

MODELADO DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR Y VARIACIÓN DE ÍNDICES DE CALIDAD EN MERMELADAS DURANTE EL PROCESO DE PASTEURIZACIÓN

Alejandro R. Lespinard, Ruth R. Bambicha, Miriam E. Agnelli, Rodolfo H. Mascheroni

*Centro de Investigación y Desarrollo en Criotecnología de Alimentos (CIDCA), CONICET –
Facultad de Ciencias Exactas Universidad Nacional de La Plata (UNLP), Calle 47 y 116 S/Nº, 1900
La Plata, Buenos Aires, Argentina, alespinard@cidca.org.ar <http://www.cidca.org.ar>*

Palabras clave: Simulación, Optimización, Esterilización, Mermeladas, Frascos.

Resumen. Para asegurar la inocuidad microbiológica en la producción de alimentos envasados es necesario conocer la dinámica del calentamiento del punto más frío de éstos durante su tratamiento térmico. Si dicho tratamiento es excesivo, el alimento pierde valor nutritivo y puede adquirir características indeseables en su aroma, textura y color. En caso contrario, se pueden desarrollar microorganismos patógenos poniendo en riesgo la salud del consumidor. Para tal fin la simulación numérica resulta ser una valiosa herramienta, la cual permite determinar la distribución y evolución de las temperaturas en el producto, minimizando los procedimientos experimentales, reduciendo los costos y tiempos de desarrollo. El presente trabajo tiene por objetivos el desarrollo de un modelo de simulación que describa la transferencia de calor y la evaluación de las pérdidas de calidad durante los procesos de pasteurización y enfriamiento de mermeladas, a los fines de optimizar dicho proceso. Para esto se implementó un modelo de transferencia conductiva del calor, con temperatura externa variable, el cual fue resuelto por medio del método de elementos finitos. Para cuantificar las pérdidas en los atributos nutricionales y sensoriales, las temperaturas obtenidas por simulación fueron acopladas a un modelo cinético de variación de calidad obteniéndose así el valor de cocción volumétrico y superficial. Para validar dichos modelos de simulación se prepararon mermeladas de kiwi envasadas en frascos de diferentes volúmenes (660, 360 y 240 cm³) y se midieron las temperaturas mediante termocuplas tipo T en el centro térmico del producto durante el proceso de pasteurización y enfriamiento. A su vez las variaciones de índices calidad en el producto fueron estimadas por medio de los parámetros color y textura. Para la representación del color en el espacio tridimensional, se utilizó el sistema CIE, conformado por las coordenadas cromáticas L^* , a^* y b^* , que fueron cuantificadas mediante la utilización de un colorímetro. Las mismas fueron empleadas para determinar el cambio total de color (ΔE). Por su parte la textura fue determinada mediante el parámetro firmeza obtenido experimentalmente por medio de un texturómetro. Finalmente, se diseñaron dos procesos térmicos equivalentes y se compararon las pérdidas de calidad simuladas, a los fines de optimizar el mismo. Las temperaturas obtenidas por simulación para el punto más frío fueron validadas exitosamente con los datos experimentales, encontrándose diferencias medias relativas inferiores al 6% en todos los casos. Tanto las variaciones encontradas para el color como para la textura se correspondieron con las determinadas para el valor de cocción, lo cual valida también la implementación de dicha cinética a los efectos de evaluar modificaciones en la calidad del producto. El empleo del modelo desarrollado permitió predecir la evolución de las temperaturas en alimentos sólidos envasados en recipientes de vidrio para diferentes procesos térmicos, y por consiguiente, el diseño y optimización de los mismos.

1 INTRODUCCIÓN

Los kiwis son frutas altamente perecederas, por lo que el procesamiento y conservación de los mismos resulta de gran importancia comercial. Para esto la producción de mermeladas y la aplicación posterior de un proceso térmico, como ser la pasteurización, es una alternativa para ampliar su vida útil y tiempo de almacenamiento. No obstante durante dicho proceso este alimento pierde valor nutritivo y puede adquirir características indeseables en su aroma, textura y color. Si bien algunos avances tecnológicos como el envasado aséptico y el procesamiento de alimentos envasados en autoclaves rotativas han mejorado sustancialmente la calidad del producto y disminuido el consumo energético, estos beneficios no han sido observados en alimentos conductivos (Durance, 1997). En alimentos sólidos, existe un calentamiento más intenso en las zonas cercanas a las paredes de los envases que los contienen, obteniéndose así un producto con un grado de cocción no uniforme. Consecuentemente las pérdidas de calidad son mayores en dichas áreas, siendo estas aún más elevadas en productos envasados en recipientes de gran diámetro (Holdsworth, 1997). Por lo anterior resulta de gran interés el diseño y optimización del tratamiento térmico de productos sólidos envasados a los fines de minimizar dichas pérdidas. Para esto deben determinarse los cambios en los atributos de calidad y en el contenido microbiológico durante el tratamiento térmico, los cuales pueden ser cuantificados mediante los parámetros *C-valor* (valor de cocción) y *F-valor* (valor de esterilidad), respectivamente. Para evaluar ambas cinéticas de destrucción debe conocerse la evolución térmica del producto en todo su dominio. En este sentido el modelado y simulación de dicho proceso ha resultado ser una valiosa herramienta, la cual permite determinar la distribución y evolución de las temperaturas en el producto, minimizando los procedimientos experimentales, reduciendo los costos y tiempos de desarrollo. Este trabajo tiene por objetivo desarrollar un modelo de simulación que permita predecir la evolución de la temperatura y variación de índices de calidad en mermeladas de kiwi envasadas en frascos de diferentes tamaños, a los fines de optimizar el proceso y mejorar la calidad final del producto.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Preparación de las muestras

Para la elaboración de la mermelada se emplearon kiwis frescos (*Actinidia Chinensis P.*) comprados en el mercado local, los cuales fueron inmediatamente procesados. Los mismos fueron pelados, cortados y triturados con una procesadora y luego sometidos a un proceso de cocción hasta lograr una disminución de un tercio de su volumen inicial. Se adicionó azúcar y se cocinó hasta alcanzar la consistencia deseada. Finalmente se agregó pectina de alto metoxilo como agente gelificante.

Posteriormente la mermelada fue colocada en recipientes cilíndricos de vidrio, de diferentes volúmenes y dimensiones características, las cuales son indicadas en la figura 1.

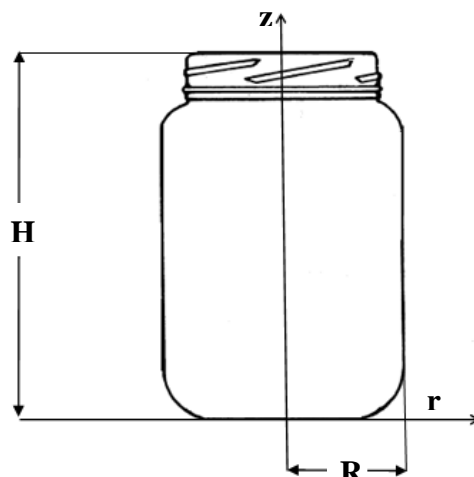


Figura 1: Diagrama de la sección r-z de un recipiente cilíndrico de vidrio mostrando sus dimensiones características.

Los volúmenes y dimensiones de los diferentes envases empleados en este estudio son detallados a continuación en Tabla 1.

Volumen (cm ³)	H (cm)	R (cm)	H/R
660	13.86	4.50	1.54
360	12.00	3.66	1.64
240*	7.70	3.80	1.01
240**	13.37	2.85	2.34

Tabla 1: Dimensiones de los envases empleados en el modelo de simulación.

2.2 Procesamiento Térmico

El procesamiento térmico se llevó a cabo en un autoclave vertical tipo batch construido en acero inoxidable. Este consistió en una etapa inicial de calentamiento de aproximadamente 30 minutos donde la temperatura del autoclave (T_{ext}) aumenta de una temperatura inicial igual a la temperatura ambiente hasta una temperatura final de 118°C. Esta etapa es seguida de un segundo período durante el cual se mantiene dicha temperatura. Finalmente la conserva fue sometida a una etapa de enfriamiento, donde se libera la sobrepresión del autoclave por apertura de la espita y su temperatura desciende a 100°C. Luego la conserva es sumergida en un baño de agua termostatzado a 50°C para acelerar el proceso de enfriamiento del producto. El baño de enfriamiento termostatzado se encuentra a una temperatura no menor de 50°C a los efectos de amenguar el salto térmico y por consiguiente evitar la ruptura del envase.

2.3 Modelo de simulación

La transferencia de calor en alimentos sólidos o de alta viscosidad se produce por conducción y esta puede ser descripta por la segunda ley de Fourier. Para alimentos envasados en recipientes cilíndricos la ecuación de transferencia de energía se asume de la siguiente forma (ecuación 1) (Bird *et al.*, 1976):

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

Condiciones iniciales

Como condición inicial una temperatura uniforme T_0 fue considerada en todo el dominio de simulación:

$$T(r, z, 0) = T_0(r, z) \quad \text{para } t=0, 0 \leq r \leq R \text{ y } 0 \leq z \leq H \quad (2)$$

Condiciones de contorno

$$T = T_w(t) \quad \text{para } r=R \text{ y } 0 \leq z \leq H \quad (3)$$

Como condición de contorno se asumió una condición de contorno esencial, la misma presenta un comportamiento variable con el tiempo, característico de autoclaves de baja capacidad. Las propiedades termofísicas de la mermelada fueron consideradas constantes y las mismas fueron calculadas a partir de modelos teóricos, considerando un porcentaje de humedad de 24.24% (Tabla 2).

Propiedad	Valor/expresión	Unidades	Fuente
Densidad (ρ)	1200	kg m ⁻³	
Calor específico (C_p)	2279.93	J kg ⁻¹ K ⁻¹	Riedel (1969)
Conductividad térmica (k)	0.337	W m ⁻¹ K ⁻¹	Fikiin (1974)

Tabla 2: Propiedades de mermelada de kiwi (24.24% de humedad) empleadas en el modelo de simulación.

Las ecuaciones diferenciales parciales del modelo de simulación fueron resueltas por medio del método de elementos finitos empleando el software COMSOL Multiphysics versión 3.2 (COMSOL AB, 2005).

2.4 Validación del modelo de simulación

Para validar el modelo se midió la temperatura, en la superficie del frasco y en el centro geométrico de las conservas, cada 15s con termocuplas tipo T – cobre – constantan- (Cu-CuNi). Las historias térmicas fueron medidas y registradas mediante un sistema de adquisición de datos multicanal (KEITHLEY modelo AS-TC, USA). El modelo de predicción fue validado comparando las temperaturas simuladas con las medidas experimentalmente. Para realizar dichas comparaciones se calcularon las diferencias relativas porcentuales medias, definida por la ecuación (4):

$$R = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{|T_s - T_e|}{T_e} 100 (\%) \quad (4)$$

2.5 Estimación del tiempo de proceso

Los procesos térmicos fueron diseñados determinando el tiempo de proceso estrictamente necesario para alcanzar una letalidad acumulada ($F^{8.3}_{93.3}$) de 10 minutos (ecuación 5), recomendado por Townsend, *et al* (1954), para productos con pH de 4.0 a 4.5.

$$F = \int_0^t 10^{(T-93.3)/8.3} dt \quad (5)$$

Para este fin se realizaron simulaciones modificando el tiempo, en el cual la temperatura externa se mantiene constante durante la etapa de calentamiento del proceso, hasta alcanzar el valor de letalidad indicado anteriormente.

Por otra parte, a los fines de optimizar el proceso se diseñaron, de la misma forma que los anteriores, tratamientos térmicos donde la temperatura externa máxima se alcanza instantáneamente al iniciar el proceso. De esta manera se diseñaron dos tipos procesos térmicos equivalentes (misma letalidad alcanzada), uno con perfil de temperatura externa variable con el tiempo y otro con temperatura externa constante, denominados procesos VRT y CRT, respectivamente.

2.6 Evaluación de índices de calidad

2.6.1 Valor de cocción

Los valores de cocción medio (C_{medio}) y superficial (C_{sup}) fueron determinados por medio de las ecuaciones 6 y 7 respectivamente. Se consideró una temperatura de referencia (T_{ref}) de 100°C y un valor z_c de 33°C. El valor de z_c fue tomado sobre la base de un promedio de los valores correspondientes a la cinética de deterioro tiamina, clorofila y ácido ascórbico (Ohlsson, 1980).

$$C_{medio} = \frac{I}{V} \int_0^{t_f} \int_{\Omega} 10^{(T - T_{ref})/z_c} d\Omega dt \quad (6)$$

$$C_{sup} = \frac{I}{S} \int_0^{t_f} \int_{\Gamma} 10^{(T - T_{ref})/z_c} d\Gamma dt \quad (7)$$

2.6.2 Textura

El parámetro textural firmeza fue medido con un analizador de textura TA-XT2i (Stable Micro Systems Ltd, Godalming, Surrey, UK), los datos fueron adquiridos y procesados con el software Texture Expert Exceed. La muestra fue sometida a un ensayo de compresión, empleando una sonda SMS P/25. Los análisis se llevaron a cabo con los siguientes parámetros instrumentales: velocidad de pre-ensayo 3.0 mm/s; velocidad de ensayo 1.0 mm/s; velocidad de post-ensayo 10 mm/s, y velocidad de adquisición de datos 200 pps. Cada valor reportado corresponde a la media de 10 mediciones, para la muestra procesada como la sin procesar.

2.6.3 Color

La evaluación del color se llevó a cabo mediante la utilización de un colorímetro Minolta CR-300 (Osaka, Japan), por medio de las coordenadas cromáticas L^* , a^* y b^* de la escala CIE Lab (CIE, 1978). El color se evaluó en la superficie y en todo el volumen del producto. El primero se determinó colocando el colorímetro en varios puntos sobre la superficie del frasco, para el segundo se mezcló el producto y se prepararon dos muestras de 3cm de espesor, las cuales fueron colocadas en cápsula de Petri. Los parámetros L^* , a^* y b^* fueron determinados para diez muestras antes y después de ser procesadas por cada tratamiento. Para evaluar efecto del proceso de pasteurización en las mermeladas, se determinó el cambio total de color, mediante la ecuación 8:

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}} \quad (8)$$

donde ΔL^* , Δa^* y Δb^* , son las diferencias entre los valores de L^* , a^* y b^* de la mermelada procesada y sin procesar.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Perfiles de temperatura - validación del modelo de simulación

En la figura 2 se muestra la evolución térmica, experimental y predicha por el modelo de simulación, del centro geométrico de la mermelada de kiwi envasada en un recipiente de $240 \times \text{cm}^3$, para un proceso de esterilización VRT. En dicha figura también se presentan la evolución de la temperatura del medio de calentamiento (autoclave), de enfriamiento (baño termostatzado) y de la pared del frasco (condición de contorno). La marcada diferencia entre la temperatura de la pared del frasco y la del autoclave, en la etapa inicial del proceso, podría deberse al alto contenido de aire en el medio de calentamiento. A medida que el calentamiento progresa se va generando un mayor contenido de vapor, en el interior del autoclave, lo que favorece la transferencia de calor por convección disminuyendo así dichas diferencias de temperaturas. Aproximadamente a los 40 minutos se detiene el calentamiento, apagándose la fuente de calor (quemador), lo que produce que el medio calefactor disminuya su presión y temperatura hasta llegar a 1 atmosfera y 100°C , respectivamente. En esta instancia, se realizó la apertura del autoclave y se transfirieron los envases hacia el baño de enfriamiento.

En la figura 2 también se aprecia notablemente la gran inercia térmica, característica de este tipo de producto y de recipiente, elevándose la temperatura del centro térmico por un largo período aún durante la etapa de enfriamiento. Se puede observar que la mayor inactivación microbiana (letalidad acumulada) se produce durante la etapa de enfriamiento, contrariamente a lo que ocurre en productos enlatados.

La buena concordancia de las temperaturas simuladas con las medidas experimentalmente comprueba la validez del modelo de simulación propuesto para este sistema. En todos los volúmenes de envases estudiados se obtuvieron comportamientos térmicos similares, con diferencias relativas porcentuales medias entre las temperaturas predichas y experimentales inferiores al 10%.

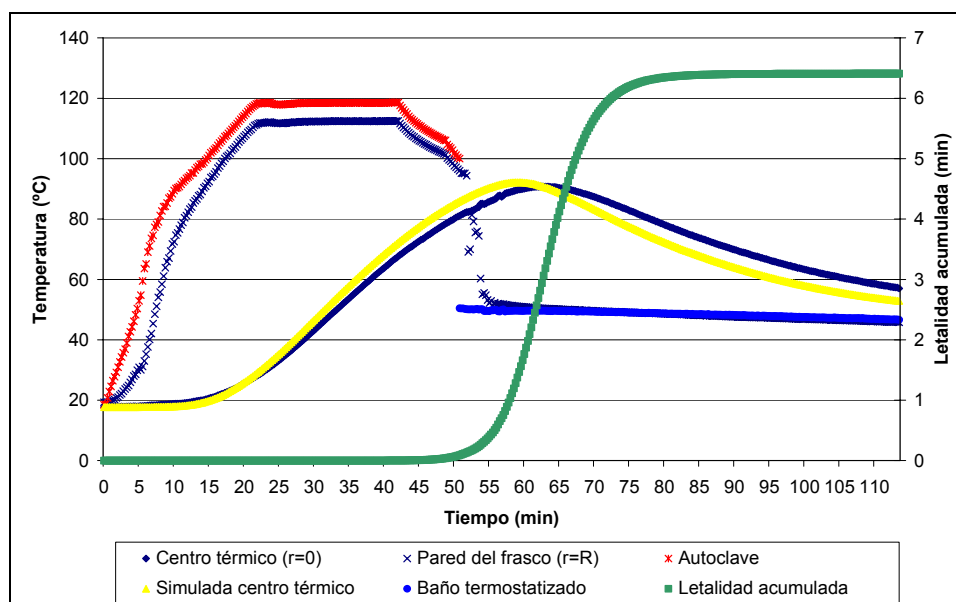


Figura 2: Evolución térmica experimental y predicha de mermelada de kiwi envasada en un frasco de $240 \times \text{cm}^3$.

En la figura 3 se presentan los perfiles de temperatura del producto a los 1500s de iniciado el proceso térmico (VRT), para los distintos envases analizados en este trabajo. En dicha figura se observa que el punto más frío del producto prácticamente coincide con el centro geométrico lo cual es una característica de alimentos puramente conductivos. No obstante dicho punto se encuentra algo por debajo del geométrico, lo que probablemente se deba a la asimetría de conductividades térmicas entre el fondo del recipiente y la tapa metálica. A su vez se puede observar un calentamiento más lento y menos uniforme (mayor calentamiento en la superficie) en aquellos envases de mayor volumen, mientras que para los de igual volumen (ver figura 3c y 3d) el calentamiento fue mayor para el envase de menor diámetro y mayor altura (240^{**}cm^3).

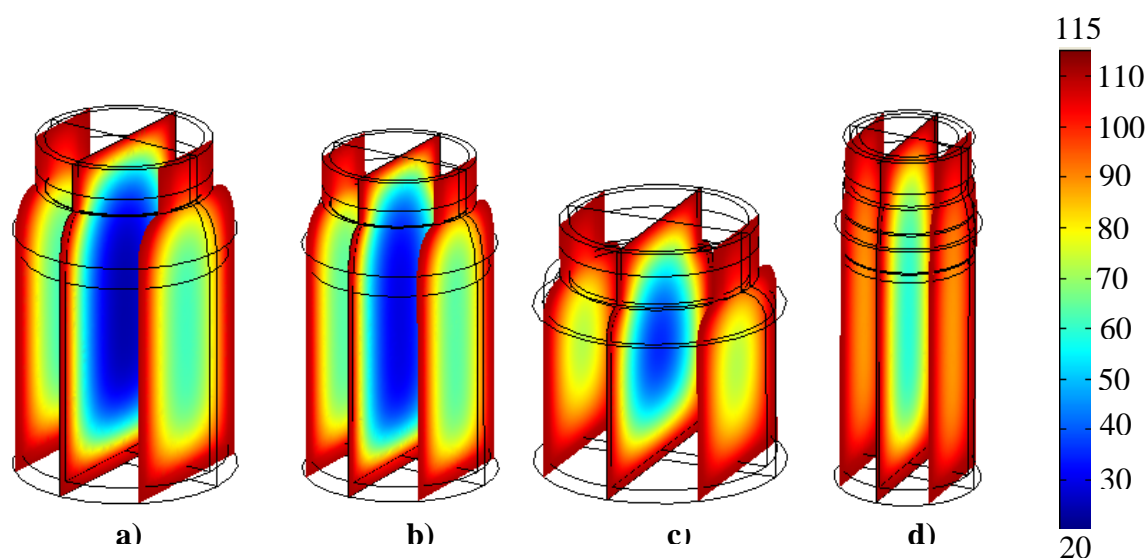


Figura 3: Distribución de temperaturas a los 1500s de iniciado el calentamiento durante el procesamiento térmico VRT de mermeladas de kiwi envasadas en frascos de: a) 660 cm^3 , b) 360 cm^3 , c) 240^* cm^3 y d) 240^{**} cm^3 .

3.2 Variación de índices de calidad

En la figura 4 se presenta el efecto del tratamiento térmico sobre las propiedades texturales de la mermelada de kiwi mediante el parámetro firmeza para el producto sin procesar (testigo) y procesado para los diferentes tamaños de envase para el proceso VRT.

En todos los casos se observó un aumento de la firmeza respecto de la mermelada sin pasteurizar, siendo este aumento aún mayor para aquellas mermeladas envasadas en frascos de mayor volumen.

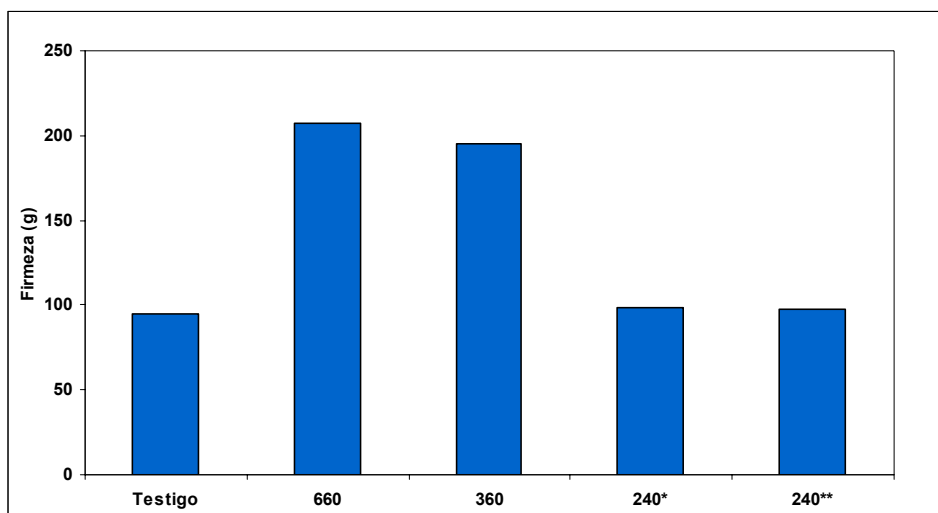


Figura 4: Valores de firmeza para los distintos tamaños de envases luego del procesamiento térmico.

En la figura 5 se muestra el cambio total de color (ΔE) para los diferentes tamaños de envases analizados en este trabajo. En la misma se puede apreciar la mayor variación de color tanto global como superficial para los envases de mayor diámetro (660 y 240*). Por otra parte la diferencia entre ambos parámetros también resultó mayor para dichos tamaños de frasco, lo que se corresponde con la mayor diferencia de temperatura entre la pared y el centro mostrada en la figura 3.

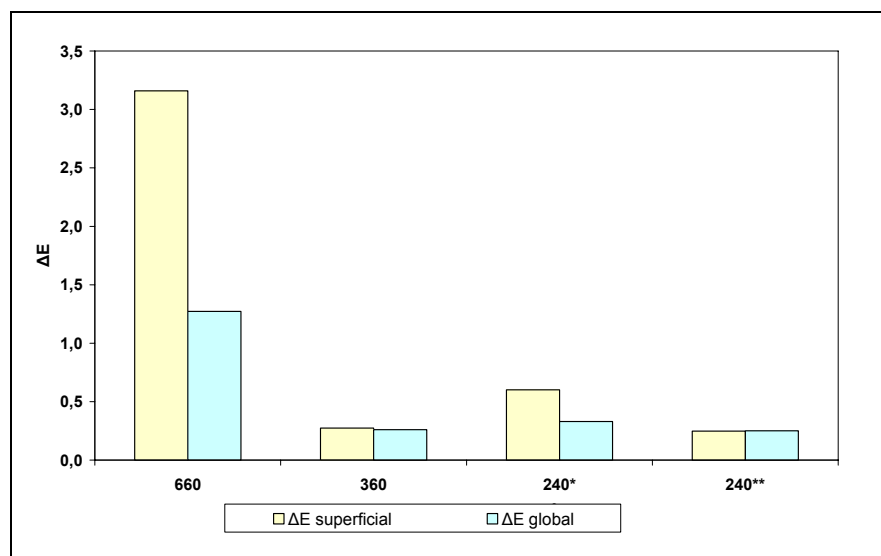


Figura 5: Diferencia total de color para los distintos tamaños de envases luego del procesamiento térmico.

3.3 Análisis de procesos térmicos equivalentes - optimización

En la figura 6 se muestra las temperaturas predichas para el centro térmico de una mermelada envasada en el recipiente de 240 ** cm³ para los procesos VRT y CRT, en esta puede observarse el menor retardo y por consiguiente la mayor velocidad de calentamiento del producto sometido al proceso CRT alcanzando una letalidad acumulada de 10 minutos aproximadamente 10 minutos antes que el proceso VTR.

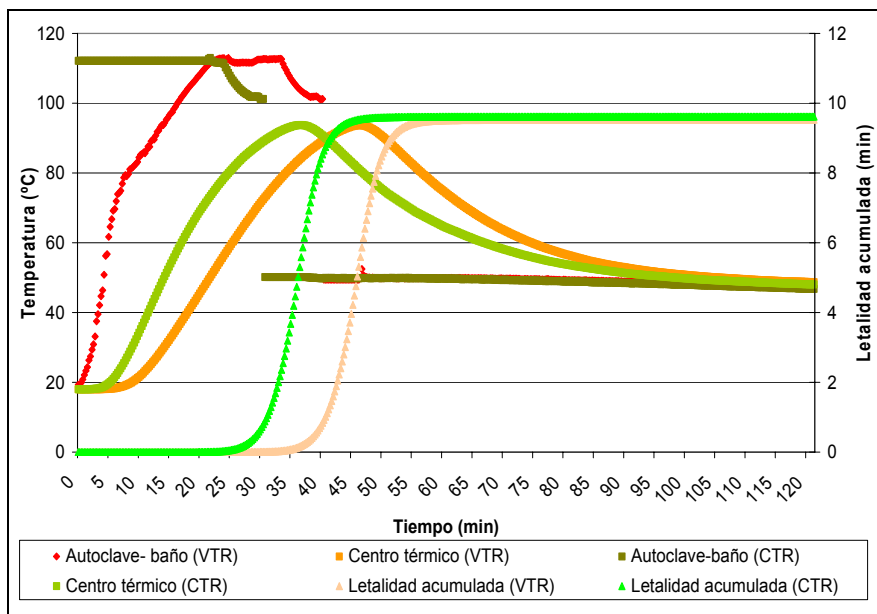


Figura 6: Evolución de la temperatura del centro térmico del producto envasado en un recipiente de 240** cm³ para dos tratamientos térmicos: a) perfil del autoclave variable con el tiempo (VRT), b) perfil del autoclave constante (CRT).

La figura 7 muestra la distribución de temperaturas en mermeladas de kiwi envasadas en frascos de 360 cm³, a los 1200s de iniciado el calentamiento, en todo el dominio de simulación para ambos tipos de procesos (VRT y CRT). Si bien con el proceso CRT se acortan los tiempos de proceso y por ende el consumo de energía, este produce un calentamiento menos uniforme del producto, produciendo una sobre cocción en la superficie del mismo. Similares comportamientos fueron encontrados para las restantes dimensiones y volúmenes de envases.

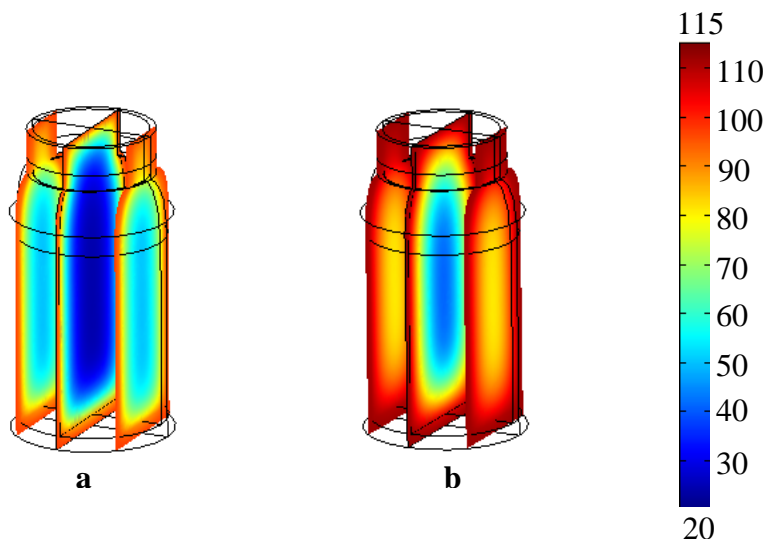


Figura 7: Distribución de temperaturas en mermeladas de kiwi envasadas en frascos de 360 cm³, a los 1200s de iniciado el calentamiento, para dos tratamientos térmicos diferentes: a) VRT y b) CRT.

En la figura 8 se presentan los valores de cocción medio y superficial calculados para los diferentes tamaños de envases y para los dos tipos de procesos térmicos equivalentes aplicados (VRT y CRT). En dicha figura se puede observar que la diferencia entre el valor de

cocción medio y el superficial son mayores para los procesos CRT. Esta mayor cocción del producto en la superficie se traduce en un mayor deterioro de la apariencia del producto, siendo este un parámetro de gran importancia en productos envasados en recipientes de vidrio. Por otra parte los valores de cocción medio y superficial resultaron inferiores cuando se aplicaron tratamientos VRT, para todos los tamaños de envases. Los valores de cocción aumentaron con el volumen del envase, mientras que para los de igual volumen (240 cm^3) este parámetro de calidad fue mayor para el envase de mayor diámetro y menor altura (240^* cm^3).

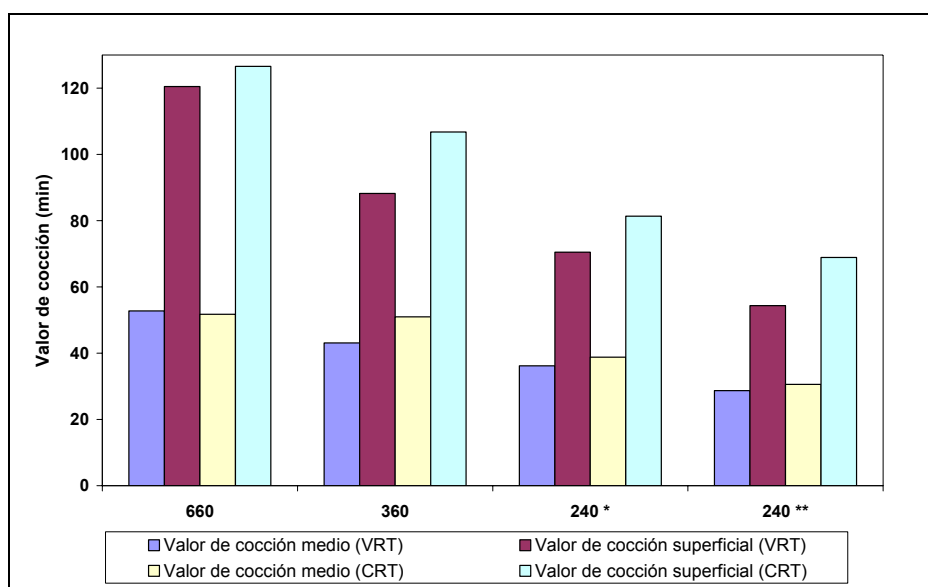


Figura 8: Valores de cocción medio y superficial obtenidos para los diferentes tamaños de envases y procesos térmicos aplicados.

Los valores de cocción obtenidos para el proceso VRT se correspondieron con los parámetros de textura y color medidos experimentalmente, lo que valida la implementación de los mismos en la optimización del proceso (ver figuras 4 y 5, respectivamente).

4 CONCLUSIONES

Se simuló por medio del método de elementos finitos los perfiles de temperatura durante el calentamiento conductivo de un alimento sólido (mermelada de kiwi) envasado en frascos de vidrio, de distintos volúmenes y dimensiones. Las temperaturas predichas fueron validadas exitosamente con los datos experimentales. Los parámetros de calidad, determinados a partir de las temperaturas predichas, resultaron en concordancia con los obtenidos experimentalmente, lo que demostró la validez de la aplicación de los modelos cinéticos de pérdidas de calidad.

El empleo del modelo desarrollado permite predecir la evolución de las temperaturas en alimentos sólidos envasados en recipientes de vidrio para procesos térmicos equivalentes, y por consiguiente, el diseño y optimización de los mismos.

5 REFERENCIAS

- Bird, R.B., Stewart, W.Y., Lightfoot, E.N. *Transport Phenomena*. John Wiley and Sons, New York. 1976.
- COMSOL AB. *COMSOL Multiphysics User's Guide*. Version: September 2005, COMSOL 3.2.

- Durance, T.D. Improving canned food quality with variable retort temperature processes. *Trends in Food Science & Technology* 8: 113-118, 1997.
- Fikiin, A. Sur les paramètres thermophysiques des produits alimentaires congelés. In *Current studies on the thermophysical properties of foodstuffs – Proceedings of the Meetings of IIR Commissions B1, C1 and C2 in Bressanone (Italy)* (pp. 173–181). Refrigeration Science and Technology, IIR-Paris. 1974.
- Holdsworth, S.D. *Thermal processing of packaged foods*. London, Ed. Chapman Hall, 1997.
- Ohlsson, T. Optimal sterilization temperatures for flat containers. *Journal of Food Science*, 45: 848–858, 1980.
- Riedel, L. Measurements of thermal diffusivity on foodstuffs rich in water. *Kaltetechnik*, 21: 315, 1969.
- Townsend, C., Somers, I., Lamb, F. y Olson, N. A Laboratory Manual for the Canning Industry, National Food Processors' Assoc., Washington, DC. 1954.