertemente del diámetro D y la altura H de los envases.

Por consiguiente, fijando ese valor, se ajustaron nuevamente los parámetros **a** y **b** de la ec. (5.6). En la tabla 5.2 se muestran, para algunos tamaños de envases, los nuevos valores de **a** y **b** recalculados. Debido al elevado número de envases simulados, sólo se muestran algunos tamaños a modo de ejemplo. Se eligen estos tamaños de envases para poder comparar con los valores de la tabla 5.1 y observar la variación de ambos parámetros al mantener constante el diámetro variando la altura y viceversa.

Se encuentra que los modelos que reproducen con mayor precisión la dependencia de **a** y **b** con las dimensiones, para la totalidad de tamaños de envases simulados, son los presentados en las ecs. (5.7) y (5.8):

$$a = 2.8575^{-17} D^{-6.7032} H^{-4.4884} \quad r^2=0.9937 \quad (5.7)$$

$$b = 4.3398^{-4} D^{-1.8337} \left[\left(\frac{D}{H} \right)^2 - 0.9376 \left(\frac{D}{H} \right) + 2.1223 \right] \quad r^2=0.9990 \quad (5.8)$$

Las Figuras 5.8a y 5.8b muestran los gráficos 3D de los parámetros empíricos **a** y **b** en función del diámetro y la altura de los envases de manera de poder visualizar el efecto de cada variable sobre los parámetros de regresión. De estos gráficos puede observarse que el valor del parámetro **a** aumenta considerablemente para valores mas pequeños de D y H. En cambio, la variación del parámetro **b** con las dimensiones de los envases es mucho más suave.

Para validar las ecuaciones de regresión propuestas, los valores numéricos de f_n se comparan con los valores predichos (ecs. (5.6), (5.7) y (5.8)). Nuevamente puede observarse alta correlación en todos los casos ($r^2 > 0.95$).

Los coeficientes simulados y predichos para dos muestras en particular se comparan en las figuras 5.9a y 5.9b, observando una buena concordancia entre los distintos valores. Resultados similares fueron obtenidos para el set completo de envases.

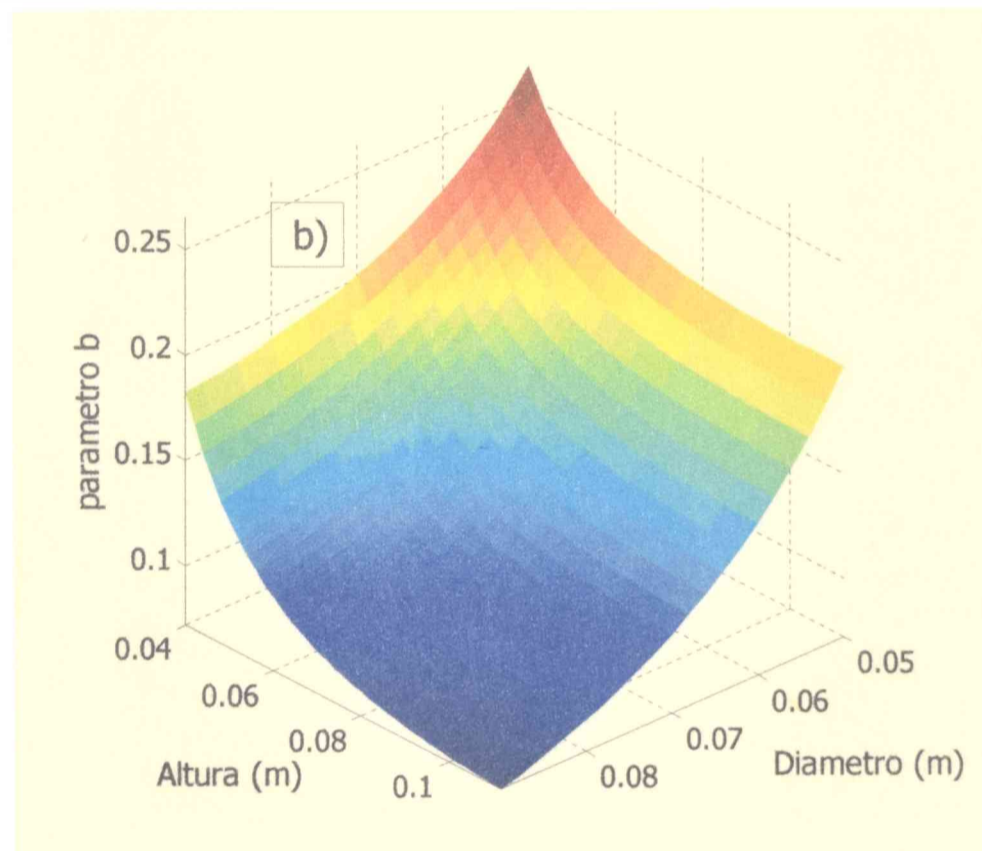
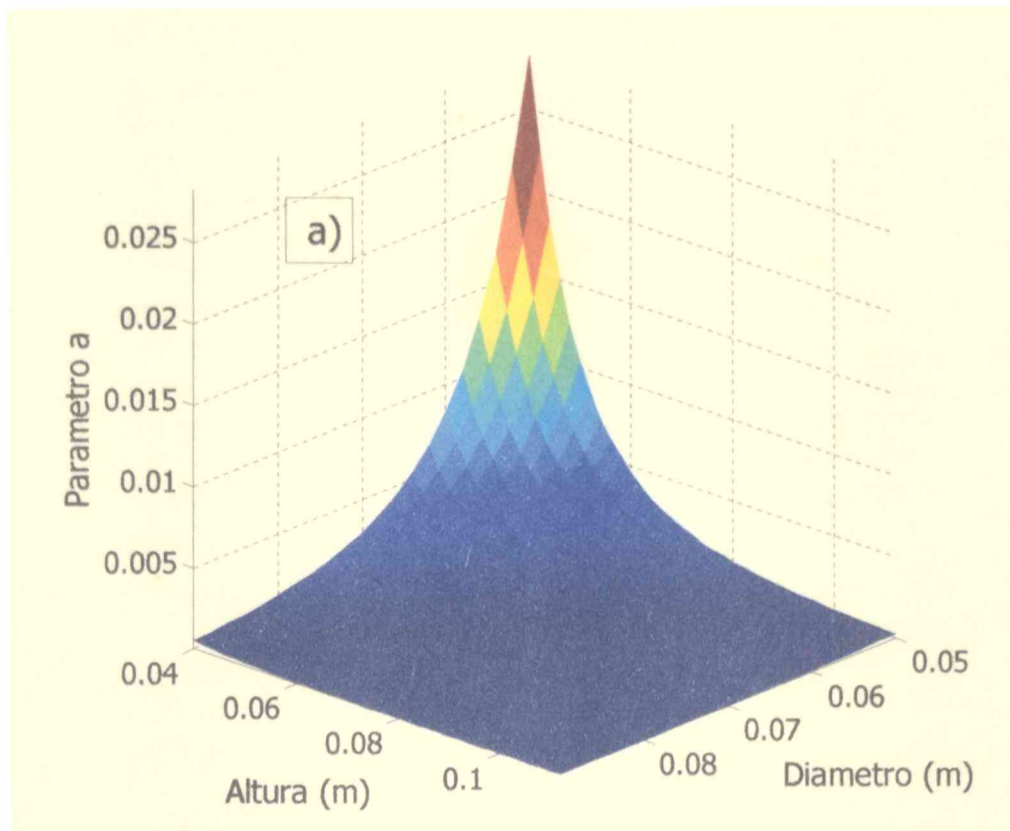


Figura 5.8. Gráfico de superficie 3D de los parámetros empíricos **a** y **b** de la ec. (5.6) vs. diámetro y la altura de los envases; (a) parámetro empírico **a**; (b) parámetro empírico **b**.

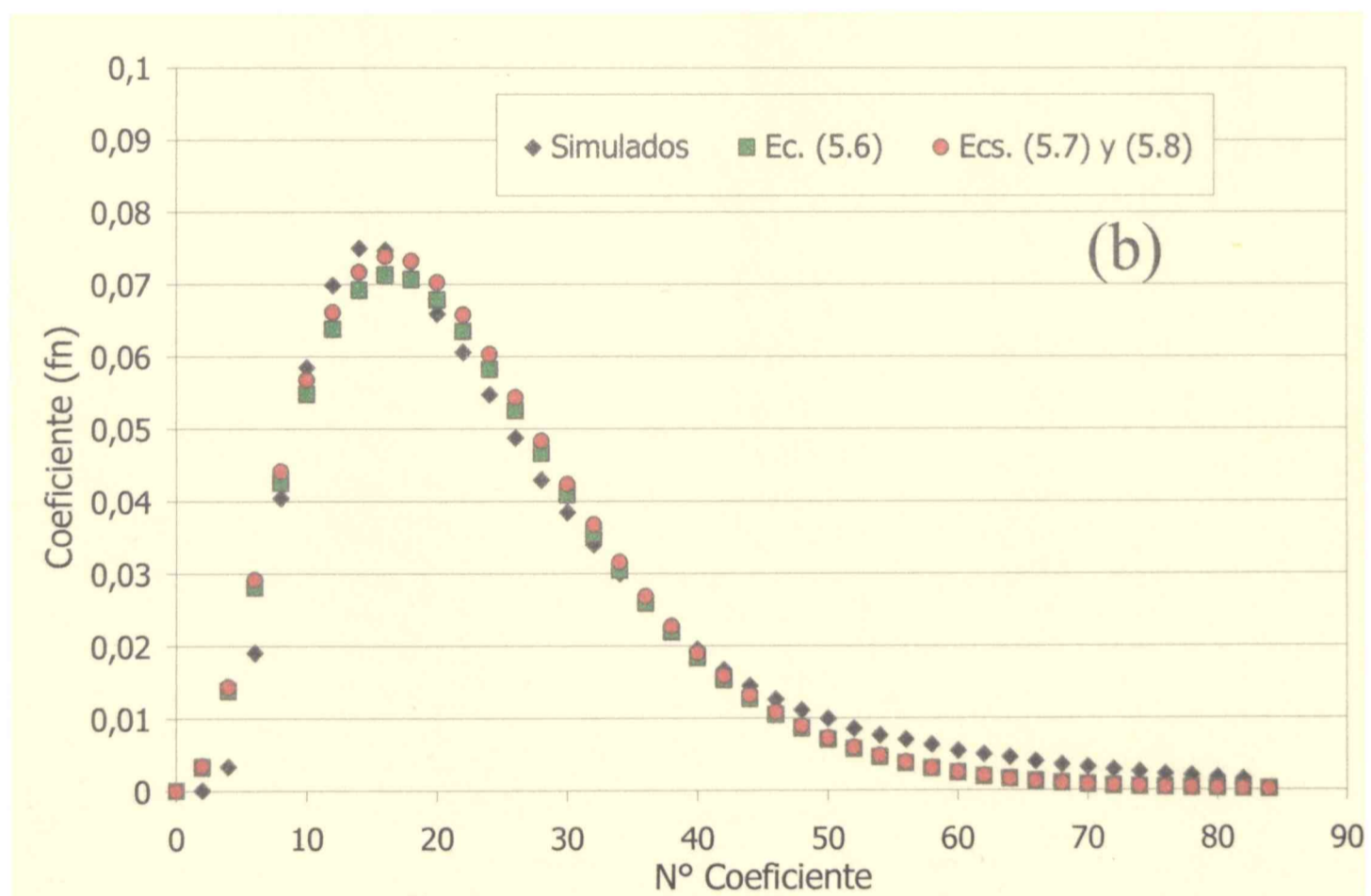
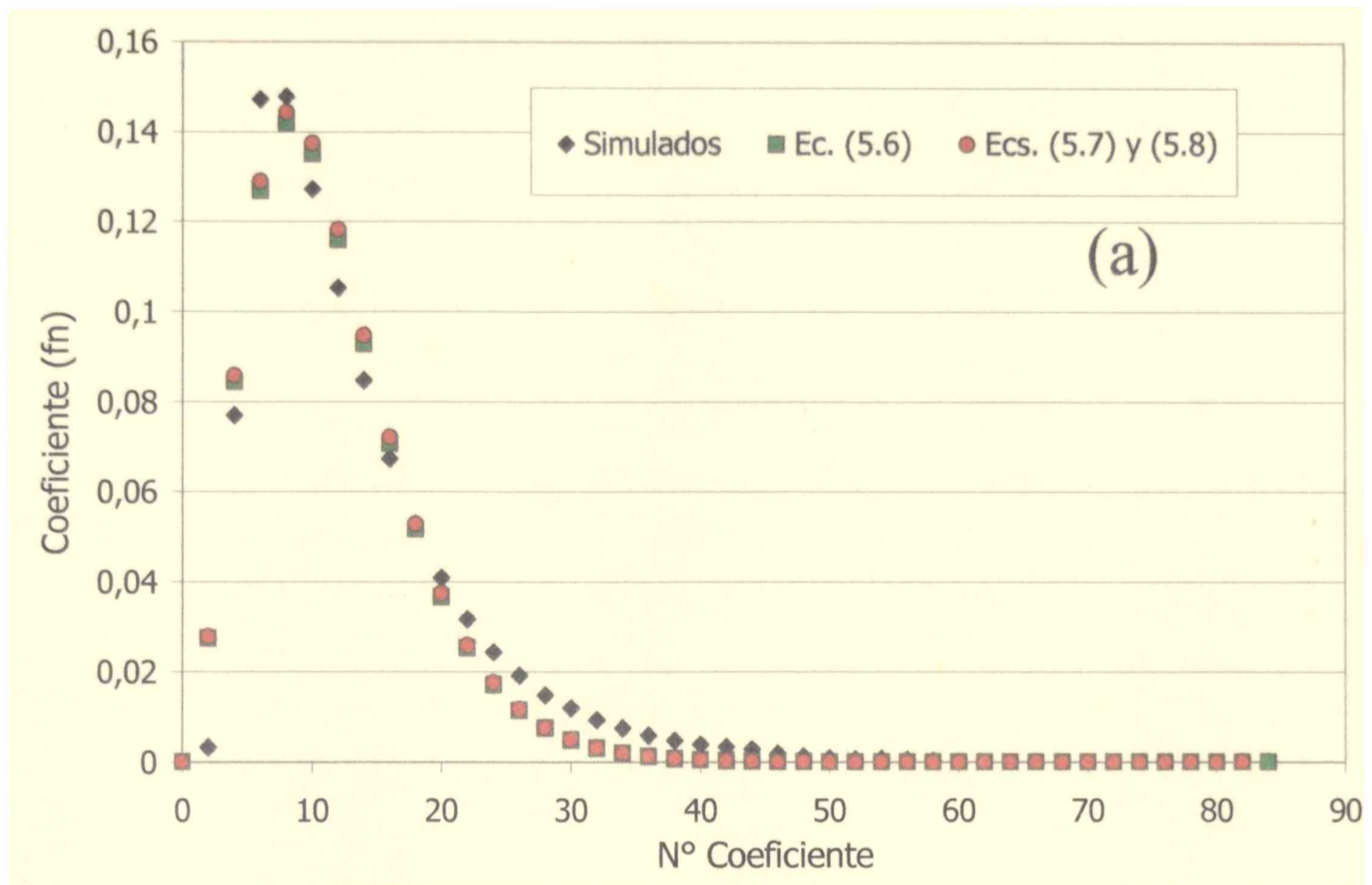


Figura 5.9. f_n simulados y predichos; (a) envase de $D=0.072$ m y $H=0.04$ m; (b) envase de $D = 0.073$ m y $H = 0.050$ m

5.1.5. Validación de funciones de transferencia

Se testeó la capacidad de las funciones de transferencia para predecir la respuesta térmica de un envase (muestra S2, tabla 4.1) bajo una perturbación externa variable. Se utilizaron los coeficientes f_n predichos (ecs. (5.6), (5.7) y (5.8)) para el cálculo de la respuesta térmica. La figura 5.10 muestra la evolución, experimental y predicha, de la temperatura en el centro del envase S2 con un típico come-up time de autoclave y con temperaturas inicial y externa diferentes a las utilizadas en el cálculo de la función de transferencia. La alta correlación entre los resultados experimentales y predichos confirma que la función de transferencia de un sistema es única e independiente de T_i y T_{ext} .

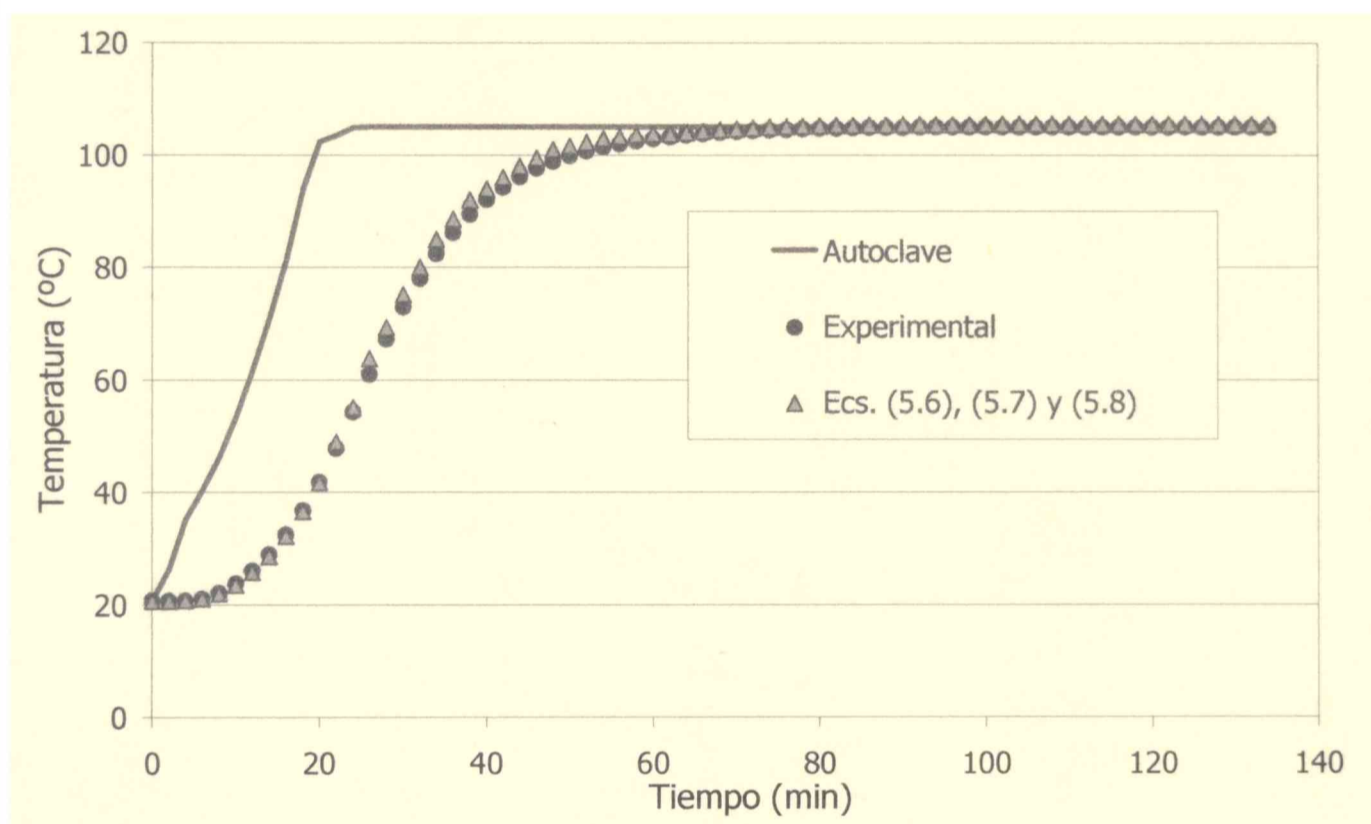


Figura 5.10. Evolución de la temperatura, experimental y predicha, en el centro del envase S2 bajo condiciones de temperatura variable ($T_i = 20^\circ\text{C}$ y $T_{final} = 105^\circ\text{C}$).

La figura 5.11 muestra la respuesta predicha del centro térmico de la muestra S7 por la función de transferencia bajo condiciones de temperatura de autoclave variable. La historia térmica predicha fue validada con resultados provenientes de la simulación numérica de elementos finitos, debido a la dificultad de generar la perturbación VRT propuesta en nuestro autoclave controlado en forma manual. Nuevamente los resultados confirman la exactitud del presente método.

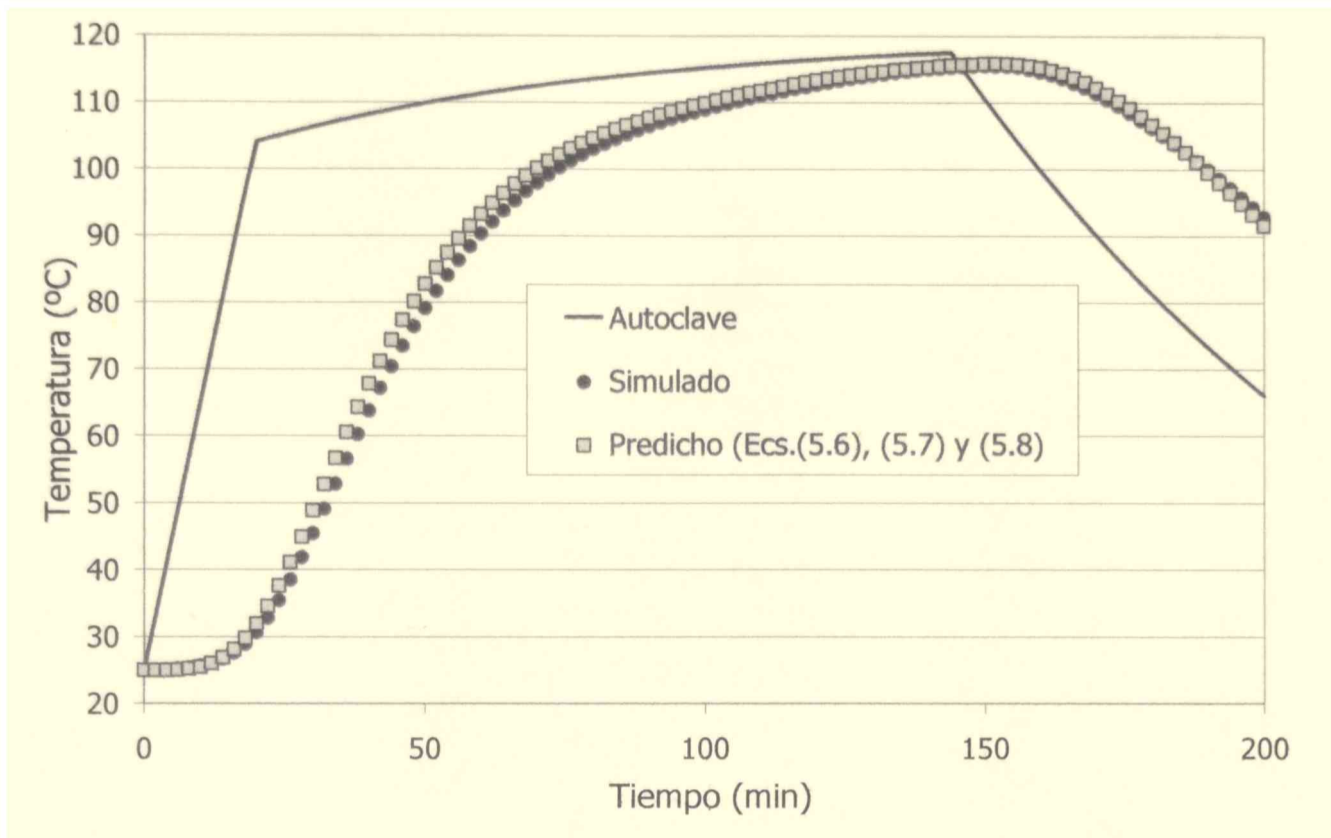


Figura 5.11. Respuesta térmica, simulada y predicha, del centro térmico de la muestra S7 bajo una perturbación VRT.

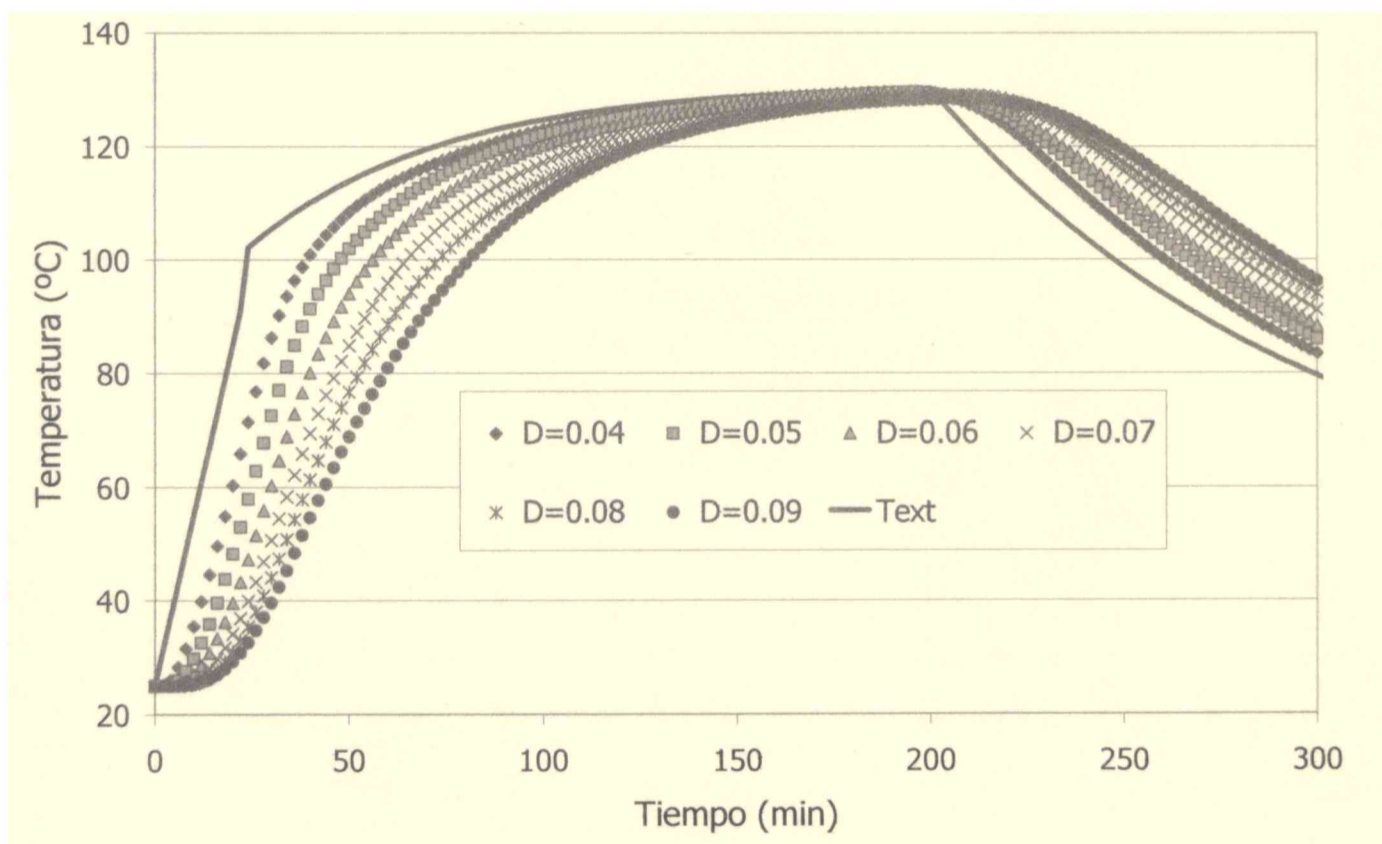


Figura 5.12. Respuesta térmica predicha para envases cilíndricos de H=0.07 m y distintos valores de D bajo una perturbación VRT.

En la figura 5.12, se muestran las respuestas térmicas predichas para distintos tamaños de envases, mostrando que la metodología presentada es una forma eficiente y práctica de poder comparar la respuesta térmica de envases de distintos tamaños.

Por último, para validar la presente metodología utilizando un producto distinto al utilizado en la simulación numérica (caballa), se muestran en la figura 5.13 las temperaturas experimentales y predichas, así como también la letalidad predicha para caballa procesada en un autoclave batch sujeto a temperaturas de autoclave variable. Nuevamente alta correlación es hallada entre los datos experimentales y predichos.

Los resultados obtenidos en la aplicación del modelo anteriormente desarrollado obtenido para atún envasado para predecir la historia térmica de caballa enlatada procesada en un autoclave batch nos muestran que el efecto de las propiedades térmicas sobre los coeficientes de la función de transferencia es débil si se consideran productos similares.

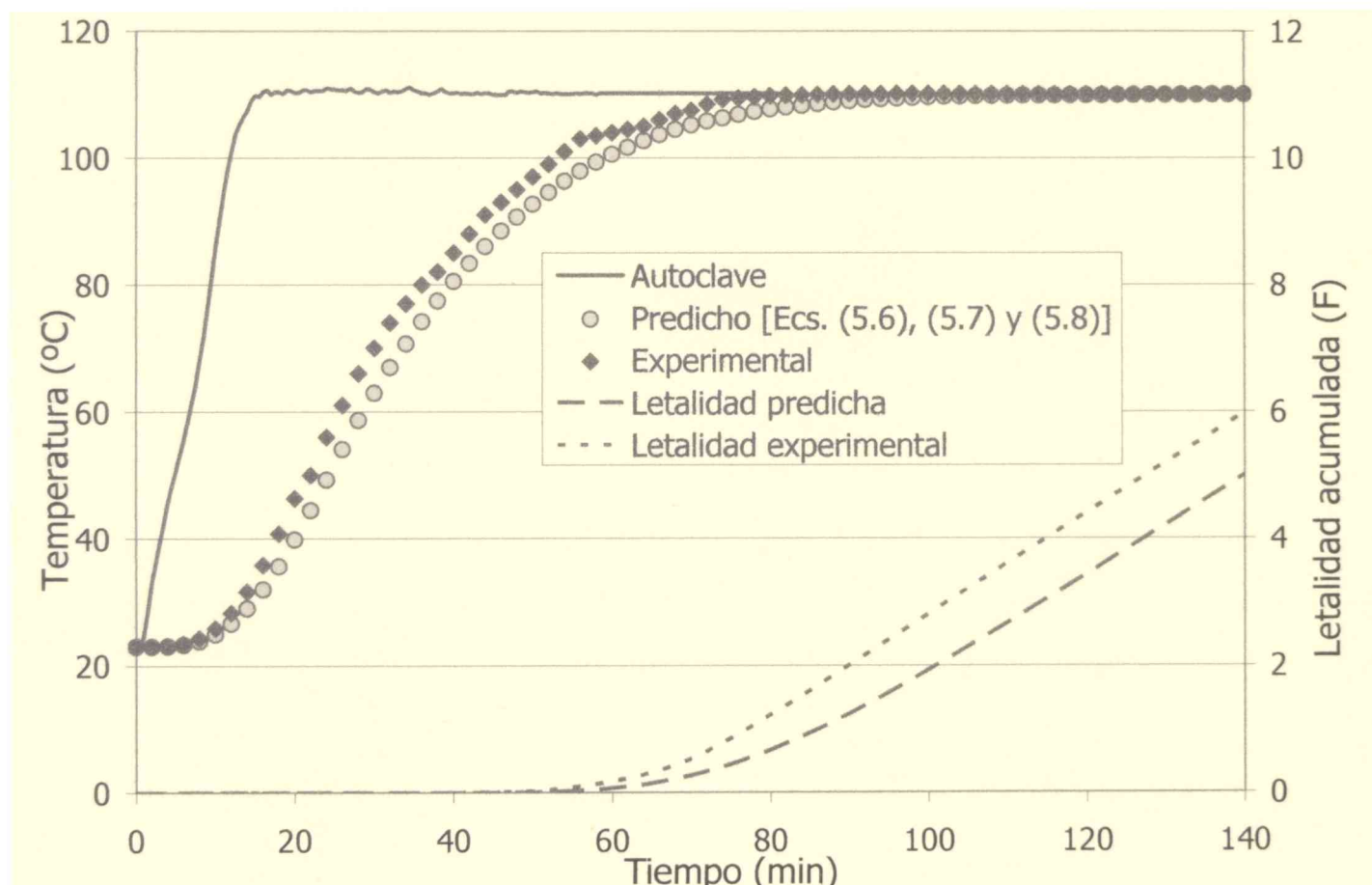


Figura 5.13. Respuesta experimental y predicha del centro térmico y letalidad acumulada para caballa envasada (muestra S2) procesada bajo condiciones de temperatura variable.

5.1.6. Vinculación de respuestas térmicas con letalidad acumulada

Para hacer a sus productos absolutamente seguros los fabricantes de conservas de pescado deben asegurarse que los procesos térmicos sean suficientes para eliminar todos los microorganismos patógenos y de deterioro. De estos el *Clostridium botulinum* es claramente el más notorio en alimentos de baja acidez ya que puede reproducirse dentro de los envases sellados y producir una toxina letal.

En función del valor de D de *Clostridium botulinum* en conservas de pescado ($D=0.21$ min en Holdsworth (1997)) y aplicando el criterio de obtener 12 reducciones decimales, el valor de F_0 es de 2.52 min. No obstante, distintos autores, invocando buenas prácticas de manufactura, sugieren procesar las conservas de estos productos hasta valores de F_0 de 5 minutos (Simpson y col. (2004)). Existen evidencias de que algunos fabricantes utilizan valores de F_0 mayores. Además de ser un derroche de tiempo y energía, procesos tan severos afectan adversamente las cualidades organolépticas del producto.

Para calcular el tiempo de proceso, hemos visto que es necesario relacionar la historia térmica del punto de calentamiento más lento, en este caso el centro del envase, con la ec. (3.3) que me permite determinar el valor F del proceso, es decir, el valor de F obtenido durante la exposición del alimento una determinada combinación tiempo-temperatura. Este valor debe ser mayor o igual al F requerido (F_0).

Como un ejemplo de lo dicho anteriormente, se testean dos perfiles VRT diferentes. Los resultados se muestran en las figuras 5.14a y 5.14b.

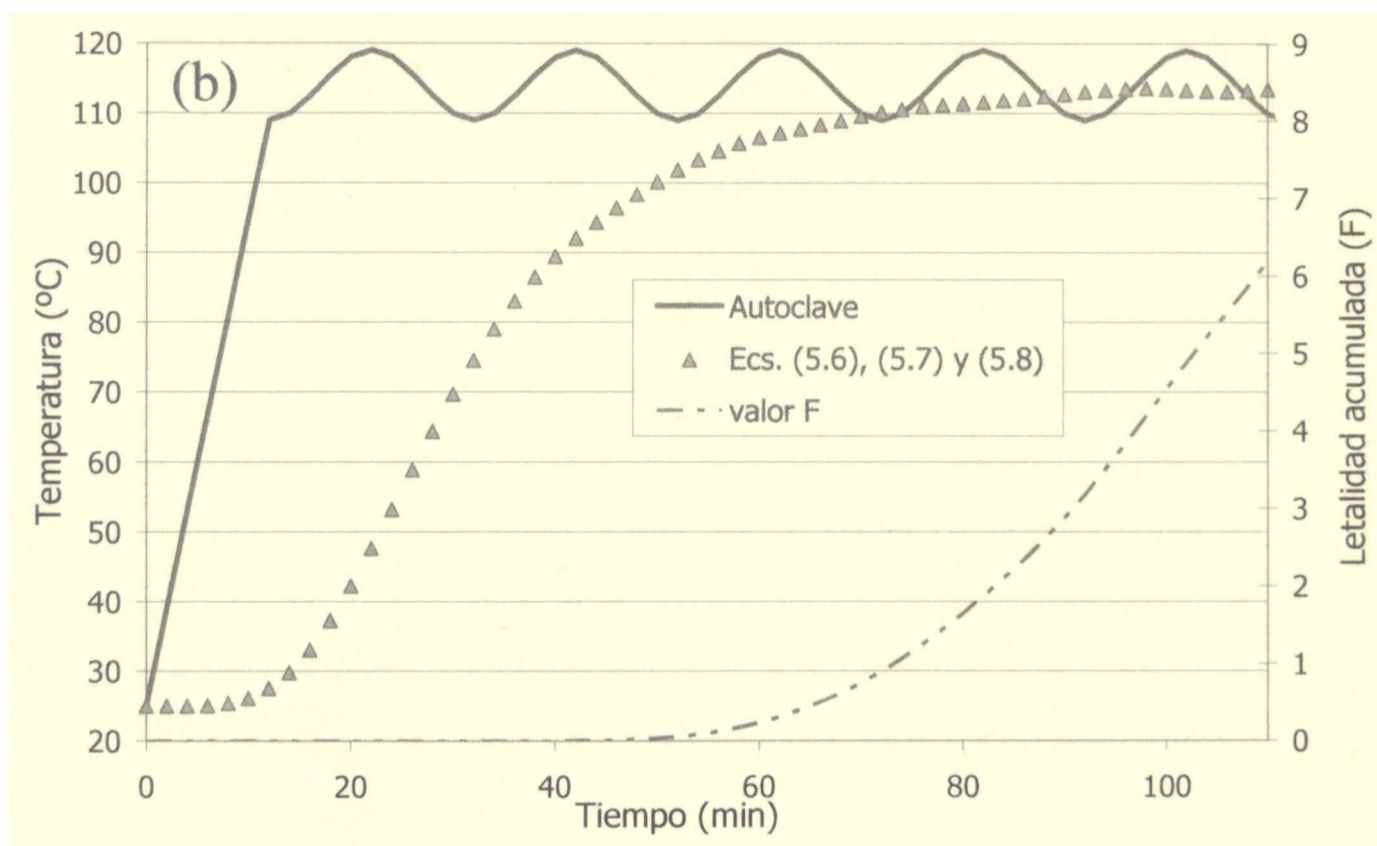
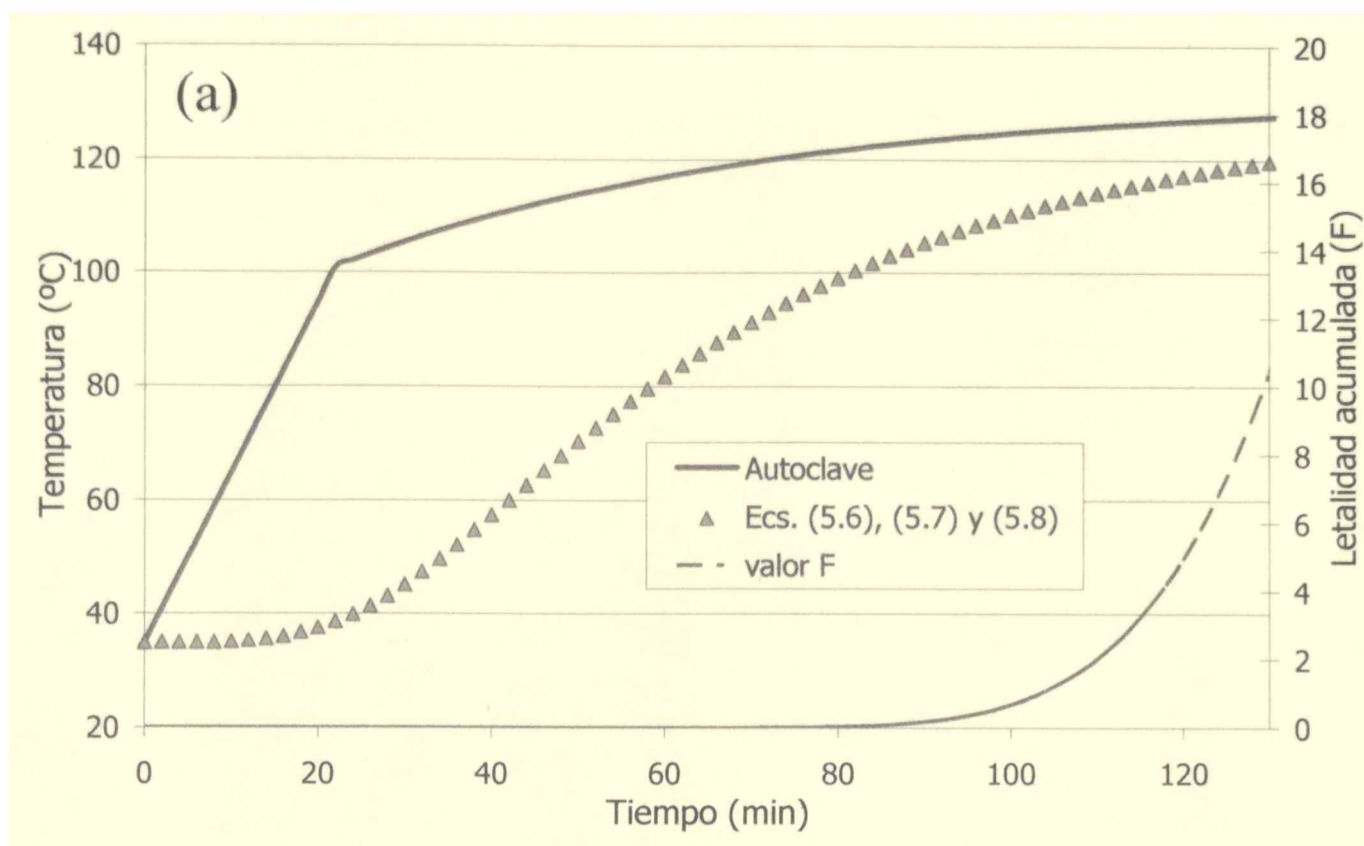


Figura 5.14. Historia térmica predicha y letalidad acumulada (F) bajo condiciones de proceso variables; (a) temperatura de autoclave lineal y exponencial, envase de $D=0.08$ m y $H=0.1$ m; (b) temperatura de autoclave lineal y sinusoidal, envase de $D=0.07$ m y $H=0.06$ m.

5.2. Sistemas Mixtos

5.2.1. Determinación de dimensiones características de los mejillones

Para comenzar con el análisis de este tipo de conservas se procedió, en primera instancia, a la caracterización del producto elegido (mejillones). Para ello fue necesario determinar tanto el peso promedio, así como también las dimensiones características de los mismos.

Se tomaron como dimensiones características la longitud del eje mayor (L_1), la del eje menor (L_2), y la profundidad (P).

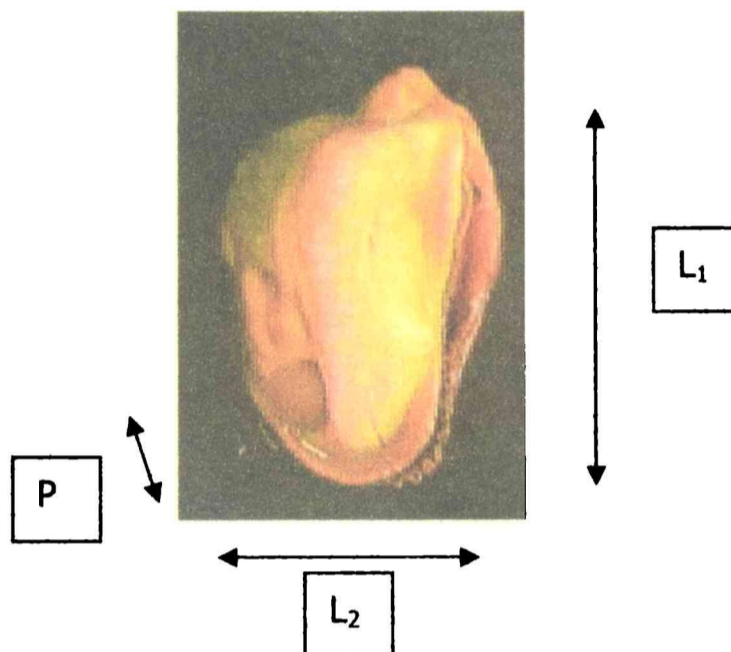


Figura 5.15. Dimensiones características del mejillón

De un total de 20 mejillones muestreados al azar ($n=20$), se obtuvieron los siguientes resultados:

Peso: 3 ± 0.3 gramos

Eje mayor (L_1): 3 ± 0.1 cm

Eje menor (L_2): 2 ± 0.2 cm

Profundidad o espesor (P): 0.8 ± 0.07 cm

5.2.2. Determinación de la ubicación del centro térmico

Para poder proceder al diseño de un procesamiento térmico es necesario conocer la historia térmica del punto más frío (centro térmico) del producto. Como ya hemos visto,

esta posición coincide con el centro geométrico del envase para conservas donde la transferencia de calor ocurre fundamentalmente por conducción pura. Sin embargo, esto no es así en el caso de conservas mixtas, donde la transferencia de calor ocurre a través de dos mecanismos: convección y conducción. En este sistema, la transferencia de calor ocurre por convección y conducción en el líquido de cobertura mientras que en las partículas sólidas el calor se transmite por conducción.

Cabe mencionar en este punto, que en conservas mixtas, la especificación de peso escurrido es muy importante al momento del envasado en el cual se incorporará fluido de cobertura. En estos casos las corrientes convectivas que se producen en el fluido favorecen la rápida transmisión de calor a la frontera de las piezas sólidas desde donde el calor es conducido más lentamente, por conducción, al interior de los trozos. Si no existe un buen control del peso escurrido puede suceder que algunos envases tengan mayor contenido de sólidos, y en consecuencia menos fluido, dando por resultado una penetración de calor más lenta en el punto de calentamiento más lento. Está claro que cada producto tendrá sus propias condiciones de tratamiento térmico.

Teniendo en cuenta que el peso escurrido es determinante de la historia térmica del alimento, se procede a evaluar la dependencia de la ubicación del centro térmico con el porcentaje de líquido de cobertura. Para ello se utiliza el envase S11 (tabla 4.2). Se procede al llenado del mismo con mejillones y salmuera en distintas proporciones cumpliendo siempre con el valor total de 380 gramos (contenido máximo de dicho envase).

Para la determinación del centro térmico, se realizaron las determinaciones experimentales detalladas en la sección 4.4.2. Las muestras, inicialmente en un baño termostático a una temperatura uniforme e igual a 25°C, fueron sumergidas en otro baño termostático a 90°C provocando una perturbación escalón en la temperatura del entorno. Se registraron las historias térmicas en varios puntos del envase sobre el eje axial.

Las historias térmicas medidas sobre el eje axial a distintas alturas (medidas desde el fondo del envase) se detallan en la figura 5.16 para el envase de dimensiones S11, con un contenido de salmuera de 50% P/P.

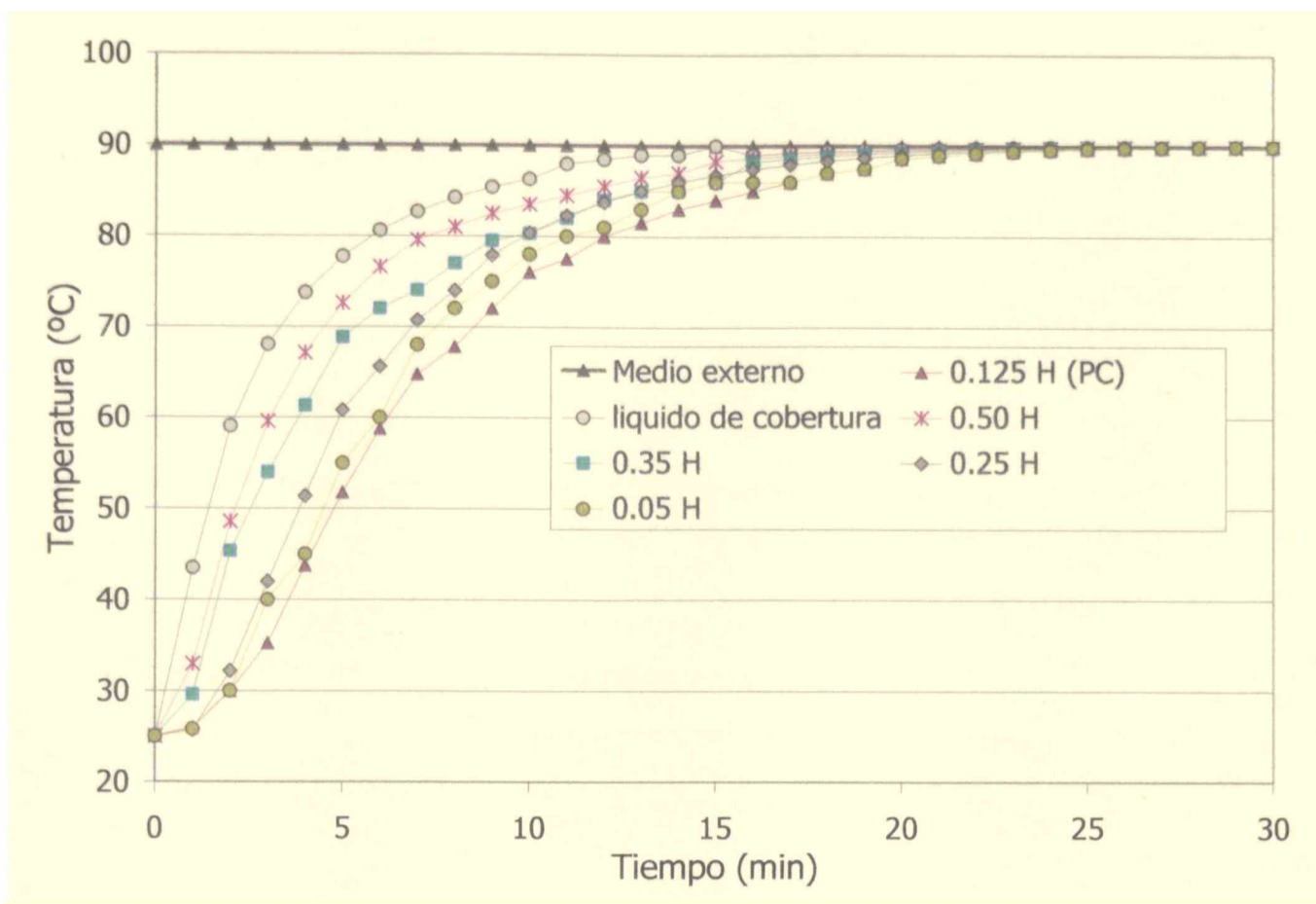


Figura 5.16. Historias térmicas experimentales medidas sobre el eje axial a distintas alturas del fondo (envase S11).

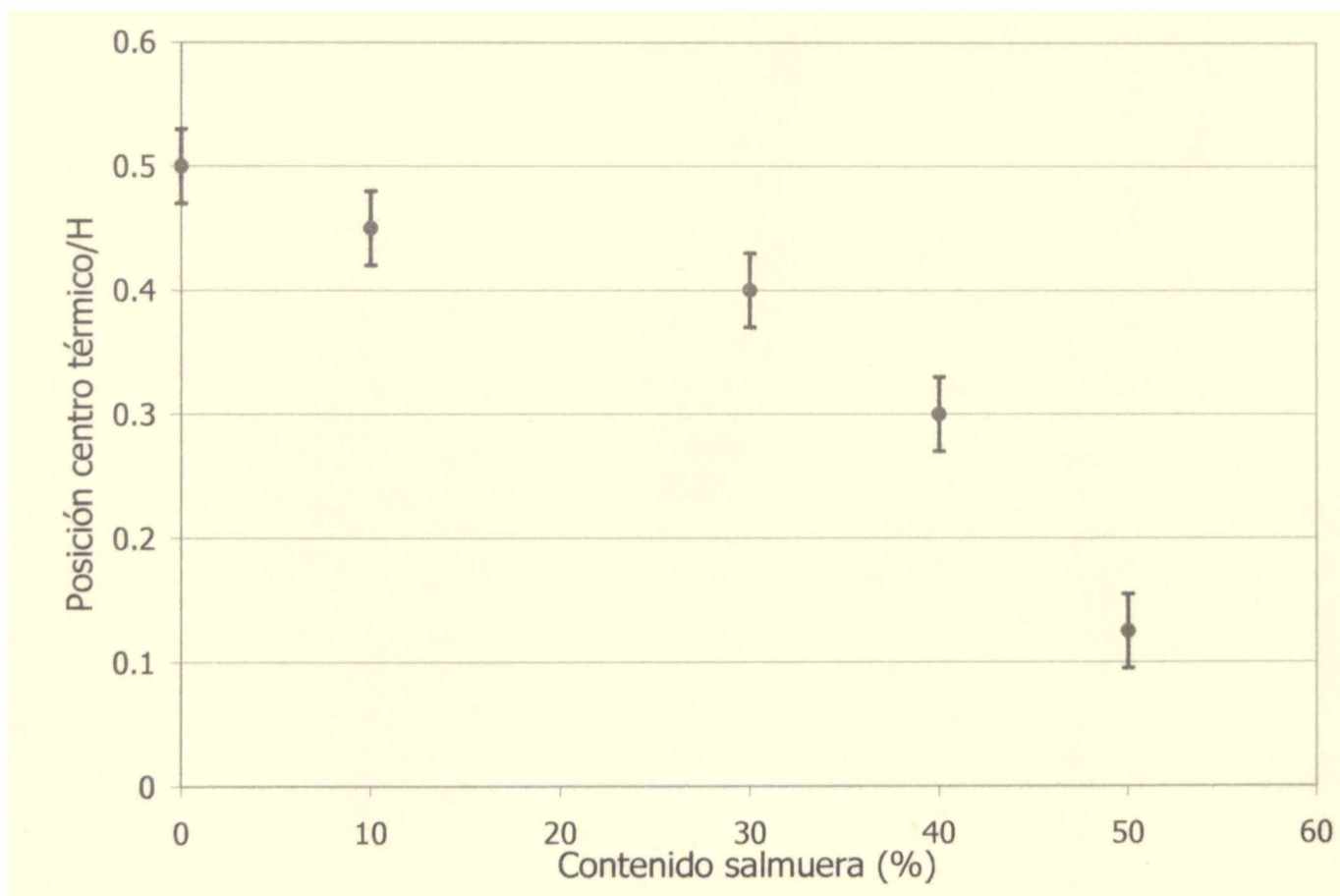


Figura 5.17. Ubicación del punto crítico en función del % P/P de salmuera contenido en el envase S11

Se realizó el mismo procedimiento para distintos porcentajes en el contenido de salmuera (un total de 4 corridas para cada contenido de salmuera) y se determinó la ubicación del centro térmico en todas las condiciones. La figura 5.17 muestra el desplazamiento en la ubicación de este punto en función del porcentaje de salmuera, para el mismo tamaño de envase anterior.

Como se desprende de la figura anterior, la posición del punto más frío en las conservas mixtas es una función del contenido de salmuera. Por consiguiente, para proceder al diseño del procesamiento térmico de este tipo de conservas, en primer lugar se debe determinar el porcentaje estándar de salmuera en las conservas comerciales que se encuentran en el mercado. Se midió el porcentaje de salmuera en un número suficientemente alto de muestras y se calculó un contenido promedio. Se halló que el contenido promedio de conservas de mejillones, es del 50% (el máximo permitido según el CAA). Se toma este porcentaje para las determinaciones experimentales que se realizan para los demás tamaños de envases y a partir del mismo queda determinada la ubicación del centro térmico o punto crítico.

Como puede verse, la ubicación del punto crítico para conservas mixtas de este tipo se encuentra a una altura levemente menor que para el caso de alimentos líquidos en los que solo ocurre convección libre, generalmente localizado a una altura entre un 15-20% de la altura total, medida desde el fondo de la lata (Abdul Ghani y col., 1999) y obviamente a una altura mucho menor que para el caso de sistemas donde ocurre conducción pura, en los cuales coincide con el centro geométrico.

Para poder entender el comportamiento anterior, se hicieron algunas corridas preliminares en un envase de vidrio y a partir de las mismas, se pudo ver que las corrientes convectivas del líquido de cobertura no producían el movimiento de los mejillones debido a la mayor densidad de éstos. Esta situación genera la formación de un colchón estático de mejillones en el fondo del envase. La presencia de este colchón restringe el flujo libre de las corrientes convectivas, siendo esta restricción mayor cuanto más profundo es el colchón (es decir cuanto mayor es el contenido de sólidos en el envase). Debemos considerar asimismo que el autoclave utilizado es estático, sin movimiento rotatorio de los envases. De esta forma vemos que el mecanismo conductivo de transferencia de calor toma importancia a medida que nos movemos hacia el fondo de la lata, haciendo la transferencia de calor mucho más lenta que la generada a partir de la convección del líquido. Además, el movimiento del fluido más caliente es hacia arriba mientras que el

fluido más frío se mueve hacia abajo. Esto nos permitiría explicar el desplazamiento del punto crítico hacia el fondo del envase a medida que aumentamos el contenido de sólidos en el envase.

5.2.3. Cálculo de los coeficientes f_n

Las Figuras 5.18a y 5.18b presentan los coeficientes f_n , calculados para envases cilíndricos de distintos tamaños, empleando un intervalo de muestreo Δ de 1 minuto.

Se utilizó, en principio, este intervalo de muestreo dado que la respuesta de este tipo de sistemas es mucho más rápida que para el caso de sistemas conductivos.

De la misma forma que en el caso de conservas conductivas, se analizó la dependencia de la función $F(z)$ con el intervalo de muestro Δ . Para ello se calcularon los valores f_n utilizando otros valores de Δ , 0.5 y 2 minutos respectivamente. Los resultados se obtuvieron para todos los envases pero sólo se muestran para el caso particular de dos tamaños de envases en la figura 5.19. Como se puede ver, la forma de las gráficas de f_n vs. n es similar a las mostradas en la figura 5.18. Utilizando un intervalo de muestreo de 0.5 minutos se tiene un número excesivamente alto de coeficientes para cada tamaño y de valores sucesivos muy similares, lo cual "molesta" en la etapa posterior de ajuste de la funcionalidad de f_n vs. D y H . Por el contrario, un valor de $\Delta = 2$ minutos puede enmascarar la respuesta macroscópica del sistema. Dependiendo de la relación D/H , puede que no se evidencie un máximo pronunciado de f_n , perdiéndose información del sistema. Dado que velocidad de respuesta de este tipo de sistemas es alta, un Δ de 2 minutos, supera la inercia térmica del sistema en estudio y utilizando este intervalo de muestreo la sumatoria total de f_n (ec. (4.22)) es bastante menor que 0.99.

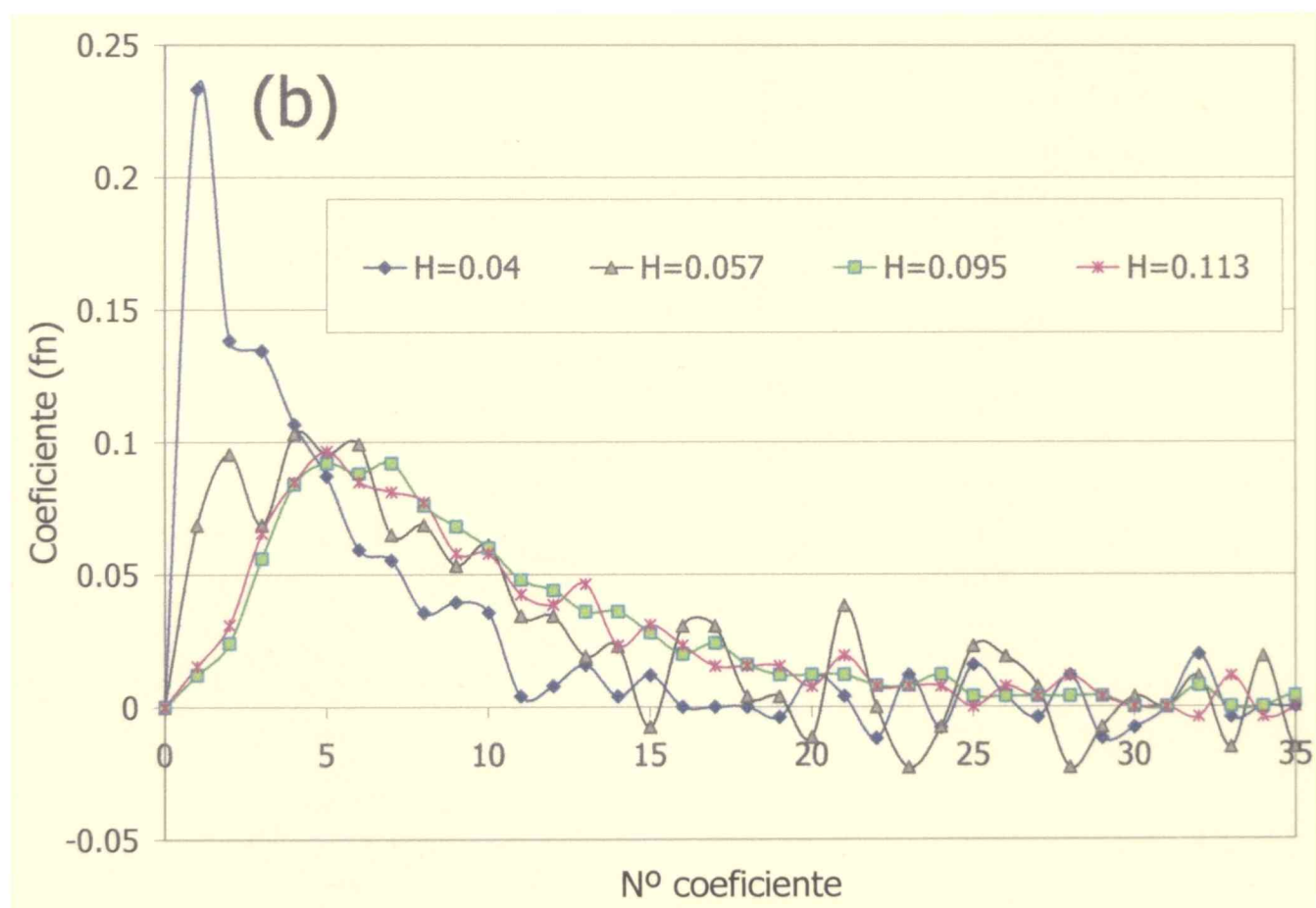
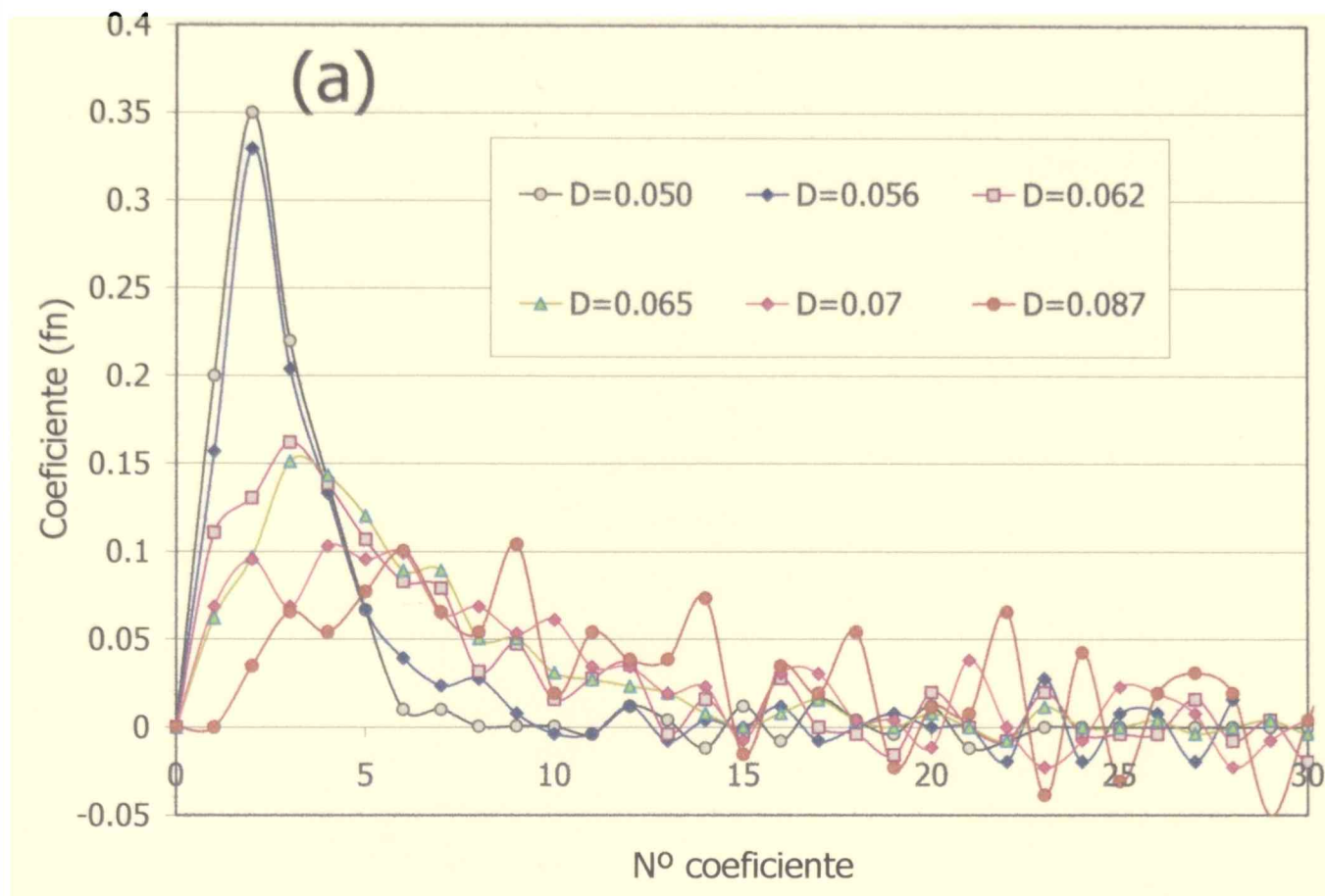


Figura 5.18. Coeficientes de $F(z)$, del punto crítico de mejillones en salmuera en envases cilíndricos; (a) $H = 0.072$ m y diferentes valores de D ; (b) $D = 0.073$ m y diferentes valores de H .

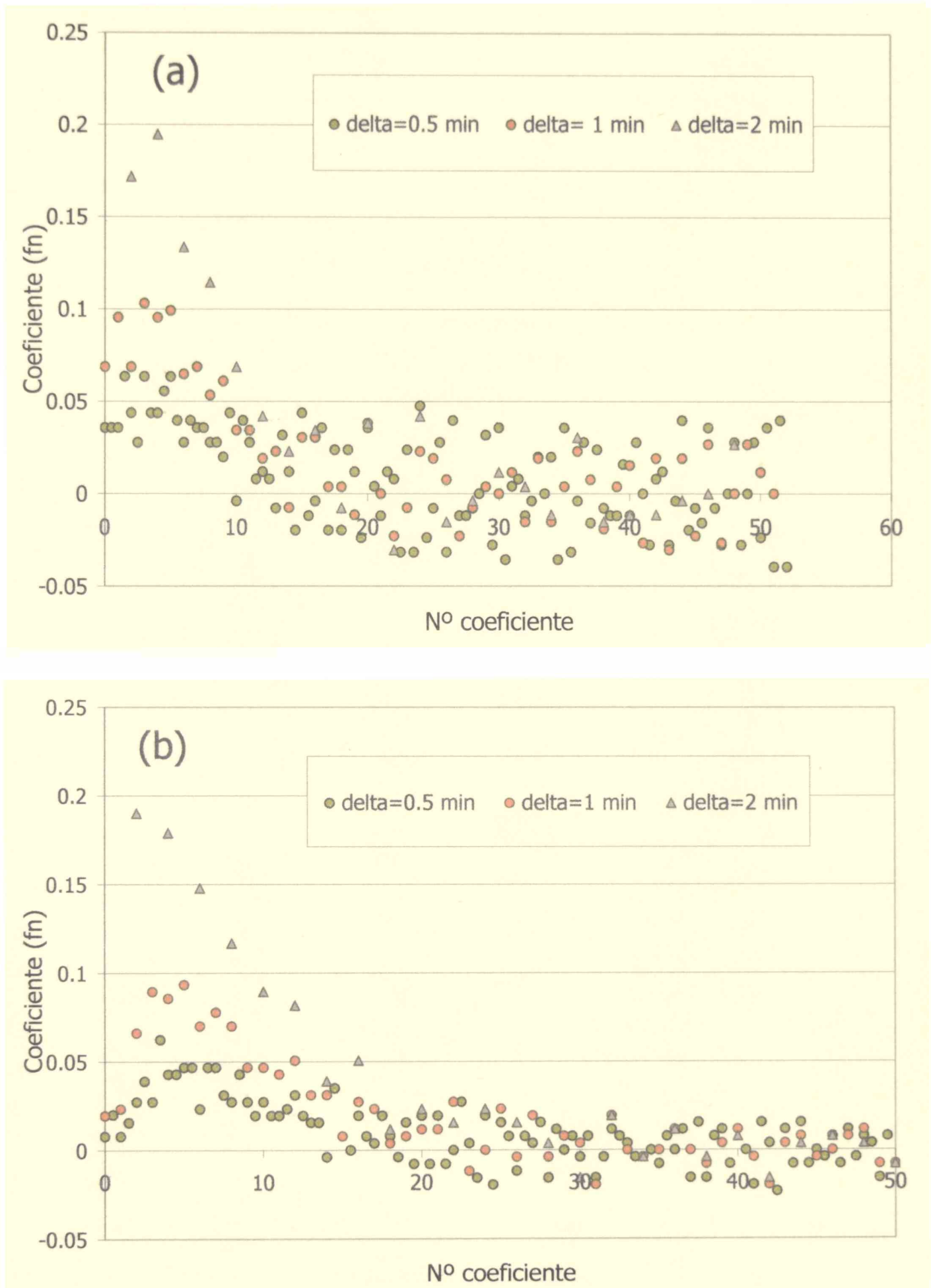


Figura 5.19. Coeficientes de $F(z)$ calculados a partir de distintos intervalos de muestreo; (a) envase de $D=0.073$ m y $H=0.057$ m; (b) envase de $D=0.073$ m y $H=0.113$ m.

Observando la misma forma de las gráficas de f_n vs. n que en el caso de conservas conductivas, se ensayaron los mismos dos modelos (ecs. (5.5) y (5.6)) para describir la influencia del intervalo de muestreo Δ sobre los coeficientes de la función de transferencia f_n para conservas mixtas. Como se puede deducir de las historias térmicas para este tipo de producto, la velocidad de respuesta de este tipo de conservas es mayor que en los sistemas totalmente conductivos, haciendo por lo tanto que el parámetro empírico c de la ec. (5.5), equivalente a la demora del sistema, presente valores nulos o casi nulos.

Se muestran en la tabla 5.3 los valores de los parámetros empíricos a , b , y d así como también el valor del r^2 del ajuste de los coeficientes de la función de transferencia con la ec. (5.6) para todos los tamaños de envases ensayados. Se encuentra alta correlación para todos los envases muestreados ($r^2 > 0.85$ en todos los casos).

Tabla 5.3. Parámetros empíricos de ajuste

Dimensión envase (D×H) (m)	Parámetro empírico de ajuste			r^2
	a	b	d	
0.073 × 0.040	0.276	0.246	2.10^{-6}	0.960
0.073 × 0.057	0.079	0.261	0.908	0.959
0.073 × 0.095	0.018	0.337	2.020	0.977
0.073 × 0.113	0.022	0.332	1.889	0.984
0.050 × 0.072	2.616	2.482	3.250	0.988
0.056 × 0.072	0.633	1.378	2.897	0.985
0.062 × 0.072	0.127	0.457	1.387	0.971
0.070 × 0.072	0.079	0.261	0.906	0.914
0.087 × 0.072	0.087	0.223	0.909	0.944
0.065 × 0.076	0.070	0.505	1.749	0.949
0.087 × 0.044	0.022	0.039	3.10^{-6}	0.902
0.087 × 0.068	0.003	0.049	0.632	0.856

A partir de los coeficientes calculados con $\Delta = 1$ minuto, se estudió la dependencia de los parámetros de ajuste de la ec. (5.6), a , b y d con el diámetro y la altura de los envases. A diferencia de los sistemas conductivos, los tres parámetros dependen fuertemente del diámetro D y la altura H de los envases.

Se encuentra que los modelos que reproducen con mayor precisión la dependencia de **a**, **b** y **d** con las dimensiones, para la totalidad de tamaños utilizados en los ensayos de penetración de calor, son los presentados a continuación:

$$a = 2.529 \cdot D^{-13} H^{-4.4} \quad r^2=0.959 \quad (5.9)$$

$$b = 232.876 \cdot \exp(-104.3032 \cdot D + 8.958 \cdot H) \quad r^2=0.8957 \quad (5.10)$$

$$d = 0.01 \cdot D^{-1.65} \left[\left(\frac{D}{H} \right)^2 - 4.6184 \cdot \left(\frac{D}{H} \right) + 5.1891 \right] \quad r^2=0.8472 \quad (5.11)$$

Las figuras 5.20 ((a), (b) y (c)) muestran los gráficos 3D de los parámetros **a**, **b** y **d** en función del diámetro y la altura de los envases de manera de poder visualizar el efecto de cada variable sobre los parámetros de regresión. De estos gráficos puede observarse que el valor del parámetro **a** aumenta considerablemente para valores más pequeños de D y H (el mismo comportamiento que se encontró para sistemas totalmente conductivos). En cambio, las variaciones de los parámetros **b** y **d** con las dimensiones de los envases son mucho más suaves.

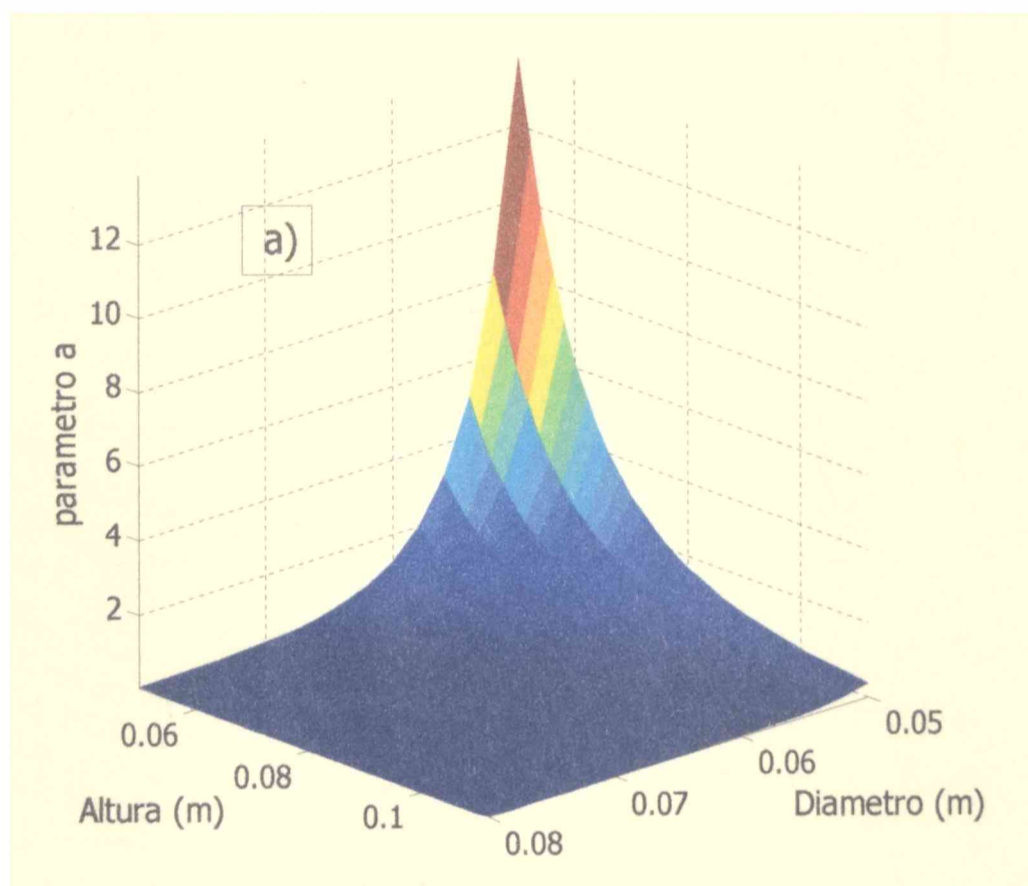


Figura 5.20. Gráfico de superficie 3D de los parámetros empíricos **a**, **b** y **d** (ec. (5.6)) vs. diámetro y la altura de los envases; (a) parámetro **a**

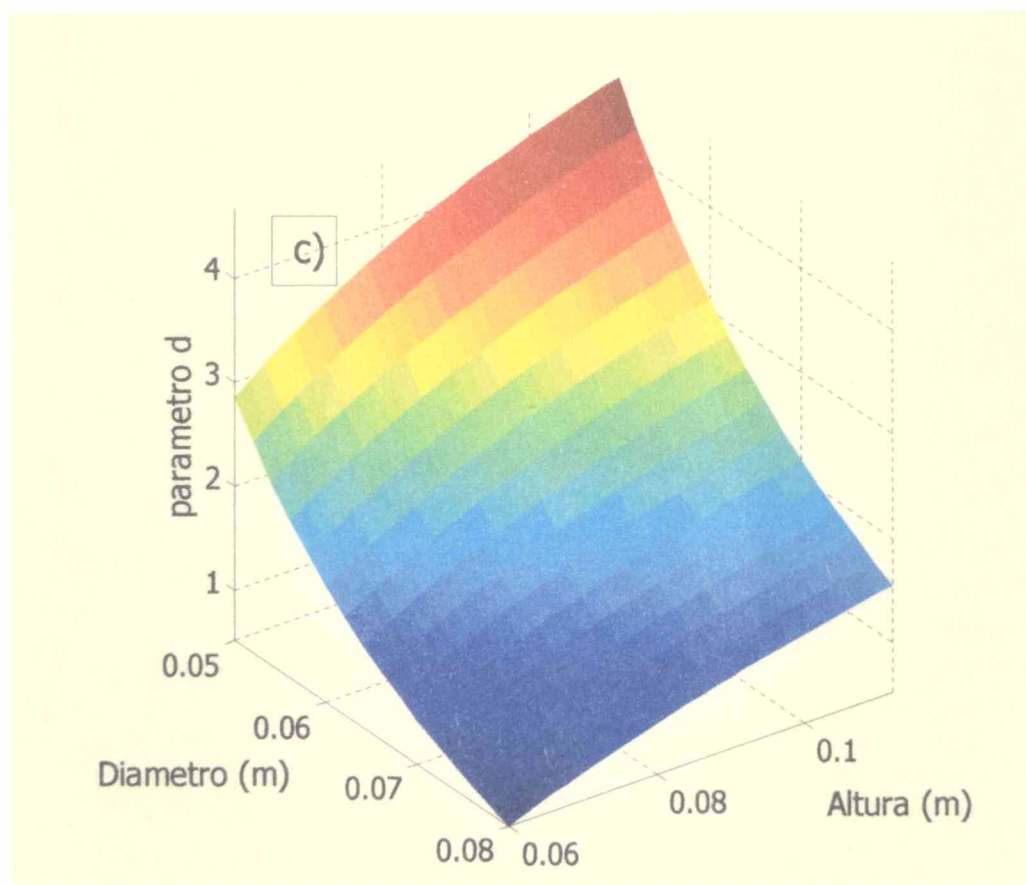
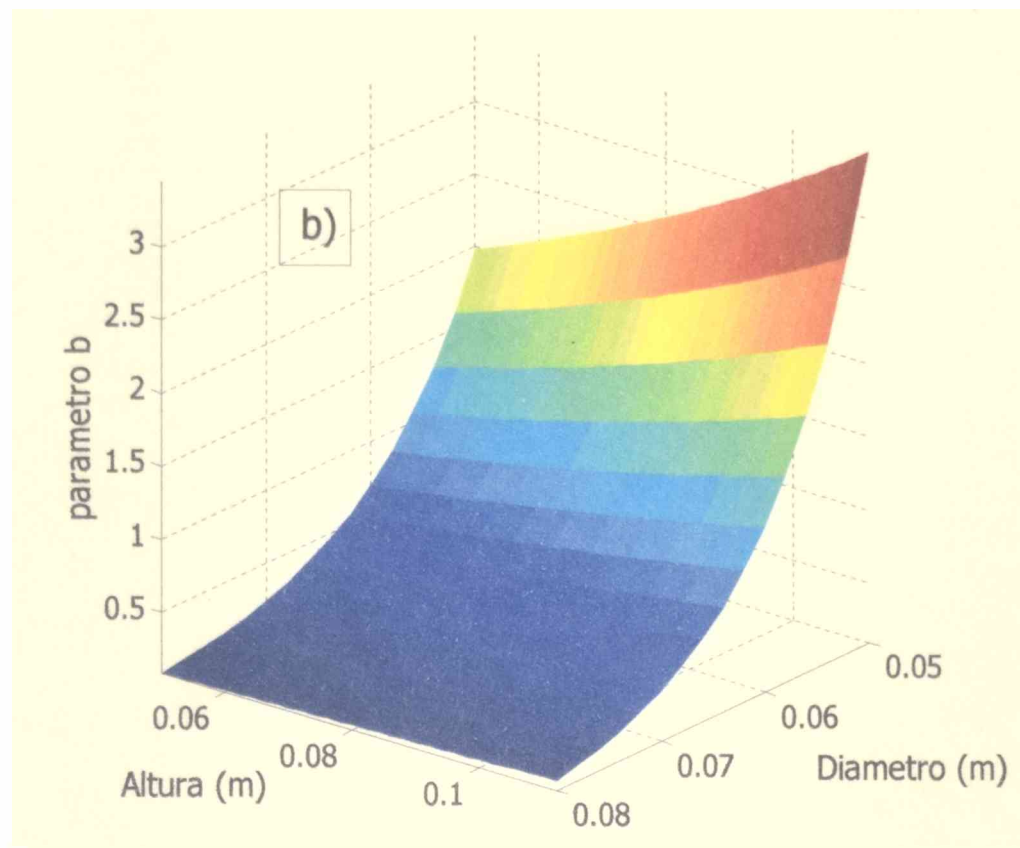


Figura 5.20 (continuación). Gráfico de superficie 3D de los parámetros empíricos **a**, **b** y **d** (ec. (5.6)) vs. diámetro y la altura de los envases; (b) parámetro **b**; (c) parámetro **d**.

Para validar las ecuaciones de regresión propuestas, los coeficientes experimentales y predichos para tres muestras en particular se comparan en las figuras 5.21 ((a), (b) y (c)) observando una buena concordancia entre los distintos valores.

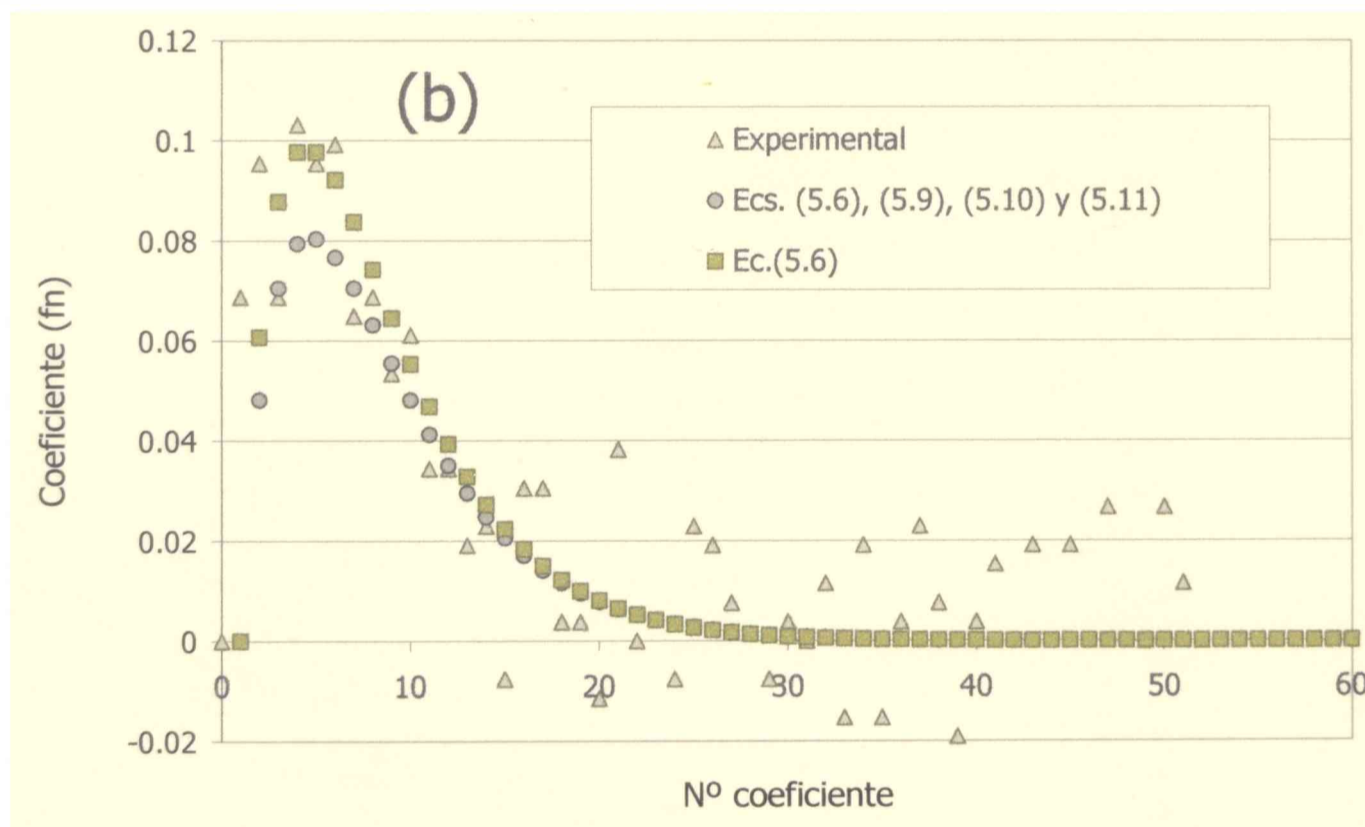
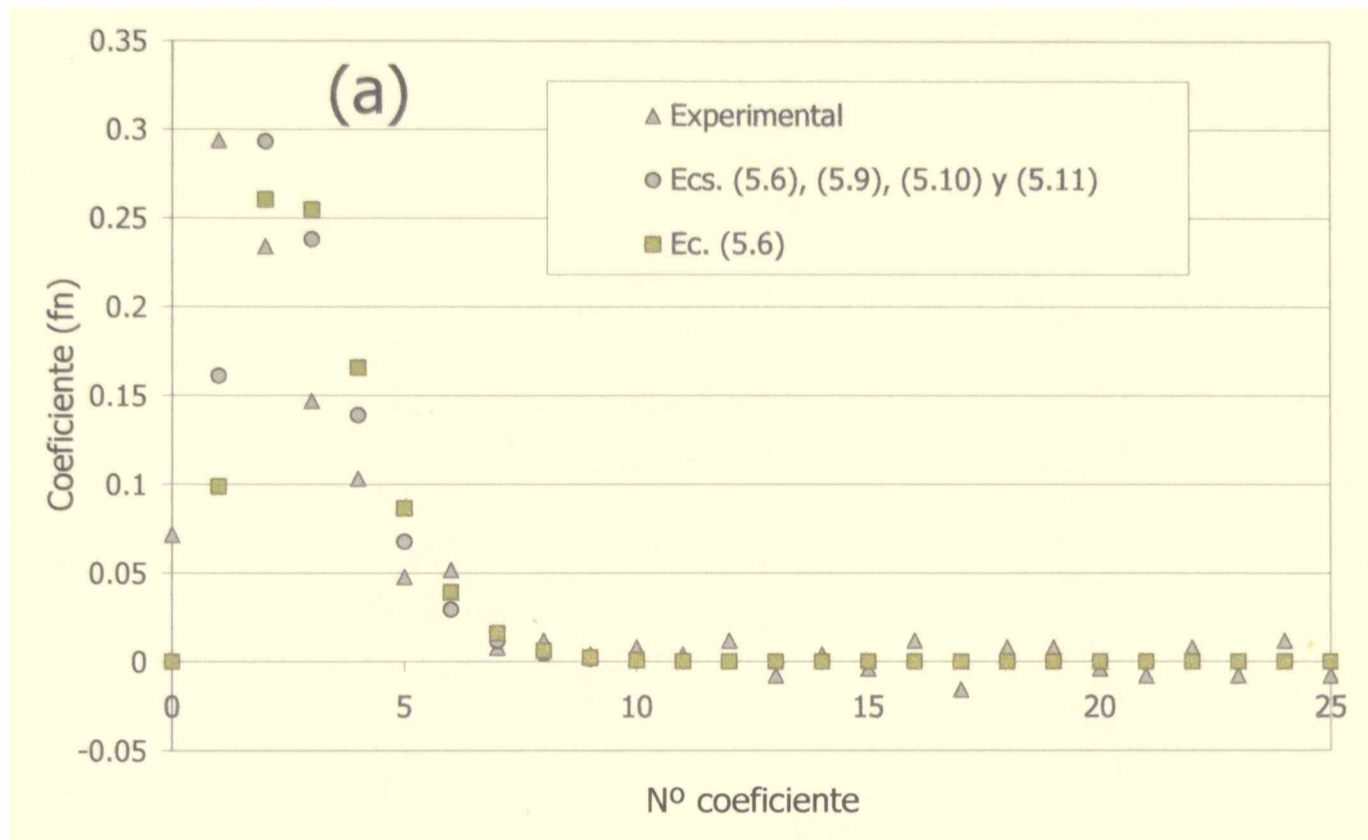


Figura 5.21. f_n experimentales y predichos; (a) envase de $D=0.056$ m y $H=0.072$ m; (b) envase de $D=0.073$ m y $H=0.057$ m.

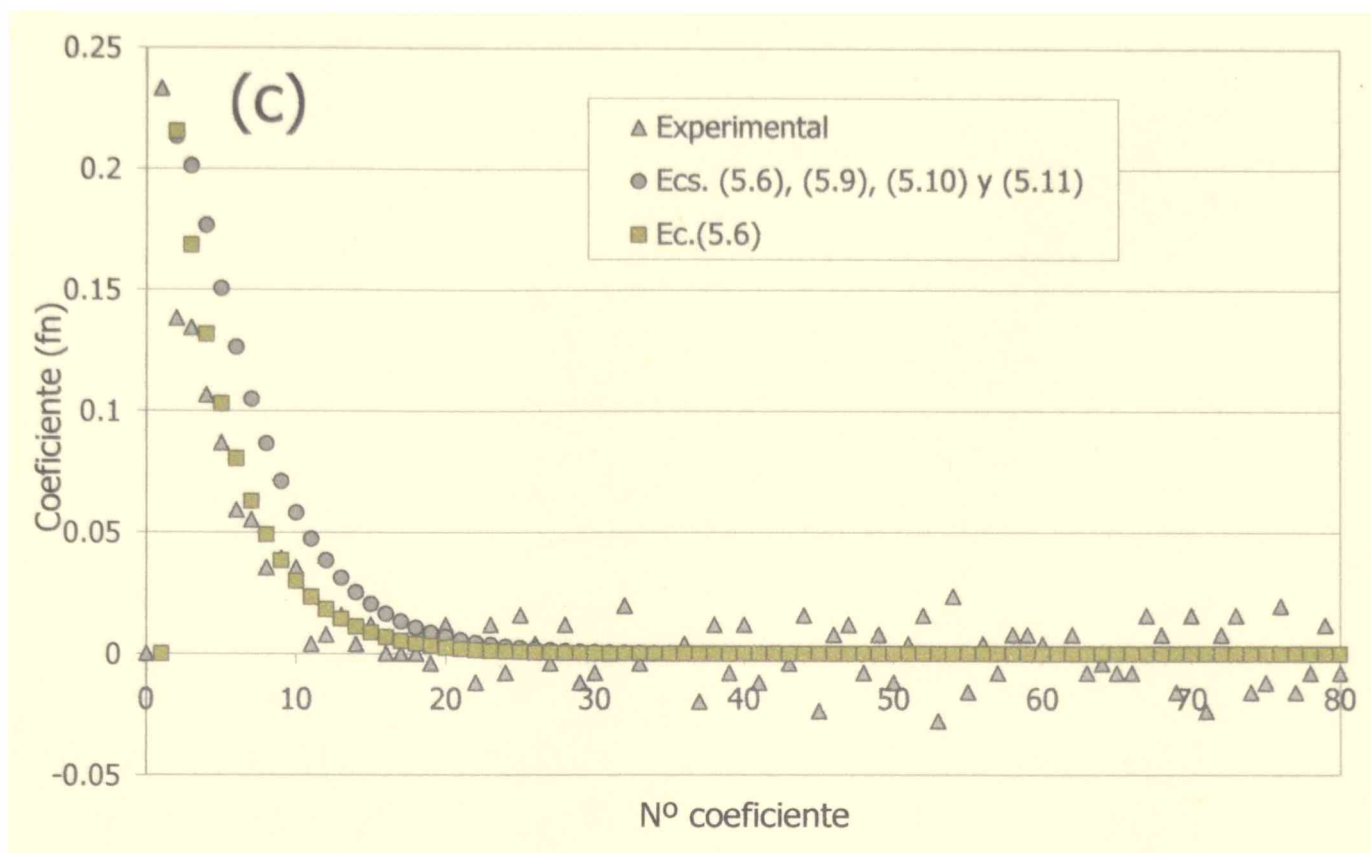


Figura 5.21 (continuación). f_n experimentales y predichos; (c) envase de $D=0.073$ m y $H=0.040$ m

5.2.4. Validación de funciones de transferencia

Se testó la capacidad de las funciones de transferencia para predecir la respuesta térmica del envase S3 (tabla 4.2) bajo una perturbación escalón en la temperatura externa. Se utilizaron los coeficientes f_n predichos (ecs. (5.6), (5.9), (5.10) y (5.11)) para el cálculo de la respuesta térmica. La figura 5.22 muestra la evolución, experimental y predicha, de la temperatura en el punto crítico del envase S3. Como se puede observar, la función de transferencia predice con alta correlación ($r^2 > 0.90$) los resultados experimentales obtenidos.

Asimismo, se analiza la capacidad de las funciones de transferencia para predecir la respuesta térmica de un envase bajo una perturbación externa variable. Se utilizaron nuevamente los coeficientes f_n predichos para el cálculo de la respuesta térmica. La figura 5.23 muestra la evolución, experimental y predicha, de la temperatura en el punto crítico del envase S9 (tabla 4.2) con un típico come-up time de autoclave y con temperaturas inicial y externa diferentes a las utilizadas en el cálculo de la función de transferencia. Se observa alta correlación entre los resultados experimentales y predichos.

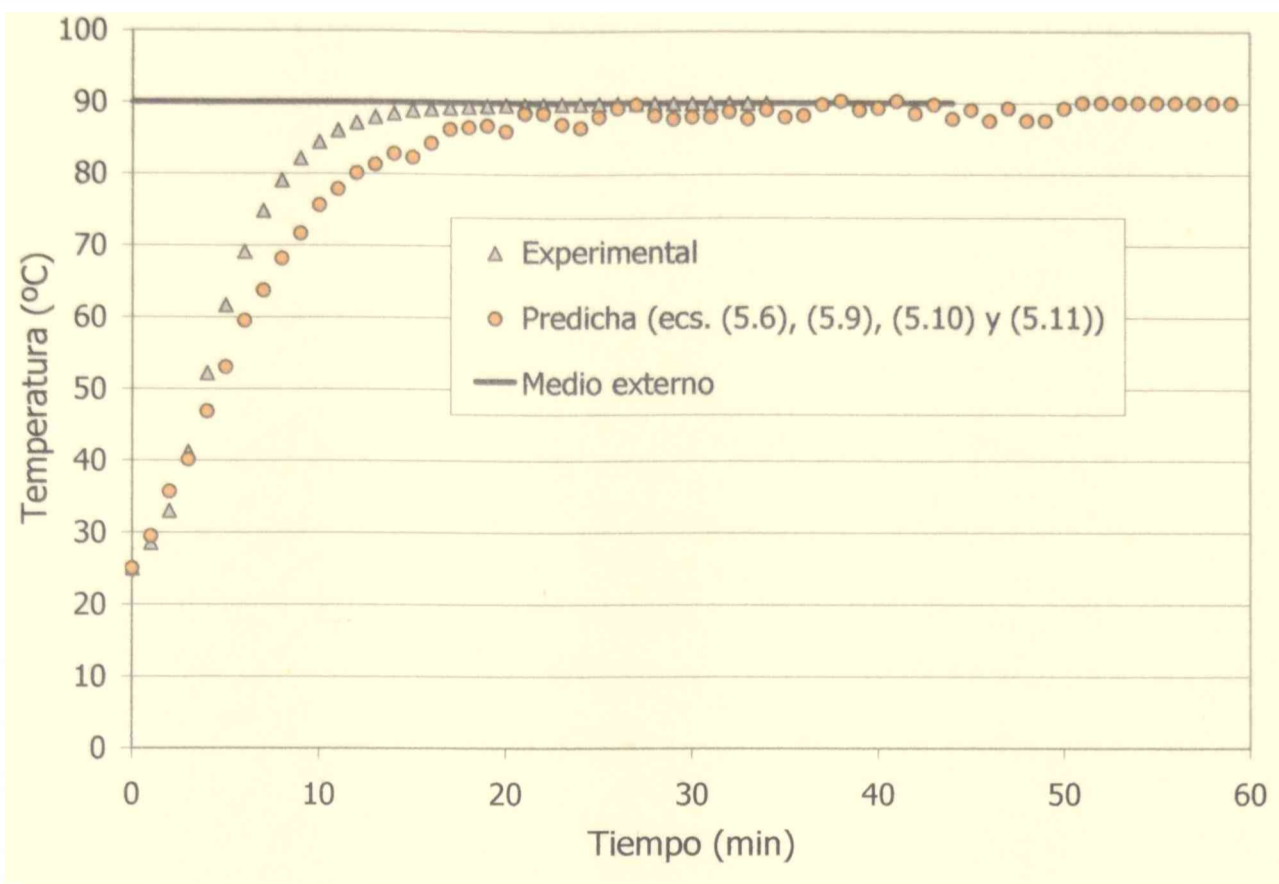


Figura 5.22. Evolución de la temperatura, experimental y predicha, en el punto crítico del envase S3 al ser sometido a una perturbación escalón

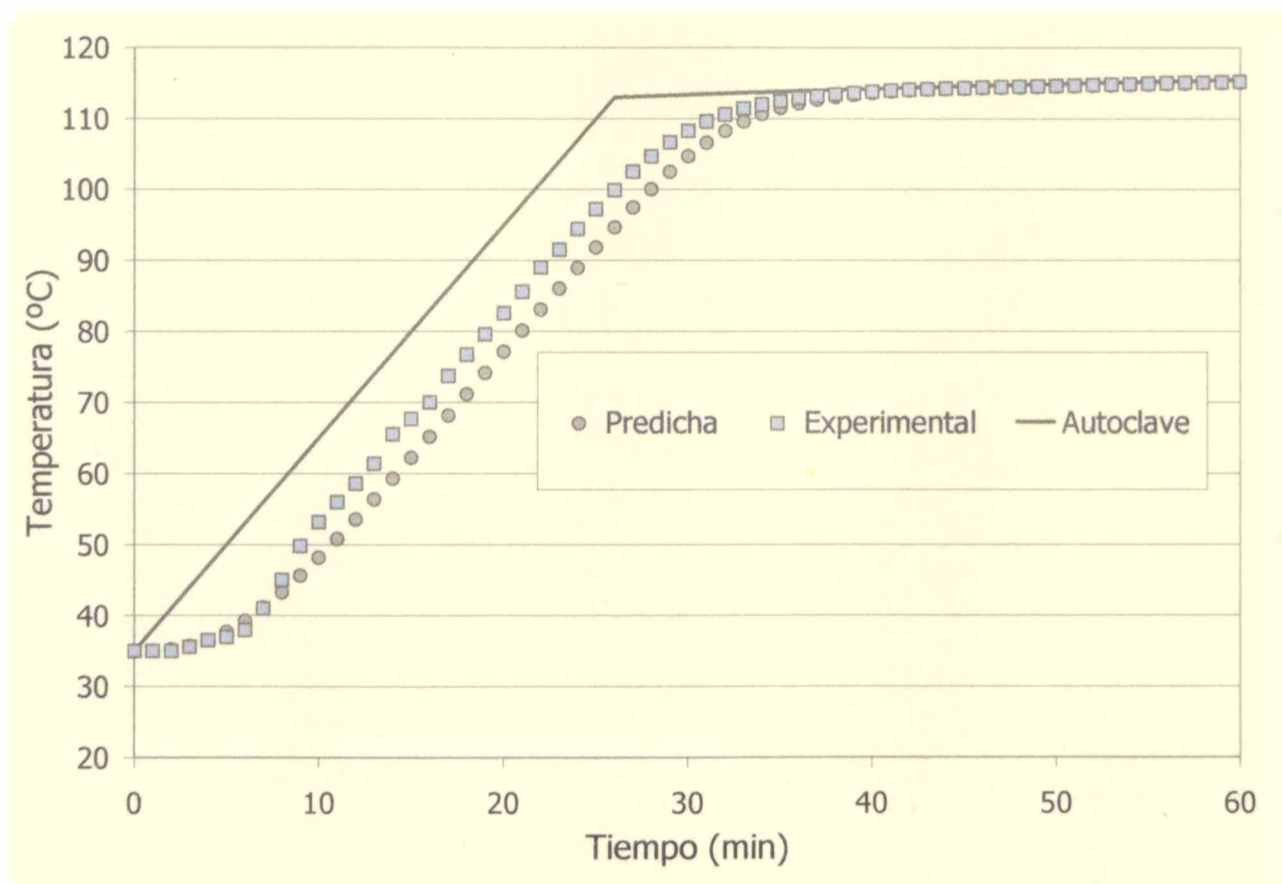


Figura 5.23. Evolución de la temperatura, experimental y predicha, en el punto crítico del envase S9 bajo condiciones de temperatura de autoclave variable ($T_i = 35^\circ\text{C}$ y $T_f = 116^\circ\text{C}$).

Por último, en la figura 5.24, se muestran las respuestas térmicas predichas en el punto de calentamiento más lento de conservas mixtas para distintos tamaños de envases, mostrando que la metodología presentada es una forma eficiente y práctica para poder comparar la respuesta térmica de envases de distintos tamaños.

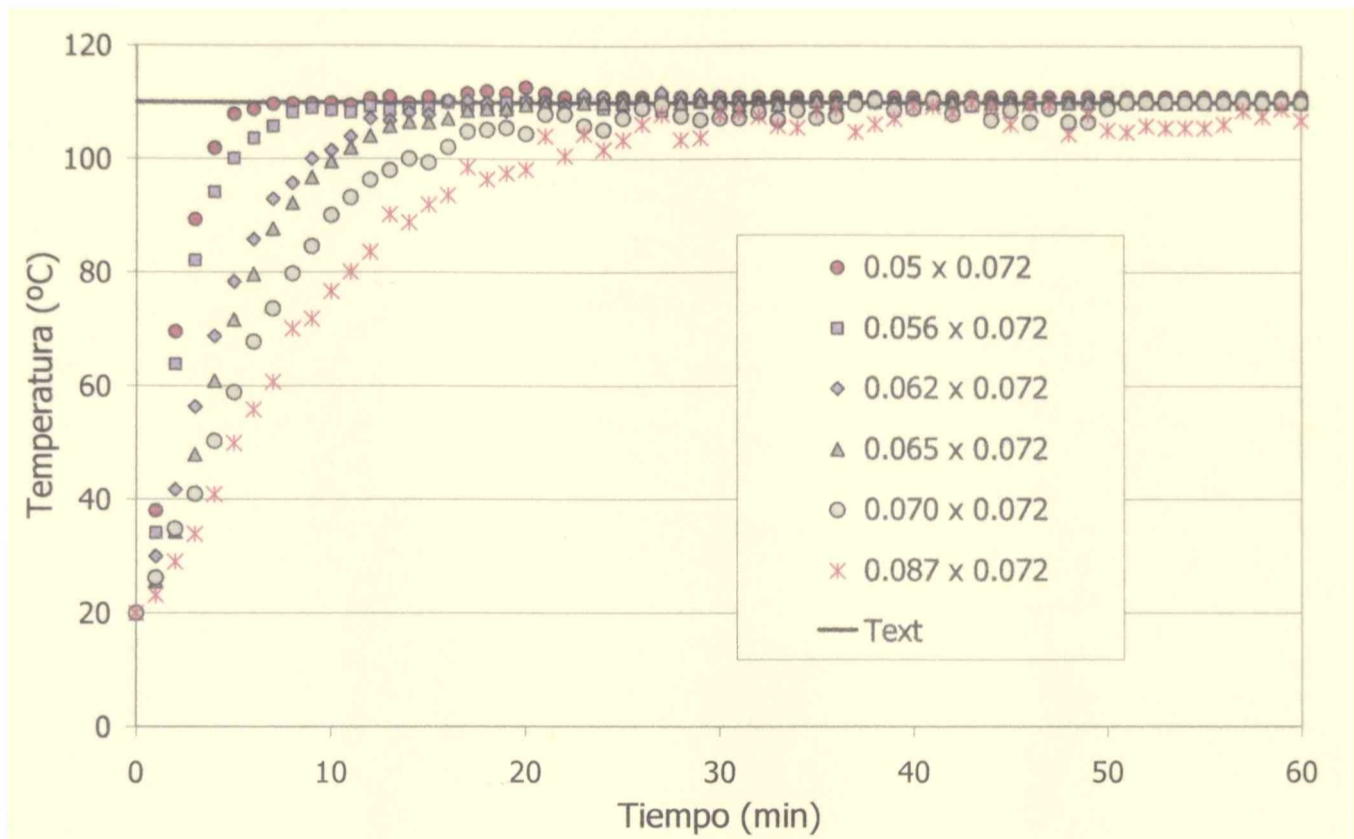


Figura 5.24. Respuesta térmica predicha para envases cilíndricos de $H=0.072$ m y distintos valores de D bajo una perturbación externa constante.

5.2.5. Vinculación de respuestas térmicas con letalidad acumulada

Productos como ostras y mejillones son sensibles al procesamiento por calor y en consecuencia se suelen adoptar valores de F_0 más cercanos al mínimo para este tipo de alimentos.

Bajo buenas prácticas de manufactura es suficiente procesar hasta valores de F_0 de 2 a 3 minutos, de manera de no afectar las cualidades organolépticas del producto.

Para calcular el tiempo de proceso, hemos visto que es necesario relacionar la historia térmica del punto de calentamiento más lento, con la ec. (3.3) que me permite determinar el valor F del proceso, es decir, el valor de F obtenido durante la exposición del alimento una determinada combinación tiempo-temperatura. Este valor deberá ser mayor o igual al F requerido o F de referencia ($F_0=3$ min).

Como un ejemplo de lo dicho anteriormente, se testea un perfil de temperatura de autoclave variable (VRT). La respuesta térmica fue calculada por el método de funciones de transferencia y se efectuó el cálculo de la letalidad. Los resultados se muestran en la figura 5.25.

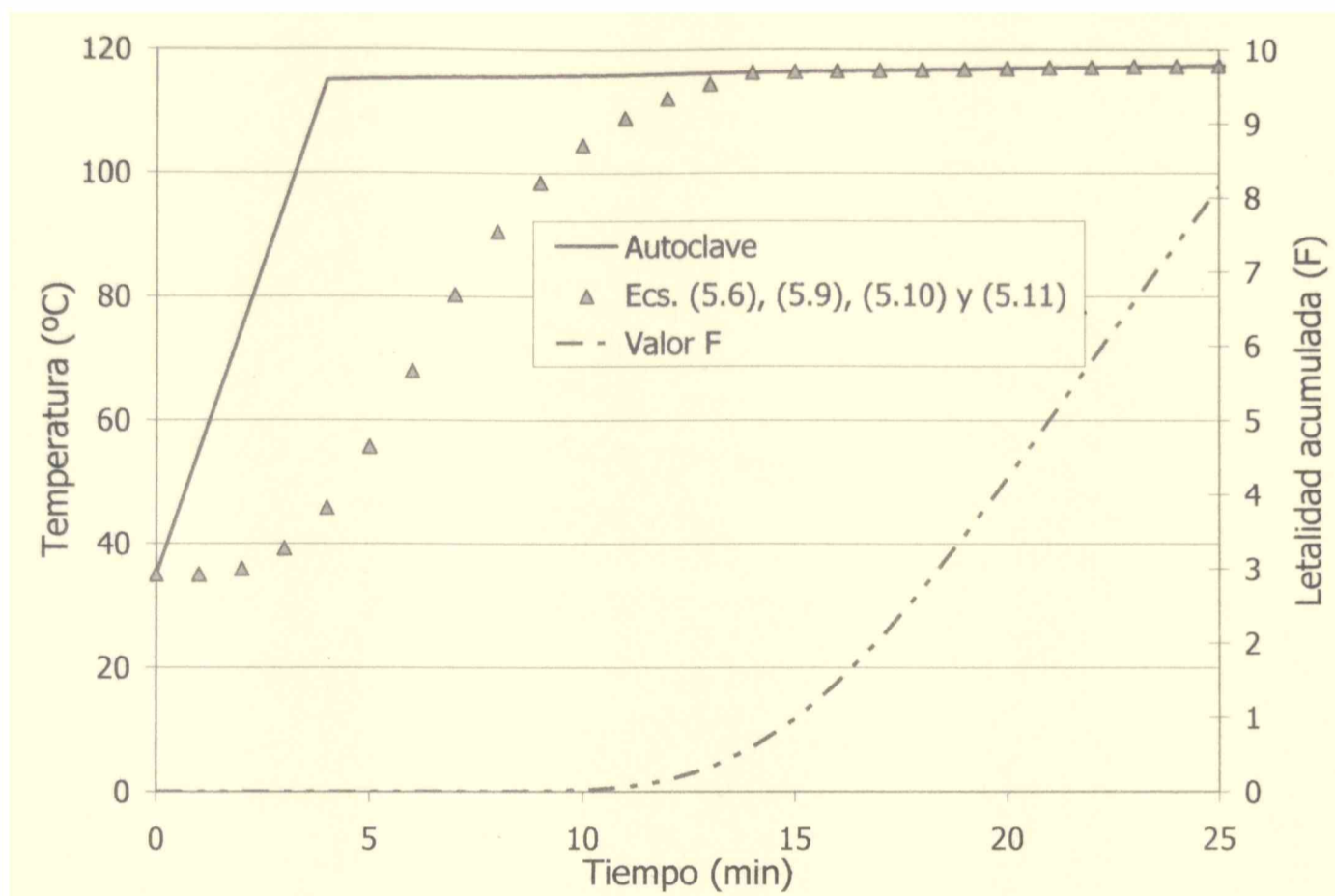


Figura 5.25. Historia térmica predicha y letalidad acumulada (F) bajo condiciones de proceso variables: temperatura de autoclave tipo rampa (envase S3)

5.3. Conclusiones

El uso de funciones de transferencia en variable discreta $F(z)$ permite predecir las historias térmicas de alimentos conductivos y mixtos frente a condiciones de contorno variables en el tiempo.

Para sistemas conductivos (simulando mediante elementos finitos el comportamiento térmico de diversos tamaños de envases) y para sistemas mixtos (a través de las historias térmicas experimentales obtenidas para el centro térmico de diversos tamaños de envases), se obtuvieron los coeficientes de la función de transferencia respectivos y a partir de un estudio sistemático se evaluó la dependencia de los mismos con el intervalo de muestreo y con las dimensiones de los envases (diámetro y altura). Estos modelos de

regresión permiten predecir los coeficientes de la función de transferencia para distintos tamaños de envases, distintos de aquellos empleados en este estudio.

Particularmente para el caso de conservas de tipo mixtas (convección-conducción) el peso escurrido es determinante de la historia térmica del alimento y define la ubicación del punto crítico o punto de calentamiento más lento. Esta posición depende del porcentaje de líquido de cobertura.

Por consiguiente la metodología propuesta en este trabajo permite sistematizar el cálculo de los coeficientes de $F(z)$ en función de las dimensiones del envase, evitando su determinación experimental o numérica.

La función de transferencia obtenida fue validada comparando historias térmicas predichas con resultados experimentales obtenidos para perturbaciones distintas de la señal escalón, obteniéndose excelentes resultados. Por lo tanto este método permite contemplar, de manera sencilla, temperatura de autoclave constante (CRT) como temperatura de autoclave variable en el tiempo (VRT). En el caso particular de VRT, como se ha visto en la sección anterior, pueden considerarse numerosas funcionalidades con el tiempo: lineales, escalones sucesivos, sinusoidales, exponenciales, etc.

De esta forma, una vez que se conoce la función de transferencia $F(z)$, ésta puede ser utilizada para el diseño del procesamiento térmico, permitiendo calcular el tiempo de proceso necesario para lograr el valor deseado F_0 . El cálculo es muy simple, puede ser fácilmente realizado con una calculadora estándar o una hoja de cálculo, aún por operarios sin entrenamiento especial.

Asimismo, la metodología desarrollada provee de una herramienta muy útil para ser utilizada en la optimización de procesos, evaluando distintas alternativas de procesamiento térmico de conservas como también en la implementación de estrategias on-line de control.

***OPTIMIZACIÓN DEL
PROCESAMIENTO TÉRMICO***

CAPITULO VI

Optimización del proceso

6.1. Introducción

Optimizar significa encontrar la mejor solución, lo que generalmente implica lograr el mejor compromiso entre un conjunto de requerimientos. Una definición más formal podría ser encontrar la mejor solución, en una forma eficiente y sistemática, entre todas las soluciones posibles (Banga y col., 2003).

El objetivo de un problema de optimización dinámica es determinar el perfil de la o de las variables de control que minimizan (o maximizan) una función objetivo dada o criterio de rendimiento sujeto a restricciones del proceso (Bryson, 1999).

En consecuencia, todo procedimiento de optimización implica el cambio de ciertas condiciones, las denominadas "**variables de decisión o de estado**", de manera de maximizar o minimizar un determinado criterio o parámetro predefinido (por ejemplo calidad del producto, costos, etc) lo que suele denominarse "**función objetivo**". Las posibles soluciones son aquellas que cumplen con una serie de requerimientos llamados "**restricciones del problema**". Por lo tanto los elementos de un problema de optimización dinámica son la función objetivo, las variables de decisión o de estado, las restricciones y el modelo matemático que representa el proceso, en este caso el tratamiento térmico de un alimento (figura 6.1).

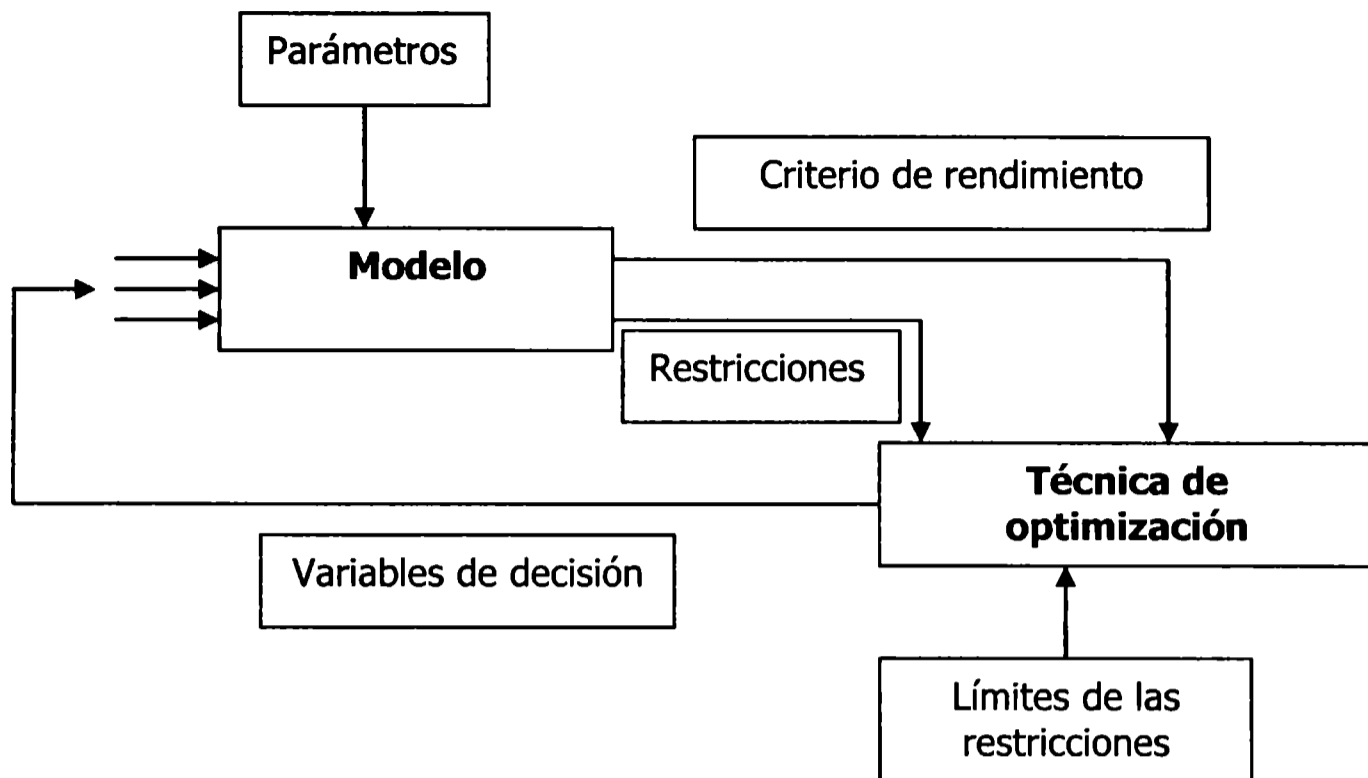


Figura 6.1. Elementos de un problema de optimización

En cuanto a la optimización de los procesos, en tecnología de alimentos la literatura revela que el método de superficie de respuesta ha sido y continúa siendo el enfoque más utilizado para optimizar. Estos métodos fueron introducidos en la década del 50 asociados a técnicas estadísticas y de diseño experimental (Box y col., 1978; Myers & Montgomery, 2002). A pesar de su utilidad, este enfoque tiene importantes condicionamientos debido a la naturaleza empírica y estacionaria de los modelos simples algebraicos usados (Banga y col., 2003).

En contraste, nuevos métodos de optimización también basados en modelos matemáticos han sido desarrollados en las últimas décadas, usando esquemas dependientes del tiempo. La mayoría de los modelos de procesamiento de alimentos son de naturaleza dinámica, en consecuencia se necesita aplicar técnicas de optimización dinámica para poder alcanzar las soluciones óptimas.

En general, encontramos tres tipos de problemas de optimización (Banga y col., 2003):

✓ **Búsqueda de condiciones de operación óptimas:** conocido un modelo matemático de un dado proceso dinámico, el objetivo es encontrar las condiciones de operación que conduzcan a la mejor performance medida por un cierto criterio predefinido. También llamado control óptimo. A esta clase pertenecen los problemas de optimización que se presentarán en los siguientes capítulos.

✓ **Estimación de parámetros (problema inverso):** se trata de encontrar los parámetros de un modelo dinámico no lineal que mejor ajusten la realidad. Esta clase de optimización también se realizó en el presente trabajo de tesis principalmente en la determinación de los parámetros empíricos de ajuste de los modelos propuestos (capítulos V y VIII).

✓ **Diseño integral de procesos:** Consiste en encontrar simultáneamente las variables de diseño estático (tamaño de los equipos), y las condiciones de operación que minimizan los costos de inversión y operativos.

En algunas situaciones el modelo matemático que representa el problema de optimización puede conducir a múltiples óptimos, de modo tal que es necesario un procedimiento de optimización global para encontrar la mejor solución (Banga & Seider, 1996; Esposito & Floudas, 2000). El objetivo de estos métodos es encontrar la mejor solución, en términos absolutos, de un problema multimodal. Esta temática ha recibido un interés creciente en la última década (Bimbenet y col., 2007; Miri y col., 2008).

Los métodos existentes se pueden clasificar en determinísticos (Floudas, 2000) y estocásticos (Ali y col., 1997). Mongeau y col. (2000) y Pinter (2002) presentan revisiones completas del software de optimización global existente.

Los métodos determinísticos hacen uso de técnicas analíticas y sistemáticas para encontrar el óptimo global. La principal desventaja de estos métodos es que el requerimiento y el tiempo computacional crecen exponencialmente con el tamaño del problema. El principal aporte en este tema en Ingeniería de alimentos es el trabajo de Esposito y Floudas (2000).

Los métodos estocásticos pueden localizar la zona de una solución global con relativa eficiencia, pero no puede garantizarse que sea un máximo global. Sin embargo, en la práctica este óptimo es satisfactorio debido al menor requerimiento computacional. Además los métodos estocásticos son más simples de implementar y usar, y permiten tratar como caja negra el problema original. Esta característica es especialmente relevante ya que permite integrar el método de optimización con un software que independientemente resuelve el modelo dinámico del proceso en estudio.

6.2. Antecedentes en optimización de tratamientos térmicos en alimentos

El procesamiento térmico es una de las operaciones más importantes en la industria de alimentos (Awuah y col., 2007). Desde los dos primeros estudios de optimización realizados por Teixeira, el primero para procesamiento a temperatura de autoclave constante, conocido como CRT (Constant Retort Temperature) (Teixeira y col., 1969) y el segundo para procesamiento a temperatura de autoclave variable con el tiempo, conocido como VRT (Variable Retort Temperature) (Teixeira y col., 1975), fueron muchos los autores que presentaron métodos computacionales destinados a optimizar este proceso. La optimización dinámica, principalmente aplicada a la operación de esterilización de alimentos continúa siendo un tema creciente de investigación (Banga y col., 1991; Balsa-Canto y col., 2002a, 2002b).

En su forma básica, la optimización dinámica de un tratamiento térmico trata de encontrar la temperatura de calentamiento (como un perfil dependiente del tiempo) que maximice la retención final de un determinado nutriente presente en un alimento conductivo envasado sujeto a restricciones microbiológicas. Por lo tanto se pueden identificar dos situaciones de compromiso: por un lado, para lograr la letalidad mínima requerida se deben procesar todas las regiones del producto a una temperatura lo suficientemente elevada durante un tiempo prolongado. Pero por otro lado, la acción del calor también provoca la destrucción de los nutrientes presentes en el alimento, y por lo tanto se trata de minimizar este efecto indeseable.

Saguy y Karel (1979) fueron los primeros en reconocer la naturaleza dinámica de este tipo de problemas, y lo resolvieron usando PMP (Pontryagin's Maximum Principle) (Bryson & Ho, 1975) para determinar el perfil óptimo de temperatura de autoclave para la retención de un determinado nutriente durante la esterilización de alimentos. La dificultad en el uso de PMP reside en los problemas de convergencia asociados a este método, sobre todo si el valor inicial supuesto del perfil óptimo no es acertado. De hecho, Saguy y Karel (1979) informan problemas de convergencia en su propio trabajo. Por otro lado, dichos autores establecieron que cada combinación de geometría de envase-producto-atributo de calidad determina una solución de temperatura variable de autoclave (VRT) única.

Nadkarni y Hatton (1985) aplicaron una versión refinada del trabajo anterior sobre la retención global de un nutriente y, al igual que Saguy y Karel, no encontraron una mejora en la utilización de procesos VRT en comparación con procesos CRT.

Banga y col. (1991) formularon problemas similares considerando otras funciones objetivo: maximización de la retención de factores de calidad en la superficie y minimización del tiempo de proceso. Además, para evitar los problemas de los PMP, transformaron el problema original en un problema no lineal (NLP). Éste último problema fue resuelto a través de un método estocástico para asegurar la convergencia a la solución global. En este trabajo, se demostró que los procesos VRT producen una notable mejora en la retención superficial de un nutriente más que en la retención global del mismo.

Hendrickx y col. (1989, 1992, 1993) desarrollaron un modelo empírico para determinar las temperaturas óptimas de esterilización, que incluían el efecto del período de enfriamiento y del CUT. Se encontró que estos últimos factores, tienen una influencia mínima sobre la temperatura de procesamiento óptima. Silva y col. (1994 a,b,c) también estudiaron la maximización de la retención superficial de un determinado parámetro de calidad para el caso de pouches usando un modelo de transferencia de calor unidimensional. En este último trabajo se obtuvieron temperaturas óptimas para una serie de condiciones de procesamiento.

Noronha y col. (1993) exploraron aún más los resultados obtenidos por Banga y col. (1991), comparando los resultados obtenidos al utilizar distintos valores de z para los factores de calidad y distintas geometrías. Se utilizaron las geometrías más simples (cilindros infinitos, placas infinitas y esferas) asumiéndose transferencia de calor por conducción en una sola dirección.

En el año 1996, Noronha y col. (1996) intentan generalizar los perfiles de autoclave variables a través de una fórmula empírica de manera de poder disminuir el esfuerzo computacional requerido para el cálculo de los mismos. En el año 1997, Durance y col. (Durance, 1997; Durance y col., 1997) aplicaron estas últimas técnicas sobre el sistema salmón enlatado, confirmando las ventajas del procesamiento a temperatura variable de autoclave (VRT).

Balsa-Canto y col. (2000, 2002 a,b) presentan un método de descomposición ortogonal (POD) para reducir el sistema de ecuaciones diferenciales y acoplar esta solución al problema de optimización.

Es importante mencionar, dentro de lo estudiado en este tema, dos trabajos de Simpson. El primer trabajo (Simpson y col., 2004) desarrolla y valida un modelo matemático asociado a una rutina de optimización para el procesamiento térmico de atún envasado

en pouches, mientras que en el segundo trabajo de este autor (Simpson y col., 2008), se aplica un procedimiento de optimización global para encontrar el perfil óptimo VRT para el procesamiento térmico de alimentos conductivos envasados.

En los últimos años, se presentaron trabajos en los cuales se halla el perfil VRT óptimo que permite maximizar la calidad de un determinado producto así como también lograr la reducción en los tiempos de procesamiento mediante la utilización de redes neuronales y algoritmos genéticos (Afaghi y col., 2000; Chen & Ramaswamy, 2002).

En lo que se refiere a la optimización del tratamiento térmico de sistemas mixtos, en correlato con la escasa bibliografía sobre el modelado del tratamiento térmico propiamente dicho es nula la literatura sobre la optimización de estos sistemas.

CAPITULO VII

Materiales y métodos

7.1. Formulación de los problemas de optimización

Como se ha visto en capítulos anteriores, para que un tratamiento térmico sea seguro debe ser lo suficientemente severo como para destruir la mayor parte de la flora microbiana inicial. Para evaluar la bondad de un tratamiento determinado se calcula la letalidad acumulada del proceso F que deberá ser al menos igual al valor de referencia F_0 . A su vez, el tratamiento térmico presenta efectos negativos ya que la temperatura incide sobre la degradación de nutrientes y otros atributos de calidad, lo que lleva entonces a la necesidad de optimizar el procesamiento térmico. Los valores de z para la degradación de nutrientes (25-50°C) son mayores que los valores de z para la inactivación microbiana (7-12°C), mostrando que los microorganismos son menos resistentes al calor que los distintos parámetros de calidad, lo que permite optimizar el proceso atendiendo a la evolución de la temperatura del mismo.

En alimentos sólidos o mixtos, donde el mecanismo de transferencia de calor es principalmente conductivo o mixto (conducción-convección) el flujo de calor en el interior del producto es bajo y para alcanzar los valores de temperatura deseados en los puntos más fríos la superficie del producto puede llegar a temperaturas excesivas y en consecuencia el daño desde el punto de vista de la calidad puede ser importante resultando en color indeseable, ablandamiento excesivo, baja retención de nutrientes, etc. (Silva y col., 1992).

Como vimos anteriormente, los elementos de un problema de optimización dinámica son la función objetivo, las variables de decisión o de estado, las restricciones y el modelo matemático que representa el proceso. Se llama problema de control óptimo al tipo de problema de optimización donde las restricciones de igualdad son ecuaciones diferenciales ordinarias (Edgar & Himmelblau, 1988). Si consideramos la minimización de una función objetivo hipotética, f_{obj} , el problema adquiere la siguiente forma matemática:

$$\min_u f_{obj}(u, x) \quad (7.1)$$

Sujeta a las restricciones:

$$g\left(\frac{dx}{dt}, x, u\right) = 0 \quad (7.2)$$

$$h(x, u) \leq 0 \quad (7.3)$$

donde la restricción de igualdad g incluye ecuaciones diferenciales y algebraicas relacionadas con el modelo del proceso y las restricciones de desigualdad h incluyen los límites físicos de las variables x . La variable u representa a los parámetros del sistema.

La optimización del tratamiento térmico puede realizarse en función de distintos objetivos: minimizar el tiempo de proceso, maximizar la retención de nutrientes (global o superficial) o un determinado parámetro de calidad (color, textura, etc.), minimizar el consumo energético, o una combinación de los anteriores, entre otros.

El estudio de distintas alternativas de tratamiento, en particular el análisis sistematizado de condiciones de temperatura externa variable (VRT) frente a condiciones de temperatura externa constante (CRT) es imprescindible para llevar adelante la tarea de optimización.

Cuando el principal objetivo es minimizar las pérdidas globales de calidad del producto, la función objetivo debe plantearse de manera de evaluar la retención de un determinado parámetro de calidad en todo el volumen del producto. Para ello es necesario obtener un valor de retención promedio. Esto es debido a que al final del proceso, los parámetros de calidad no están distribuidos de manera uniforme. La retención de calidad en un punto (r,z) a un tiempo determinado se puede expresar de la siguiente forma:

$$C(r, z, t) = C_0 \cdot \exp\left(-\frac{\ln 10}{D_{ref}^*} \int_0^t 10^{\frac{(T(r,z,t)-T_{ref}^*)}{z^*}} dt\right) \quad (7.4)$$

donde D_{ref}^* , T_{ref}^* y z_{ref}^* son los parámetros cinéticos característicos de la degradación térmica del nutriente o factor de calidad seleccionado y C_0 es la concentración inicial del nutriente o factor de calidad.

Integrando la ecuación anterior en todo el volumen, se obtiene la retención promedio o retención global:

$$\overline{C(t)} = C_0 \cdot \frac{2\pi}{V_T} \int_0^H \int_0^R \exp\left(-\frac{\ln 10}{D_{ref}^*} \int_0^t 10^{\frac{(T(t)-T_{ref}^*)}{z_{ref}^*}} dt\right) r dr dz \quad (7.5)$$

Cuando la función objetivo es la retención superficial del nutriente (C_{sup}), se utiliza una expresión equivalente a la ec. (7.4), donde ahora los valores de D_{ref}^* , T_{ref}^* y z_{ref}^* son los parámetros cinéticos del factor de calidad superficial (que pueden ser distintos del factor de calidad global) y la temperatura T va a ser solo función del tiempo, ya que es la temperatura en la superficie del producto. De esta forma se obtiene la retención superficial, que puede expresarse como:

$$\frac{C_{sup}}{C_0} = \frac{2\pi R}{A_{lateral}} \int_0^H \exp\left(-\frac{\ln 10}{D_{ref}^*} \int_0^t 10^{\frac{(T(t)-T_{ref}^*)}{z_{ref}^*}} dt\right) dz + \frac{2\pi}{A_{tapas}} \int_0^R \exp\left(-\frac{\ln 10}{D_{ref}^*} \int_0^t 10^{\frac{(T(t)-T_{ref}^*)}{z_{ref}^*}} dt\right) dr \quad (7.6)$$

Si se asume que no hay resistencia a la transferencia de calor en la superficie del producto, se tiene temperatura prescrita e igual a la temperatura del autoclave, en ese caso $T(t)$ en la ec. (7.6) coincide con $T_{aut}(t)$.

Por el contrario, si se asume la existencia de un coeficiente de transferencia de calor en la superficie del producto, entonces $T(t)$ se reemplaza en la ec. (7.4) por $T_{sup}(t)$, y la misma queda sujeta a la siguiente condición de borde:

$$k \frac{\partial T}{\partial n} = h(T_{sup} - T_{aut}) \quad (7.7)$$

7.1.1. Sistemas conductivos

7.1.1.1. Formulación de la optimización del procesamiento CRT

El objetivo en este punto es encontrar para cada tamaño de envase (conteniendo atún como sistema conductivo), la combinación tiempo de proceso-temperatura de autoclave, constante, óptima que maximiza la retención global o la retención superficial del parámetro de calidad seleccionado en este trabajo (tiamina en pescado), cumpliendo con

la restricción que establece que la letalidad acumulada final del proceso debe ser mayor o igual a un valor requerido, F_0 .

Partiendo de la formulación matemática general de un problema de optimización y tomando como función objetivo la retención global de un determinado nutriente, podemos plantear el problema de optimización de la siguiente forma:

$$\max_{T_{aut}} \frac{C(t_p)}{C_0} \quad (7.8)$$

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k \nabla T) \quad en \quad \Omega \quad (7.9)$$

$$F_{proceso}(t_p) \geq F_0 \quad (7.10)$$

Con la restricción de igualdad (ec. (7.9)) sujeta a las siguientes condiciones de borde e iniciales:

$$-k \nabla T = T_{aut} \quad en \quad \Gamma \quad (7.11)$$

$$T(r, z, 0) = T_i \quad en \quad \Omega \quad (7.12)$$

Si la función objetivo es la retención superficial, se debe reemplazar la ec. (7.8) por la ec. (7.13):

$$\max_{T_{aut}} \frac{C_{sup}(t_p)}{C_0} \quad (7.13)$$

7.1.1.2. Formulación de la optimización del procesamiento VRT

El objetivo es encontrar, el perfil de temperatura de autoclave óptima, variable con el tiempo, que permita:

1) maximizar la retención global o superficial del parámetro de calidad seleccionado (tiamina en pescado), para un determinado tiempo de proceso (óptimo para una condición CRT), de manera de lograr que la letalidad acumulada final del proceso para el centro térmico sea mayor o igual a un valor de referencia, F_0 .

Partiendo de la formulación matemática general podemos plantear este problema de optimización de la siguiente forma:

$$\max_{T_{aut}(t)} \frac{C(t_p)}{C_0} \quad \text{ó} \quad \max_{T_{aut}(t)} \frac{C_{sup}(t_p)}{C_0} \quad (7.14)$$

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k \nabla T) \quad \text{en} \quad \Omega \quad (7.15)$$

$$F_{proceso}(t_p) \geq F_0 \quad (7.16)$$

$$tp = tp^* \quad (7.17)$$

donde tp^* es el tiempo de proceso bajo condiciones de procesamiento CRT para lograr la máxima retención de tiamina. Con la restricción de igualdad (ec. (7.15)) sujeta a las siguientes condiciones de borde e iniciales:

$$-k \nabla T = T_{aut}(t) \quad \text{en} \quad \Gamma \quad (7.18)$$

$$T(r, z, 0) = T_i \quad \text{en} \quad \Omega \quad (7.19)$$

Al igual que en el caso de procesamiento bajo condiciones CRT, corresponde el lado izquierdo de la ec. (7.14) cuando la función objetivo es la retención global de tiamina y el lado derecho cuando la función objetivo sea la retención de tiamina superficial.

2) minimizar el tiempo de proceso de manera de lograr una retención igual o mayor a la retención óptima obtenida en el proceso CRT de tal manera que la letalidad acumulada final del proceso en el centro térmico sea mayor o igual a un valor de referencia, F_0 .

Este problema queda planteado de la siguiente forma:

$$\min_{T_{aut}(t)} tp \quad (7.20)$$

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k \nabla T) \quad \text{en} \quad \Omega \quad (7.21)$$

Sujeto a las siguientes restricciones impuestas:

$$F_{\text{proceso}}(t_p) \geq F_0 \quad (7.22)$$

$$\left(\frac{C(t_p)}{C_0} \right) \geq \left(\frac{\bar{C}}{C_0} \right)^* \quad \text{ó} \quad \left(\frac{C_{\text{sup}}(t_p)}{C_0} \right) \geq \left(\frac{C_{\text{sup}}}{C_0} \right)^* \quad (7.23)$$

donde el valor $(C/C_0)^*$ es la máxima retención obtenida bajo procesamiento CRT (global o superficial) y la restricción de igualdad (ec. (7.21)) está sujeta a las mismas condiciones de borde e iniciales que el problema de optimización cuando la función objetivo es la retención de tiamina (ecs. (7.18) y (7.19)).

7.1.1.2.1. Perfiles de temperatura de autoclave

En el caso de procesamiento VRT, diversos tipos de funciones, tales como escalones, rampas, sinusoidales o exponenciales pueden ser utilizados como perfiles de temperatura de autoclave. Las funciones exponenciales y sinusoidales involucran sólo dos parámetros variables mientras que las dos primeras funciones involucran un mayor número de variables dependiendo del número de intervalos considerados.

En este trabajo se evaluarán tres tipos de perfiles de temperatura de autoclave variable con el tiempo: escalones sucesivos (con distinta cantidad de escalones), rampas sucesivas y subidas de tipo lineal hasta una temperatura de venteo dada seguida por un perfil exponencial.

7.1.1.2.1.1. Escalones sucesivos

En primer lugar, se describirá el perfil VRT como una función discreta de escalones sucesivos (todos de igual duración), donde cada escalón corresponde a una temperatura constante de autoclave diferente.

El número escalones es una variable independiente determinada de antemano. La optimización considerará distinto número de escalones, presumiéndose la obtención de mejores resultados a mayor número de intervalos pero a costa de un aumento en el tiempo computacional requerido.

Algunas subidas óptimas teóricas de procesos VRT pueden ser incompatibles con la actual tecnología de autoclave debido a que presentan velocidades de calentamiento muy elevadas con respecto a los tiempos que realmente se necesitan para llevar al autoclave a la temperatura final de proceso. Es por eso que se procedió a evaluar dos perfiles de subida de autoclave que fueran más compatible con la realidad: rampas sucesivas y subida exponencial.

7.1.1.2.1.2. Rampas sucesivas

En este caso se describirá el perfil VRT como una función discreta de R rampas sucesivas (todas de igual duración). En la rutina de optimización se determinarán las temperaturas en los extremos de las rampas.

El número de rampas, R, es una variable independiente que se determina de antemano. La optimización considerará distintos valores de R y al igual que en el caso de perfiles de subida de tipo escalones sucesivos, se esperarán mejores resultados cuanto mayor sea el número de rampas.

7.1.1.2.1.3. Función exponencial

Por lo general, los autoclaves deben ser venteados al inicio de un proceso para lograr la remoción del aire antes de lograr velocidades de calentamiento uniformes en la carga del mismo. Estos esquemas de venteo son definidos por un tiempo mínimo de venteo y una temperatura mínima de autoclave, generalmente mayor o igual a 108°C (Durance y col., 1997). Una vez lograda esta condición de vapor puro, la temperatura puede ser controlada mediante sistemas comerciales de control computarizados, aunque temperaturas de autoclave por debajo de aproximadamente 108°C tienen muy poco efecto letal sobre los microorganismos. Por lo anteriormente mencionado, este perfil puede considerarse formado por dos etapas: 1) una primera etapa de venteo, con el objetivo de lograr un ambiente de vapor puro en el autoclave, durante la cual la temperatura del autoclave aumenta linealmente desde la temperatura inicial hasta la usual temperatura de venteo de un autoclave (aproximadamente 108°C); 2) etapa VRT donde la temperatura de autoclave varía de acuerdo a un patrón predefinido (como puede ser una función sinusoidal o exponencial). En este estudio, se evaluó la función exponencial, la cual es descripta matemáticamente por (Chen & Ramaswamy, 2002):

$$f(t) = A_1 \cdot (1 - e^{-k \cdot t}) \quad (7.24)$$

donde A_1 es una constante que determina la amplitud de la función exponencial, k es una constante de velocidad relacionada con el crecimiento de la función y t es el tiempo de proceso en minutos. El parámetro A_1 indica la máxima temperatura de autoclave alcanzada y por lo tanto cuanto mayor sea A_1 mayor será la temperatura final del autoclave. El parámetro k determina la velocidad de acercamiento de la temperatura a ese valor máximo y por lo tanto valores mas altos de k indican un aumento más rápido en la temperatura de autoclave. Como es de esperar, las constantes A_1 y k determinan el perfil de temperatura del autoclave durante el tiempo de procesamiento así como también la letalidad y la calidad del producto. Estos resultan, entonces, parámetros a determinar en las rutinas de optimización.

Cabe mencionar en este punto que, dado que el objetivo de esta sección es comparar la ventaja del procesamiento VRT sobre el procesamiento CRT, es válido asumir idénticas condiciones de enfriamiento para ambos tipos de tratamientos con lo cual no se incluye esta etapa en las rutinas de optimización.

7.1.1.3. Materiales y métodos

7.1.1.3.1 Simulaciones numéricas

Las historias térmicas en las distintas posiciones dentro del envase, conteniendo atún como sistema conductivo, fueron obtenidas de la resolución de la ec. (7.9), a través del software comercial de elementos finitos FEMLAB. Éstas fueron acopladas a un programa codificado en MATLAB, que contenía la cinética de deterioro del índice de calidad seleccionado de manera de hallar la temperatura de proceso óptima. Para hallar esta temperatura óptima de proceso se utilizó la función *fmincon* correspondiente al módulo de optimización de MATLAB (MATLAB 7.0 R14, 2004). Ésta última se adaptó a la secuencia de programación para realizar la optimización dinámica. Se utilizó la técnica directa de aproximación secuencial basada en la discretización del vector de las variables de control o Control Vector Parameterization (Joly & Pinto, 2004; Balsa-Canto y col., 2007). La función *fmincon* utiliza como dirección del paso la que se obtiene con un método de Quasi-Newton y la longitud del paso se determina con un método de búsqueda lineal.

Los parámetros cinéticos utilizados para describir la degradación de tiamina en pescado en las simulaciones se detallan en la tabla 7.1. Como microorganismo de referencia se

adopta al *Clostridium botulinum* cuyos parámetros cinéticos también se muestran en la misma tabla (Simpson y col., 2004).

Tabla 7.1. Parámetros cinéticos

Parámetros cinéticos	Microorganismo (<i>Clostridium Botulinum</i>)	Nutriente (tiamina en pescado)
z (°C)	10	46.7
D (min)	0.21	96
T _{ref} (°C)	121.1	121.1

7.1.1.3.2 Esquemas de optimización

A continuación se muestran los diagramas de bloques (figuras 7.1 y 7.2) correspondientes a cada esquema de optimización:

7.1.1.3.2.1. Procesamiento CRT

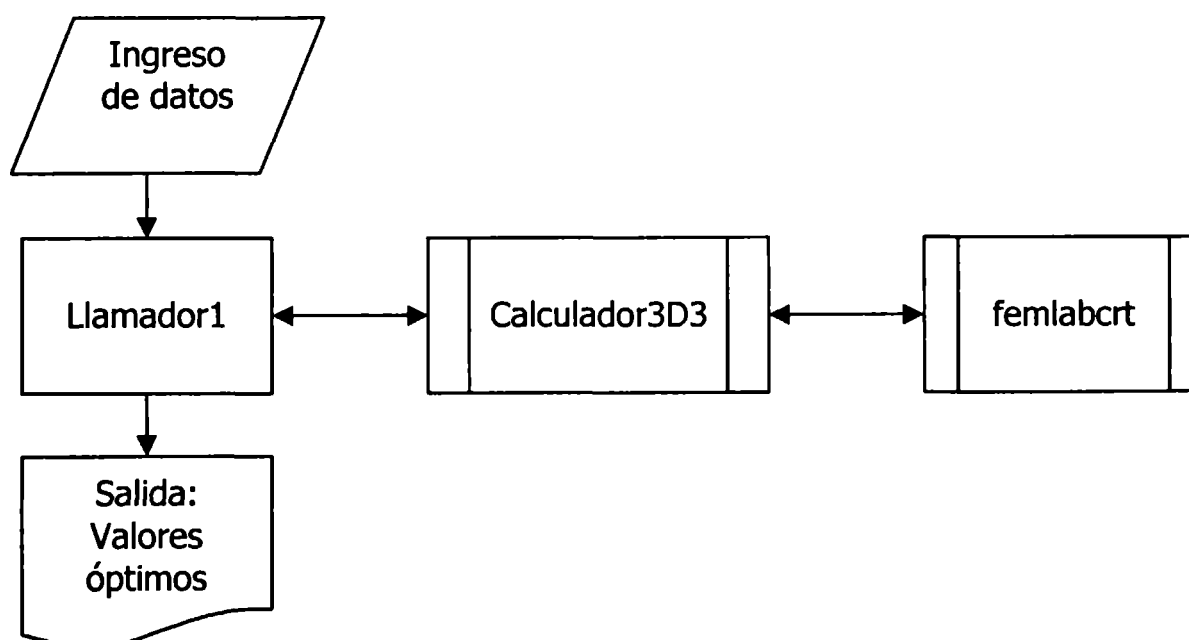


Figura 7.1. Diagrama de bloques correspondiente al esquema de optimización CRT

Llamador1: Inicia la optimización utilizando la función *fmincon*, que invoca a Calculador3D3 tomando como partida un valor de T_a que corresponde a la temperatura constante de autoclave.

En la función **calculador3D3** se calcula la función objetivo que de acuerdo al problema planteado puede ser: retención global de tiamina ó retención superficial de tiamina (ecs. (7.5) ó (7.6)).

Por último, la función **femlabvrt**, invocada por calculador3D3, contiene el script de FEMLAB donde se resuelve el sistema (envases cilíndricos conteniendo atún) por elementos finitos.

Para imponer la restricción de letalidad acumulada en el centro térmico del envase la función femlabvrt incorpora la relación tiempo de proceso vs. temperatura constante de autoclave obtenida de las curvas de isoletalidad. Como su nombre lo indica, estas curvas representan combinaciones de tiempos de proceso-temperaturas de autoclave para lograr el mismo valor de letalidad en el centro térmico. En el capítulo siguiente, en la sección 8.1.1, se profundiza en este aspecto.

7.1.1.3.2.2. Procesamiento VRT

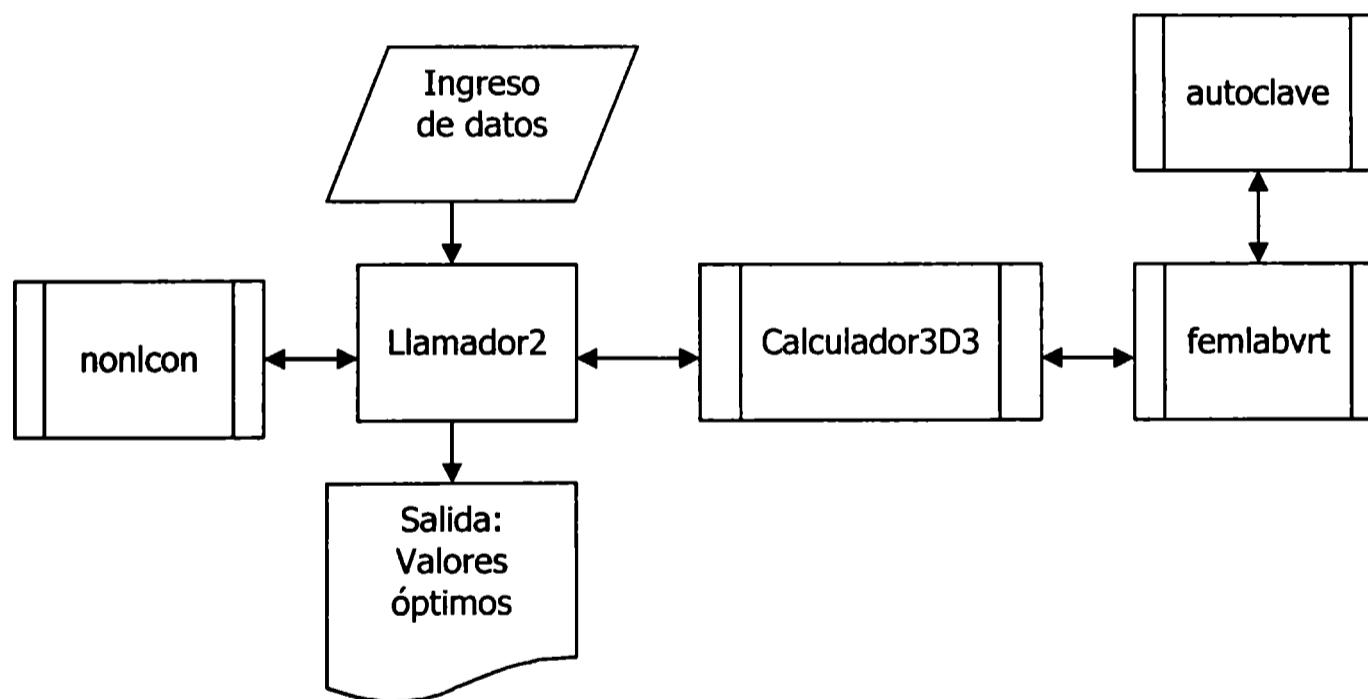


Figura 7.2. Diagrama de bloques correspondiente al esquema de optimización VRT

El esquema para la optimización del procesamiento VRT mostrado en la figura 7.2 se aplicó para la optimización de todas las funciones objetivo planteadas: maximización de la calidad (global y superficial) y minimización de los tiempos de proceso.

Llamador2. Inicia la optimización utilizando la función *fmincon*, que invoca a *Calculador3D3* tomando como partida un vector T_a cuyos elementos son los parámetros a optimizar: temperaturas de autoclave en cada intervalo, parámetros de la función exponencial o tiempos de proceso según corresponda. Por otro lado invoca a la función *nonlcon* que contiene las restricciones correspondientes a los límites ya sea de las temperaturas de autoclave, de los parámetros de la función exponencial o de los tiempos de proceso según cual sea el problema a optimizar.

Como puede verse las únicas restricciones incorporadas a *fmincon* fueron los límites operativos de las variables de control.

En la función *calculador3D3* se encuentra la función objetivo que de acuerdo al problema planteado puede ser: retención global de tiamina, retención superficial de tiamina o tiempo de proceso. La función objetivo se penaliza (ver sección 7.2) para imponer las restricciones de igualdad y desigualdad necesarias para resolver el problema.

La función *femlabvrt* contiene el script de FEMLAB donde se resuelve el sistema (envases cilíndricos conteniendo atún) por elementos finitos. Este archivo llama a la función *autoclave* que contiene el perfil de temperatura de autoclave como función del tiempo y que corresponde a la condición de borde para la resolución de la ecuación de conducción en estado transitorio.

En este punto es importante destacar que, dado que los problemas de optimización generalmente se plantean como problemas de minimización, lo que se realiza para resolver la maximización de la concentración de tiamina es transformar este problema en uno de minimización simplemente cambiando el signo de la función objetivo. Esto se realizó tanto en procesamiento CRT como VRT.

El listado de los programas utilizados para la optimización de las distintas funciones objetivo se encuentra en el ANEXO.

7.1.2. Sistemas mixtos

7.1.2.1. Formulación de la optimización del procesamiento CRT

El objetivo en este punto es encontrar para cada tamaño de envase, la combinación tiempo de proceso-temperatura de autoclave, constante, óptima que maximiza la retención superficial de tiamina en envases conteniendo mejillones en salmuera,

cumpliendo con la restricción que establece que la letalidad acumulada final del proceso debe ser mayor o igual a un valor requerido, F_0 .

Partiendo de la formulación matemática general de un problema de optimización y tomando como función objetivo la retención superficial, podemos plantear el problema de optimización de la siguiente forma:

$$\max_{T_{out}} \frac{C_{sup}(t_p)}{C_0} \quad (7.25)$$

Para evaluar la función objetivo, tal como se plantea en la ec. (7.6), es necesario evaluar la temperatura en la superficie de producto. Asumiendo temperatura prescrita, la función objetivo resulta:

$$\frac{C_{sup}}{C_0} = \frac{2\pi R FS}{A_{lateral}} \int_0^H \exp\left(-\frac{\ln 10}{D_{ref}^*} \int_0^t 10^{\frac{(T_{out}-T_{ref}^*)}{z^*}} dt\right) dz + \frac{\pi}{A_{tapa}} \int_0^R \exp\left(-\frac{\ln 10}{D_{ref}^*} \int_0^t 10^{\frac{(T_{out}-T_{ref}^*)}{z^*}} dt\right) dr \quad (7.26)$$

En la ecuación anterior, la variable FS representa la fracción de producto sólido (mejillones, en este caso particular) que está en contacto con el envase.

Como en los casos anteriores, el sistema queda sujeto a la siguiente restricción para el punto de calentamiento más lento:

$$F_{proceso}(t_p) \geq F_0 \quad (7.27)$$

En su versión más general el problema de optimización debería incluir la resolución completa del balance de energía del sistema partículas – líquido de cobertura, planteado en las ecs. (4.5) a (4.11). Sin embargo, por requerimiento de la restricción (ec. (7.27)) sólo es necesario resolver el balance para los sólidos que se ubican en el centro térmico del envase (ecs. (4.8) a (4.11)).

Cabe aclarar que debido a limitaciones de cálculo no se considera la optimización de retención global de tiamina. Como se desprende del análisis del procesamiento térmico de

sistemas mixtos, presentado en los capítulos IV y V, sólo se cuenta con la historia térmica del punto de calentamiento más lento.

7.1.2.2. Formulación de la optimización del procesamiento VRT

El objetivo es encontrar, el perfil de temperatura de autoclave óptima, variable con el tiempo, que permita maximizar la retención superficial de tiamina, para un determinado tiempo de proceso (óptimo para una condición CRT), de manera de lograr que la letalidad acumulada final del proceso para el centro térmico sea mayor o igual a un valor de referencia, F_0 .

Partiendo de la formulación matemática general podemos plantear este problema de optimización de la siguiente forma:

$$\max_{T_{aut}(t)} \frac{C_{sup}(t_p)}{C_0} \quad (7.28)$$

Nuevamente, asumiendo temperatura prescrita, la función objetivo resulta:

$$\frac{C_{sup}}{C_0} = \frac{2\pi R FS}{A_{lateral}} \int_0^H \exp\left(-\frac{\ln 10}{D_{ref}^*} \int_0^t 10^{\frac{(T_{aut}(t)-T_{ref}^*)}{z^*}} dt\right) dz + \frac{\pi}{A_{tapa}} \int_0^R \exp\left(-\frac{\ln 10}{D_{ref}^*} \int_0^t 10^{\frac{(T_{aut}(t)-T_{ref}^*)}{z^*}} dt\right) dr \quad (7.29)$$

donde la variable FS representa la fracción de producto sólido que está en contacto con el envase.

La restricción para el punto de calentamiento más lento nuevamente está dada por:

$$F_{proceso}(t_p) \geq F_0 \quad (7.30)$$

$$tp = tp^* \quad (7.31)$$

donde tp^* es el tiempo de proceso bajo condiciones de procesamiento CRT para lograr la máxima retención superficial de tiamina.

Por la misma razón que lo mencionado en la sección anterior (7.1.2.1), sólo es necesario resolver el balance para los sólidos que se ubican en el centro térmico del envase (ecs. (4.8) a (4.11)).

En la optimización del procesamiento VRT para este tipo de sistemas se evaluarán los siguientes perfiles de autoclave variables con el tiempo: escalones sucesivos y perfiles de subida exponencial.

7.1.2.3. Materiales y métodos

7.1.2.3.1. Simulaciones numéricas

La historia térmica del punto de calentamiento más lento para este tipo de sistemas (mejillones en salmuera), fue obtenida a partir de la ecs. (4.26) y (4.27) que involucran el uso de los coeficientes de la función de transferencia. Estos se obtuvieron, para cada tamaño de envase, a partir de las ecs. (5.6), (5.9), (5.10) y (5.11) y los coeficientes de la función perturbación surgen a partir de la adimensionalización de las temperaturas del autoclave (ec. (4.24)).

Estas historias térmicas fueron acopladas a un programa codificado en MATLAB, que calculaba además la cinética de deterioro del índice de calidad seleccionado de manera de hallar la temperatura de proceso óptima. Para hallar esta temperatura óptima de proceso se utilizó la función *fmincon* correspondiente al módulo de optimización de MATLAB (MATLAB 7.0 R14, 2004) (ver sección 7.1.1.3.1).

Los parámetros cinéticos utilizados para describir la degradación de tiamina en los mejillones son las mismas que se presentan en la tabla 7.1 (ver sección 7.1.1.3.1).

7.1.2.3.2. Esquemas de optimización

A continuación se muestran los diagramas de bloques (figuras 7.3 y 7.4) correspondientes a cada esquema de optimización:

7.1.2.3.2.1. Procesamiento CRT

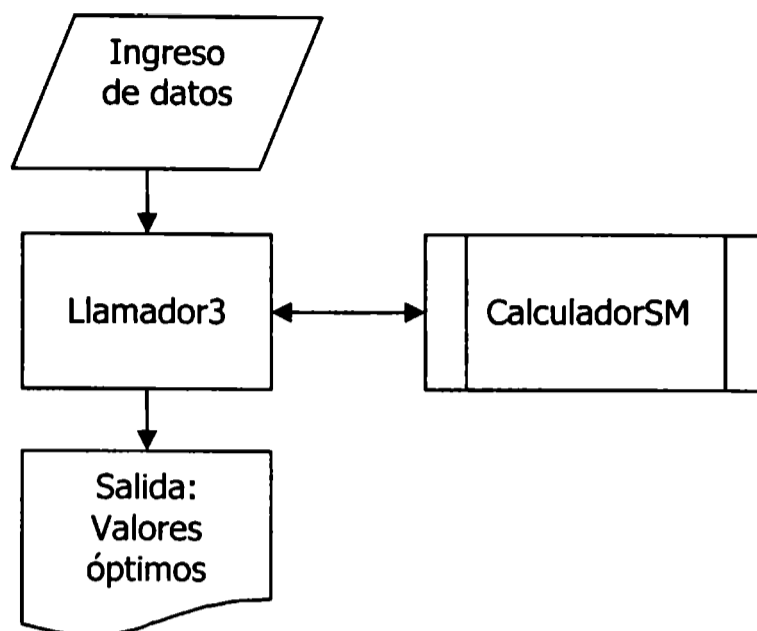


Figura 7.3. Diagrama de bloques correspondiente al esquema de optimización CRT para sistemas mixtos

Llamador3: Inicia la optimización utilizando la función *fmincon*, que invoca a *CalculadorSM* tomando como partida un valor de T_a que corresponde a la temperatura constante de autoclave.

En la función *calculadorSM* se calcula la función objetivo: retención superficial de tiamina (ec. (7.26)) y se incorpora la restricción de letalidad acumulada en el punto crítico a través de la relación tiempo de proceso vs. temperatura constante de autoclave obtenida de las curvas de isoletalidad para este tipo de sistemas (ver sección 8.2.1 del capítulo siguiente).

7.1.2.3.2.2. Procesamiento VRT

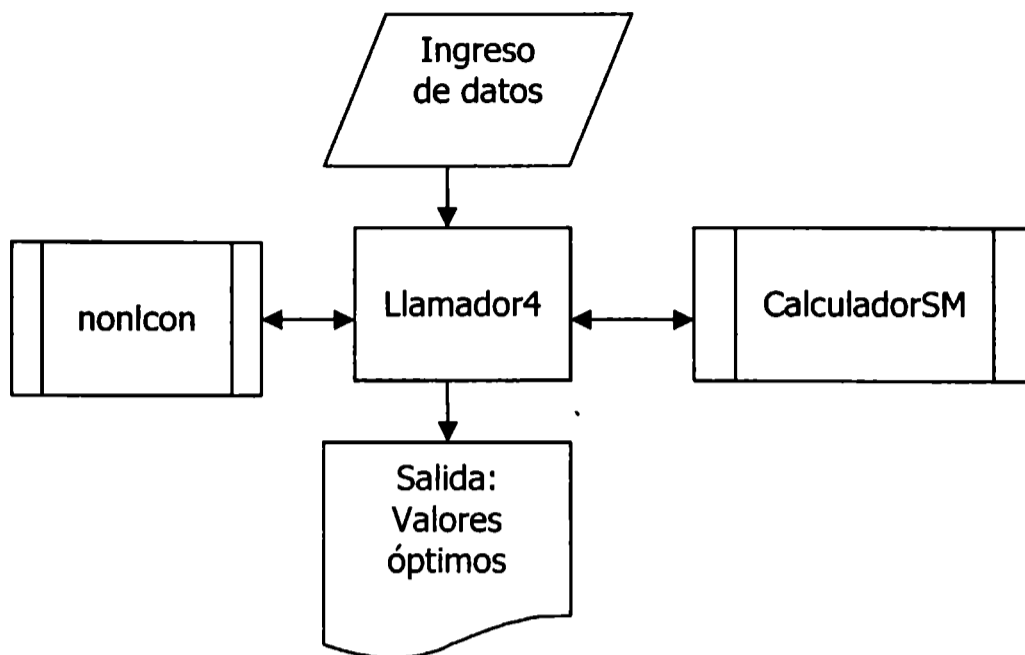


Figura 7.4. Diagrama de bloques correspondiente al esquema de optimización VRT para sistemas mixtos

Llamador4: Inicia la optimización utilizando la función *fmincon*, que invoca a CalculadorSM tomando como partida un vector T_a cuyos elementos son los parámetros a optimizar: temperaturas de autoclave en cada intervalo o parámetros de la función exponencial. Por otro lado invoca a la función **nonlcon** que contiene las restricciones correspondientes a los límites de las temperaturas de autoclave en cada intervalo o de los parámetros de la función exponencial.

En la función **calculadorSM** se encuentra la función objetivo: retención superficial de tiamina. La misma función incorpora el cálculo de la historia térmica para el punto crítico de este tipo de sistemas mediante funciones de transferencia. Asimismo, en esta función se realiza el cálculo de la letalidad del proceso (ec. (3.3)). La función objetivo se penaliza (ver sección 7.2) para imponer la restricción de desigualdad necesaria para resolver el problema ($F_{\text{proceso}} > F_0$).

Al igual que para el caso de sistemas conductivos, se transforma el problema de maximización de tiamina en superficie en un problema de minimización simplemente

cambiando el signo de la función objetivo. Esto se realizó tanto en procesamiento CRT como VRT.

El listado de los programas utilizados para la optimización de la función objetivo considerada para sistemas mixtos se encuentra en el ANEXO.

7.2. Funciones de penalización para optimización en procesamiento VRT

Una alternativa para imponer las restricciones necesarias para resolver los problemas de optimización es la utilización de métodos de penalización (Bazaraa y col., 1993; Venkataraman, 2002). Este es un método ampliamente utilizado cuyo fundamento o idea principal consiste en incorporar las restricciones dentro de la función objetivo a través de funciones de penalización que aumentan el valor de la función objetivo, penalizando la violación de las restricciones.

Consideremos el siguiente problema de optimización con una restricción de igualdad y una de desigualdad:

$$\text{Minimizar } f(x) \tag{7.32}$$

Sujeto a:

$$h(x) = 0$$

$$g(x) \leq 0$$

Si aplicamos el concepto de función de penalización, el problema con restricciones anterior puede ser reemplazado por el siguiente problema penalizado sin restricciones, en el que r (coeficiente de penalización) es un número suficientemente grande:

$$\text{Minimizar } f(x) + r_h \cdot h^2(x) + r_g \cdot [\max\{0, g(x)\}]^2 \tag{7.33}$$

Intuitivamente podemos ver que una solución óptima para el problema penalizado implica que la restricción de igualdad $h(x)$ sea cercana a cero, ya que de otra manera se incurre a una gran penalización a través del factor $r_h \cdot h^2(x)$. Por otro lado, si se cumple la restricción $g(x) \leq 0$, $r_g \cdot [\max\{0, g(x)\}]^2 = 0$ y no se incurre a ninguna penalización.

Generalizando la formulación anterior podemos transformar un problema con restricciones a un problema penalizado de la siguiente forma:

$$\text{Minimizar } F(x, r_h, r_g) = f(x) + P(x, r_h, r_g) \quad (7.34)$$

donde $P(x, r_h, r_g)$ es la función de penalización. La misma se puede expresar en forma general de la siguiente forma:

$$P(x, r_h, r_g) = r_h \left[\sum_{k=1}^l h_k(x)^2 \right] + r_g \left[\sum_{j=1}^m (\max\{0, g_j(x)\})^2 \right] \quad (7.35)$$

Como puede observarse de la ecuación anterior, si las restricciones (sean de igualdad o de desigualdad) no se satisfacen, las mismas son penalizadas. Puede demostrarse que la solución del problema penalizado tiende a la solución del problema con restricciones a medida que r_h y r_g tienden a infinito. Sin embargo valores demasiado altos pueden generar dificultades numéricas, es por eso que en general se trata que el coeficiente de penalización sea del mismo orden de magnitud que el valor de la función objetivo a optimizar. Considerando que la retención de tiamina (tanto global como superficial) es un valor adimensional siempre menor que 1, resulta suficiente trabajar con un coeficiente de penalización igual a 10. En cambio, en la optimización de tiempos de proceso fue necesario adoptar un valor mayor, 100, debido al orden de magnitud de la función objetivo involucrada.

A continuación se detallan las funciones de penalización utilizadas en cada uno de los problemas de optimización:

1) Optimización de retención de tiamina (global o superficial)

$$P = 10 \cdot [\max\{0, res\}]^2 \quad (7.36)$$

donde:

$$res = [F_0 - F_{proceso}] \quad (7.37)$$

indicando que la letalidad acumulada para el centro térmico del envase debe ser mayor o igual al valor requerido F_0 (que será igual a 5 minutos ó 3 minutos, según se trate de sistemas conductivos o mixtos, respectivamente). La penalización por el incumplimiento de esta restricción (ec. (7.36)) hace que la misma sea satisfecha.

2) Optimización de tiempo de proceso

$$P = 100 \cdot [\max\{0, res\}]^2 + 100 \cdot [\max\{0, ret\}]^2 \quad (7.38)$$

El primer término de la ec. (7.38) corresponde a la misma restricción que en el caso anterior (ec. (7.37)) y el segundo término puede ser:

$$ret = \left[\left(\frac{\bar{C}}{C_0} \right)^* - \frac{\bar{C}}{C_0} \right] \quad (7.39)$$

cuando la restricción es sobre la retención global de tiamina indicando que la misma debe ser mayor o igual al valor máximo obtenido bajo condiciones de procesamiento CRT $((\bar{C} / C_0)^*)$

o bien:

$$ret = \left[\left(\frac{C_{sup}}{C_0} \right)^* - \frac{C_{sup}}{C_0} \right] \quad (7.40)$$

indicando la misma restricción, pero sobre el valor de retención de tiamina superficial.

CAPITULO VIII

Resultados y Discusión

8.1. Sistemas conductivos

8.1.1. Temperatura de autoclave constante (CRT)

Para el caso particular de procesamiento a temperatura constante de autoclave, se resuelve el problema de optimización planteado en las ecs. (7.8) a (7.13).

Como se mencionó previamente, se consideraron dos funciones objetivo:

- 1) maximización de la retención global de tiamina;
- 2) maximización de la retención superficial de tiamina.

La restricción en ambos problemas de optimización es que el valor de letalidad acumulada del proceso (F) evaluado en el centro térmico sea mayor o igual a un valor de referencia F_0 (adoptando el mismo valor F_0 de 5 minutos utilizado en la sección 5.1.6) y los límites de la variable control (temperatura de autoclave) en ambos casos son $110^{\circ}\text{C} \leq T_{\text{aut}} \leq 140^{\circ}\text{C}$.

Los resultados que se presentan en este capítulo contemplan los mismos tamaños de envase utilizados la primera parte de este trabajo de tesis (capítulo V), es decir, diámetros en el rango de 0.04 m a 0.09 m y alturas entre 0.03 m y 0.113 m, que cubre el rango de envases utilizados en la práctica industrial.

En primera instancia, para conocer el comportamiento del sistema en estudio se calcularon, para cada tamaño de envase, todas las combinaciones de temperatura constante de autoclave y tiempos de proceso que producen la misma letalidad acumulada final. Se cuenta así para cada envase con el registro de los procesos equivalentes que producen el mismo grado de letalidad acumulada.

En la figura 8.1, se presenta la curva de isoletalidad para un dado tamaño de envase ($D=0.07$ m y $H=0.08$ m) y para una temperatura inicial del producto de 20°C . Cada punto de esta curva define las dos variables de proceso (temperatura de autoclave y tiempo de proceso) para lograr el valor de letalidad acumulada anteriormente mencionado.

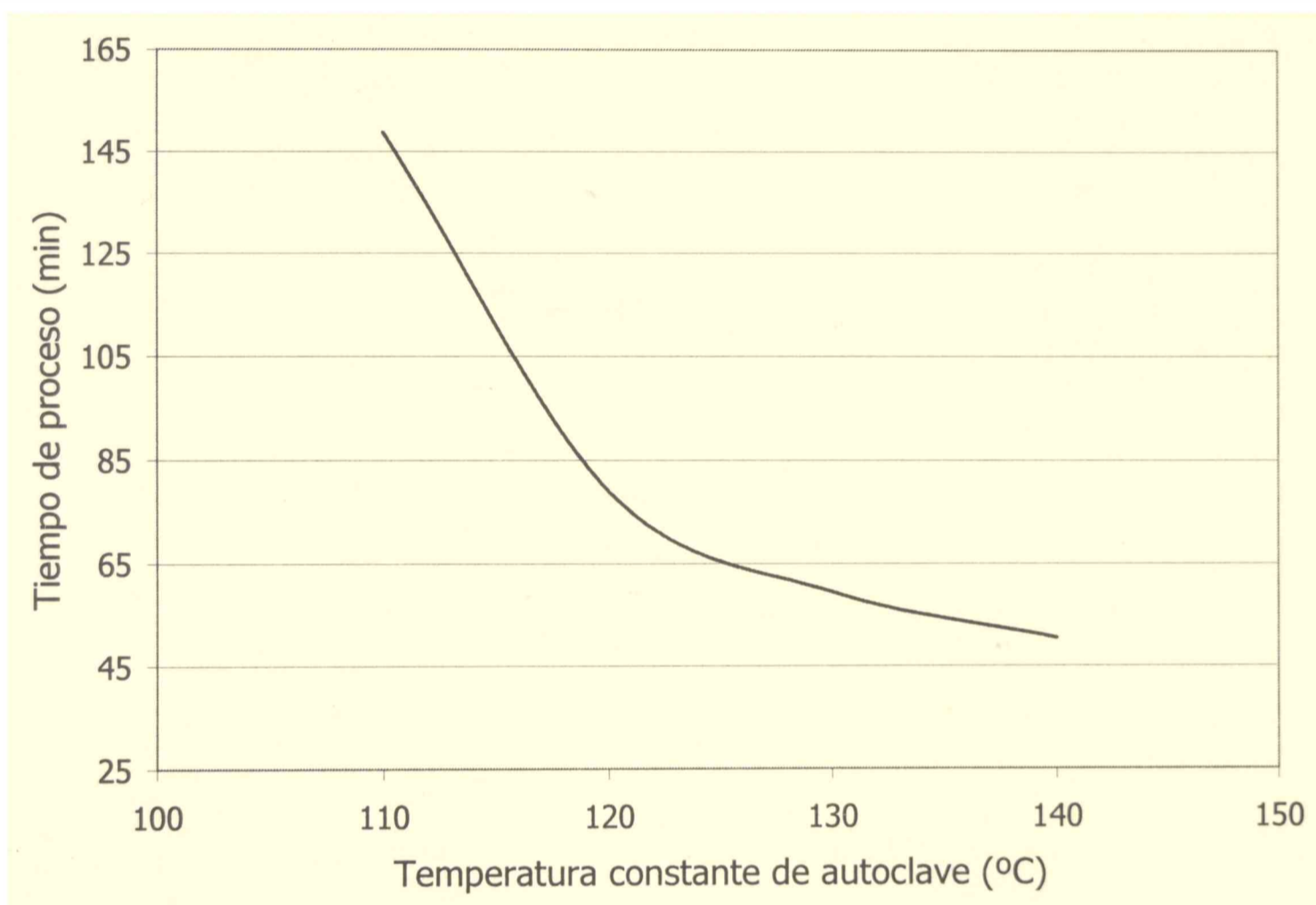


Figura 8.1. Curva de isoletalidad para el envase de dimensiones $D=0.07$ m y $H=0.08$ m. Además, para cada uno de estos procesos equivalentes, se determinaron los porcentajes de retención de tiamina (global y superficial). Los resultados obtenidos para el mismo envase de la figura 8.1 se presentan en las figuras 8.2 y 8.3 respectivamente. El análisis de estas curvas, que presentan un máximo nos indica que es posible hallar una condición óptima de proceso para este tipo de sistemas.

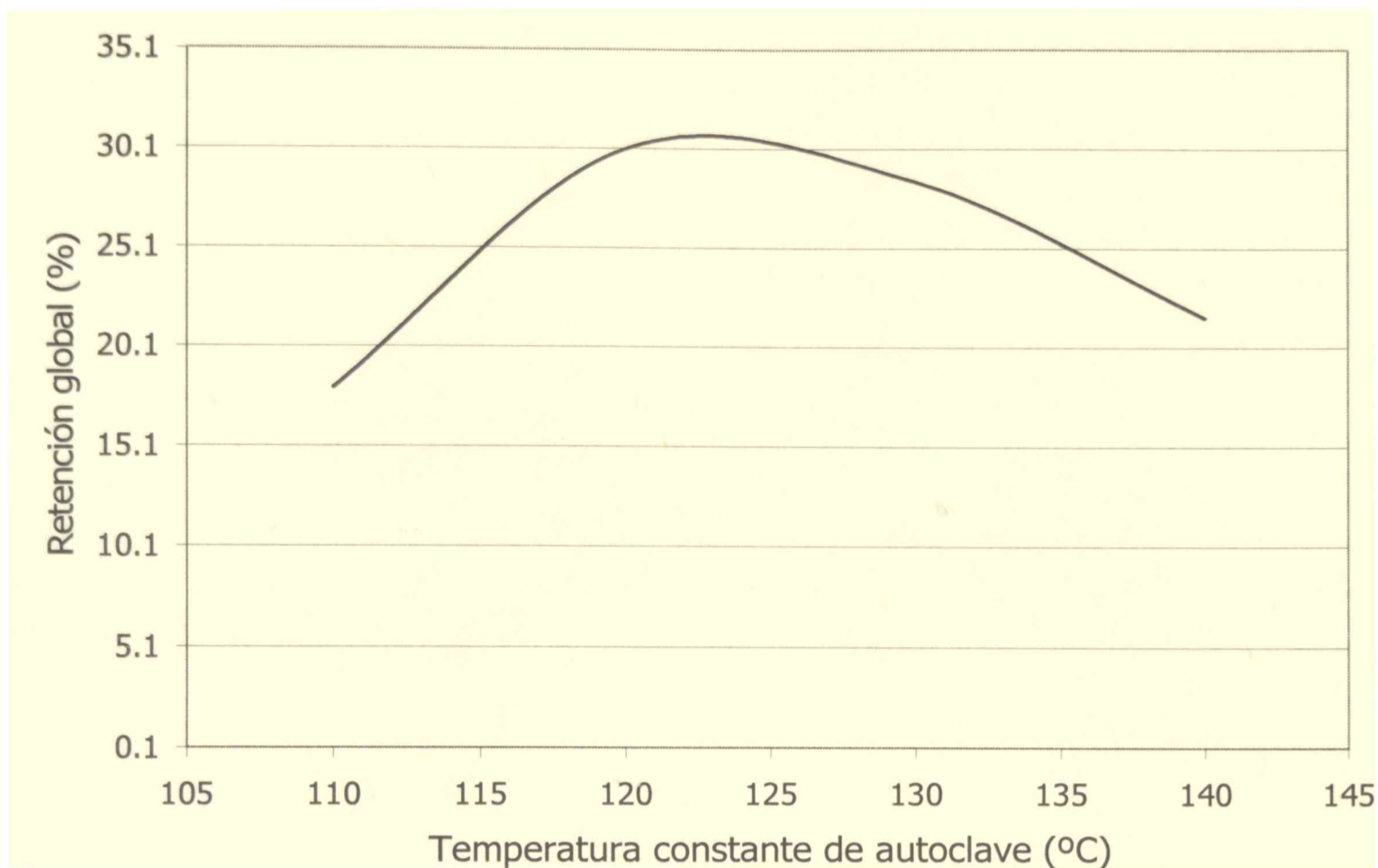


Figura 8.2. Retención global de tiamina en función de procesos CRT equivalentes.

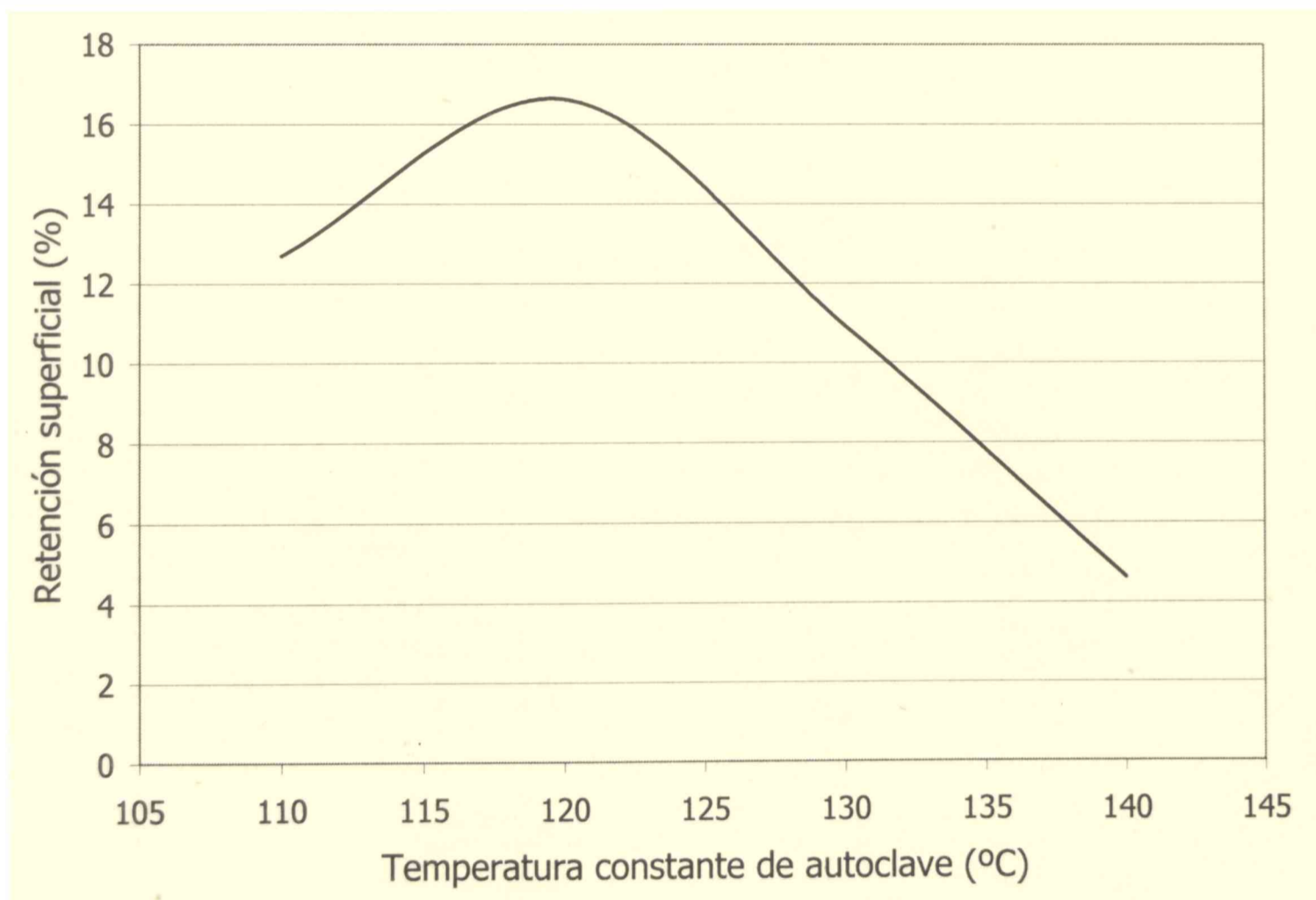


Figura 8.3. Retención superficial de tiamina en función de procesos CRT equivalentes.

Curvas idénticas a las anteriores se hallaron para todos los tamaños de envases. La forma de las curvas anteriores es similar a las presentadas por Simpson y col. (2008) en la optimización del procesamiento térmico de paté de carne de cerdo enlatado.

La temperatura óptima para lograr la máxima retención global de tiamina (para un dado tamaño de envase) no debe coincidir necesariamente con la temperatura óptima para lograr maximizar la retención superficial de dicho nutriente. Puede observarse, para el caso particular del tamaño de envase considerado en las figuras 8.2 y 8.3, que la temperatura óptima para maximizar la retención global de tiamina es de aproximadamente 123°C (correspondiéndole un valor máximo de retención de 31%), mientras que la temperatura de autoclave necesaria para optimizar la retención superficial de tiamina es de aproximadamente 119°C (correspondiéndole un valor máximo de retención de 16.5%). Estos resultados demuestran a priori que la condición óptima de proceso dependerá de la función objetivo a considerar.

8.1.1.1. Retención global de tiamina

A partir de la ec. (7.5) y teniendo en cuenta todos los tamaños de envases considerados se calcula el porcentaje de retención de tiamina global obtenido seleccionando cuatro valores de temperatura de autoclave (110, 120, 130 y 140°C). Como mencionamos, para cada temperatura, el tiempo de proceso fue determinado de manera de cumplir con el requisito de letalidad acumulada. Se muestran en las figuras 8.4 ((a), (b), (c) y (d)) estos resultados en la forma de superficies de respuesta.

Del análisis de la figura 8.4 puede observarse que, independientemente del tamaño de envase, la menor retención global de nutrientes se obtiene a temperatura de proceso de 110°C. A pesar de ser la temperatura más baja de proceso, en esta condición los tiempos de procesamiento necesarios para lograr el valor de F requerido son mayores, generando un mayor daño al producto y por lo tanto, originando los menores porcentajes de retención del nutriente. Por otro lado, el procesamiento a la temperatura de proceso más alta (140°C), si bien se corresponde con los menores tiempos de proceso, produce una exposición de determinadas regiones del producto a temperaturas excesivamente altas lo que genera porcentajes de retención menores que el procesamiento del producto a las temperaturas intermedias de 120 y 130°C. Estos resultados nos dan una idea del rango de temperaturas entre las cuales se hallarán las temperaturas óptimas de proceso para cada tamaño de envase.

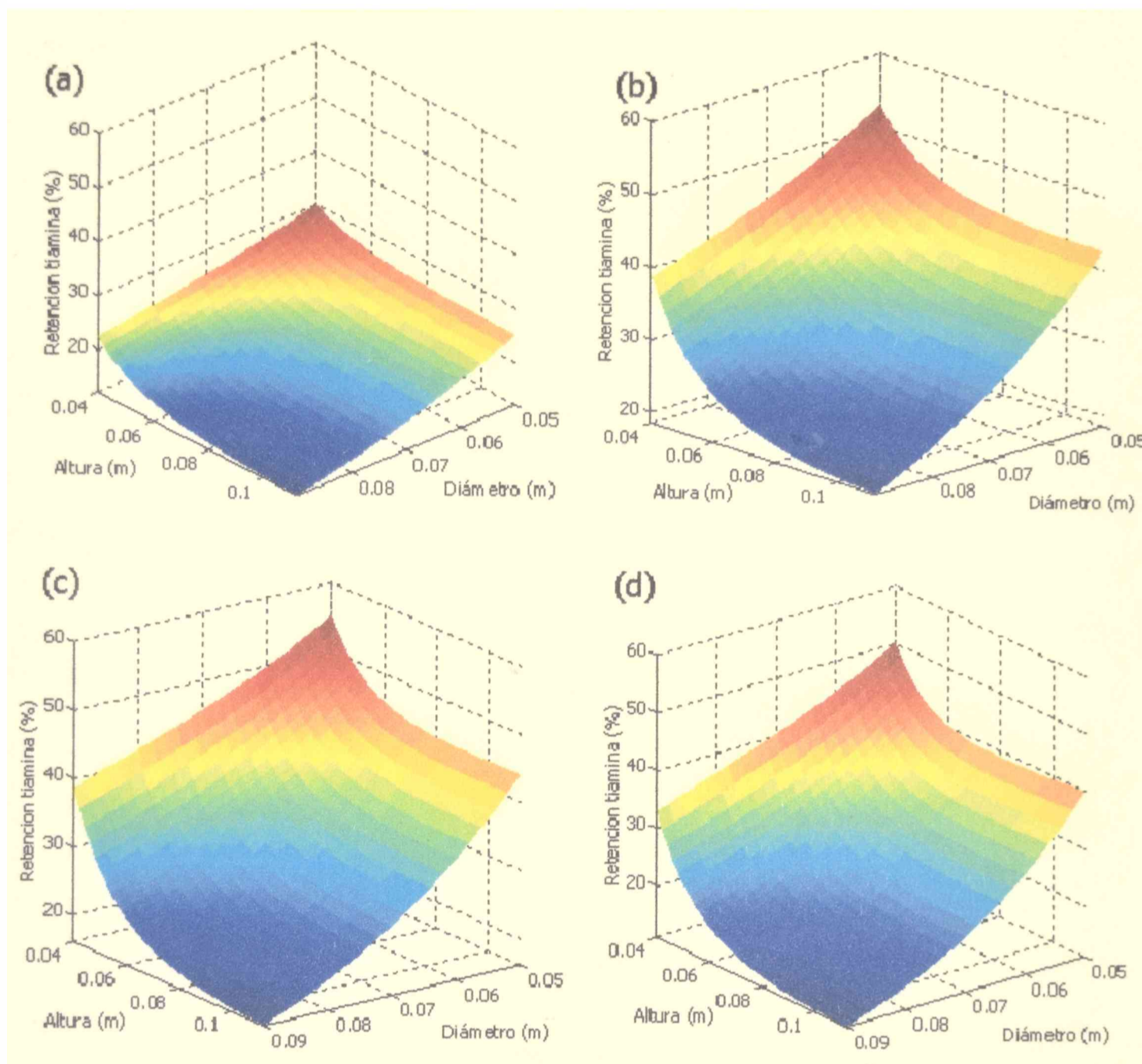


Figura 8.4. Porcentaje de retención global de tiamina en función del tamaño del envase (diámetro y altura) para una temperatura constante de autoclave; (a) 110°C; (b) 120°C; (c) 130°C; (d) 140°C.

Asimismo puede observarse que a una temperatura de proceso determinada, las pérdidas de tiamina aumentan a medida que aumenta el tamaño del envase. Esto ocurre ya que a medida que aumentan las dimensiones del envase, aumenta el tiempo necesario para alcanzar el valor de letalidad acumulada en el punto de calentamiento más lento, y por lo tanto las zonas cercanas a la superficie del producto llegan a temperaturas excesivas aumentando en consecuencia el daño desde el punto de vista de la calidad.

La retención global de tiamina, a una temperatura de proceso determinada, pudo regresionarse en función de las dimensiones del envase, por la siguiente ecuación empírica:

$$retención (\%) = m \cdot \exp(n \cdot D) \cdot \left[\left(\frac{D}{H} \right)^2 + s \cdot \left(\frac{D}{H} \right) + x \right] \quad (8.1)$$

Las constantes de la ec. (8.1) dependen de la temperatura de proceso. El ajuste de dicha ecuación se realizó mediante la función *lsqcurvefit* en Matlab. Los valores de las constantes m , n , s y x , para las cuatro temperaturas de autoclave, se detallan en la tabla 8.1.

Tabla 8.1. Retención global de tiamina: constantes de regresión de la ec. (8.1)

Temperatura de proceso (°C)	Constantes				r^2
	m	n	s	x	
110	0.1754	-19.2772	-0.7403	3.8808	0.9923
120	0.4565	-22.0934	-0.8327	2.9849	0.9879
130	0.8127	-25.9041	-1.0715	2.2608	0.9902
140	1.4545	-31.6811	-1.2622	1.7017	0.9910

Se encuentra asimismo que las cuatro constantes de regresión de la ec. (8.1) siguen una funcionalidad cuadrática con la temperatura de proceso (estos resultados no se muestran en este trabajo). Si bien la rutina de optimización propuesta en este trabajo de tesis utiliza otra expresión de la función objetivo, la ec. (8.1), incorporando la dependencia de las constantes empíricas m , n , s y x en función de T_{aut} podría emplearse también como función objetivo.

Teniendo presentes estos resultados preliminares, que permiten analizar cualitativamente la dependencia de la calidad global del producto en función de los distintos parámetros del proceso (tamaño de envase, temperatura de autoclave y tiempo de proceso), se procedió a implementar la rutina de optimización propuesta en la sección 7.1.1.1, cuyos resultados se muestran en las figuras siguientes.

La figura 8.5 representa la temperatura constante de autoclave que maximiza la retención global de tiamina, en función del tamaño de envase, en la figura 8.6 se muestran los tiempos de procesamiento y en la figura 8.7 el valor de la máxima retención global de nutriente, ambos también en función de las dimensiones del envase.

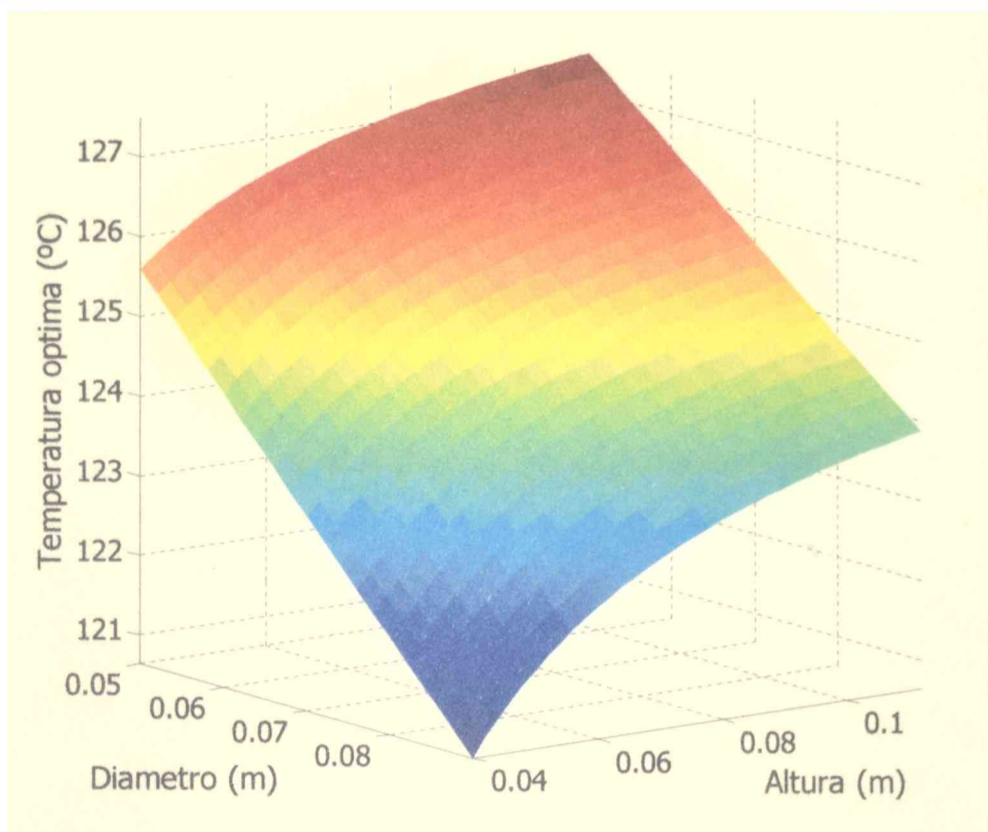


Figura 8.5. Temperatura óptima de proceso CRT en función de las dimensiones de los envases.

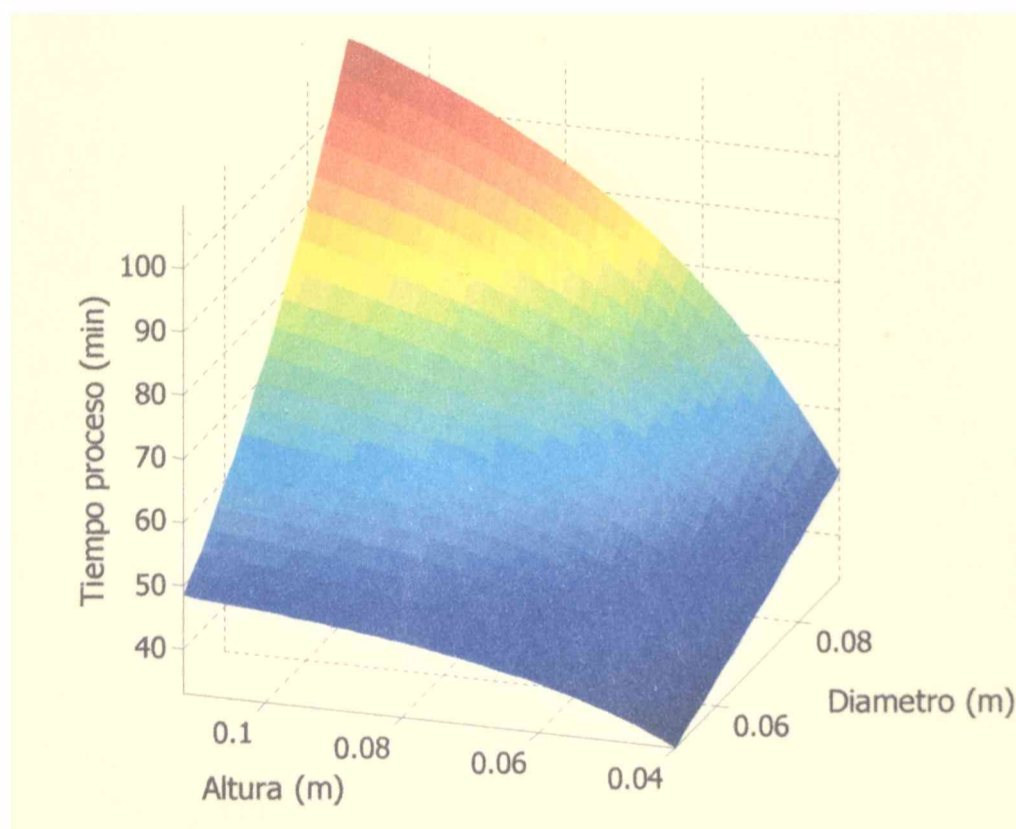


Figura 8.6. Tiempo de proceso CRT en función de las dimensiones de los envases.

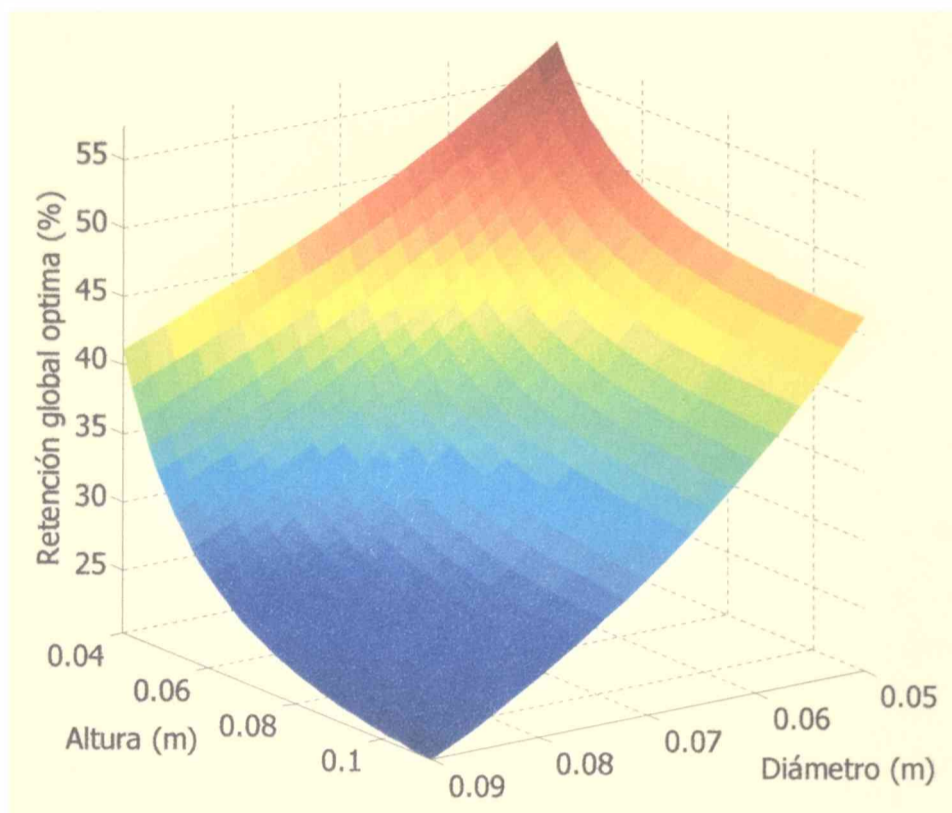


Figura 8.7. Retención global máxima (óptima) en función de las dimensiones de los envases.

A partir de estas últimas figuras (figs. (8.5), (8.6) y (8.7)), es posible entonces determinar para un dado tamaño de envase las condiciones óptimas de procesamiento representadas por la temperatura y el tiempo de operación que maximizan la retención global de tiamina verificando el valor de letalidad fijado ($F_0 = 5$ min).

8.1.1.2. Retención superficial de tiamina

Para obtener los resultados de optimización de esta sección, se procedió de la misma manera que para la optimización de la retención global de tiamina. Nuevamente fueron considerados todos los tamaños de envases utilizados en la sección 5.1.2 del capítulo V.

A partir de las curvas de isoletalidad de la sección anterior, se procedió a encontrar para cada tamaño de envase la temperatura óptima de proceso para lograr la mayor retención de tiamina en la superficie del producto. Idénticas curvas a la figura 8.3 pueden obtenerse para cada uno de los tamaños anteriormente mencionados.

Se calcula, al igual que en la sección anterior, para cada tamaño de envase, el porcentaje de retención de tiamina en la superficie luego del procesamiento necesario para lograr el

valor de letalidad acumulada de 5 minutos. Dichos resultados se muestran en las figuras 8.8 ((a), (b), (c) y (d)).

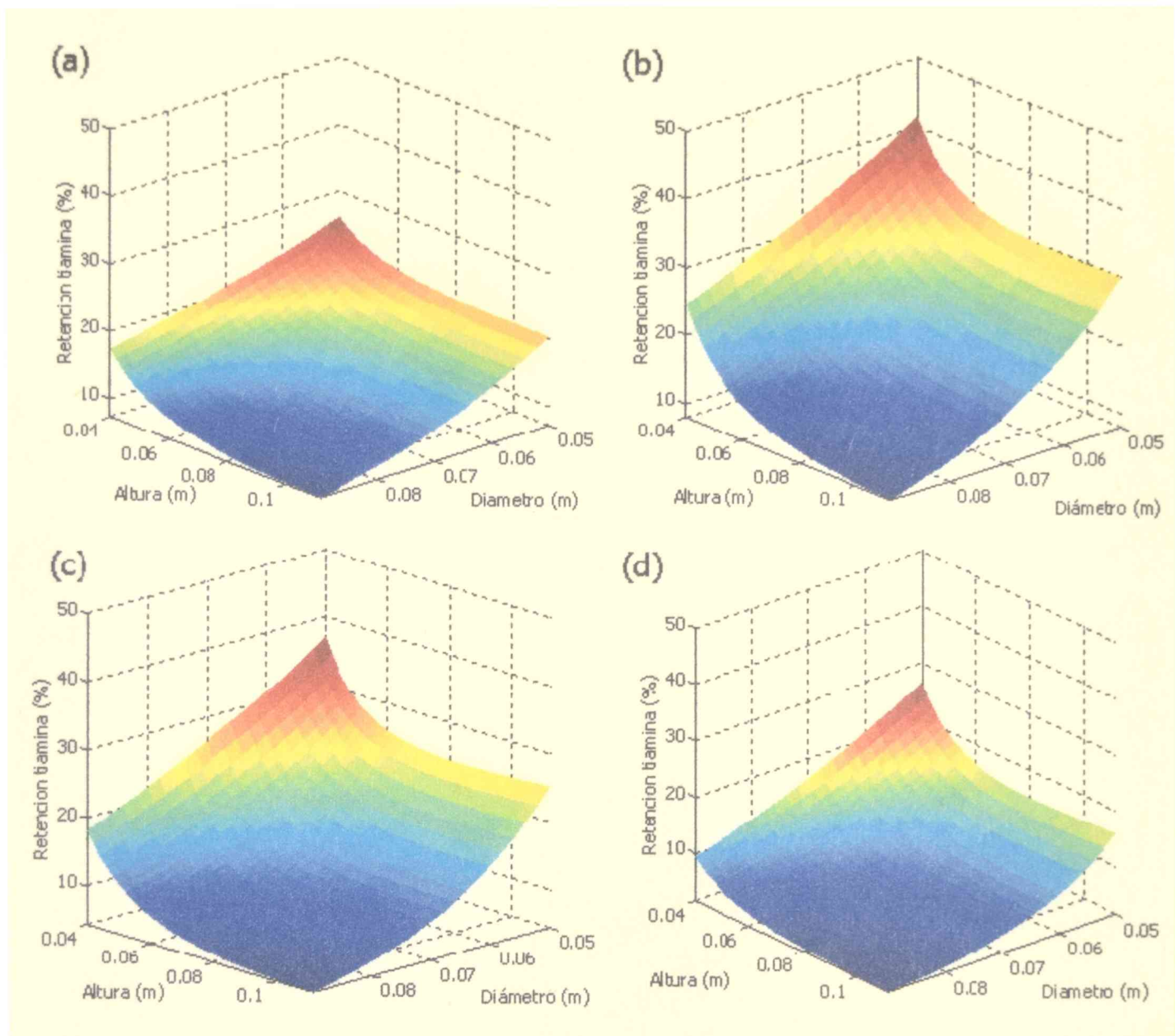


Figura 8.8. Porcentaje de retención superficial de tiamina en función del tamaño del envase (diámetro y altura) para una temperatura constante de autoclave; (a) 110°C; (b) 120°C; (c) 130°C; (d) 140°C.

Analizando las curvas anteriores se encuentra que la dependencia de la retención superficial de tiamina con las dimensiones del producto, se encuentra descrita por el mismo modelo (ec. (8.1)), con constantes empíricas que dependen de la temperatura de proceso.

En la tabla 8.2 se listan las constantes m , n , s y x para las cuatro temperaturas de proceso.

Tabla 8.2. Retención superficial de tiamina: constantes de regresión de la ec. (8.1)

Temperatura de proceso (°C)	Constantes				r^2
	m	n	s	x	
110	0.3775	-27.0454	-0.9517	2.3146	0.9930
120	1.2721	-34.3617	-1.0707	1.5977	0.9882
130	2.7295	-44.1563	-1.2043	1.1787	0.9858
140	4.8652	-56.8525	-1.2327	0.9145	0.9790

Se encontró, al igual que en la sección anterior, que cada una de las constantes de regresión sigue una funcionalidad cuadrática con la temperatura de proceso.

A partir de los resultados anteriores, se calculó la temperatura constante de autoclave que maximiza la retención superficial de tiamina para cada uno de los tamaños de envase estudiados (figura 8.9), los tiempos de procesamiento a esa temperatura óptima (figura 8.10) y el valor de la máxima retención superficial de nutriente para cada tamaño (figura 8.11).

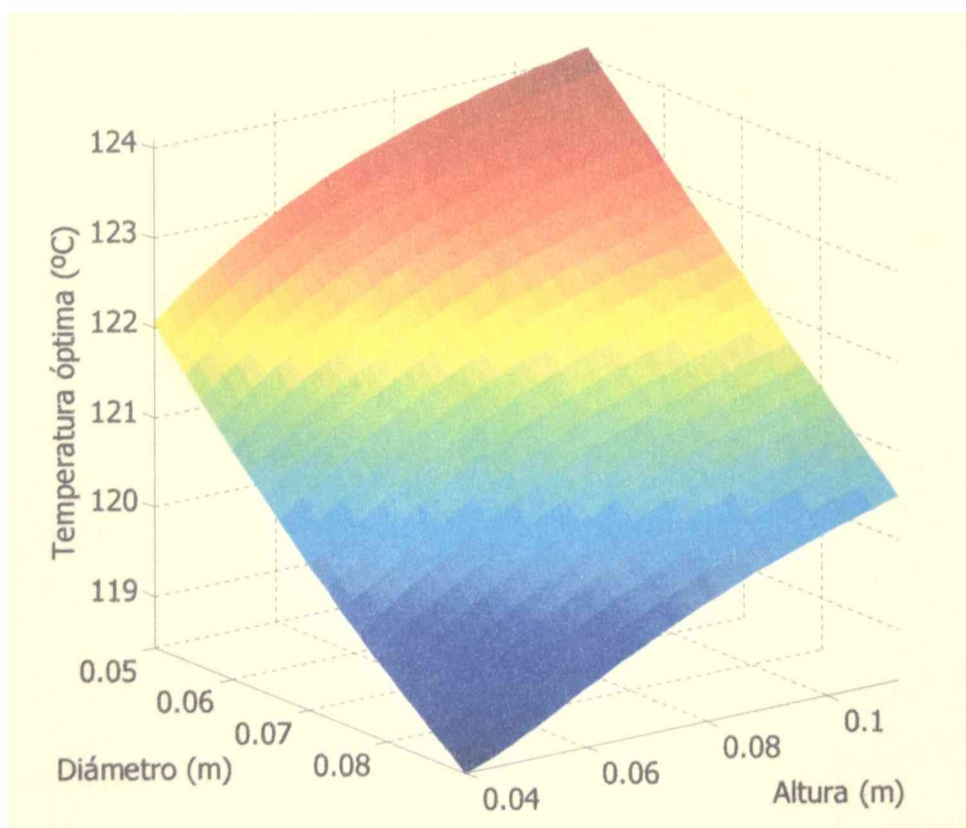


Figura 8.9. Temperatura óptima CRT de proceso en función de las dimensiones de los envases.

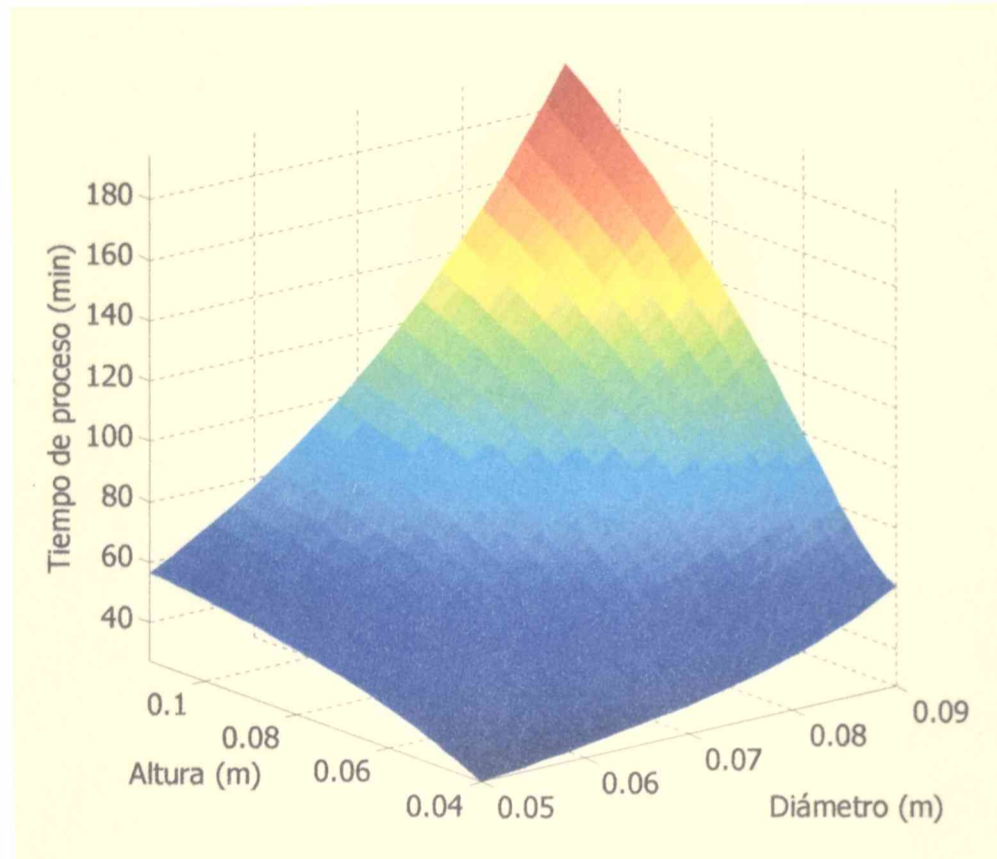


Figura 8.10. Tiempo de proceso en función de las dimensiones de los envases.

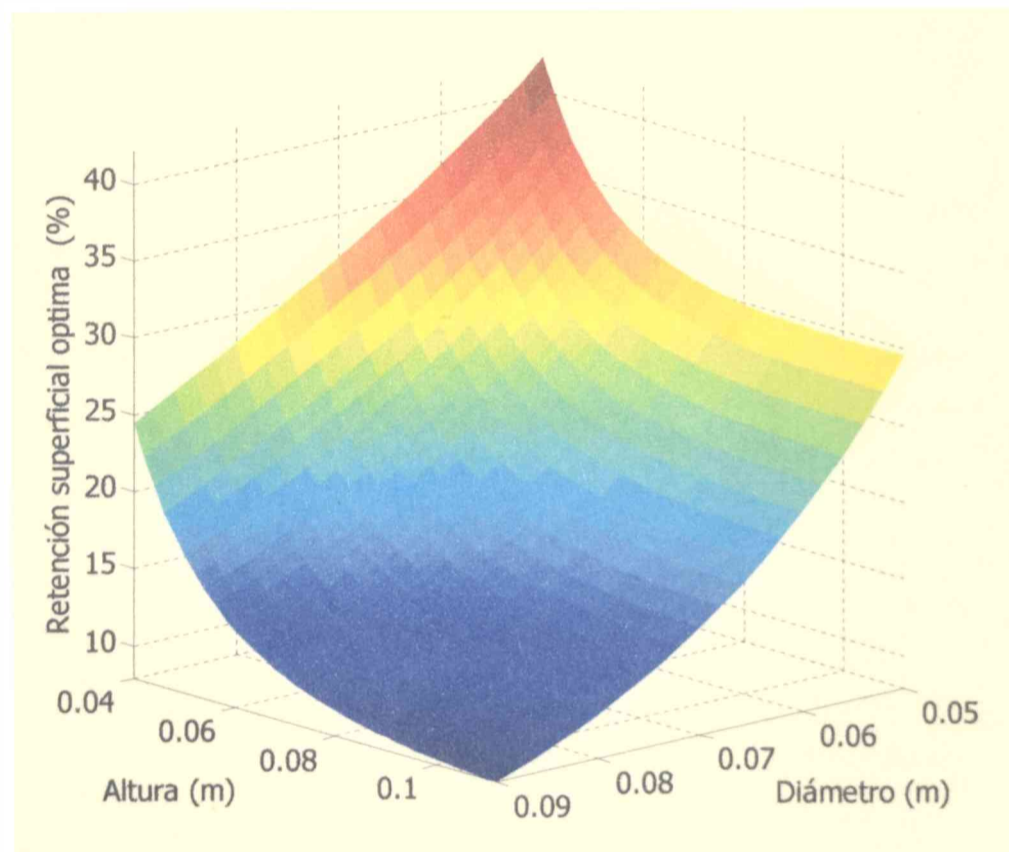


Figura 8.11. Retención superficial máxima en función de las dimensiones de los envases.

De las figuras anteriores (figs. (8.9), (8.10) y (8.11)), es posible determinar para un dado tamaño de envase las condiciones óptimas de procesamiento representadas por la

temperatura y el tiempo de operación que maximizan la retención superficial de tiamina verificando el valor de letalidad fijado ($F_0 = 5$ min).

8.1.2. Temperatura de autoclave variable (VRT)

8.1.2.1. Retención global de tiamina

El problema de optimización de la retención global de tiamina bajo procesamiento a temperatura variable (VRT), se resuelve a partir de las ecs. (7.14) (lado izquierdo) a (7.19), teniendo en cuenta que en este caso T_{aut} va a ser una función del tiempo.

La resolución del problema de optimización cuando la función objetivo es la retención global de tiamina implica en primera instancia, fijar el tiempo de proceso (t_p) de manera de poder comparar la ventaja del procesamiento VRT sobre el procesamiento CRT. En consecuencia, se adoptó el tiempo correspondiente al proceso CRT óptimo.

El objetivo de esta sección es demostrar que, para un mismo tiempo de procesamiento, la utilización de temperatura variable de autoclave permite obtener una mayor retención (en este caso global) de tiamina en el producto final.

Se analizará la situación para dos tamaños de envase determinados, de distinta relación diámetro/altura: E_1 ($R=0.03$ m y $H=0.1$ m) y E_2 ($R=0.025$ y $H=0.04$).

Se detallan en la tabla 8.3 los resultados de la optimización de la retención global de tiamina obtenidos para estos dos tamaños de envases bajo condiciones de procesamiento CRT (sección 8.1.1.1).

Tabla 8.3. Resultados de la optimización de retención global de tiamina bajo procesamiento CRT

Tamaño envase	Temperatura óptima de procesamiento (CRT)	Tiempo de proceso (min)	Retención tiamina (%)		F (min)
			Global*	Superficial	
E_1 R=0.03 m; H=0.1 m	125.20°C	58	36.53	18.52	5.0005
E_2 R= 0.025 m; H=0.04 m	125.26°C	30	54.20	41.81	5.0001

* Valores óptimos de retención global de tiamina

A continuación, se detallan los resultados obtenidos con los tres esquemas de función externa variable descritos en la sección 7.1.1.2.1.

Escalones sucesivos

Analizando el procesamiento a temperatura variable de autoclave para el caso particular del envase E_1 , manteniendo el tiempo final de proceso en 58 minutos, inicialmente se procedió a describir el perfil VRT como una función discreta de escalones sucesivos (descritos en 7.1.1.2.1.1). Las variables de control para la optimización fueron las temperaturas de proceso de cada tramo, N_i . Los límites de dichas variables de control son: $90^\circ C < N_i < 140^\circ C$.

Se pretende que la temperatura de proceso aumente a lo largo del tiempo por lo que se incluye como restricción adicional: $N_{i+3} \geq N_{i+2} \geq N_{i+1} \geq N_i$.

La optimización se realizó considerando distinta cantidad de intervalos de tiempo o número de escalones: 3, 4 y 6. En las figuras 8.12 ((a), (b), (c) y (d)) se muestran los perfiles VRT y CRT óptimos para el envase de dimensiones E_1 , así como también el correspondiente perfil de temperatura y letalidad acumulada del centro térmico obtenido durante el procesamiento VRT. Las figuras 8.12 (c) y (d) corresponden al mismo perfil VRT, sólo que en la primera la escala de temperaturas está ampliada para visualizar mejor los distintos escalones. En forma análoga, se obtuvieron los resultados de optimización para el envase de dimensiones E_2 .

En la tabla 8.4 se detallan para ambos tamaños de envases las características del proceso VRT óptimo (valores de temperatura de autoclave de cada escalón), los resultados obtenidos de retención global de tiamina (máximos) y el porcentaje de mejora con respecto al proceso CRT óptimo correspondiente.

Analizando los resultados de la tabla 8.4, se concluye que la mejora alcanzada en la retención global utilizando perfiles de este tipo es relativamente baja, llegando como máximo a una mejora de un 2.25 % para el caso del envase de dimensiones E_2 y seis intervalos.

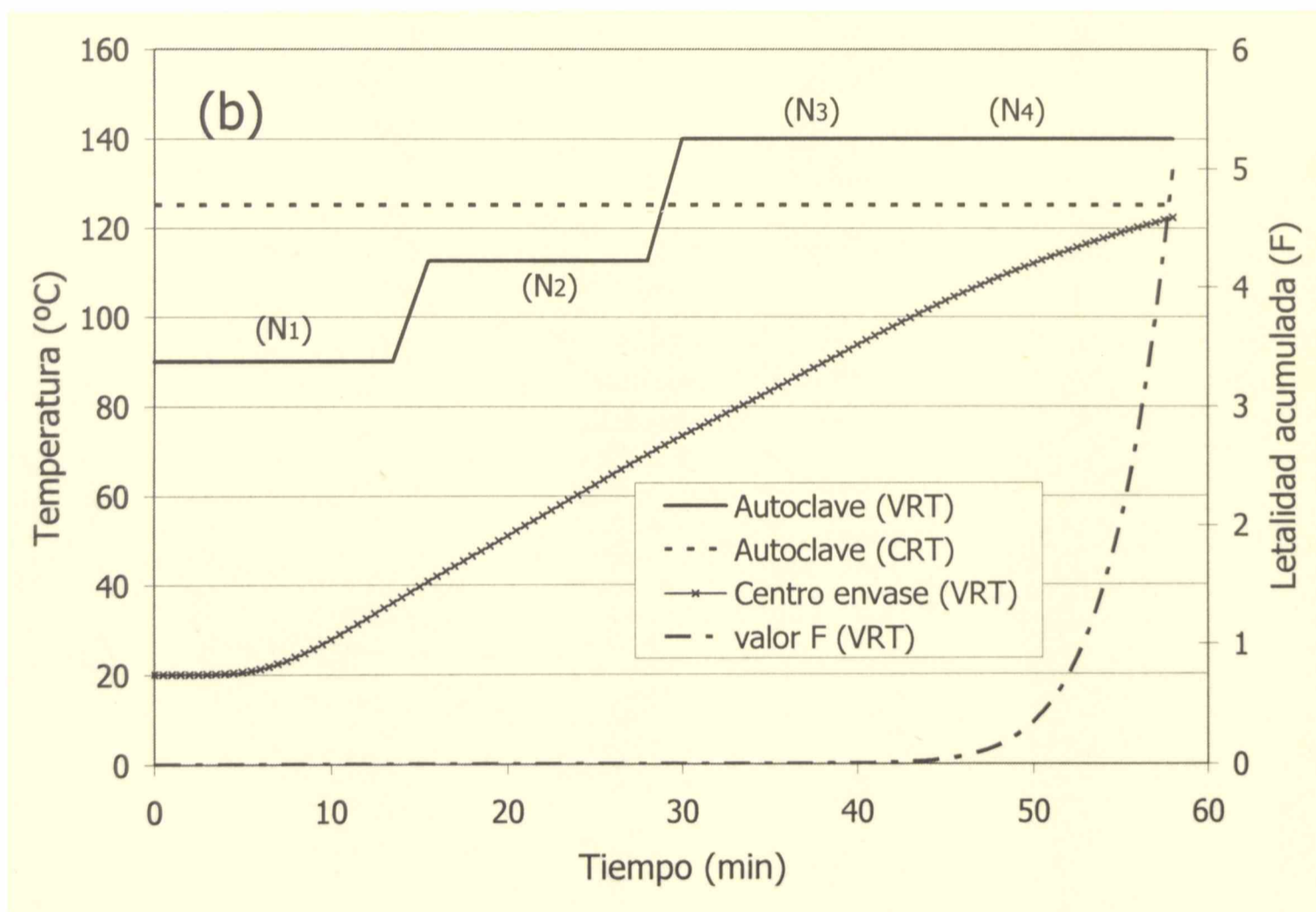
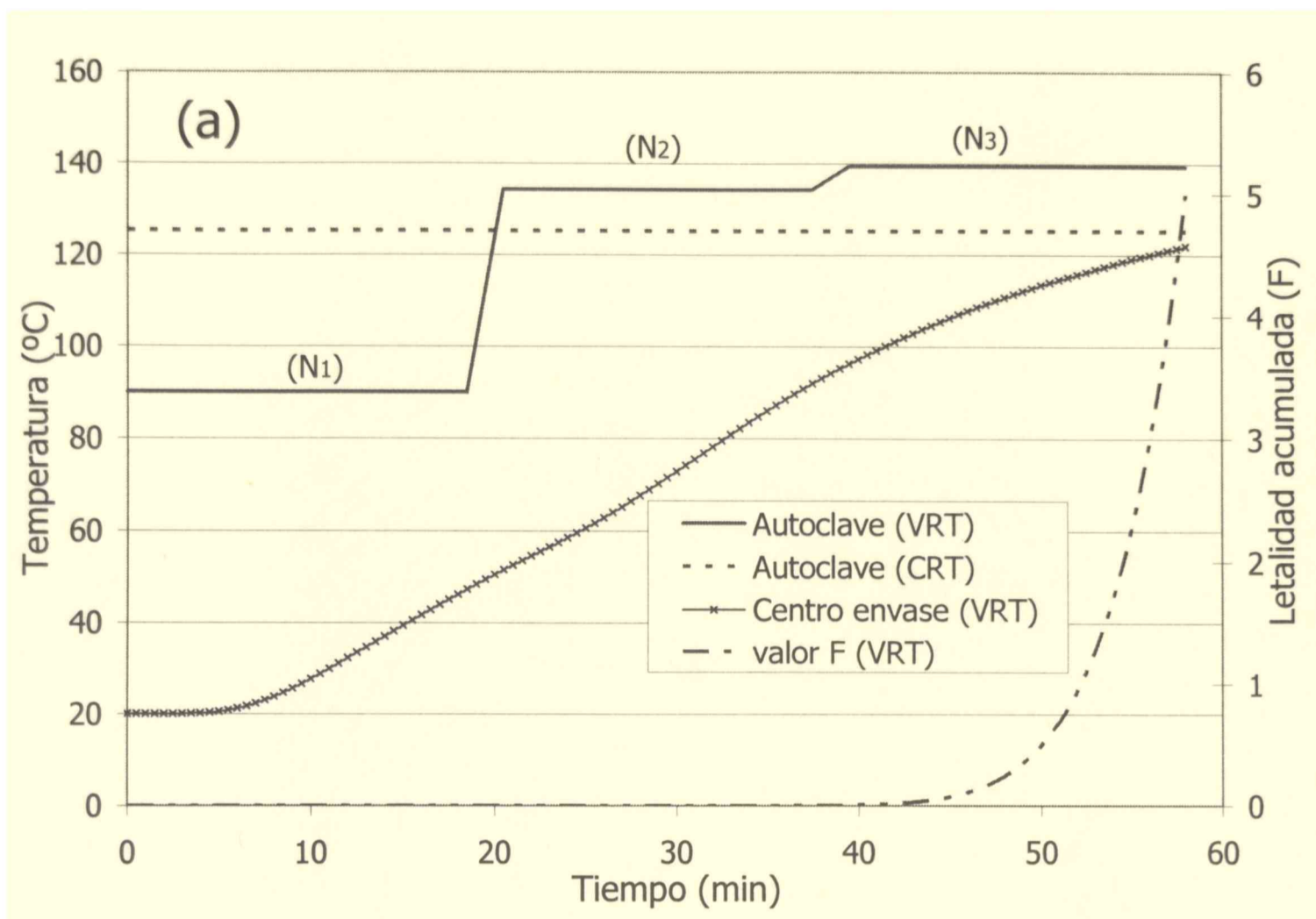


Figura 8.12. Perfiles CRT y VRT óptimos de autoclave y perfil de temperatura y letalidad acumulada del centro térmico bajo condiciones de procesamiento variable; (a) 3 escalones; (b) 4 escalones.

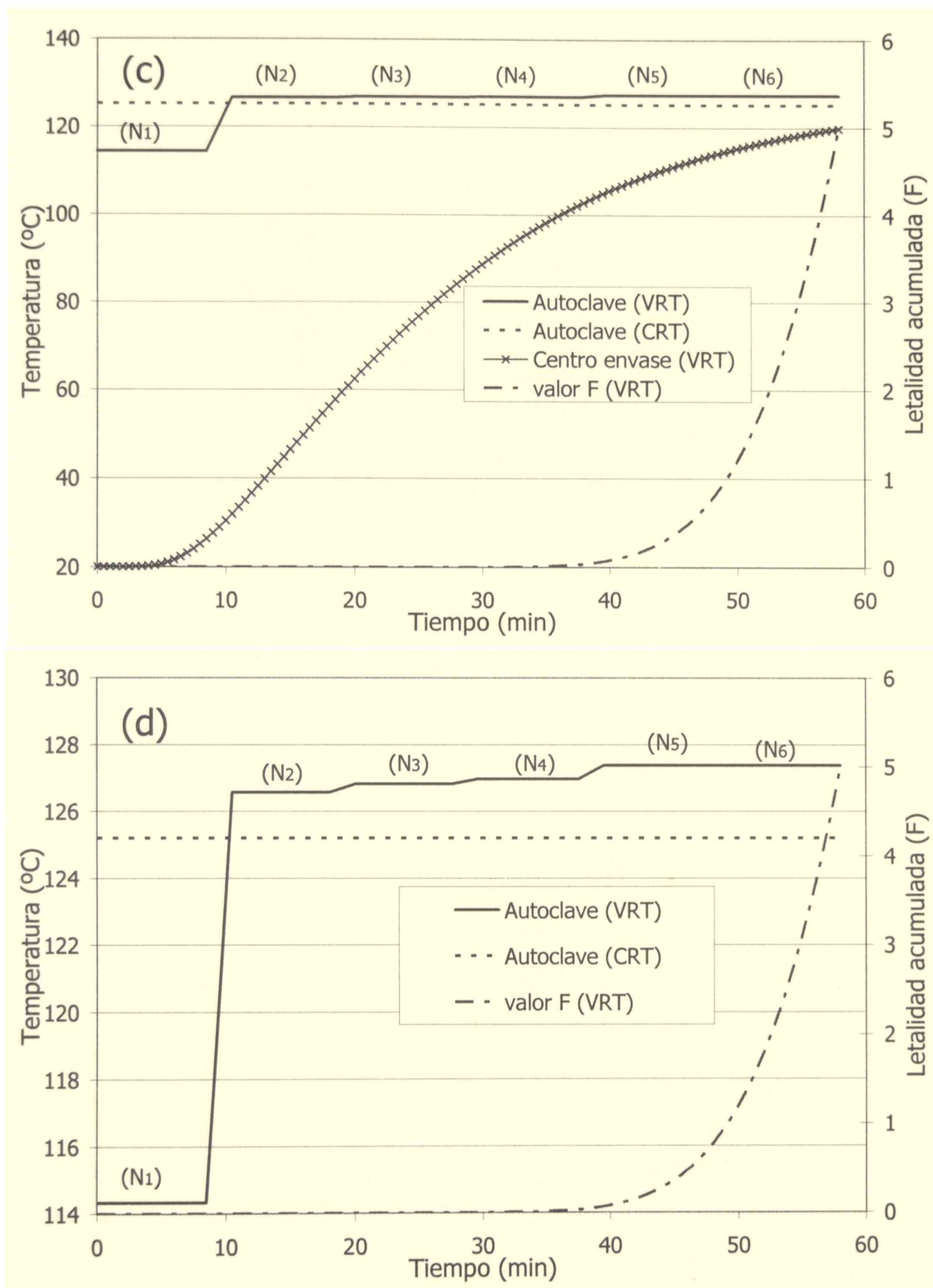


Figura 8.12 (continuación). Perfiles CRT y VRT óptimos de autoclave y perfil de temperatura y letalidad acumulada del centro térmico bajo condiciones de procesamiento variable; (c) 6 escalones (d) ídem inciso (c) a escala ampliada.

Tabla 8.4. Resultados de la optimización de retención global de tiamina bajo procesamiento VRT

Tamaño envase	Número de escalones	Temperatura de autoclave en cada escalón (°C)	Tiempo total de proceso (min)	Retención tiamina (%)		F (min)
				Global	Mejora respecto CRT óptimo	
E ₁	3	N ₁ = 90.00	58	36.53	0%	4.9996
		N ₂ =134.27				
		N ₃ =139.39				
	4	N ₁ = 90.02	58	36.59	0.16%	5.0001
		N ₂ =112.63				
		N ₃ =139.99				
6	N ₄ =139.99	58	37.20	1.83%	5.0002	
	N ₁ =114.33					
	N ₂ =126.57					
E ₂	3	N ₃ =126.82	30	54.20	0%	5.0001
		N ₄ =126.96				
		N ₅ =127.37				
	4	N ₆ =127.37	30	54.89	1.27%	5.0019
		N ₁ = 97.59				
		N ₂ =131.91				
6	N ₃ =134.71	30	55.42	2.25%	4.9992	
	N ₁ = 90.09					
	N ₂ =116.56					
6	N ₃ =139.33	30	55.42	2.25%	4.9992	
	N ₄ =139.77					
	N ₁ = 90.17					
6	N ₂ =113.18	30	55.42	2.25%	4.9992	
	N ₃ =125.27					
	N ₄ =135.86					
6	N ₅ =137.43	30	55.42	2.25%	4.9992	
	N ₆ =137.43					
	N ₁ = 90.17					

Puede observarse asimismo que a medida que aumenta el número de escalones considerados, se logra una mejora en la retención global de nutriente, pero a costa de un aumento en el tiempo computacional requerido ya que aumenta el número de parámetros a optimizar. Otro aspecto que vale la pena destacar es que las temperaturas de dos o más etapas son prácticamente iguales cuando la secuencia VRT considera cuatro o seis escalones.

Los resultados obtenidos concuerdan con la tendencia informada por Teixeira y col. (1975) que indica un aumento en la retención global de nutrientes con la disminución del tamaño de envase.

Rampas sucesivas

Dado que el perfil de escalones sucesivos incluye cambios de temperaturas muy abruptos en muy cortos tiempos, lo que lo hace bastante difícil de reproducir en un autoclave comercial, se procedió a describir el perfil VRT como una sucesión de rampas cada una de ellas a intervalos equidistantes de tiempo a lo largo del tiempo total de proceso (descritos en la sección 7.1.1.2.1.2).

Las variables de control para la optimización fueron las temperaturas extremas de cada una de las rampas. Los límites de dichas variables de control son: $90^{\circ}C < T_i < 140^{\circ}C$.

Se pretende que la temperatura de proceso aumente a lo largo del tiempo por lo que se incluye como restricción adicional: $T_{i+3} \geq T_{i+2} \geq T_{i+1} \geq T_i$.

En la tabla 8.5 se muestran, para el caso del procesamiento del envase E₁, las temperaturas extremas de las rampas (T_i) para el caso particular de dos perfiles de autoclave de este tipo (formados por 3 y 5 rampas, respectivamente), los valores óptimos obtenidos de retención global de tiamina y el porcentaje de mejora con respecto al proceso CRT óptimo correspondiente.

Las figuras 8.13 (a) y (b) muestran estos perfiles de autoclave así como también el correspondiente perfil de temperatura y letalidad acumulada para el centro del envase anteriormente mencionado.

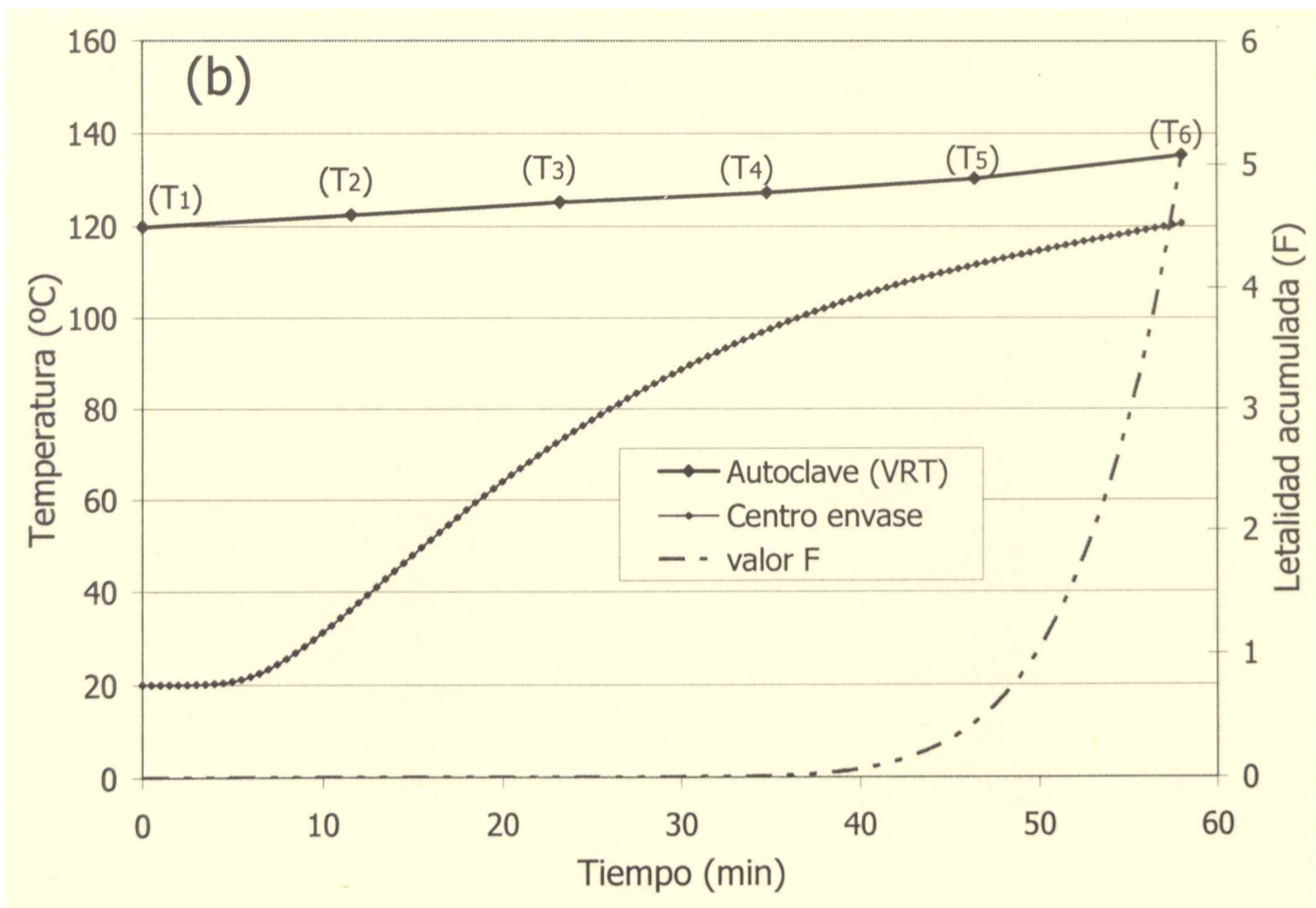
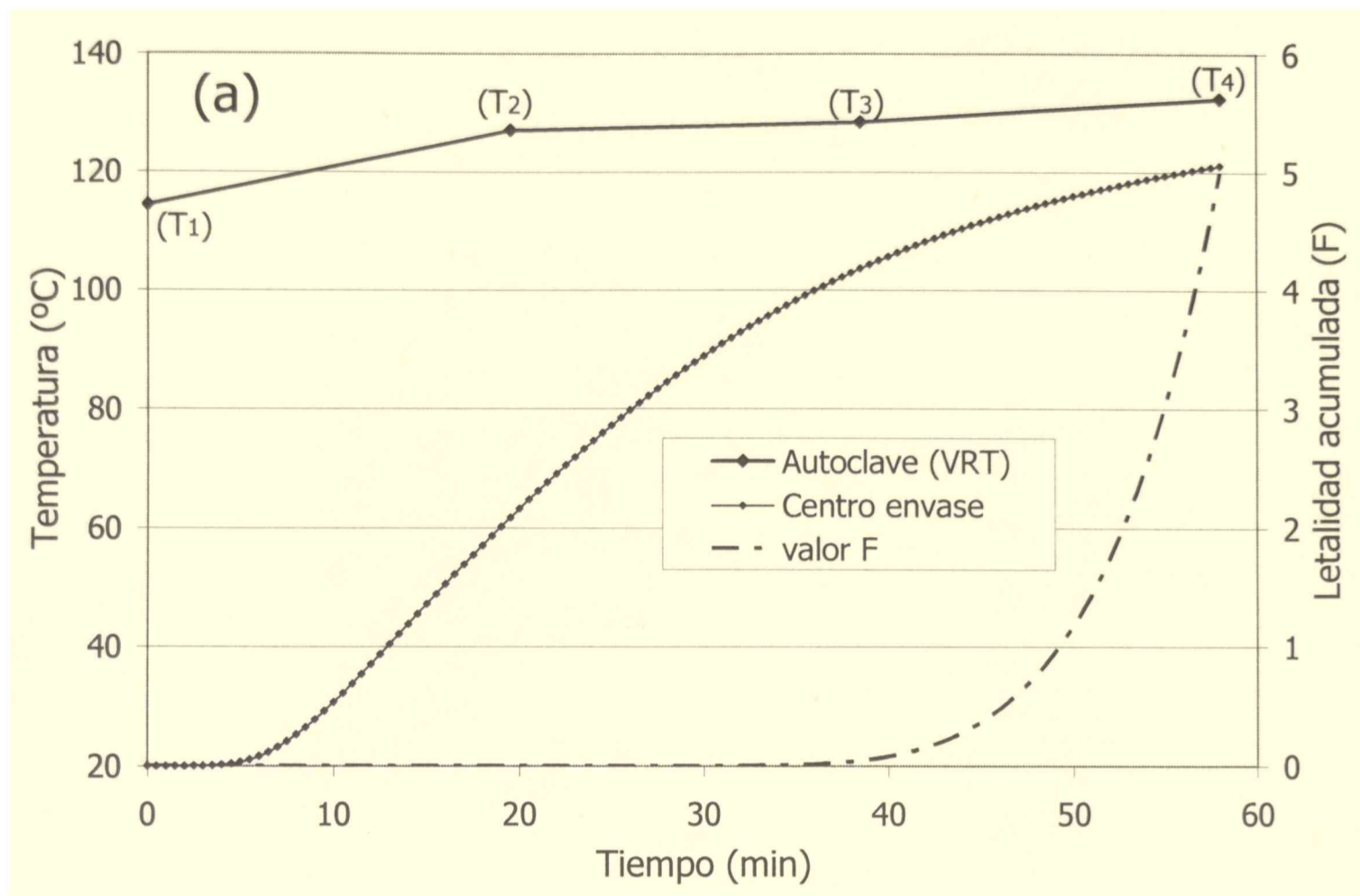


Figura 8.13. Perfil de autoclave tipo rampa que optimiza la retención global de tiamina junto a su correspondiente perfil de temperatura y letalidad acumulada del centro térmico del envase E_1 ; (a) $R=3$; (b) $R=5$

Función exponencial

Por último se procedió a evaluar otro tipo de subida de autoclave que fuera todavía más compatible con la realidad. Se optó por un perfil de autoclave lineal hasta una temperatura de venteo de 108°C seguida por un perfil exponencial en el que se buscaron los parámetros A_1 y k de la ec. (7.24) de manera de optimizar la retención global de tiamina en el envase. Los límites de la variable de control se tomaron como: $10 < A_1 < 40$ y $0.03 < k < 0.2$.

La figura 8.14 muestra el perfil exponencial óptimo junto con el correspondiente perfil de temperatura y letalidad acumulada del punto crítico para el caso del envase E_1 . En la tabla 8.5 se detallan los resultados de la optimización obtenidos para dicho envase.

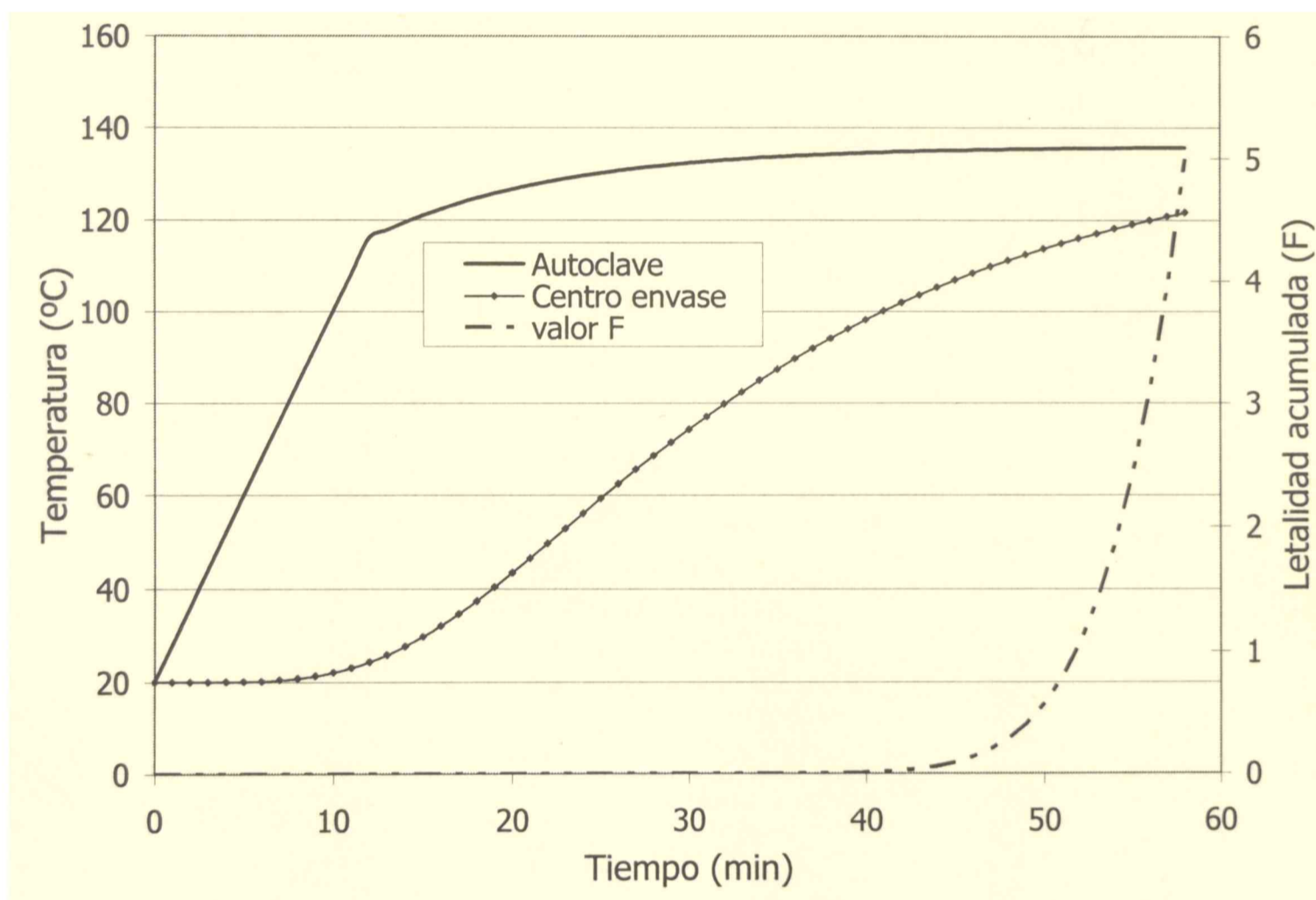


Figura 8.14. Perfil de autoclave exponencial junto a su correspondiente perfil de temperatura y letalidad acumulada del punto crítico para el envase E_1 .

Como puede verse, el procesamiento VRT, cuando la función objetivo es la retención global de tiamina, no proporciona demasiados beneficios lográndose como mucho una mejora en la retención global de un 2.655 % correspondiente a un perfil exponencial de

subida de autoclave. En este sentido, trabajos previos informan resultados del mismo orden: Banga y col. (1991) obtuvieron resultados similares en la retención global de tiamina (5 % de aumento en el procesamiento de paté de carne de cerdo y 4.4 % considerando puré de arvejas); Durance y col. (1997) reportan una mejora de 2% en la retención superficial de tiamina en salmón; Simpson y col. (2008), utilizando un método de optimización global y considerando cinco escalones sucesivos, obtienen un incremento sólo del 2% en la retención global de tiamina en paté de carne de cerdo.

Tabla 8.5. Resultados de la optimización de retención global de tiamina bajo procesamiento VRT para el envase de dimensiones E_1

Tipo de subida	Variables de control	Tiempo total de proceso (min)	Retención global tiamina (%)	Mejora respecto proceso CRT óptimo	F (min)
Rampas sucesivas R=3	$T_1=114.39$	58	36.59	0.16%	5.0001
	$T_2=127.07$				
	$T_3=128.48$				
	$T_4=132.42$				
Rampas sucesivas R=5	$T_1=119.78$	58	36.70	0.46%	5.0585
	$T_2=122.40$				
	$T_3=125.10$				
	$T_4=127.19$				
	$T_5=130.22$				
	$T_6=135.30$				
Lineal+ exponencial	$A_1=19.979$ $K= 0.0954$	58	37.50	2.655%	4.9998

8.1.2.2. Retención superficial de tiamina

Se detallan en la tabla 8.6 los resultados de la optimización de la retención superficial de tiamina obtenidos para los dos tamaños de envases estudiados bajo condiciones de procesamiento CRT (sección 8.1.1.2).

Tabla 8.6. Resultados de la optimización de retención superficial de tiamina bajo procesamiento CRT

Tamaño envase	Temperatura óptima de procesamiento (CRT)	Tiempo de proceso (min)	Retención tiamina (%)		F (min)
			Global	Superficial*	
E₁ R=0.03 m; H=0.1 m	121.19°C	72	33.42	19.48	5.0004
E₂ R= 0.025 m; H=0.04 m	121.98°C	35	54.28	41.90	4.9999

* Valores óptimos de retención superficial de tiamina

El problema de optimización de la retención superficial de tiamina bajo procesamiento a temperatura variable (VRT), se resuelve a partir de las ecs. (7.14, lado derecho) a (7.19).

La resolución de este problema, se realiza de la misma forma que en la sección anterior (8.1.2.1).

Escalones sucesivos

Para el caso particular del envase E₁, manteniendo el tiempo final de proceso en 72 minutos, se procedió al igual que antes a describir el perfil VRT como una función discreta de escalones sucesivos. En este caso particular, se tomaron como límites de la variable de control: $80^{\circ}C < N_i < 140^{\circ}C$.

Como puede observarse, se tomó como límite inferior 80°C (menor al de la sección anterior) ya que como lo que se pretende es optimizar la tiamina en superficie, es lógico pensar que temperaturas inferiores permitirán obtener mejores resultados. Nuevamente se impone la restricción: $N_{i+3} \geq N_{i+2} \geq N_{i+1} \geq N_i$.

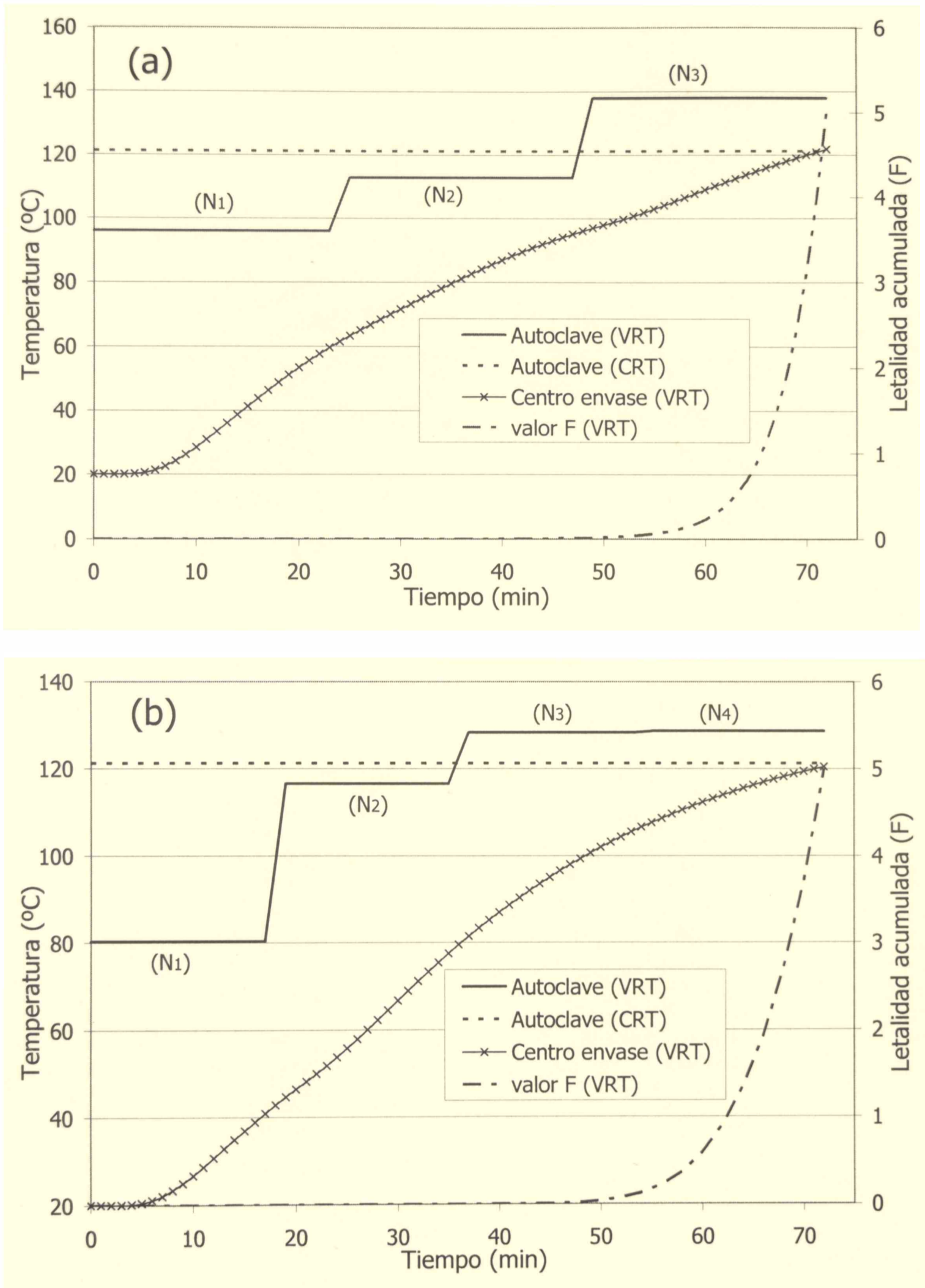


Figura 8.15. Perfiles óptimos de autoclave (CRT y VRT) junto al perfil de temperatura y letalidad acumulada del centro térmico bajo condiciones de procesamiento variable; (a) 3 escalones; (b) 4 escalones

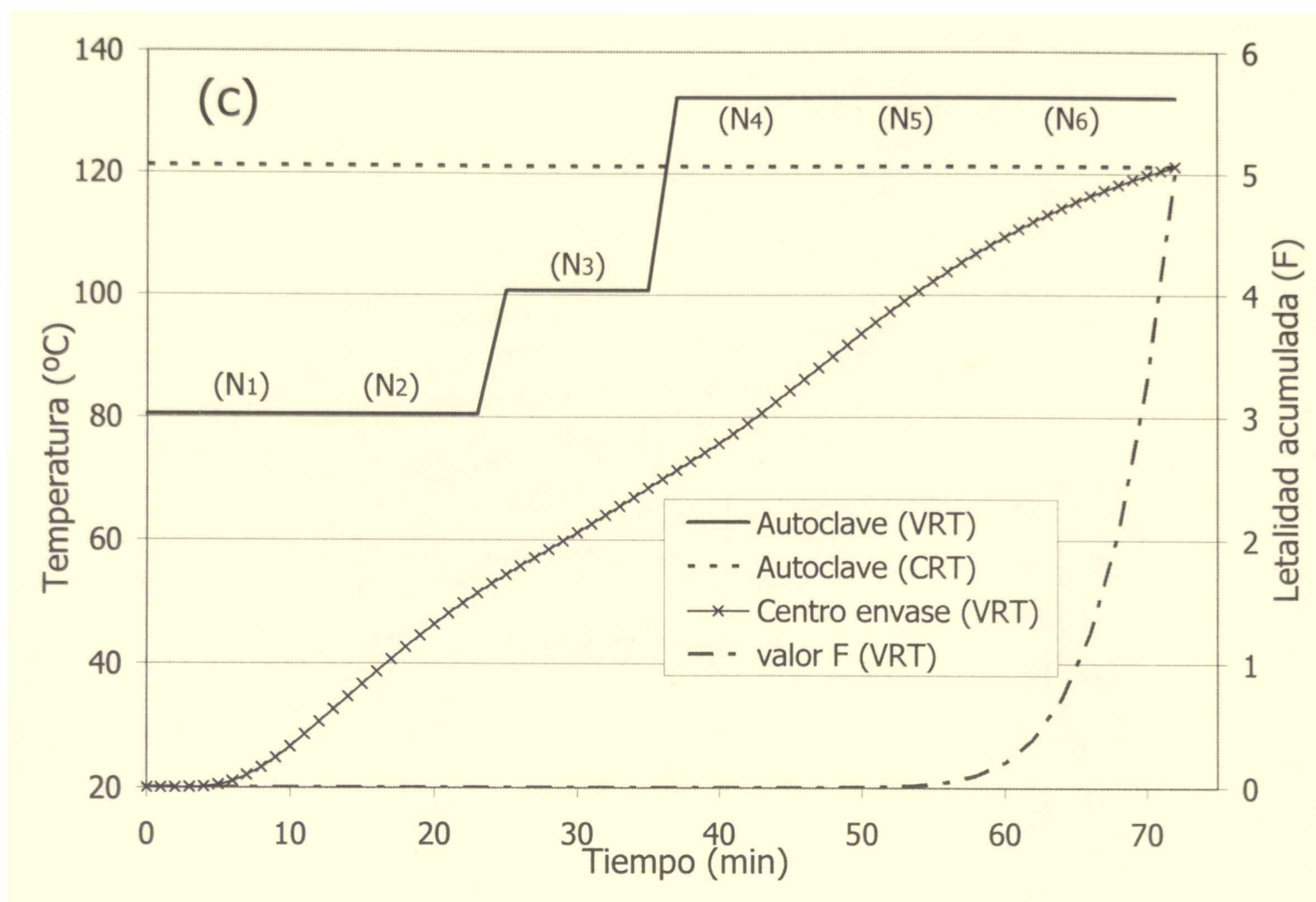


Figura 8.15 (continuación) . Perfiles óptimos de autoclave (CRT y VRT) junto al perfil de temperatura y letalidad acumulada del centro térmico bajo condiciones de procesamiento variable; (c) 6 escalones

En las figuras 8.15 ((a), (b) y (c)) se muestran los perfiles CRT y VRT (tipo escalones sucesivos) óptimos para el envase de dimensiones E_1 , así como también el correspondiente perfil de temperatura y valor de letalidad acumulada del centro térmico obtenido durante el procesamiento VRT.

Se detallan en la tabla 8.7 los resultados de la optimización para los dos tamaños de envases considerados. Se muestran en esta tabla, las características del proceso VRT óptimo, los valores óptimos de retención superficial obtenidos y el porcentaje de mejora con respecto al proceso CRT óptimo correspondiente.

Al igual que lo observado en la optimización global de tiamina la función VRT óptima tiene dos o tres tramos con temperaturas prácticamente idénticas, por ejemplo el perfil óptimo de seis escalones que se obtiene para el envase E_1 en realidad termina convirtiéndose en un perfil de tres escalones, de distinta duración.

Tabla 8.7. Resultados de la optimización de retención superficial de tiamina bajo procesamiento VRT

Tamaño envase	Número de escalones	Temperatura de autoclave en cada escalón (°C)	Tiempo total de proceso (min)	Retención tiamina (%)		F (min)
				Superf.	Mejora respecto CRT óptimo	
E ₁	3	N ₁ = 96.02	72	19.62	0.71%	4.9999
		N ₂ =112.77				
		N ₃ =137.86				
	4	N ₁ = 80.31	72	21.68	11.29%	4.9997
		N ₂ =116.53				
		N ₃ =128.31				
6	N ₄ =128.61	72	23.30	19.61%	4.9989	
	N ₁ = 80.43					
	N ₂ = 80.43					
E ₂	3	N ₃ =100.69	35	42.06	0.38%	5.0001
		N ₄ =132.48				
		N ₅ =132.48				
	4	N ₆ =132.48	35	46.97	12.10%	4.9999
		N ₁ = 86.06				
		N ₂ =115.37				
6	N ₃ =138.52	35	46.98	12.12%	5.0022	
	N ₁ = 80.70					
	N ₂ =113.69					
		N ₃ =129.63				
		N ₄ =129.63				
		N ₁ = 80.03				
		N ₂ = 90.44				
		N ₃ = 99.62				
		N ₄ =130.66				
		N ₅ =134.28				
		N ₆ =134.28				

Rampas sucesivas

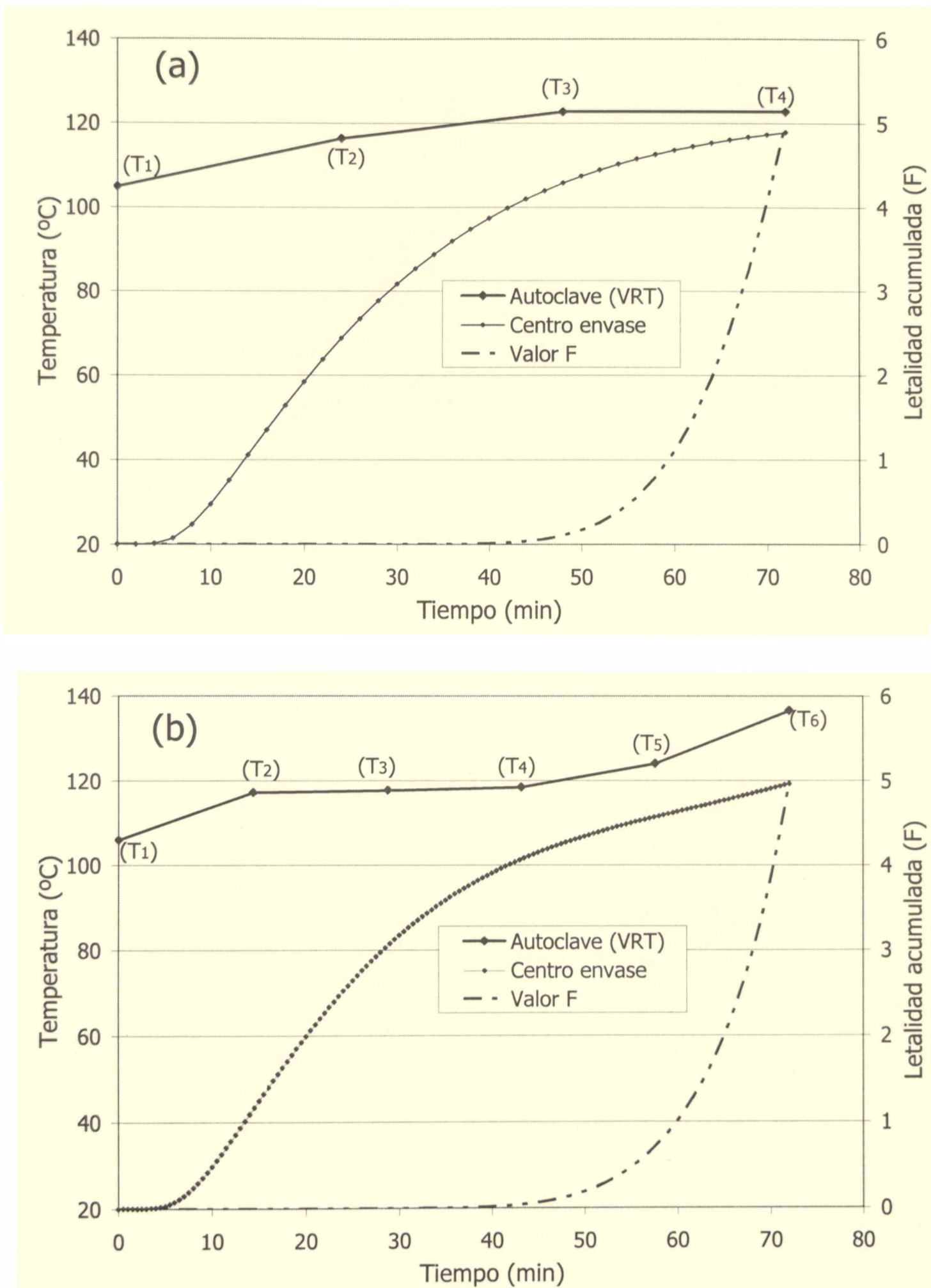


Figura 8.16. Perfil de autoclave tipo rampa que optimiza la retención superficial de tiamina junto a su correspondiente perfil de temperatura y valor de letalidad acumulada del centro térmico del envase E_1 ; (a) $R=3$; (b) $R=5$

Se muestra en las figuras 8.16 (a) y (b) los perfiles de autoclave tipo rampas sucesivas que optimizan la retención superficial de tiamina así como también el correspondiente perfil de temperatura y valor de letalidad acumulada del centro térmico del envase E_1

En la tabla 8.8 se detallan los parámetros optimizados así como también el valor óptimo de tiamina superficial y el porcentaje de mejora con respecto al valor óptimo obtenido bajo procesamiento CRT de dicho envase.

Función exponencial

Por ultimo, en la figura 8.17 se muestra el perfil óptimo de subida de autoclave de tipo exponencial así como también el correspondiente perfil de temperatura y valor de letalidad acumulada del punto crítico para el caso del envase E_1 . Se detallan en la tabla 8.8 el valor óptimo de tiamina superficial hallado para este mismo envase. Los límites de la variable de control se tomaron igual que en la sección 8.1.2.1.

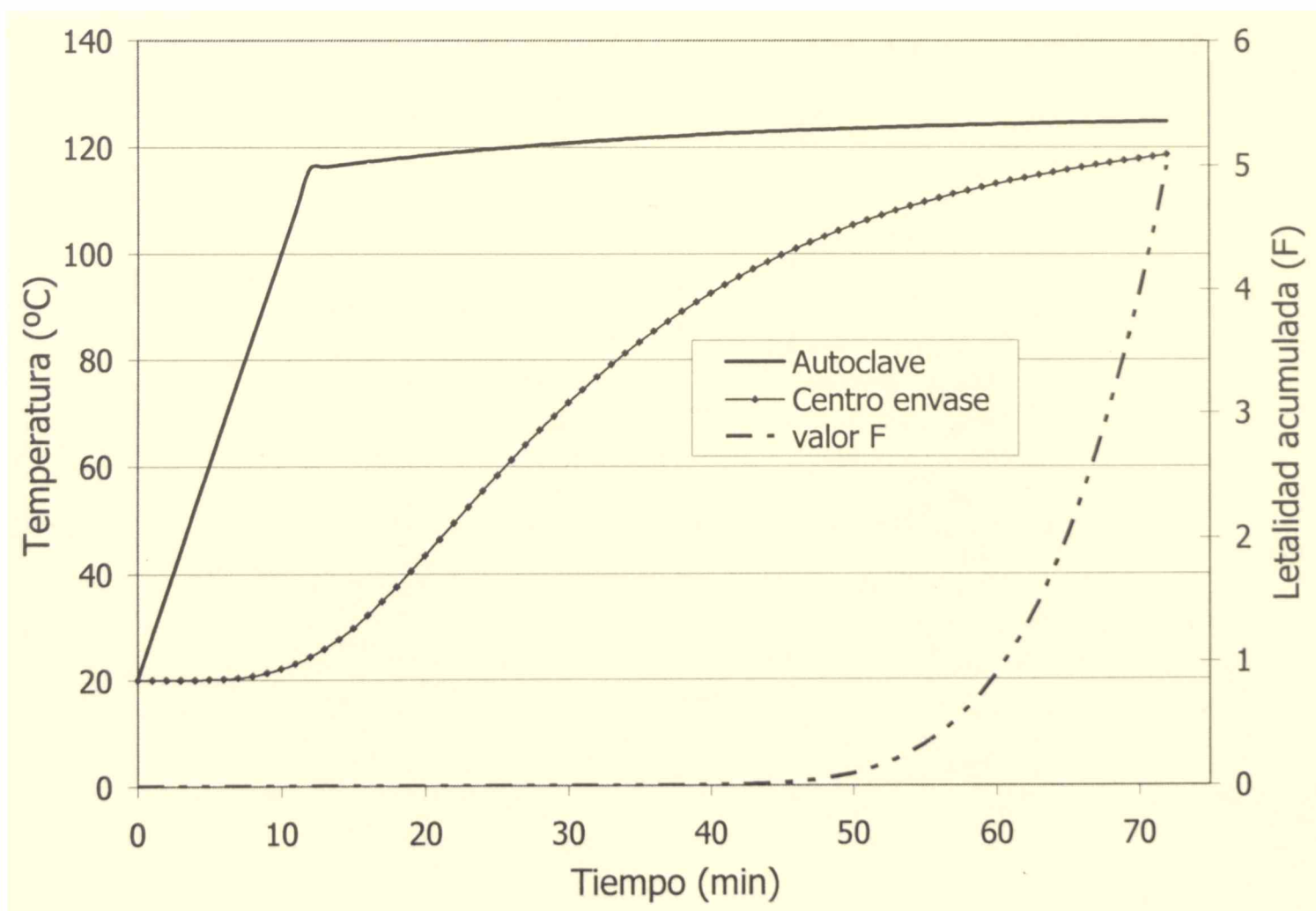


Figura 8.17. Perfil de autoclave exponencial junto a su correspondiente perfil de temperatura y valor de letalidad acumulada del punto crítico para el envase E_1 .

Tabla 8.8. Resultados de la optimización de retención superficial de tiamina bajo procesamiento VRT para el envase de dimensiones E₁

Tipo de subida	VARIABLES DE CONTROL	Tiempo total de proceso (min)	Retención superficial tiamina (%)	Mejora respecto proceso CRT óptimo	F (min)
Rampas sucesivas R=3	T ₁ =104.91 T ₂ =116.38 T ₃ =122.72 T ₄ =122.72	72	22.13	13.60%	4.9993
Rampas sucesivas R=5	T ₁ =105.93 T ₂ =117.22 T ₃ =117.74 T ₄ =118.47 T ₅ =124.05 T ₆ =136.57	72	23.65	21.41%	4.9999
Lineal+ exponencial	A ₁ = 10 K= 0.037	72	21.02	7.91%	4.9998

Analizando los resultados detallados en las tablas 8.7 y 8.8, podemos afirmar que a diferencia de lo que ocurría en la optimización del contenido global de tiamina, se obtiene una notable mejora en la retención superficial utilizando perfiles VRT. El incremento en la retención de nutrientes alcanza hasta un 21.41% utilizando temperatura variable de autoclave. Resultados similares son reportados en trabajos previos: Banga y col. (1991) obtuvieron resultados similares en la retención de tiamina en superficie (20% de aumento en el procesamiento de paté de carne de cerdo). Durance y col. (1997) reportan una disminución del 18% en el valor de cocción superficial utilizando la apariencia del salmón ($z=23^{\circ}\text{C}$) como factor de calidad superficial. Noronha y col (1996) obtienen un 22% de reducción en el valor de cocción superficial utilizando la apariencia como factor de calidad superficial para la optimización del procesamiento térmico de porotos en envases de vidrio.

8.1.2.3. Tiempo de proceso

Como mencionamos previamente, encontrar un óptimo depende fundamentalmente del criterio utilizado en la función objetivo. En este trabajo de tesis, además de optimizar en función de un criterio de calidad se completó el estudio buscando minimizar el costo energético expresado mediante la variable tiempo de proceso.

En consecuencia, se resuelve el problema de optimización planteado en las ecs. (7.20) a (7.23).

Dicha resolución implica, en primera instancia, establecer como restricción que el valor de retención (global o superficial) debe ser mayor o igual al valor óptimo obtenido bajo procesamiento CRT de manera de poder comparar la ventaja del procesamiento VRT sobre el procesamiento CRT. El objetivo es demostrar que bajo procesamiento VRT, se puede lograr el mismo (o mayor) porcentaje de retención que para el caso del procesamiento CRT óptimo pero con un tiempo menor de procesamiento.

Se analizará la situación para el caso particular del envase E_1 ($R=0.03$ m y $H=0.1$ m). Similares resultados pueden obtenerse para cualquier otro tamaño de envase.

Los resultados de la optimización obtenidos para este tamaño de envase bajo condiciones de procesamiento CRT fueron detallados en las tablas 8.3 y 8.6.

Dado que los perfiles de subida de tipo exponencial y rampas sucesivas son los perfiles más fácilmente reproducibles en cualquier autoclave, se decide mostrar los resultados de la optimización del tiempo de proceso cuando el comportamiento de subida del autoclave sigue este tipo de perfiles.

Se muestran en la figuras 8.18 ((a) y (b)), los perfiles óptimos de subida de autoclave de tipo rampas sucesivas (a) (utilizando un total de 8 rampas) y de tipo exponencial (b) así como también el correspondiente perfil de temperatura y letalidad acumulada del punto crítico para el caso del envase E_1 . En ambos casos se fijó como restricción el valor de letalidad acumulada en el centro del envase y que el valor de retención superficial de tiamina fuera mayor o igual al obtenido bajo la condición óptima de procesamiento CRT.

Para el primer perfil se tomó como límites de las variables de control $80^{\circ}\text{C} < T_i < 140^{\circ}\text{C}$. Para el segundo, los límites de las variables de control se tomaron como: $10 < A_1 < 40$ y $0.03 < k < 0.2$.

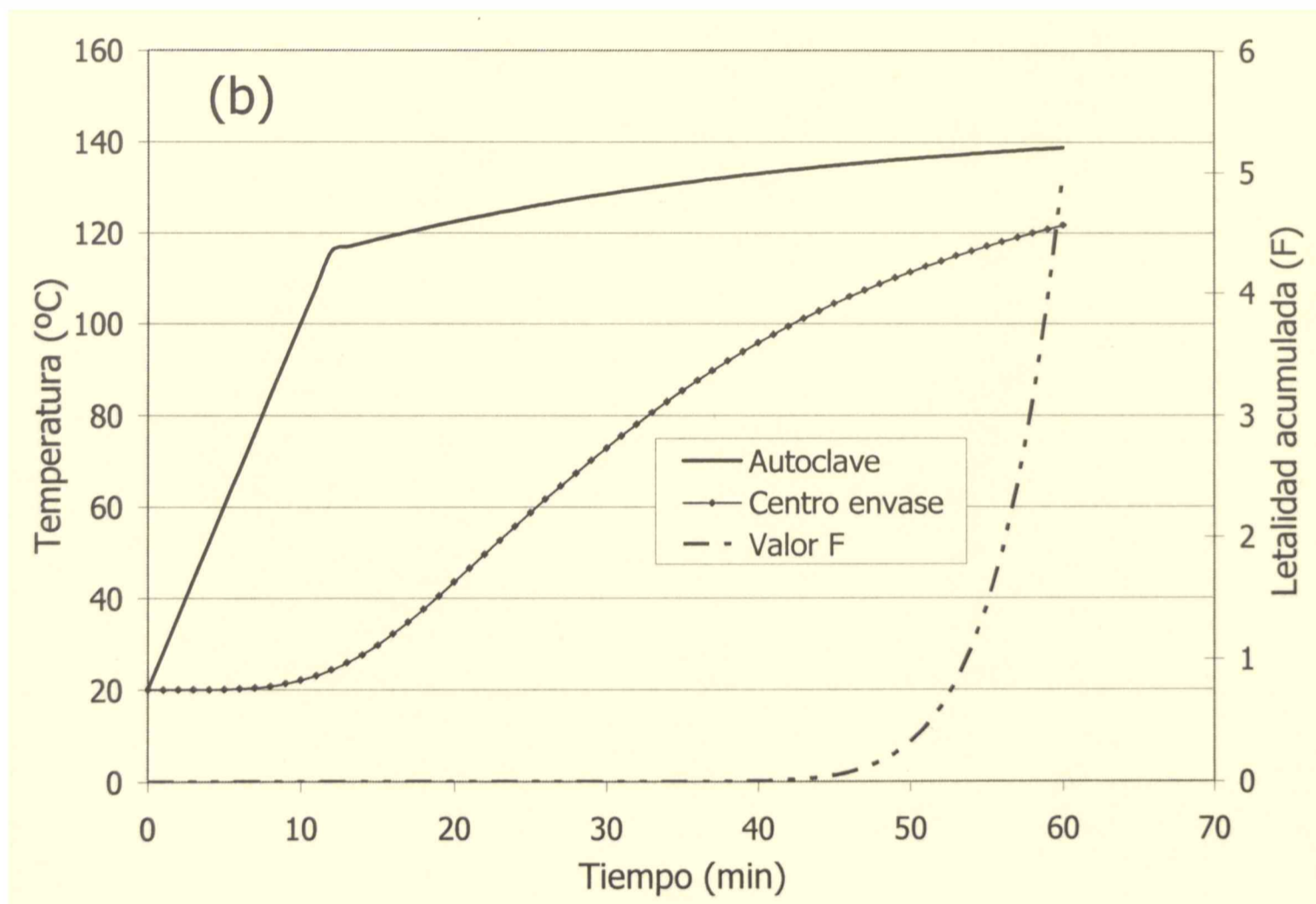
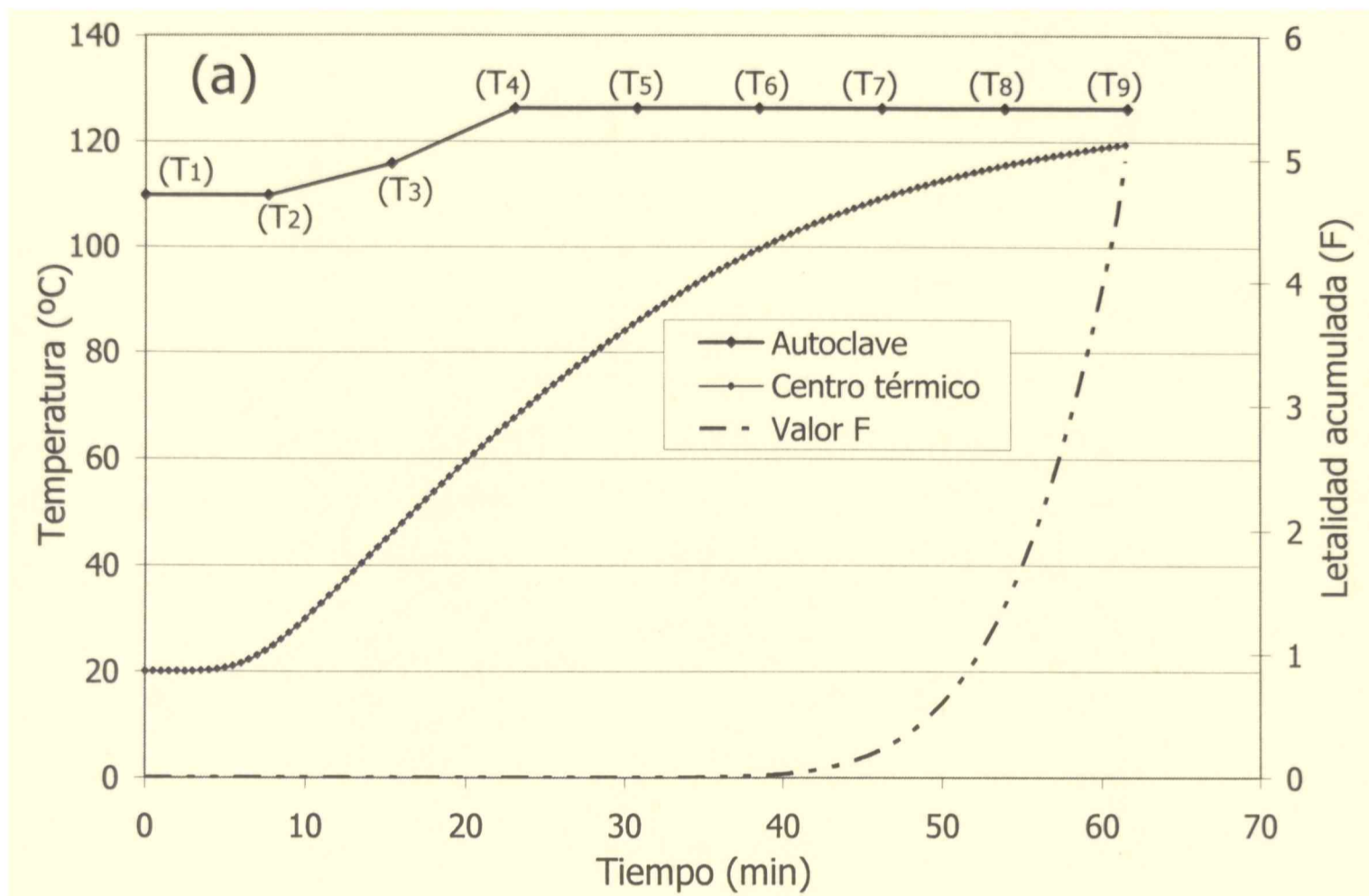


Figura 8.18. Perfil de autoclave junto a su correspondiente perfil de temperatura y valor de letalidad acumulada del punto crítico del envase E_1 ; (a) perfil de autoclave tipo rampas sucesivas ($R=8$); (b) perfil de autoclave tipo exponencial

Tal como se observa en la figura 8.18 (a) el uso de un número elevado de rampas no introduce mejoras sustanciales, ya que el óptimo termina siendo un perfil de tres rampas y un valor final constante.

En este punto es importante aclarar que si bien se obtuvieron resultados para el caso en el que se toma como restricción la retención global de tiamina (lado izquierdo de la ec. (7.23)), estos resultados no se muestran en el presente trabajo de tesis ya que no se obtienen beneficios al utilizar la retención global del nutriente como restricción. Estos resultados concuerdan con lo hallado sobre el tema en la literatura y en parte con los resultados obtenidos en la sección 8.1.2.1.

Se detallan en la tabla 8.9 los valores de retención de tiamina obtenidos (global y superficial) así como también el tiempo final de proceso logrado con cada uno de los perfiles VRT ensayados. Se compara este tiempo con el obtenido procesando el mismo envase bajo condiciones constantes óptimas de temperatura.

Tabla 8.9. Resultados de la optimización del tiempo final de proceso (con restricciones en la retención superficial de tiamina) para el envase de dimensiones E_1

Variables de control	Tiempo total de proceso CRT (min)	Tiempo total de proceso VRT (min) *	Mejora respecto CRT (%)	Retención global tiamina (%)	Retención superficial tiamina (%)	F (min)
Lineal + exponencial $A_1 = 29.5681$ $K = 0.0308$	72	60.01	19.98	33.82	19.50	4.9994
Rampas sucesivas (R=8) $T_1=109.75$ $T_2=109.75$ $T_3=115.73$ $T_4=126.15$ $T_5=126.15$ $T_6=126.15$ $T_7=126.15$ $T_8=126.15$ $T_9=126.15$	72	61.66	16.77	33.76	20.31	4.9993

* Valores óptimos de tiempo total de proceso

A partir de los resultados presentados en la tabla 8.9, puede verse que se logra el mismo o incluso un porcentaje de retención superficial mayor que para el proceso óptimo a temperatura constante de autoclave y con una reducción en el tiempo total de procesamiento que llega en algunos casos hasta un 20%. En este sentido, trabajos previos informan resultados similares: Durance y col. (1997) reportan una reducción del 15% en el tiempo de procesamiento de salmón envasado utilizando una restricción sobre el valor de la apariencia superficial; Banga y col. (1991) obtuvieron resultados un poco mayores (33 % de disminución del tiempo de procesamiento considerando el procesamiento de paté de carne de cerdo); Noronha y col. (1996) reportan una disminución del 26% en el tiempo de procesamiento para el caso particular de porotos en envases de vidrio.

8.2. Sistemas mixtos

8.2.1. Temperatura de autoclave constante (CRT)

Para el caso de procesamiento de sistemas mixtos a temperatura constante de autoclave, se resuelve el problema de optimización dado por las ecs. (7.25) a (7.27). Se tomará, en este caso, la maximización de la retención superficial de tiamina como función objetivo. La restricción en este problema de optimización es que el valor de letalidad acumulada del proceso (F) en el punto crítico sea mayor o igual a un valor de referencia F_0 . Se fijarán como límites de la variable de control (temperatura de autoclave) los valores $110^{\circ}\text{C} \leq T_{\text{aut}} \leq 140^{\circ}\text{C}$

Como ya se ha mencionado, productos como ostras y mejillones son sensibles al procesamiento por calor y en consecuencia se suelen adoptar valores de F_0 más cercanos al mínimo para este tipo de alimentos, considerando suficiente procesar hasta valores de F_0 de 3 minutos, de manera de no afectar las cualidades organolépticas del producto. Cabe mencionar que si bien éste valor requerido de letalidad es menor al utilizado para sistemas conductivos sigue siendo un valor mayor al que surge de aplicar el concepto de obtener 12 reducciones decimales ($F_0 = 2.52$ min).

Se trabajará con un tamaño determinado de envase (envase S11 de la tabla 4.2) y se hallará la temperatura óptima de proceso para lograr la máxima retención superficial de tiamina. El contenido de salmuera en el envase se fijará en un 50% ($FS = 0.5$), por lo que el punto crítico estará situado sobre el eje axial a una distancia de $0.125 H$ de la base del

envase (figura 5.17). Bajo estas condiciones, en base a nuestra propia experiencia y considerando que el autoclave utilizado es estático, se asume que el 50% del volumen inferior del envase estará ocupado por el colchón de mejillones mientras que la parte superior tendrá solo líquido de cobertura (salmuera). Es por ello que la retención superficial de tiamina se calcula considerando que la pared de la mitad inferior del envase está totalmente en contacto con los mejillones.

A partir de las historias térmicas (sección 7.1.2.3.1) y con la ec. (3.3) que define la letalidad acumulada del proceso se determinan las combinaciones temperatura constante de autoclave - tiempo de proceso que producen la misma letalidad acumulada final. Los resultados se muestran en la figura 8.19, que es la curva de isoletalidad correspondiente al envase de dimensiones S11 y para una temperatura inicial del producto de 20°C. Nuevamente, cada punto de esta curva define una temperatura constante de autoclave y un tiempo de proceso para lograr el valor de letalidad acumulada de 3 minutos.

Además, para cada uno de estos procesos equivalentes, se determinaron los porcentajes de retención superficial obtenidos al final del proceso. Se presenta en la figura 8.20 el resultado en la forma de curvas de optimización.

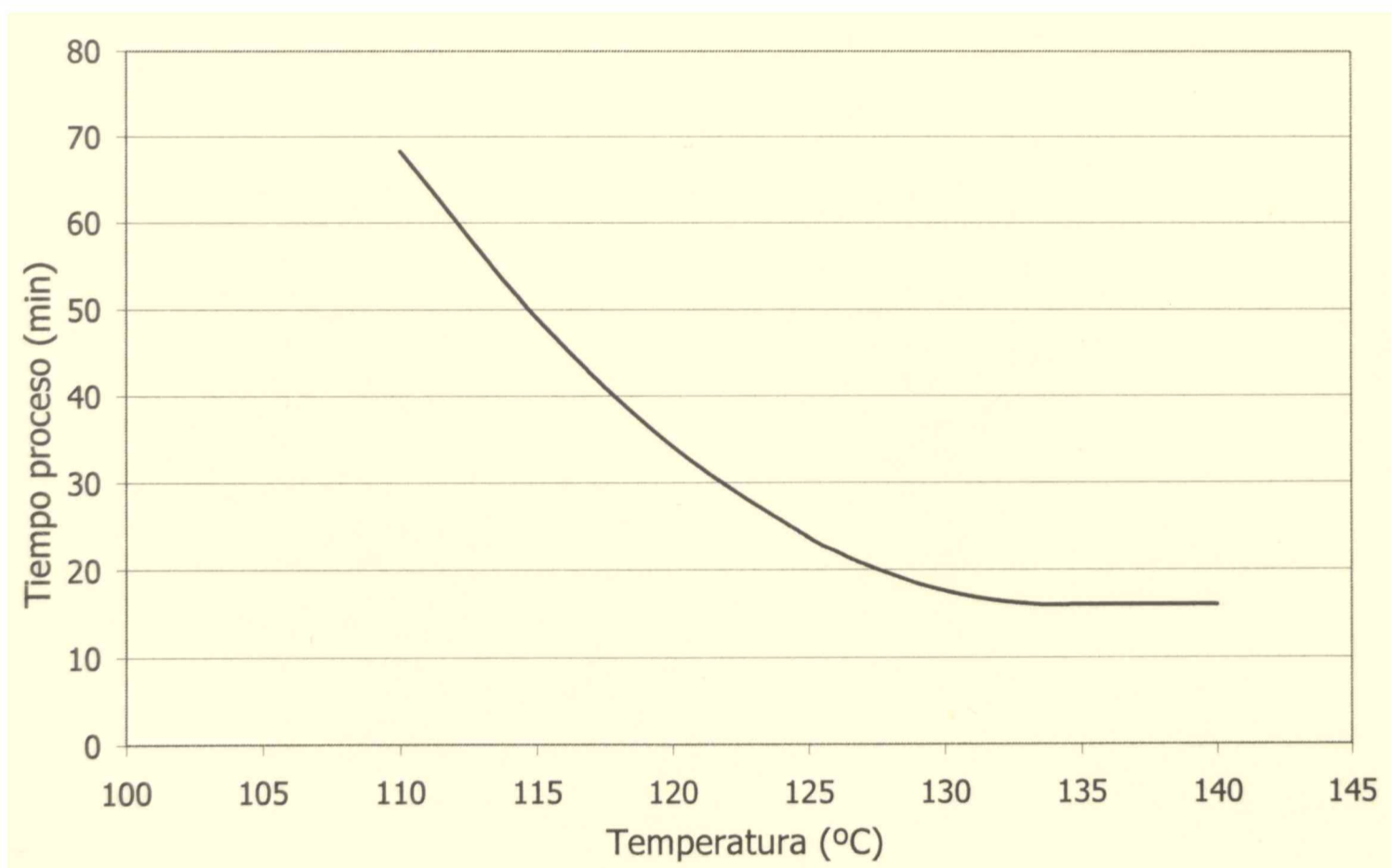


Figura 8.19. Curva de isoletalidad para mejillones en salmuera en envase S11

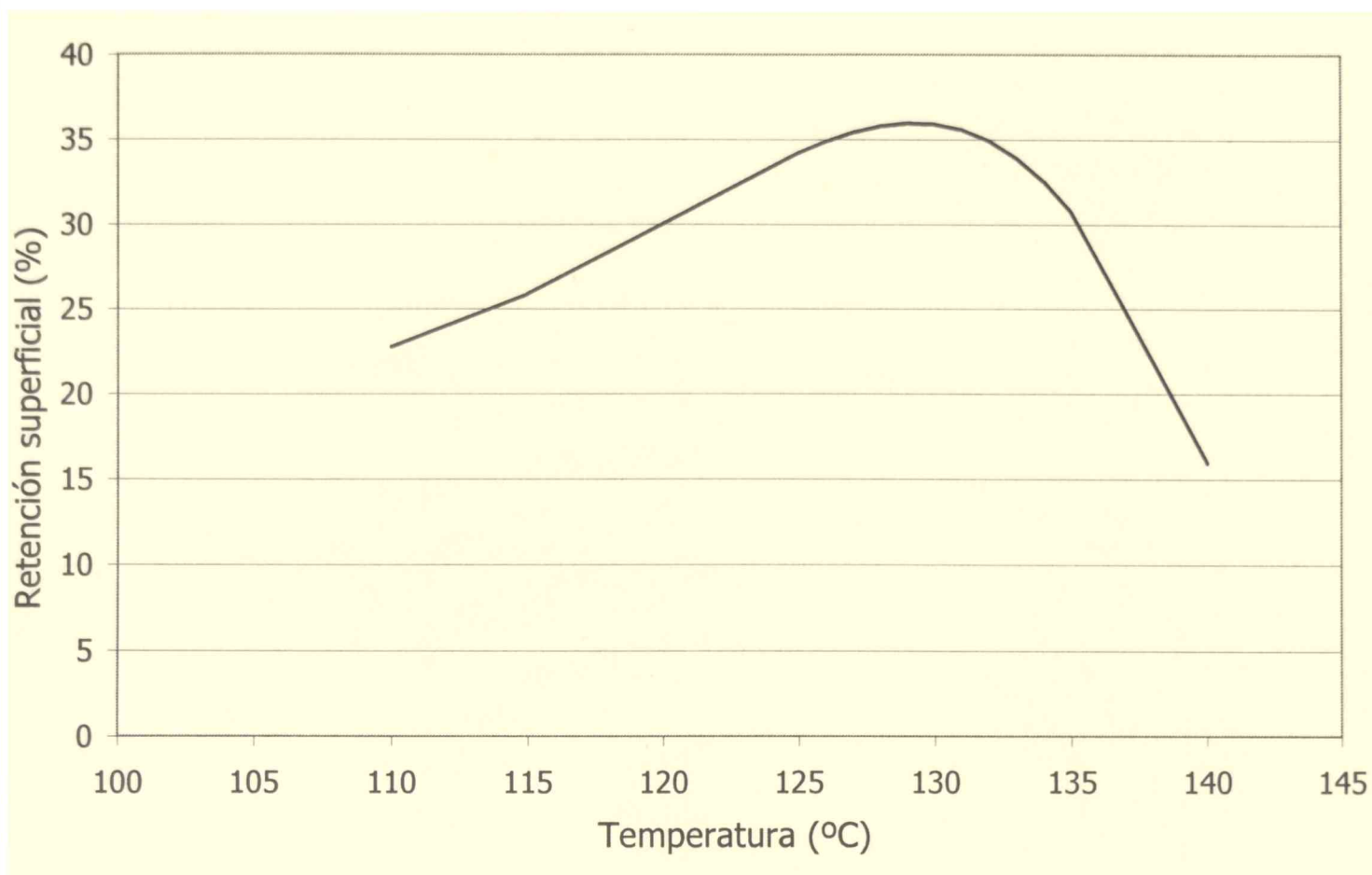


Figura 8.20. Curva de optimización mostrando el porcentaje de retención superficial de tiamina en función de procesos equivalentes de temperatura constante de autoclave, obtenidos de la curva de isoletalidad mostrada en la figura 8.20.

Empleando el esquema de optimización definido en la sección 7.1.2.3.2.1 se calcula la retención óptima de tiamina en superficie y se halla que para este tamaño de envase, se debe procesar a una temperatura constante de autoclave de **129.27°C** durante un tiempo total de proceso de **18.02 minutos**, para lograr una retención máxima en superficie de un **35.99 %**. La misma metodología se realiza para todos los tamaños de envases. Los resultados se muestran en la tabla 8.10.

Puede concluirse de los resultados de la tabla 8.10 que, a diferencia de lo que ocurre en sistemas conductivos (figura 8.9) donde la temperatura óptima oscila entre 120 y 125°C, el óptimo para este tipo de productos se encuentra empleando altas temperaturas (generalmente mayores a 130°C) durante cortos tiempos de proceso, permitiendo de esta forma mantener la calidad superficial de productos tan sensibles como son los mejillones. Estas condiciones de trabajo, sumado a que el valor requerido de letalidad es menor, conducen a valores de retención superficial de nutriente sensiblemente mayores que los correspondientes a sistemas conductivos (figura 8.11).

Tabla 8.10. Resultados de la optimización de retención superficial de tiamina de mejillones en salmuera bajo procesamiento CRT para distintos tamaños de envases

Dimensiones envase (D x H)	Temperatura óptima de proceso CRT (°C)	Tiempo óptimo de procesamiento (min)	Retención superficial óptima (%)
0.073 x 0.113	129.27	18.02	35.99
0.073 x 0.095	129.39	16.12	40.89
0.073 x 0.057	130.94	11.92	62.84
0.073 x 0.040	132.08	5.20	80.70
0.087 x 0.072	130.68	15.20	45.72
0.070 x 0.072	130.92	11.56	63.75
0.065 x 0.072	130.98	8.30	72.32
0.062 x 0.072	131.08	6.99	76.00
0.056 x 0.072	132.22	2.08	91.71
0.050 x 0.072	132.22	1.49	94.01
0.087 x 0.068	130.11	16.38	49.22
0.087 x 0.044	131.31	10.02	60.23

Procediendo de igual manera a lo expuesto en sistemas conductivos, en base a los resultados correspondientes a los doce tamaños de envase empleados en la parte experimental de este trabajo de tesis, se regresiona una ecuación para calcular el porcentaje óptimo de retención superficial de tiamina. Se encuentra que la dependencia del porcentaje de retención de tiamina respecto del diámetro y altura es igual a la encontrada para sistemas conductivos, ec. (8.1). El ajuste de dicha ecuación se realizó mediante la función *lsqcurvefit* en Matlab. Los valores de las constantes m, n, s y x se detallan en la tabla 8.11.

Tabla 8.11. Retención superficial de tiamina: constantes de regresión de la ec. (8.1) para mejillones en salmuera

Constantes				r ²
m	n	s	x	
0.0966	-29.6596	3139.4	2130.4	0.92

Al igual que en el caso anterior, también se regresionaron los tiempos óptimos y las temperaturas óptimas de proceso con las dimensiones de los envases. Los resultados obtenidos se muestran en las figuras que se muestran a continuación, en la forma de superficies de respuesta. La figura 8.21 representa la temperatura constante de autoclave que maximiza la retención superficial de tiamina, en función del tamaño de envase, en la figura 8.22 se muestran los tiempos de procesamiento y en la figura 8.23 el valor de la máxima retención superficial de nutriente, ambos también en función de las dimensiones del envase.

A partir de estas últimas figuras (figs. (8.21), (8.22) y (8.23)), es posible entonces determinar para un dado tamaño de envase las condiciones óptimas de procesamiento representadas por la temperatura y el tiempo de operación que maximizan la retención superficial de tiamina en envases conteniendo mejillones en salmuera en una proporción 50% P/P y que verifica el valor de letalidad fijado para este tipo de conservas ($F_0=3$ minutos).

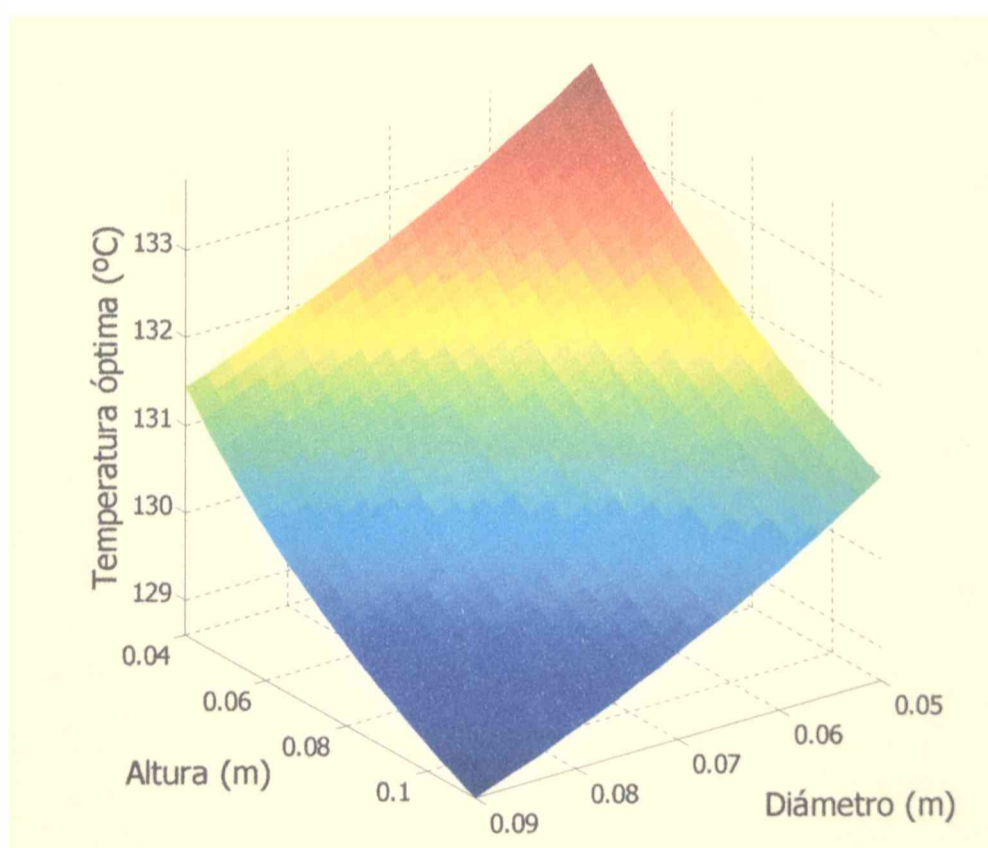


Figura 8.21. Temperatura óptima de proceso CRT en función de las dimensiones de los envases.

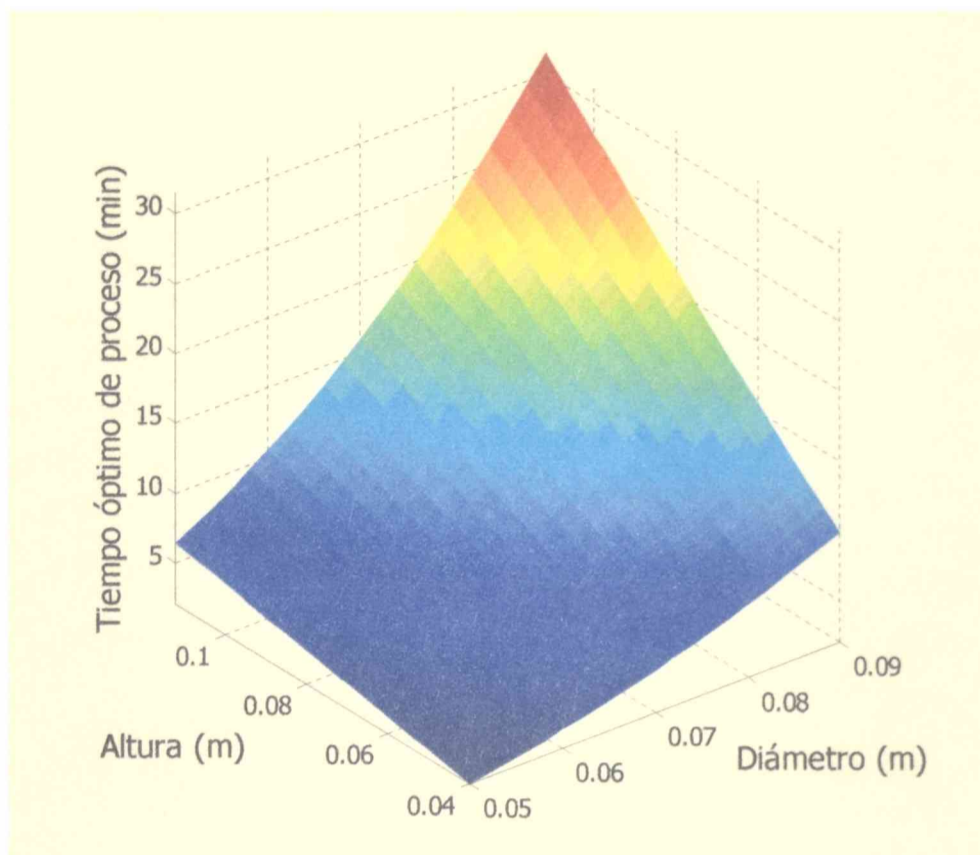


Figura 8.22. Tiempo de proceso óptimo CRT en función de las dimensiones de los envases

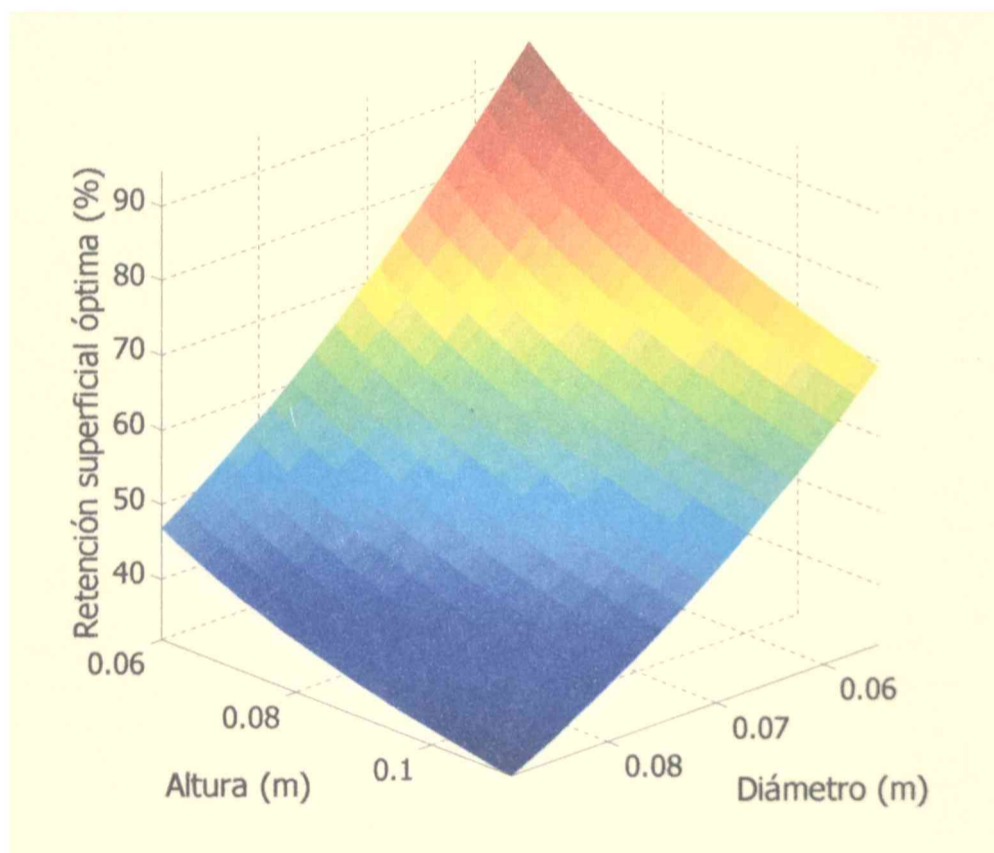


Figura 8.23. Retención superficial máxima en función de las dimensiones de los envases.

8.2.2. Temperatura de autoclave variable (VRT)

Se realizará la optimización con perfiles VRT contemplando subidas de autoclave de tipo escalones sucesivos y de tipo exponencial.

Se analiza la situación para el envase S11 ($R=0.0365$ m y $H=0.113$ m) utilizado para obtener las curvas 8.19 y 8.20 de la sección anterior y que presentó el menor valor de tiamina en superficie bajo condiciones de procesamiento CRT.

Los resultados de la optimización bajo condiciones CRT de la retención superficial de tiamina para este tamaño de envase se detallan en la tabla 8.10.

Para comparar el procesamiento CRT con el procesamiento VRT, se mantendrá el tiempo final de proceso en el tiempo para procesamiento CRT que maximiza la retención de tiamina en superficie, por lo que para el envase S11 se fija el tiempo final de proceso en 18 minutos.

Perfil escalones sucesivos

Cuando el perfil de autoclave se procede a describir como una función discreta de escalones sucesivos, se toman como variables de control las temperaturas de proceso constantes de cada intervalo. Los límites se tomaron como: $110^{\circ}C < N_i < 140^{\circ}C$

Se pretende que la temperatura de proceso aumente a lo largo del tiempo por lo que se incluye la restricción adicional: $N_{i+3} \geq N_{i+2} \geq N_{i+1} \geq N_i$

Se consideraron distinta cantidad de intervalos de tiempo o número de escalones: 2, 3 y 6. Se muestran en las figuras 8.24 ((a), (b) y (c)) para el envase de dimensiones S11 los perfiles VRT y CRT óptimos, así como también el correspondiente perfil de temperatura y letalidad acumulada del punto de calentamiento más lento de mejillones en salmuera obtenido durante el procesamiento VRT. La tabla 8.12 muestra estos resultados y los compara con los obtenidos durante el procesamiento óptimo a temperatura constante de autoclave. Asimismo se muestran en esta tabla los valores de temperatura del autoclave en cada escalón.

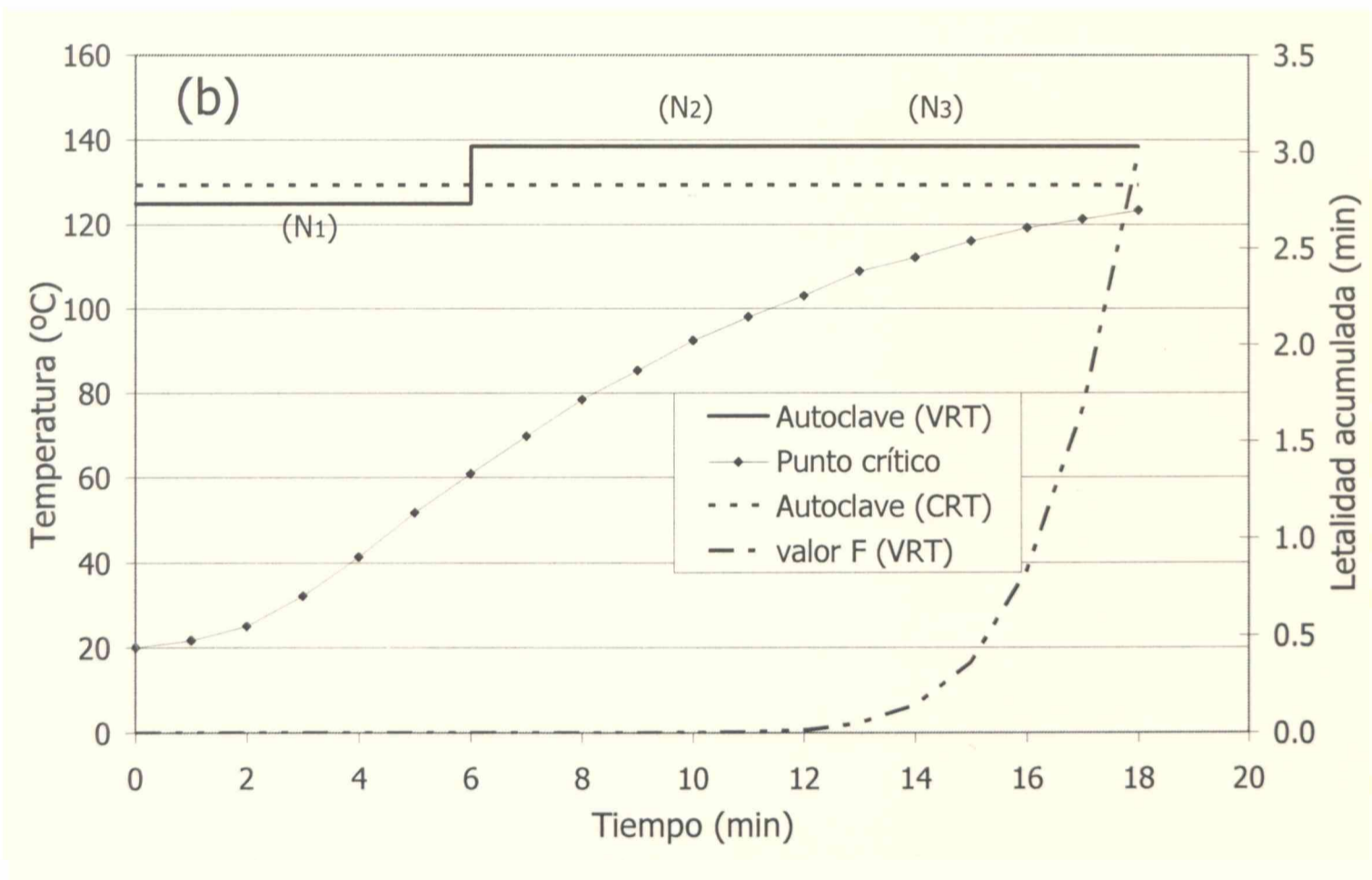
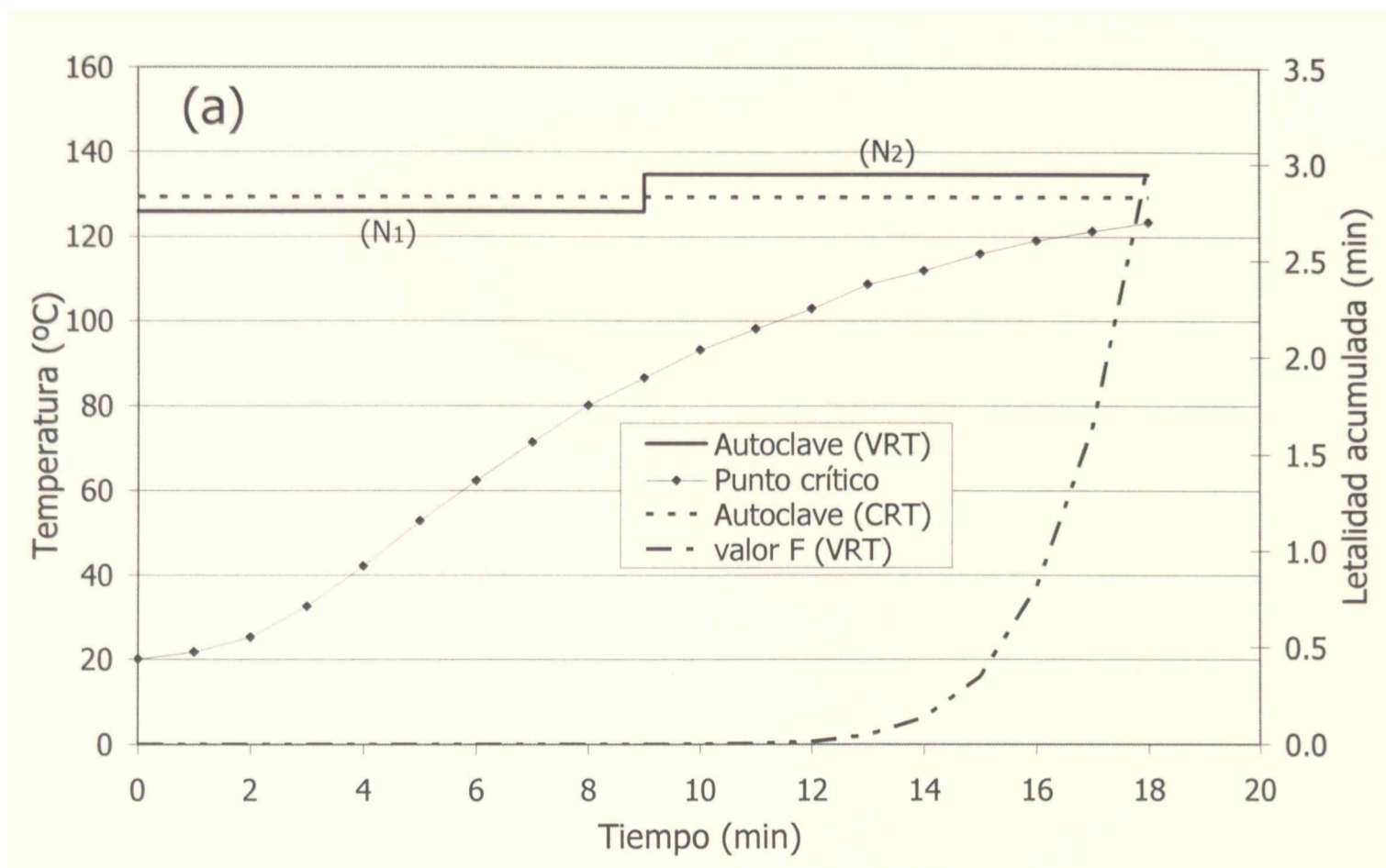


Figura 8.24. Perfiles óptimos de autoclave (CRT y VRT) junto a temperatura y letalidad acumulada del punto de calentamiento más lento bajo condiciones de procesamiento variable; (a) 2 escalones; (b) 3 escalones.

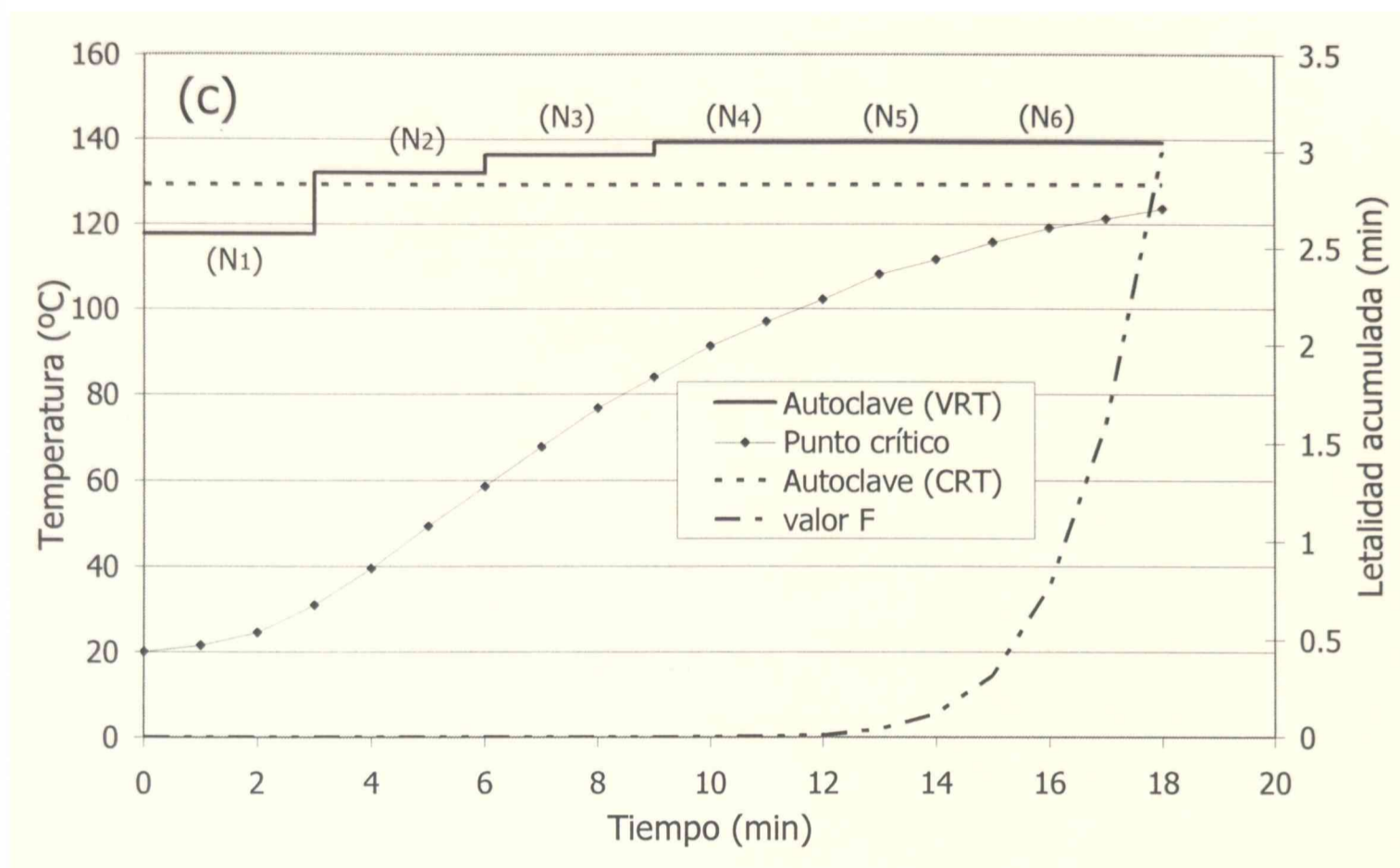


Figura 8.24. (continuación) Perfiles óptimos de autoclave (CRT y VRT) junto a temperatura y letalidad acumulada del punto de calentamiento más lento bajo condiciones de procesamiento variable; (c) 6 escalones

Tabla 8.12. Resultados de la optimización de retención superficial de tiamina bajo procesamiento VRT

Número de escalones	Temperatura de autoclave en cada escalón (°C)	Tiempo total de proceso (min)	Retención tiamina (%)		F (min)
			Superficial	Mejora respecto CRT óptimo	
2	N ₁ =125.78 N ₂ =134.65	18	36.089	0.275%	2.9993
3	N ₁ =124.86 N ₂ =138.38 N ₃ =138.38	18	42.062	16.87%	2.9996
6	N ₁ =117.54 N ₂ =131.99 N ₃ =136.25 N ₄ =139.26 N ₅ =139.26 N ₆ =139.26	18	42.161	17.15%	3.0002

Al igual que lo observado en la optimización de tiamina para sistemas conductivos, vemos que la función VRT óptima tiene dos o tres tramos con temperaturas prácticamente idénticas, por ejemplo el perfil óptimo formado por tres escalones sucesivos, termina convirtiéndose en un perfil de dos escalones, de distinta duración. Como puede verse de la tabla 8.12, altos porcentajes de mejora pueden obtenerse en la retención de tiamina en superficie utilizando este tipo de perfiles.

Perfil exponencial

En este caso se procedió a evaluar un perfil de subida de autoclave más compatible con la realidad. Se optó por un perfil de autoclave lineal hasta una temperatura de venteo de 108°C seguida por un perfil exponencial en el que, al igual que para el caso de sistemas conductivos, se buscaron los parámetros A_1 y k de la ec. (7.24) de manera de optimizar la retención superficial de tiamina. Los límites de la variable de control se tomaron como: $10 < A_1 < 40$ y $0.03 < k < 0.2$.

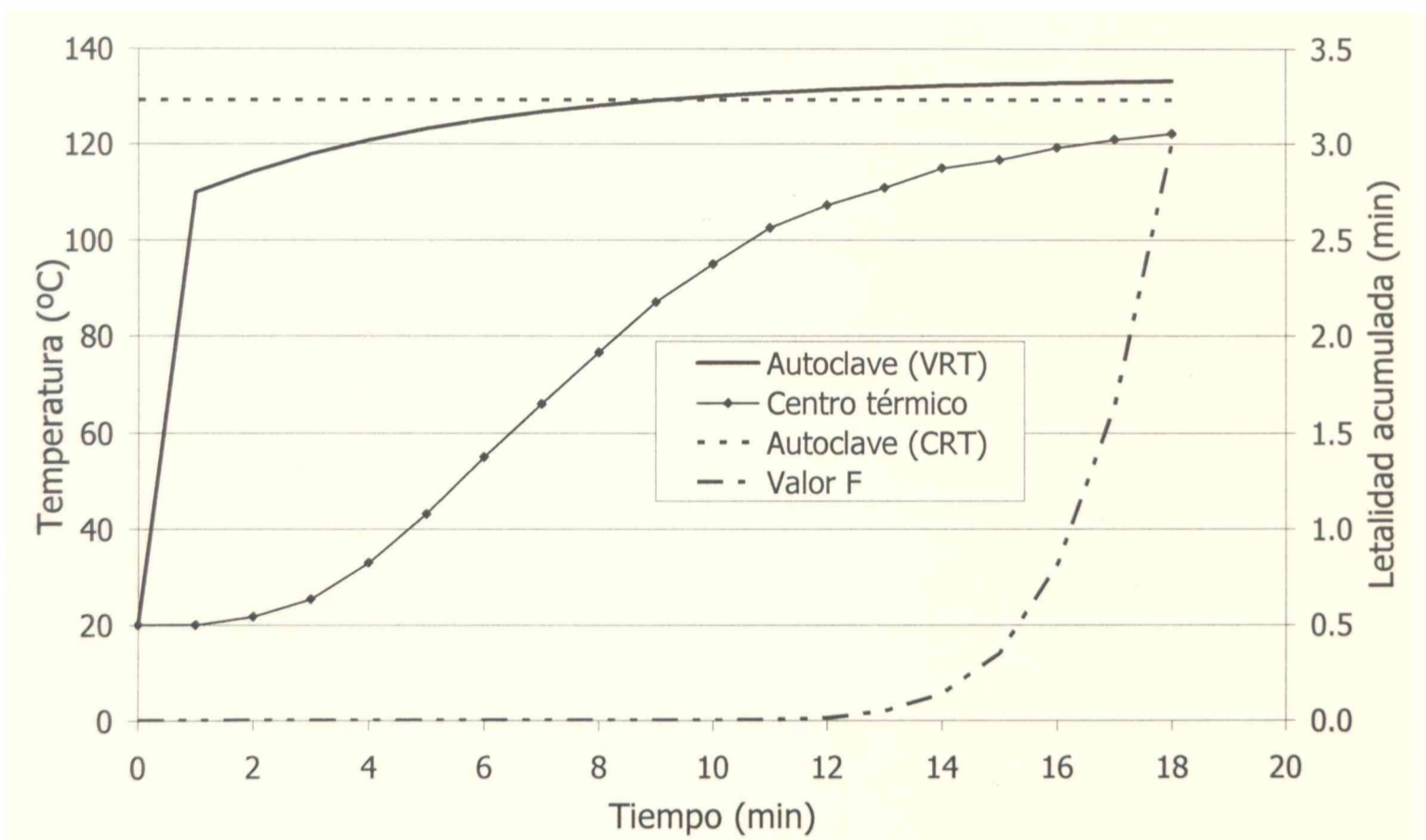


Figura 8.25. Perfil de autoclave exponencial junto a su correspondiente perfil de temperatura y letalidad acumulada del centro térmico para el envase S11.

La figura 8.25 muestra el perfil exponencial óptimo junto con el correspondiente perfil de temperatura y letalidad acumulada del punto crítico para el caso del envase S11.

Asimismo puede observarse en la misma figura el perfil CRT óptimo. En la tabla 8.13 se detallan los resultados de la optimización obtenidos para dicho envase.

Tabla 8.13. Resultados de la optimización de la retención de tiamina en superficie para el envase de dimensiones S11

Tipo de subida	Variables de control	Tiempo total de proceso (min)	Retención superficial tiamina (%)	Mejora respecto proceso CRT óptimo	F (min)
Lineal+ exponencial	A ₁ = 10 K= 0.037	18	55.92	55.38%	2.9999

A diferencia de lo que ocurría con sistemas conductivos, no pueden compararse los resultados obtenidos con datos de literatura debido a que no hay datos disponibles en la optimización de este tipo de sistemas.

8.3. Conclusiones

Se implementó una política de control óptimo cuyas variables de optimización fueron la temperatura de autoclave (constante o adoptando distintos perfiles de subida de autoclave) y/o el tiempo total de proceso.

Respecto de la optimización de sistemas conductivos, los resultados indican que para maximizar la retención global de un nutriente, no es recomendable aplicar un esquema de temperatura de autoclave variable ya que las mejoras en la retención volumétrica de tiamina no son significativas. Por lo que para el caso particular de retención global de este nutriente se sugiere trabajar a la temperatura óptima constante.

Cuando el atributo de calidad es superficial, podemos observar que los beneficios en la utilización de temperaturas de autoclave variables (VRT) son altos, llegando hasta valores de más del 20% de aumento en la retención de tiamina en la superficie.

Además de la optimización en función de un criterio de calidad se completó el estudio buscando minimizar el costo energético expresado mediante la variable tiempo de proceso. En este punto, y en base a los resultados obtenidos, vemos que es posible lograr

una reducción altamente significativa en el tiempo de proceso, obteniendo un producto de la misma calidad o con una calidad superior que el obtenido bajo la condición CRT óptima.

Respecto de la optimización de sistemas mixtos, sólo se utilizó como función objetivo la retención en la superficie de tiamina. Nuevamente observamos que los beneficios en la utilización de un perfil de temperaturas de autoclave variables (VRT) son muy altos, llegando a una mejora del 55% respecto del esquema de temperatura de autoclave constante. Independientemente de que en este trabajo no se simuló la retención global como función objetivo por dificultades numéricas, es importante recalcar que al ser esta conserva un producto muy sensible al deterioro por altas temperaturas, conviene enfocar la búsqueda del óptimo en la respuesta de la superficie que siempre será la región expuesta a mayor temperatura.

Cabe asimismo mencionar que el valor de retención óptima también depende de las dimensiones del envase en el cual se procesa el producto. Para ambos sistemas se encuentra que la retención (tanto global cuando corresponde, como superficial) siempre fue mayor cuanto menor es el tamaño del envase empleado.

A partir de los resultados presentados en este capítulo para ambos sistemas, conductivos y mixtos, podemos afirmar que el procesamiento térmico de alimentos es un buen ejemplo de cómo la aplicación de las técnicas de optimización dinámica pueden ser utilizadas de manera de obtener perfiles de operación VRT óptimos los cuales superan significativamente a los procesos tradicionales a temperatura constante. Estos perfiles óptimos permiten mejorar la calidad final del producto, especialmente a nivel superficial, o reducir el tiempo de proceso asegurando un nivel deseado en la calidad.

CONCLUSIONES GENERALES

CAPITULO IX

Conclusiones generales

La esterilización es una operación que tiene por objetivo preservar los alimentos asegurando la destrucción de todos los organismos vivos capaces de deteriorarlos o de perjudicar la salud del consumidor y de esta manera aumentar la vida útil del producto. Para el diseño de un procesamiento térmico, por lo tanto, es necesario conocer la historia térmica del alimento en el punto de calentamiento más lento (centro térmico) y acoplarla a datos de destrucción microbiana de manera de calcular el efecto del tratamiento térmico sobre la destrucción de los microorganismos.

Sin embargo, asociado a la destrucción de los microorganismos o a la destrucción de otros agentes indeseables, el tratamiento térmico presenta efectos negativos ya que la temperatura incide sobre la degradación de nutrientes y otros atributos de calidad con la consecuente disminución de la calidad del producto final.

Por lo tanto, es importante tener un control adecuado del proceso que minimice la degradación del producto y que tenga en cuenta la eficiencia del proceso, desde el punto de vista energético.

Atendiendo a los objetivos generales del presente trabajo de tesis, se procedió en primera instancia al desarrollo de un método simplificado de predicción de la temperatura del centro térmico que permita el diseño del proceso considerando tanto condiciones externas constantes como variables. Para ello se procedió a caracterizar la respuesta térmica de alimentos envasados, tanto de productos donde la transferencia de calor se produce totalmente por conducción (pasta de atún) como de productos particulados donde los

mecanismos de transferencia de calor en el interior del envase son, simultáneamente, conducción y convección (mejillones en salmuera) procesados en autoclaves batch.

La caracterización de ambos tipos de sistemas fue realizada mediante la utilización de funciones de transferencia en variable discreta $F(z)$, herramienta que permite predecir las historias térmicas de alimentos conductivos y mixtos frente a condiciones de contorno variables en el tiempo.

Para sistemas conductivos (simulando mediante elementos finitos el comportamiento térmico de diversos tamaños de envases) y para sistemas mixtos (a través de las historias térmicas experimentales obtenidas para el centro térmico de diversos tamaños de envases), se obtuvieron los coeficientes de la función de transferencia respectivos y a partir de un estudio sistemático se estudió la dependencia de los mismos con el intervalo de muestreo y con las dimensiones de los envases (diámetro y altura). Estos modelos de regresión permiten predecir los coeficientes de la función de transferencia para otros tamaños de envases, distintos de aquellos empleados en este estudio.

Asimismo, para el caso particular de conservas de tipo mixtas (convección-conducción), se determinó la dependencia de la ubicación del centro térmico con el porcentaje de líquido de cobertura contenido en el envase.

A partir de la metodología de trabajo propuesta, es posible sistematizar el cálculo de los coeficientes de $F(z)$ en función de las dimensiones del producto, evitando su determinación experimental o numérica.

De esta forma, una vez que se conoce la función de transferencia $F(z)$, ésta puede ser utilizada para el diseño del procesamiento térmico, permitiendo calcular el tiempo de proceso necesario para lograr el valor deseado F_0 . El cálculo es muy simple, puede ser fácilmente realizado con una calculadora estándar o una hoja de cálculo, aún por operarios sin entrenamiento especial.

En segunda instancia, se procedió a la optimización del procesamiento térmico de alimentos envasados considerando dos funciones objetivo: la maximización de la retención de un determinado parámetro de calidad (global y superficial) y la minimización del tiempo de tratamiento.

Se implementó una política de control óptimo cuyas variables de optimización fueron la temperatura de autoclave (constante o adoptando distintos perfiles de subida de autoclave) y/o el tiempo total de proceso.

Respecto de la optimización de sistemas conductivos, los resultados indican que para maximizar la retención global de un nutriente, no es recomendable aplicar un esquema de temperatura de autoclave variable ya que las mejoras en la retención volumétrica de tiamina no son significativas. Por lo que para el caso particular de retención global de este nutriente se sugiere trabajar a la temperatura óptima constante.

Cuando el atributo de calidad es superficial, podemos observar que los beneficios en la utilización de temperaturas de autoclave variables (VRT) son altos, llegando hasta valores de más del 20% de aumento en la retención de tiamina en la superficie.

Además de la optimización en función de un criterio de calidad se completó el estudio buscando minimizar el costo energético expresado mediante la variable tiempo de proceso. En este punto, y en base a los resultados obtenidos, vemos que es posible lograr una reducción altamente significativa en el tiempo de proceso, obteniendo un producto de la misma calidad o con una calidad superior que el obtenido bajo la condición CRT óptima.

Respecto de la optimización de sistemas mixtos, sólo se utilizó como función objetivo la retención en la superficie de tiamina. Nuevamente observamos que los beneficios en la utilización de un perfil de temperaturas de autoclave variables (VRT) son muy altos, llegando a una mejora del 55% respecto del esquema de temperatura de autoclave constante. Independientemente de que en este trabajo no se simuló la retención global como función objetivo por dificultades numéricas, es importante recalcar que al ser esta conserva un producto muy sensible al deterioro por altas temperaturas, conviene enfocar la búsqueda del óptimo en la respuesta de la superficie que siempre será la región expuesta a mayor temperatura.

A partir de los resultados obtenidos de la optimización del procesamiento térmico para ambos sistemas, conductivos y mixtos, podemos afirmar que el procesamiento térmico de alimentos es un buen ejemplo de cómo la aplicación de las técnicas de optimización dinámica pueden ser utilizadas de manera de obtener perfiles de operación VRT óptimos los cuales superan significativamente a los procesos tradicionales a temperatura constante. Estos perfiles óptimos permiten mejorar la calidad final del producto, especialmente a nivel superficial, o reducir el tiempo de proceso asegurando un nivel deseado en la calidad.

BIBLIOGRAFÍA

- Abdul Ghani, A.G., Farid, M.M., Chen, X.D. & Richards, P.** (1999). Numerical simulation of natural convection heating of canned food by computational fluid dynamics. *Journal of Food Engineering*, 41, 55-64.
- Abdul Ghani, A.G. & Farid, M.M.** (2006). Using the computational fluid dynamics to analyze the thermal sterilization of solid-liquid food mixture in cans. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 7, 55-61
- Abril, J., Vírseda, P. & Moure, J.** (1998). Modelización de la penetración de calor en conservas vegetales. In *Proceedings of the II Congreso Iberoamericano de Ingeniería de Alimentos (CD)*. Bahía Blanca, Argentine, paper IV.11.
- Afaghi, M., Ramaswamy, H.S. & Prasher, S.O.** (2000). Artificial neural network models as alternatives to thermal process calculation methods. In *Food SIM 2000, First International Conference on Simulation in Food and Bio Industries* (pp. 20-22).
- Afaghi, M., Ramaswamy, H.S. & Prasher, S.O.** (2001). Thermal process calculations using artificial neural network models. *Food Research International*, 34, 55-65.
- Ali, M. M., Storey, C. & Törn, A.** (1997). Application of stochastic global optimization algorithms to practical problems. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 95, 545-563.
- Alstrand, D.V. & Benjamin, H.A.** (1949). Thermal processing of canned foods in tin containers. V. Effect of retorting procedures on sterilization values in canned foods. *Food Research*, 14, 253-260.
- American Can Co.** (1952). *Calculation of Processes for canned Foods*, American Can Co., Research and Technical Dept., Maywood, IL.
- ASHRAE Handbook.** (2002). *Fundamentals*, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers. Chapters 23 and 26.

- Awuah, G.B., Ramaswamy, H.S. & Economides, A.** (2007). Thermal Processing and quality: Principles and overview. *Chemical Engineering and Processing*, 46, 584-602.
- Ball, C.O.** (1923). *Thermal Process time for Canned Food*, Bulletin of the National Research Council N° 37, Vol. 7, Part 1, Natl. Res. Council, Washington, D.C.
- Ball, C.O.** (1928). *Mathematical solution of Problems on Thermal Processing of Canned Foods*, Univ. of California. Pubs. In Public Health, Vol. 1, No. 2, Univ. California Press, Berkeley, C.A.
- Ball, C.O. & Olson, F.C.** (1957). *Sterilization in Food Technology. Theory, Practice and Calculations*, McGraw-Hill, New York.
- Balsa-Canto, E., Banga, J. R., Alonso, A. A. & Vassiliadis, V. S.** (2000). *Optimal control of distributed processes using restrictive second order information*. In Biegler, L. T., Brambilla, A. & Scali, C. (eds). Int. Symp. Advanced Control of Chemical Processes, ADCHEM, 905-910.
- Balsa-Canto, E., Alonso, A.A. & Banga, J.R.** (2002a). A novel, efficient and reliable method for thermal process design and optimization. Part I: theory. *Journal of Food Engineering*, 52, 227-234.
- Balsa-Canto, E., Alonso, A.A. & Banga, J.R.** (2002b). A novel, efficient and reliable method for thermal process design and optimization. Part II: applications. *Journal of Food Engineering*, 52, 235-247.
- Balsa-Canto, E., Rodriguez-Fernandez, M. & Banga, J.R.** (2007). Optimal design of dynamic experiments for improved estimation of kinetic parameters of thermal degradation. *Journal of Food Engineering*, 82, 178-188.
- Banga, J.R. & Seider, W.D.** (1996). *Global optimization of chemical processes using stochastic algorithms*. In C.A. Floudas, & P.M. Pardalos (Eds.), State of the art in global optimization. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic.

- Banga, J.R., Balsa-Canto, E., Moles, C. & Alonso, A.** (2003). Improving food processing using modern optimization methods. *Trends in Food Science & Technology*, 14, 131-144.
- Banga, J.R., Martin, R.I., Gallardo, J.M. & Casares, J.J.** (1991). Optimization of thermal processing of conduction-heated canned foods: study of several objective functions. *Journal of Food Engineering*, 14, 25-51.
- Barakat, S.A.** (1987). *Experimental determination of the z-transfer function coefficients for houses*, ASHRAE Trans 93, Part 1:146.
- Bathe, K.J.** (1996). *Finite element Procedures*. New Jersey: Prentice Hall
- Bazaraa, M.S., Sherali, H.D. & Shetty, C.M.** (1993). *Nonlinear Programming: Theory and Algorithms*. Second Edition. John Wiley & Sons, New York, USA.
- Bichler, J. & Teixeira, A.A.** (1993). *Thermal processing of canned foods under mechanical agitation*, in *Heat Transfer in Food Processing*, HTD- Vol.254, Karwe, M.V., Bergman, T.L., and Paolucci, S., Eds., ASME, New York, 35.
- Bimbenet, J. Schubert, H. & Trystram, G.** (2007). Advances in Research in Food Process Engineering as presented at ICEF 9. *Journal of food Engineering*, 78(2), 390-404.
- Box, G.E., Hunter, W.G. & Hunter, J.S.** (1978). *Statistics for experimenters: an introduction to design, data analysis, and model building*, New York: Wiley.
- Brenner, S.C. & Scott, L.R.** (1994). *The mathematical theory of finite element methods*. New York: Springer-Verlag.
- Bryson, A.E. & Ho, Y.C.** (1975). *Applied optimal control*. New York: Hemisphere.
- Bryson, A.E.** (1999). *Dynamic Optimization*. Addison-Wesley Longman Inc.

- Carslaw, H.S. & Jaeger, J.C.** (1959). *Conduction of Heat in Solids*, 2nd ed. Clarendon Press, Oxford, Great Britain.
- Cass, G.V.** (1947). A note on use of Schultz and Olson lethal-rate paper for calculation of thermal processes for food products in tin containers. *Food Research*, 12.
- Ceylan, H.T.** (1987). Transient heat transfer in long cylinders with time-dependent surface temperature. *ASHRAE Trans* 93, Part 2, 768-775.
- Chen, C.R. & Ramaswamy H.S.** (2002). Modeling and optimization of variable retort temperature (VRT) thermal processing using coupled neural networks and genetic algorithms. *Journal of Food Engineering*, 53, 209-220.
- Chiheb, A., Debray, E., Le Jean, G. & Piar, G.** (1994). Linear model for predicting transient temperature during sterilization of a food product. *Journal of Food Science*, 59(2), 441-446.
- Ciarlet, P.G. & Lions, J.L. [Eds.]** (1991). *Handbook of numerical analysis: finite element methods (part 1)*. Amsterdam: North-Holland.
- Durance, T.D.** (1997). Improving canned food quality with variable retort temperature processes. *Trends in Food Science & Technology*, 8, 113-118.
- Durance, T.D., Dou, J. & Mazza, J.** (1997). Selection of variable retort temperature processes for canned salmon. *Journal of Food Process Engineering*, 20, 65-76.
- Edgar, T.F. & Himmelblau, D.M.** (1988). *Optimization of Chemical Processes*. McGraw-Hill.
- Esposito, W.R. & Floudas, C. A.** (2000). Deterministic global optimization in nonlinear optimal control problems. *Journal of Global Optimization*, 17, 97-126.
- Esty, J.R. & Meyer, K.F.** (1992). The heat resistance of spores of *B. Botulinus* in canned foods. *Journal Infectious Diseases*, 31, 650-663.

FEMLAB 3.0. *Multiphysics modeling.* Versión: 2004, COMSOL AB

Fellows, P. (1994). *Tecnología del procesado de alimentos*, Ed. Acribia, Zaragoza.

Floudas, C.A. (2000). *Deterministic global optimization: theory, methods, and applications.* Dordrecht: Kluwer Academic.

Gillespy, T.G. (1951). Estimation of sterilizing values of processes as applied to canned foods. I. Packs heating by conduction. *Journal of Science Food Agricultural*, 2(3), 107-115.

Gillespy, T.G. (1953). Estimation of sterilizing values of processes as applied to canned foods. II: Packs heating by conduction: complex processing conditions and value of coming-up time or retort. *Journal of Science Food Agricultural*, 4(12), 553-560.

Goncalves, E.C, Minim, L.A., Coimbra, J.S.R. & Minim, V.P.R. (2005). Modeling sterilization process of canned foods using artificial neural networks. *Chemical Engineering and Processing*, 44, 1269-1276.

Griffin, R.C., Jr.; Herndon, D.H. & Ball, C.O. (1969). Use of computer-derived tables to calculate sterilizing processes for packaged foods. II. Application to broken-line heating curves. *Food Technology*, 23(4), 519-529.

Grimm, R.C., Jr., Herndon, D.H. & Ball, C.O. (1971). Use of computer-derived tables to calculate sterilizing processes for packaged foods. III: Application to cooling curves. *Food Technology*, 25(2), 134-144.

Halder, A., Datta, A.K., Black, G. & Davidson, P.M. (2007). Use of COMSOL Multiphysics to develop a predictive software for food safety in Proceedings of the COMSOL Conference 2007, Boston.

Hayakawa, K. (1968). A procedure for calculating the sterilizing value of a thermal process. *Food Technology*, 22(7), 905-910.

- Hayakawa, K.** (1970). Experimental formulas for accurate estimation of transient temperature of food and their application to thermal process evaluation. *Food Technology*, 24(12), 1407-1410.
- Hayakawa, K.** (1973). Modified lethal rate paper technique for thermal process evaluation, Can. Ins. *Food Technology*, 6(4), 295-307.
- Hendrickx, M., Van Gentchen, K. & Tobback, P.** (1989). *Optimizing quality attributes of conduction heated foods, a simulation approach*. 5th Int. Congress Engineering and Food, Cologne, Germany.
- Hendrickx, M., Silva C., Olivera F. & Tobback, P.** (1992). *Optimization of heat transfer in thermal processing of conduction heated foods*. In Singh R.P. & Wirakartakusumah, M.A. *Advances in Food Engineering* Boca Raton, FL, CRC. Press, 221-235.
- Hendrickx M., Silva C., Olivera F. & Tobback, P.** (1993). Generalized (semi)-empirical formulae for optimal sterilization temperatures of conduction-heated foods with infinite surface heat transfer coefficients. *Journal of Food Engineering*, 19(2), 141-158.
- Herndon, D.H, Griffin, R.C, Jr., & Ball, C.O.** (1968). Use of computer-derived tables to calculate sterilizing processes for packaged foods. *Food Technology*, 22(4), 473-480.
- Holdsworth, S.D.** (1997). *Thermal processing of packaged foods*. Blackie Academic & Professional, Chapman Hall, London.
- Holdsworth, S.D.** (2004). *Optimising the safety and quality of thermally processed packaged foods*. Improving the thermal processing of foods. Editor: Philip Richardson. Ed. CRC press
- Ikegami, Y.** (1977). Heat penetration in canned foods containing solids and liquid. *Canners' Journal*, 56(7), 548-552.

- Jakobsen, F.** (1954). Notes on process evaluation, *Food Research*. 19, 66-82.
- Jen, Y., Manson, J.E., Stumbo, C.R., & Zahradnik, J.W.** (1971). A procedure for estimating sterilization of and quality factor degradation in thermally processed foods. *Journal of Food Science*, 36, 692-699.
- Joly, M. & Pinto, J.** (2004). Optimal control of product quality for batch nylon-6, autoclaves. *Chemical Engineering Journal*, 97, 87-101.
- Kopelman, I.J., Pflug, I.J. & Naveh, D.** (1981). On the conversion factors in thermal processes. *Journal of Food Technology*, 16, 229-237.
- Kopelman, I.J., Naveh, D. & Pflug, I.J.** (1982). Overshooting of thermal processes due to temperature distribution at steam-off. *Journal of Food Technology*, 17, 441.
- Larkin, J.W. & Berry, R.B.** (1991). Estimating cooling process lethality for different cooling j values. *Journal of Food Science*, 56(4), 1063-1067.
- Lekwauwa, A.N. & Hayakawa, K.** (1986). Computerized model for the prediction of thermal responses of packaged solid-liquid food mixture undergoing thermal processes. *Journal of Food Science*, 51(4), 1042-1049.
- Leonhardt, G.F.** (1978). A general lethal-rate paper for the graphical calculation of processing times. *Journal of Food Science*, 43(2), 660-660.
- Lespinaud, A.R., Goñi, S.M., Salgado, P.R. & Mascheroni, R.H.** (2009). Experimental determination and modelling of size variation, heat transfer and quality indexes during mushroom blanching. *Journal of Food Engineering*. 92, 8-17.
- Luyben. T.** (1973) *Process Modeling, Simulation and Control for Chemical Engineers*. Mc Graw - Hill Kogakusha Ltd, Chapters 9 y 14.

- MATLAB 7.0.** Release 14 (2004). The MathWorks, Inc: Natick, MA.
- Márquez, C.A., De Michelis, A., Salvadori, V.O. & Mascheroni, R.H.** (1998). Application of Transfer Functions to the Thermal Processing of Particulate Foods Enclosed in Liquid Medium. *Journal of Food Engineering*, 38, 189-205.
- Márquez, C.A., Salvadori, V.O., Mascheroni, R.H. & De Michelis, A.** (2003). Application of Transfer Functions to the Thermal Processing of Sweet and Sour cherries preserves: Influence of Particle and container sizes. *Food Science and Technology Internacional*, 9(2), 69-75.
- Mascheroni R.H., Sanz P.D. & Domínguez M.** (1987). A new way to predict thermal histories in multidimensional heat conduction: the z-transfer function method. *International Comm Heat Mass Transference*, 14, 81-89.
- Merrill, D.G.** (1948). Heating rates of food in glass and other containers. *Industrial Engineering Chemistry*, 40(12), 2263-2270.
- Merson, R.L., Singh, R.P. & Carroad, P.A.** (1978). An evaluation of Ball's formula method of thermal process calculations. *Food Technology*, 32. 66-72, 75.
- Miri, T., Tsoukalas, A., Bakalis, S., Pistikopoulos, E.N., Rustem, B. & Fryer, P.J.** (2008). Global optimization of Process conditions in batch thermal sterilization of food. *Journal of Food Engineering*, 87(4), 485-494.
- Mitalas, G.P.** (1978) *Comments on the z-transfer function method for calculating heat transfer in buildings*, ASHRAE Trans 84, Part 1:667.
- Mittal, G.S. & Zhang, J.** (2002). Prediction of food thermal process evaluation parameters using neural networks. *International Journal of Food Microbiology*, 79, 153-159.
- Mongeau, M., Karsenty, H., Rouze, V. & Hiriart-Urruty, J. B.** (2000). Comparison of public-domain software for black-box global optimization. *Optimization Methods & Software*, 13, 203-226.

- Myers, R.H. & Montgomery, D.C.** (2002). *Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments*. New York: Wiley.
- Nadkarni, M.N & Hatton, T.A.** (1985). Optimal nutrient retention during the thermal processing of conduction-heated canned foods: Application of the distributed Minimum principle. *Journal of Food Science*, 50, 1312-1321.
- Naveh, D., Kopelman, I.J., Zechman, L. & Pflug, I.J.** (1983). Transient cooling of conduction heating products during sterilization: temperature histories. *Journal Food Processing and Preservation*, 7(4), 259-270.
- Noronha, J., Hendrickx, M., Suys, J. & Tobback, P.** (1993). Optimization of surface quality retention during the thermal processing of conduction heated foods using variable temperature retort profiles. *Journal of Food Processing and Preservation*, 17, 75-91.
- Noronha, J., Van Loey, A., Hendrickx, M. & Tobback, P.** (1996). An empirical equation for the description of optimum variable retort temperature profiles that maximize surface quality retention in thermally processed foods. *Journal of Food Processing and Preservation*, 20, 251-264.
- Patashnik, M.** (1953). A simplified procedure for thermal process evaluation. *Food Technology*, 7, 1-10.
- Pham, Q.T.** (1987). Calculation of thermal process lethality for conduction-heated canned foods. *Journal of Food Science*, 52(4), 967-974.
- Pham, Q.T.** (1990). Lethality calculation for thermal processes with different heating and cooling rates. *International Journal Food Science & Technology*, 25(2), 148-156.
- Pinter, J.D.** (2002). *Global optimization: software, test problems, and applications*. In Nonconvex optimization and its applications Dordrecht: Kluwer (Vol. 62) (pp. 515-569).

- Puri, V.M. & Anantheswaran, R.C.** (1993). The finite-element method in food processing: a review. *Journal of Food Engineering*, 19(3), 247-274.
- Purohit, K.S. & Stumbo, C.R.** (1973). Refinement and extension of $f_h/U: g$ parameters for process calculation. *Journal of Food Science*. 38, 726-728.
- Ramaswamy, H.S.** (1993). Come-up time effectiveness for process calculations involving thin-profile packages. *Journal of Food Engineering*, 19(2), 109-117.
- Rumsey, T.R.** (1984). *Modeling heat transfer in cans containing liquid and particulates*. AMSE St. Joseph, MI, 84-6515.
- S.A.G.P.Y.A.** (2007). *Exportaciones e Importaciones Pesqueras*. Ministerio de Economía de la Nación
- Saguy, I. & Karel, M.** (1979). Optimal retort temperature profile in optimizing thiamine retention in conduction-type heating of canned foods. *Journal of Food Science*, 44, 1485-1490.
- Salvadori, V.O., Sanz, P.D., Dominguez Alonso, M. & Mascheroni, R.H.** (1994). Application of z-transfer functions to heat or mass transfer problems. Their calculation by numerical methods. *Journal of Food Engineering*, 23(3), 293-307.
- Sanz, P.D.** (1984). Análisis de las funciones de transferencia para la resolución de problemas de transmisión de calor en régimen variable en cámaras adiabáticas y de régimen controlado, *Tesis doctoral*, Universidad Complutense, Madrid.
- Sanz, P.D., Mascheroni, R.H., Domínguez, M. & García de Vinuesa, S.** (1986). Time-temperature prediction curves of foodstuffs by means of the z-transfer function method, *International Journal Refrigeration*, 9, 89-98.
- Sastry, S.K.** (1984). *Convective heat transfer coefficients for canned mushrooms processed in still retorts*. St. Joseph, MI. ASME 84-6517.

- Schultz, O.T. & Olson, F.C.** (1938). Thermal processing of canned foods in tin containers. I. Variation of heating rate with can size for products heating by convection, *Food Research*, 3, 647-655.
- Schultz, O.T. & Olson, F.C.** (1940). Thermal processing of canned foods in tin containers. III. Recent improvements in the general method of thermal process calculations. A special coordinate paper and methods of converting initial and retort temperatures, *Food Research*, 5, 399-409.
- Seem, J.E., Klein, S.A., Beckman, W.A. & Mitchell, J.W.** (1989a). Transfer functions for efficient calculation of multidimensional transient heat transfer, *ASME Journal Heat Transference* 111, 5-8.
- Seem, J.E., Klein, S.A., Beckman, W.A. & Mitchell, J.W.** (1989b). Comprehensive room transfer functions for efficient calculation of the transient heat transfer processes in buildings, *ASME Journal Heat Trans* 111, 264-269.
- Silva, C., Hendrickx, M., Oliveira, F. & Tobback, P.** (1992). Critical evaluation of commonly used objective functions to optimize overall quality and nutrient retention of heat-preserved foods. *Journal of Food Engineering* 17, 241-258.
- Silva, C., Oliveira, F. A. R. & Hendrickx, M.** (1994a). Optimum sterilization: A comparative study between average and surface quality. *Journal of Food Process Engineering*, 17, 155-176.
- Silva, C., Oliveira, F. A. R., Lamb J., Torres, A. P. & Hendrickx, M.** (1994b). Experimental validation of models predicting optimal surface quality sterilization temperatures. *International Journal of Food Science and Technology*, 29, 227-241.
- Silva, C., Oliveira, F. A. R. & Hendrickx, M.** (1994c). Quality optimization of conduction heating foods sterilized in different packages. *International Journal of Food Science and Technology*, 29, 515-530.

- 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.
- Simpson, R., Abakarov, A. & Teixeira, A.** (2008). Variable retort temperature optimization using adaptative random search techniques. *Food Control*, 19, 1023-1032.
- Stephenson, D.G. & Mitalas, G.P.** (1971) Calculation of heat conduction transfer functions for multi-layer slabs, *ASHRAE Transactions*, 77, Part 2:117
- Stoforos, N.G. & Merson, R.L.** (1990). Estimating heat transfer coefficients in liquid/particulate canned foods using only liquid temperature data. *Journal of Food Science*, 55(2) 478-483.
- Stoforos, N.G.** (1995). Thermal process design. *Food Control*, 6(2) 81-94.
- Stumbo, C.R.** (1973). *Thermobacteriology in Food Processing*, 2nd ed., Academic Press, New York.
- Stumbo, C.R. & Longley, R.E.** (1966). New parameters for process calculation. *Food Technology*, 20(3), 341-348.
- Teixeira, A.A., Zinsmeister, G.E. & Zahradnik, J.W.** (1975). Computer simulation of variable retort control and container geometry as a possible means of improving thiamine retention in thermally processed foods. *Journal of Food Science*, 40, 656-659.
- Teixeira, A.A., Dixon, J.R., Zahradnik, J.W. & Zinsmeister, G.E.** (1969). Computer optimization of nutrient retention in the thermal processing of conduction-heated foods, *Food Technology*, 23(6), 137-142.

- Teixeira, A.A., Tucker, G.S., Balaban, M.O. & Bichier, J.** (1992). *Innovations in conduction-heating models for on-line retort control of canned foods with any j-value*, in *Advances in Food Engineering*, Singh, R.P. and Wirakartakusumah, M.A., Eds., CRC Press, Boca Raton, FL, 293-301.
- Venkataraman, P.** (2002). *Applied Optimization with MATLAB Programming*. John Wiley & Sons, Inc. New York. USA.
- Vírseda, P. & Pinazo, J.M.** (1997). Thermal behavior in multilayer Products by response Factors. *Journal of Food Engineering*, 33, 347-358.
- Wang, L. & Sun, D.** (2006). Heat and mass transfer in thermal food processing. *Thermal Food Processing, New Technologies and Quality Issues*. Editor: Da-Wen-Sun. Taylor & Francis Group, LLC. pp 35-72.
- Welti-Chanes, J., Vergara-Balderas, F. & Bermúdez-Aguirre D.** (2005). Transport phenomena in food engineering: basic concepts and advances. *Journal of Food Engineering*, 67, 113-128.
- Zienkiewicz, O. C. & Taylor, R. L.** (1994). *El método de los elementos finitos* (Vol.1). Barcelona: McGraw-Hill.
- Zienkiewicz, O. C.** (1989). *The Finite Element Method*. McGraw-Hill, New York, NY, USA.

ANEXOS

CÁLCULO DE LOS COEFICIENTES DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA

```

clc, clear all

M=xlsread('40por10');      % archivo con la perturbación y la respuesta del sistema

T=[M(:,2)]                % Temperatura del centro térmico (respuesta de mi sistema)
Text=[M(:,1)]             % Temperatura autoclave (perturbación)
tot=length(T)
Tini=25;                  %Temperatura inicial del producto
Textfinal=Text(tot);     %Temperatura final del autoclave

%%%%%%%%% Adimensionalización de Temperaturas %%%%%%%%%%%

for k=1:tot
P(k)=(T(k)-Tini)/(Textfinal-Tini);    %adimensionalizacion temperatura del producto
B(k)=(Text(k)-Tini)/(Textfinal-Tini)  %adimensionalizacion temperatura del autoclave
end

n=length(P);
nb=n+4;
na=n+4;

%%%%%%%%% Calculo de los coeficientes de la función de transferencia(Q) %%%%%%%%%%%

[b,a]=stmcb(P,B,nb,na,10)

TEMP(:,1)=P;
TEMP(:,2)=B;
TEMP(:,3)=b;
TEMP(:,4)=a;
TEMP(:,5)=C;
TEMP(:,6)=Tenv;

hecho=xlswrite('Sal40por10',TEMP);

```

ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS

Programa co2

```

opt=optimset('LargeScale','off');

global u

M = xlsread('corridas');           % archivo conteniendo los datos a regresionar

udata = M(:,2)'
x=M(:,1)'

beta0=[0 0 0 2];                   %vector de inicialización de los parámetros

[beta,resnorm,residual,exitflag]=lsqcurvefit('coef',beta0,x,udata,[0 0 0 0],[],opt)

a=beta(1)
b=beta(2)
c=beta(3)
d=beta(4)

param=erre(udata,u);

r2=param(1)
plot(x,udata,'o',x,u)
legend('Datos experimentales','Ajuste no lineal')

```

Función coef

```

function u=coef(beta,x)

global u

a=beta(1);
b=beta(2);
c=beta(3);
d=beta(4);

u=a*x.^d.*exp(-b*(x-c));

```

Función erre

```
function [out]=erre(udata,u)

udataprom=sum(udata)/length(udata);
SC=sum((udata-udataprom).^2);
SCE=sum((udata-u).^2);

r2=(SC-SCE)/SC;
out=[r2];
```

CÁLCULO DE LA LETALIDAD ACUMULADA

```
clear all,close all
format short g
% global u

M=xlsread('libro2'); % En este archivo se encuentra la historia térmica del centro térmico
i=2;
F0=0;

while F0<5&i<size(M,1)+1

t=M(1:i,3)
T=M(1:i,4)

L=10.^((T-121.1)/10)

F0=trapz(t,L)
i=i+1;

end
```

OPTIMIZACIÓN CRT: RETENCIÓN TIAMINA (GLOBAL O SUPERFICIAL)

Programa llamador1

```
clear all,clc,close all
opt=optimset('Display','iter','MaxFunEvals',1000);

clear all,clc,close all
opt=optimset('Display','iter');

T=fmincon('calculador3D3',140,[],[],[],[],110,140,[],opt)
```

Función calculador3D3

```
function val=calculador3D3(T)

fem=femlabcrt(T);

%%%%%%%%%% RETENCIÓN GLOBAL DE TIAMINA %%%%%%%%%%%

for i=1:length(fem.sol.tlist)
    intL_V(i)=postint(fem,'10^((T-121.1)/46.7)','solnum',i,'phase',0,'edim',3,'dl',[1]);
end

Vol=postint(fem,'1','dl',[1],'t',[0]);
intL_V=intL_V/Vol

intL_V_t=trapz(fem.sol.tlist,intL_V)

val=-exp(-2.3026/96*intL_V_t) % si la función objetivo es la retención global

%%%%%%%%%% RETENCION SUPERFICIAL DE TIAMINA %%%%%%%%%%%

for i=1:length(fem.sol.tlist)
    intL_S(i)=postint(fem,'10^((T-121.1)/46.7)','solnum',i,'phase',0,'edim',2,'intorder',4,
'geomnum',1,'dl',[1:6]);
end
S=postint(fem,'1','dl',[1:6],'edim',2,'solnum',1);
int_S=intL_S/S;
int_S_t=trapz(fem.sol.tlist,int_S);

%val=-exp(-2.3026/96*int_S_t) % si la función objetivo es la retención superficial
```

Función femlabcrt

```
function fem=femlabcrt(T_autoclave)
global T_autoclave
% FEMLAB Model M-file
% Generated by FEMLAB 3.0a (FEMLAB 3.0.0.228, $Date: 2004/04/05 18:04:31 $)

fclear fem

% Femlab version
clear vrsn
vrsn.name = 'FEMLAB 3.0';
vrsn.ext = 'a';
vrsn.major = 0;
vrsn.build = 228;
vrsn.rcs = '$Name: $';
vrsn.date = '$Date: 2004/04/05 18:04:31 $';
fem.version = vrsn;

% Geometry
g1=cylinder3('0.03','0.1','pos',{0,0,0},'axis',{0,0,1},'rot',0);
clear s
s.objs={g1};
s.name={'CYL1'};
s.tags={'g1'};

fem.draw=struct('s',s);
fem.geom=geomcsg(fem);

% Initialize mesh
fem.mesh=meshinit(fem, ...
    'hmaxfact',1.5, ...
    'hcutoff',0.02, ...
    'hgrad',1.5, ...
    'hcurve',0.5);

% Application mode 1
clear appl
appl.mode.class = 'HeatTransfer';
appl.assignsuffix = '_ht';
clear bnd
bnd.T0 = T_autoclave;
bnd.type = 'T';
bnd.ind = [1,1,1,1,1,1];
appl.bnd = bnd;
clear equ
equ.init = 20;
equ.k = 0.463;
equ.Dts = '1/60';
equ.rho = 1003;
```



```
equ.C = 3470;
equ.ind = [1];
appl.equ = equ;
fem.appl{1} = appl;
fem.outform = 'general';
```

```
% Multiphysics
fem=multiphysics(fem);
```

```
% Extend mesh
fem.xmesh=meshextend(fem);
```

```
% Evaluate initial value
init = asseminit(fem);
```

```
%Update model
fem.sol = init;
```

```
% Solve problem
fem.sol=femtime(fem, 'init',init, 'symmetric','on', 'solcomp',{T}, 'outcomp',{T},
'tlist',linspace (0,(0.0955*T_autoclave*T_autoclave-27.121*T_autoclave+1963.1),50),
'tout','tlist');
```

```
% En esta última parte se incorpora la restricción del problema (a través de la curva de
isoletalidad)
```

OPTIMIZACIÓN VRT: RETENCIÓN TIAMINA (GLOBAL O SUPERFICIAL)

Programa llamador2

%Programa que resuelve la optimización dinámica (control óptimo de temperatura de autoclave).

```
clear all,clc,close all
```

```
opt=optimset('Display','iter','MaxFunEvals',1000);
```

```
Ta=120;
```

```
%Temperatura inicial
```

```
n=4
```

```
% numero de intervalos de la variable de control
```

```
Tainf=90*ones(n,1);
```

```
%limite inferior
```

```
Tasup=140*ones(n,1);
```

```
%limite superior
```

```
tx=72/n;
```

```
%[min]
```

```
% duración intervalos
```

```
Ta0=[90 105 110 120];
```

```
% vector de inicialización de las temperaturas de autoclave
```

```
[Ta,fval,exitflag,output]=fmincon('calculador3D3',Ta0,[],[],[],[],Tainf,Tasup,'nonlcon',opt)
```

Función nonlcon

```
function [restri,restrireq]= nonlcon(x)
```

```
global res
```

```
Ta=x;
```

```
%Subida de autoclave en 4 intervalos
```

```
restri = [x(1)-x(2);x(2)-x(3);x(3)-x(4)];
```

```
restrireq = [];
```

Función calculador3D3

```
function val=calculador3D3(x)
```

```
global Ta res
```

```
Ta=x;
```

```
fem=femlabvrt
```

```
%%%%%%%%%% FUNCION OBJETIVO RETENCION GLOBAL DE TIAMINA %%%%%%%%%%%
```

```
for i=1:length(fem.sol.tlist)
```

```

    intL_V(i)=postint(fem,'10^((T-121.1)/46.7)','solnum',i,'phase',0,'edim',3,'dl',[1]);
end

Vol=postint(fem,'1','dl',[1],'t',[0]);
intL_V=intL_V/Vol

intL_V_t=trapz(fem.sol.tlist,intL_V)

val2=-exp(-2.3026/96*intL_V_t) % Si la función objetivo es la retención global

%%%%%%%%% FUNCION OBJETIVO RETENCION SUPERFICIAL DE TIAMINA %%%%%%%%%%%

for i=1:length(fem.sol.tlist)
    intL_S(i)=postint(fem,'10^((T-121.1)/46.7)','solnum',i,'phase',0,'edim',2,'intorder',4,
'geomnum',1,'dl',[1:6]);
end
S=postint(fem,'1','dl',[1:6],'edim',2,'solnum',1);
int_S=intL_S/S;
int_S_t=trapz(fem.sol.tlist,int_S);

%val2=-exp(-2.3026/96*int_S_t) % Si la función objetivo es la retención superficial

%%%%%%%%%%CALCULO DE LA LETALIDAD ACUMULADA EN EL CENTRO%%%%%%%%%%

T= postinterp(fem,'T',[0;0;0.05],'solnum',1:length(fem.sol.tlist))
L= postinterp(fem, '10^((T-121.1)/10)',[0;0;0.05],'solnum',1:length(fem.sol.tlist))
F0=trapz(fem.sol.tlist,L)

res= [5-F0] % Función de penalización

val=val2+10*max([0 res].^2) % Función objetivo

Función femlabvrt

function fem=femlabvrt
global Ta
% FEMLAB Model M-file
% Generated by FEMLAB 3.0a (FEMLAB 3.0.0.228, $Date: 2004/04/05 18:04:31 $)

fclear fem

% Femlab version
clear vrsn
vrsn.name = 'FEMLAB 3.0';
vrsn.ext = 'a';

```

```
vrsn.major = 0;
vrsn.build = 228;
vrsn.rcs = '$Name: $';
vrsn.date = '$Date: 2004/04/05 18:04:31 $';
fem.version = vrsn;

% Geometry
g1=cylinder3('0.03','0.1','pos',{0,0,0},'axis',{0,0,1},'rot','0');
clear s
s.objs={g1};
s.name={'CYL1'};
s.tags={'g1'};

fem.draw=struct('s',s);
fem.geom=geomcsg(fem);

% Initialize mesh
fem.mesh=meshinit(fem);

% Application mode 1
clear appl
appl.mode.class = 'HeatTransfer';
appl.assignsuffix = '_ht';
clear bnd
bnd.T0 = 'autoclave(t)';
bnd.type = 'T';
bnd.ind = [1,1,1,1,1,1];
appl.bnd = bnd;
clear equ
equ.init = 20;
equ.k = 0.463;
equ.Dts = '1/60';
equ.rho = 1003;
equ.C = 3470;
equ.ind = [1];
appl.equ = equ;
fem.appl{1} = appl;
fem.outform = 'general';

% Multiphysics
fem=multiphysics(fem);

% Extend mesh
fem.xmesh=meshextend(fem);

% Solve problem
fem.sol=femtime(fem, 'symmetric','on', 'solcomp',{'T'}, 'outcomp',{'T'}, 'tlist',[0:0.5:72],
'tout','tlist', 'linsolver','cg', 'prefun','amg'); % Se fija el tiempo de proceso
```

Función autoclave

```
function T=autoclave(t)
global Ta
```

```
%%%%%%%%%SUBIDA DE AUTOCLAVE CON 4 ESCALONES%%%%%%%%%
```

```
tt=[0 17 19 35 37 53 55 72];
TT=[Ta(1) Ta(1) Ta(2) Ta(2) Ta(3) Ta(3) Ta(4) Ta(4)];
T=interp1(tt,TT,t,'linear');
```

```
%%%%%%%%%SUBIDA DE AUTOCLAVE EN RAMPAS SUCESIVAS %%%%%%%%%%
```

```
tt=[0 24 48 72];
TT=[Ta(1) Ta(2) Ta(3) Ta(4)];
T=interp1(tt,TT,t,'linear');
```

```
%%%%%%%%% SUBIDA EXPONENCIAL%%%%%%%%%
```

```
T=(20+8*t).*(t<12)+(116+Ta(1)*(1-exp(-Ta(2)*(t-12))))).*(t>=12).*(t<=72)
```

OPTIMIZACIÓN VRT: TIEMPO TOTAL DE PROCESO

Programa llamador2

%Programa que resuelve la optimización dinámica (control óptimo de temperatura de autoclave).

```
clear all,clc,close all
```

```
opt=optimset('Display','iter','MaxFunEvals',1000);
```

```
n=4 % numero de intervalos de la variable de control
```

```
Tainf=70*ones(n,1); %limite inferior
```

```
Tasup=140*ones(n,1); %limite superior
```

```
Ta0=[80 110 100 50]; % vector de inicialización para temperaturas de autoclave (los tres primeros elementos del vector) y tiempo de proceso (ultimo elemento)
```

```
[Ta,fval,exitflag,output]=fmincon('calculador3D3',Ta0,[],[],[],[],Tainf,Tasup,'nonlcon',opt)
```

Función nonlcon

```
function [restri,restrireq]= nonlcon(x)
```

```
global res
```

```
Ta=x;
```

```
%Subida de autoclave en 3 intervalos
```

```
restri = [x(1)-x(2);x(2)-x(3);x(4)-150;50-x(4)];
```

```
restrireq = [];
```

Función calculador3D3

```
function val=calculador3D3(x)
```

```
global Ta res
```

```
Ta=x;
```

```
fem=femlabvrt
```

```
tp=Ta(4)
```

```
%%%%%%%%% CALCULO DE LA RETENCION SUPERFICIAL DE TIAMINA %%%%%%%%%%
```

```
for i=1:length(fem.sol.tlist)
```

```
    intL_S(i)=postint(fem,'10^((T-121.1)/46.7)','solnum',i,'phase',0,'edim',2,'intorder',4,'geomnum',1,'dl',[1:6]);
```

```

end
S=postint(fem,'1','dl',[1:6],'edim',2,'solnum',1);
int_S=intL_S/S;
int_S_t=trapz(fem.sol.tlist,int_S);

val2=exp(-2.3026/96*int_S_t)

ret=[Csup * -val2]   % Csup * es el valor de retención superficial óptimo bajo procesam. CRT

%%%%%%%%% CALCULO DE LA LETALIDAD ACUMULADA EN EL CENTRO %%%%%%%%%%%

T= postinterp(fem,'T',[0;0;0.05],'solnum',1:length(fem.sol.tlist))
L= postinterp(fem,'10^((T-121.1)/10)',[0;0;0.05],'solnum',1:length(fem.sol.tlist))
F0=trapz(fem.sol.tlist,L)

res= [5-F0]

val=tp+100*max([0 ret].^2)+100* max([0 res].^2)

% Incorporación de funciones de penalización a la función objetivo.

```

Función femlabvrt

```

function fem=femlabvrt
global Ta
% FEMLAB Model M-file
% Generated by FEMLAB 3.0a (FEMLAB 3.0.0.228, $Date: 2004/04/05 18:04:31 $)

fclear fem

tp=Ta(4)
% Femlab version
clear vrsn
vrsn.name = 'FEMLAB 3.0';
vrsn.ext = 'a';
vrsn.major = 0;
vrsn.build = 228;
vrsn.rcs = '$Name: $';
vrsn.date = '$Date: 2004/04/05 18:04:31 $';
fem.version = vrsn;

% Geometry
g1=cylinder3('0.03','0.1','pos',{0,0,0},'axis',{0,0,1},'rot','0');
clear s
s.objs={g1};
s.name={'CYL1'};
s.tags={'g1'};

fem.draw=struct('s',s);

```

```

fem.geom=geomcsg(fem);

% Initialize mesh
fem.mesh=meshinit(fem);

% Application mode 1
clear appl
appl.mode.class = 'HeatTransfer';
appl.assignsuffix = '_ht';
clear bnd
bnd.T0 = 'autoclave(t)';
bnd.type = 'T';
bnd.ind = [1,1,1,1,1,1];
appl.bnd = bnd;
clear equ
equ.init = 20;
equ.k = 0.463;
equ.Dts = '1/60';
equ.rho = 1003;
equ.C = 3470;
equ.ind = [1];
appl.equ = equ;
fem.appl{1} = appl;
fem.outform = 'general';

% Multiphysics
fem=multiphysics(fem);

% Extend mesh
fem.xmesh=meshextend(fem);

% Solve problem
fem.sol=femtime(fem,'symmetric','on','solcomp',{T},'outcomp',{T},'tlist',[0:0.5:tp],'tout',
'tlist','linsolver','cg','prefun','amg');

```

Función autoclave

```

function T=autoclave(t)
global Ta
tp=Ta(4);
tx=tp/3;

%%%%%%%%%%%%% SUBIDA DE AUTOCLAVE CON 3 ESCALONES%%%%%%%%%%%%%

tt=[0 tx-1 tx+1 2*tx-1 2*tx+1 3*tx];
TT=[Ta(1) Ta(1) Ta(2) Ta(2) Ta(3) Ta(3)];
T=interp1(tt,TT,t,'linear');

```

Asimismo se plantearon los demás perfiles de subida de autoclave

OPTIMIZACIÓN CRT: OPTIMIZACIÓN TIAMINA SUPERFICIAL

Programa llamador3

```
%Programa que resuelve la optimización dinámica (control óptimo de temperatura de autoclave).
```

```
%global Ta
```

```
clear all,clc,close all
```

```
opt=optimset('Display','iter','MaxFunEvals',1000);
```

```
[Ta,fval,exitflag,output]=fmincon('calculadorSM',110,[],[],[],[],110,140,[],opt)
```

Función calculadorSM

```
function val=calculadorSM(Ta)
```

```
H=0.072;
```

```
R=0.028
```

```
tp=0.0865*Ta*Ta-22.977*Ta+1527.9    % Curva de isoletalidad para envase 56x72
```

```
S=2*pi*R*(H/2)+pi*R*R
```

```
%%%%%%%% FUNCION OBJETIVO RETENCION SUPERFICIAL DE TIAMINA%%%%%%%%
```

```
C=10^((Ta-121.1)/46.7)
```

```
int_S=C/S;
```

```
int_S_t=tp*C
```

```
val=-exp(-2.3026/96*int_S_t)
```

OPTIMIZACIÓN VRT: OPTIMIZACIÓN TIAMINA SUPERFICIAL

Programa llamador4

%Programa que resuelve la optimización dinámica (control óptimo de temperatura de autoclave para sistemas mixtos).

```
clear all,clc,close all
```

```
opt=optimset('Display','iter','MaxFunEvals',1000);
```

```
n=6      % numero de intervalos de la variable de control
```

```
Tainf=110*ones(n,1);    %limite inferior
```

```
Tasup=140*ones(n,1);    %limite superior
```

```
Ta0=[120 125 127 130 135 140];
```

```
[Ta,fval,exitflag,output]=fmincon('calculadorSM',Ta0,[],[],[],[],Tainf,Tasup,'nonlcon',opt)
```

Función nonlcon

```
function [restri,restrireq]= nonlcon(x)
```

```
Ta=x;
```

```
restri = [x(1)-x(2);x(2)-x(3);x(3)-x(4);x(4)-x(5);x(5)-x(6)];
```

```
restrireq = [];
```

Función calculadorSM

```
function val=calculadorSM(Ta)
```

```
M=xlsread('coefmejillones');
```

```
Q=[M(:,2)];
```

```
Tini=20;
```

```
Text1=Ta(1);
```

```
Text2=Ta(2);
```

```
Text3=Ta(3);
```

```
Text4=Ta(4);
```

```
Text5=Ta(5);
```

```
Text6=Ta(6);
```

```
Textfinal=Ta(6);
```

```
for k=1:4
```

```
    B(k)=(Text1-Tini)/(Textfinal-Tini)
```

```
end
```

```
for k=4:7
```

```
    B(k)=(Text2-Tini)/(Textfinal-Tini)
```

```

end
for k=7:10
    B(k)=(Text3-Tini)/(Textfinal-Tini)
end
for k=10:13
    B(k)=(Text4-Tini)/(Textfinal-Tini)
end
for k=13:16
    B(k)=(Text5-Tini)/(Textfinal-Tini)
end
for k=16:19
    B(k)=(Text6-Tini)/(Textfinal-Tini)
End

```

%%%%%%%% CALCULO DE LA TEMPERATURA EN EL CENTRO TÉRMICO %%%%%%%%%%

```

C=conv(Q,B);
C=C(1:19);
Tenv=C*(Textfinal-Tini)+Tini

```

%%%%%%%%% CALCULO DE LA LETALIDAD ACUMULADA %%%%%%%%%%

```

t=[0:1:18]
T=Tenv
L=10.^((T-121.1)/10)
F0=trapz(t,L)

```

%%%%%%%%% %%%%%%%%%%

```

R=0.0365;
H=0.113;

```

```

S=2*pi*R*(H/2)+pi*R*R
tp=18;

```

```

for i=1:4
    Conc(i)=10^((Text1-121.1)/46.7)
end
for i=4:7
    Conc(i)=10^((Text2-121.1)/46.7)
end
for i=7:10
    Conc(i)=10^((Text3-121.1)/46.7)
end
for i=10:13
    Conc(i)=10^((Text4-121.1)/46.7)
end
for i=13:16
    Conc(i)=10^((Text5-121.1)/46.7)
end

```

```
for i=16:19
Conc(i)=10^((Text6-121.1)/46.7)
end
int_S=Conc/S;

int_S_t=(tp/6)*Conc(1)+(tp/6)*Conc(5)+(tp/6)*Conc(8)+(tp/6)*Conc(11)+(tp/6)*Conc(14)+(tp/6)*Conc(17)

%%%%%%%%% FUNCION OBJETIVO RETENCION SUPERFICIAL DE TIAMINA %%%%%%%%%%%

val2=-exp(-2.3026/96*int_S_t)

res= [3-F0]

val=val2+10*max([0 res].^2)      % Función objetivo
```

