
CONTROL POR ORDENADOR DEL PROCESO DE ESTERILIZACION DE CONSERVAS VEGETALES. 2.- TRANSMISION DE CALOR POR CONVECCION

P. VIRSEDA, J. ABRIL y J. MOURE

Univ. Pública de Navarra, E.T.S.I. Agrónomos, Depto. de Tecnología de Alimentos, Campus Arrosadía s/n, 31006 Pamplona - España

COMPUTERIZED CONTROL OF THE STERILIZATION PROCESS OF CANNED VEGETABLES. 2. HEAT TRANSFER BY CONVECTION

ABSTRACT

A mathematical model for the simulation of the heat transfer by convection in sterilization processes of canned foods, is developed and discussed. The mathematical model was incorporated into a computer program specially designed for the study (Part I of this series). To develop the model, the process was divided into three sections, according to the temperature of the heating element. Results were validated using experimental data of water, green beans and fresh garlic stored in glass jars. Deviations of the order of 1% for water and 2% for beans and garlic were found. The model showed to be appropriate for the representation of this kind of processes.

Keywords: heat transfer, heat convection, sterilization, numerical methods, canned vegetables

RESUMEN

Se desarrolla y discute un modelo matemático para la simulación del proceso de transferencia de calor por convección en la esterilización de vegetales enlatados. El modelo matemático fue incorporado a un programa computacional especialmente diseñado para el estudio (Parte I de esta serie). Para desarrollar el modelo se dividió el proceso en tres secciones, de acuerdo a la temperatura del medio calefactor. Los resultados fueron validados usando datos experimentales en los que se usó agua, judías verdes y ajos tiernos, almacenados en jarros de vidrio. Se encontraron desviaciones del orden de 1% para el agua y de 2% para las judías y los ajos. El modelo ha mostrado ser apropiado para la representación de este tipo de procesos.

INTRODUCCIÓN

La transferencia de calor durante los tratamientos térmicos de alimentos, como la esterilización de conservas alimentarias, tiene lugar por distintos mecanismos. En los productos sólidos (pates, carne, etc.) y en los líquidos de alta viscosidad (tomate triturado) el mecanismo de transferencia predominante es el de conducción; mientras que en los productos líquidos de baja viscosidad el mecanismo de transferencia predominante es el de convección.

En el caso de muchas conservas vegetales, en las que un producto sólido se encuentra en el seno de un líquido (salmuera), en el estudio de la transmisión de calor hay que considerar primero la transmisión de calor por convección en la salmuera y posteriormente la transmisión de calor por conducción desde la salmuera al producto.

La transmisión de calor en productos por conducción ha sido estudiada por los mismos autores, desarrollándose un algoritmo de cálculo que permite el control por ordenador del proceso de esterilización en función de las características del producto y del autoclave (Moure et al., 1997).

Para el caso de sólidos inmersos en salmuera se han desarrollado algoritmos de simulación como los establecidos para conservas de champiñón (Akterian, 1995) o para las conservas de espárragos (Virseda, y Abril, 1997) ambos basados en esquemas de diferencias finitas.

Para el estudio térmico en conservas de productos líquidos se han desarrollado estudios semi-empíricos o numéricos basados en la utilización de los esquemas aplicados a la transmisión de calor por conducción (Datta, A.K. y Teixeira, A.A., 1987; Kumar et al., 1990)

En este trabajo se propone la determinación de las ecuaciones que se aplicarán al algoritmo ya desarrollado para el caso de transmisión de calor por conducción (Moure et al., 1997), y que permitan determinar, en el caso de transmisión de calor por convección, directamente la evolución de la temperatura en el interior del alimento en función del calor específico del producto, del tamaño del recipiente y de las características del autoclave. El modelo propuesto podrá ser aplicado tanto a conservas de productos líquidos como a conservas constituidas por sólidos en el seno de un líquido, siempre que el espesor del sólido sea suficientemente fino para que el error producido, al no considerar la transmisión de calor por conducción, no sea significativo.

DESARROLLO MATEMÁTICO

Para determinar el perfil de temperaturas en el producto debemos conocer cuál es la función que relaciona el tiempo de proceso con la temperatura alcanzada por su centro térmico. El balance térmico, cuando el mecanismo de transmisión de calor es el de convección, entre el producto y el autoclave podrá escribirse como:

$$A \cdot h (T_R - T) dt = m \cdot c_e dT \quad (1)$$

donde:

A = Área de transferencia del calor (m^2)

h = Coeficiente de convección (W/m^2K)

T_R = Temperatura de recinto (autoclave)

T = Temperatura del producto

t = Tiempo de proceso

c_e = Calor específico del producto (J/kgK)

m = Masa del producto (kg)

Denominando $E = m \cdot c_e / A \cdot h$ (Bimbenet y Michiels, 1974) y sustituyendo en (1) la ecuación de transferencia de calor por convección vendrá determinada por:

$$\frac{1}{E} dt = \frac{1}{(T_R - T)} dT \quad (2)$$

siendo el coeficiente de inercia térmica E , el retraso, en segundos, presentado por la curva de calentamiento del producto con respecto a la del autoclave. Este coeficiente depende de las características del producto: calor específico y densidad; de las dimensiones del envase: radio y altura y del coeficiente de convección obtenido por el sistema de calefacción.

Para la determinación de las ecuaciones de cálculo de la operación de esterilización se distinguen tres tramos en función de la temperatura del medio calefactor: i) tramo de temperatura creciente; ii) tramo de temperatura constante; y iii) tramo de temperatura decreciente.

1.-Tramo de temperatura creciente

En los autoclaves industriales la temperatura del medio calefactor es una función lineal del tiempo de proceso:

$$T_R = T_{R_0} + b \cdot t \quad (3)$$

siendo:

b = pendiente de recta de calentamiento

$T_{R_{01}}$ = Temperatura inicial del autoclave.

Si se sustituye en la ecuación (2) T_R por su valor en este tramo, se tiene:

$$\frac{1}{E} dt = \frac{dT}{T_{R_{01}} + b \cdot t - T} \quad (4)$$

La resolución de esta ecuación diferencial se realizará mediante la utilización de $e^{\frac{t}{E}}$ como factor de integración.

Integrando y operando se obtiene la ecuación que nos va a permitir determinar la temperatura del producto en su fase de calentamiento cuando el mecanismo de transferencia de calor predominante sea la convección (Bimbenet y Michiels, 1974):

$$T = T_R - b \cdot E - \left(T_{R_{01}} - T_{01} - b \cdot E \right) \cdot e^{-\frac{t}{E}} \quad (5)$$

siendo T_{01} la temperatura inicial del producto.

2.-Tramo de temperatura constante

Al ser constante la temperatura del medio calefactor, podemos integrar la ecuación (2) directamente obteniendo que la temperatura del producto en este tramo estará definida por la expresión (Bimbenet, J.J y Michiels, 1974):

$$T = T_R - \left((T_R - T_{02}) \left(\text{EXP} \left(-\frac{t}{E} \right) \right) \right) \quad (6)$$

donde T_{02} es la temperatura a la que se encuentra el producto al inicio del tramo.

3.-Tramo de temperatura decreciente.

En este tercer tramo la temperatura del medio calefactor tampoco es constante. Si la refrigeración del autoclave se efectúa por medio de un cambiador de calor contra agua fría, la temperatura del recinto será una función exponencial del tiempo de proceso, de la temperatura del agua fría y de la temperatura de régimen del autoclave a la que se comienza este tramo

$$T_R = T_a + \frac{T_{R_{03}} - T_a}{e^{\frac{t}{E}}} \quad (7)$$

siendo:

$T_{R_{03}}$ = temperatura de régimen del autoclave (a la que comienza el proceso de enfriamiento)

T_a = Temperatura del agua de enfriamiento

j = constante que depende del tipo de cambiador de calor.

Si sustituimos T_R , en la ecuación (2), por su valor para este tramo:

$$\frac{1}{E} dt = \frac{dT}{T_a + \frac{T_{R_{03}} - T_a}{e^{\frac{t}{E}}} - T} \quad (8)$$

La resolución de esta ecuación se realiza mediante la utilización del mismo factor de integración utilizado para el tramo de calentamiento.

Integrando y resolviendo se tiene la ecuación que va a permitir determinar la temperatura en enfriamiento de un producto cuyo mecanismo de transmisión de calor predominante sea la convección.

$$T = T_R + \frac{E}{j - E} \cdot (T_{R_{03}} - T_a) \cdot e^{-\frac{t}{E}} + \left(T_0 - T_a - \frac{j}{j - E} \cdot (T_{R_{03}} - T_a) \right) \cdot e^{-\frac{t}{E}} \quad (9)$$

MATERIAL Y MÉTODOS

La validación del modelo matemático propuesto se ha llevado a cabo con un autoclave horizontal MICROMAR-MINI marca MARRODAN, S.A., de Lodosa (España).

Las muestras utilizadas han sido: botes de vidrio comerciales de 720 gramos con agua, judías verdes cortadas en tiras y tallos de ajos tiernos cortados. Se han realizado cinco repeticiones para cada muestra.

La desviación relativa media entre las temperaturas simuladas y las experimentales se han determinado según la expresión (Akterian, 1995):

$$D = \frac{1}{m} \cdot \sum_1^m \left| \frac{T_t - T_e}{T_e} \right| \cdot 100 (\%) \quad (10)$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con el modelo matemático planteado y el algoritmo de simulación desarrollado se puede predecir:

- La evolución de la temperatura en el autoclave tanto en la fase de calentamiento como en la de mantenimiento de la temperatura y en la de enfriamiento.
- La evolución de la temperatura en el centro del producto en las fases de calentamiento, esterilización y enfriamiento, a partir de la evolución de temperatura calculada para el autoclave.
- El tiempo de esterilización necesario para conseguir el F_0 requerido para el producto.

El valor de la constante j del autoclave utilizado en el tramo de enfriamiento es $j = 8.89$

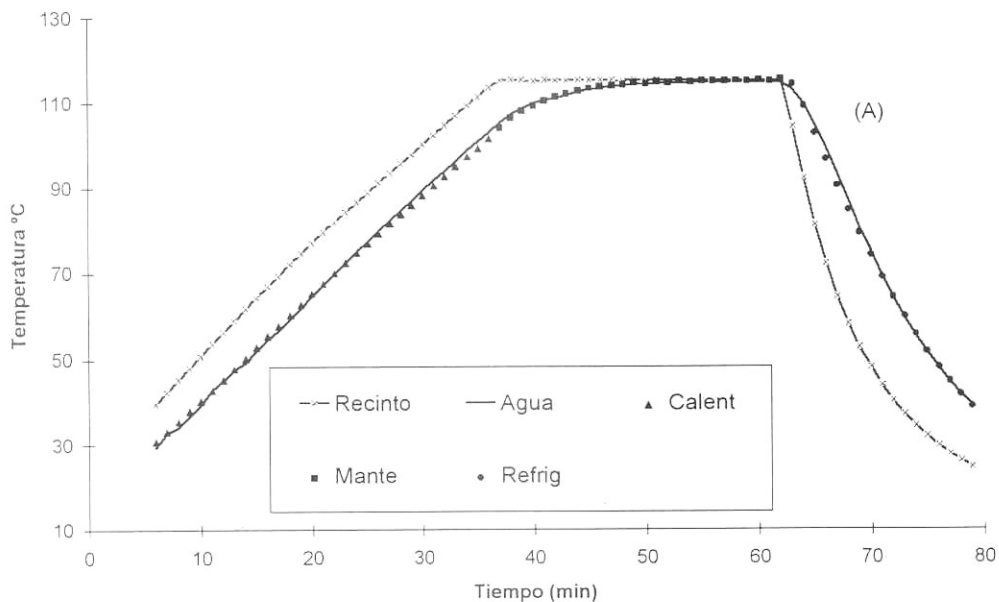
En la figura se representan la evolución de las temperaturas de autoclave y centro térmico del producto junto con su simulación correspondiente para A) agua, B) judías verdes cortadas en tiras y C) tallos de ajos tiernos.

Como puede verse en todos los casos la

predicción de la evolución de las temperaturas del autoclave se ajustan con mucha exactitud a los valores experimentales obtenidos en las tres fases del proceso de esterilización: fase de temperatura creciente, fase de temperatura constante y fase de temperatura decreciente.

En el caso del agua, donde el mecanismo de transmisión de calor puede ser considerado de convección pura, el ajuste del proceso de simulación en el interior del envase presenta una desviación relativa mínima ($D=0.94\%$), sin embargo tanto en el caso de las judías verdes cortadas en tiras como en el de los tallos de ajos tiernos el ajuste es algo más impreciso debido a que el producto considerado es un sólido finamente dividido en el seno de un líquido de gobierno.

Aunque la presencia de productos sólidos no permite que se establezcan con toda su amplitud las corrientes de convección que definen este mecanismo de transporte de calor, los resultados se adaptan con la suficiente precisión a los resultados simulados (considerando exclusivamente este mecanismo) como para aconsejar la utilización de este sistema en el estudio de la evolución de la temperatura debida a la esterilización de estos productos.



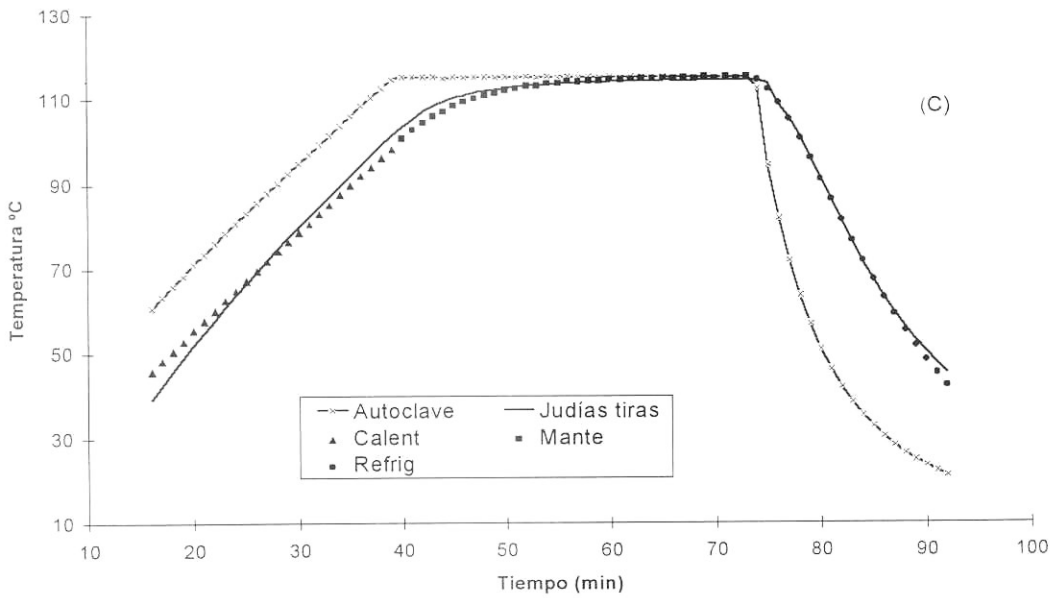
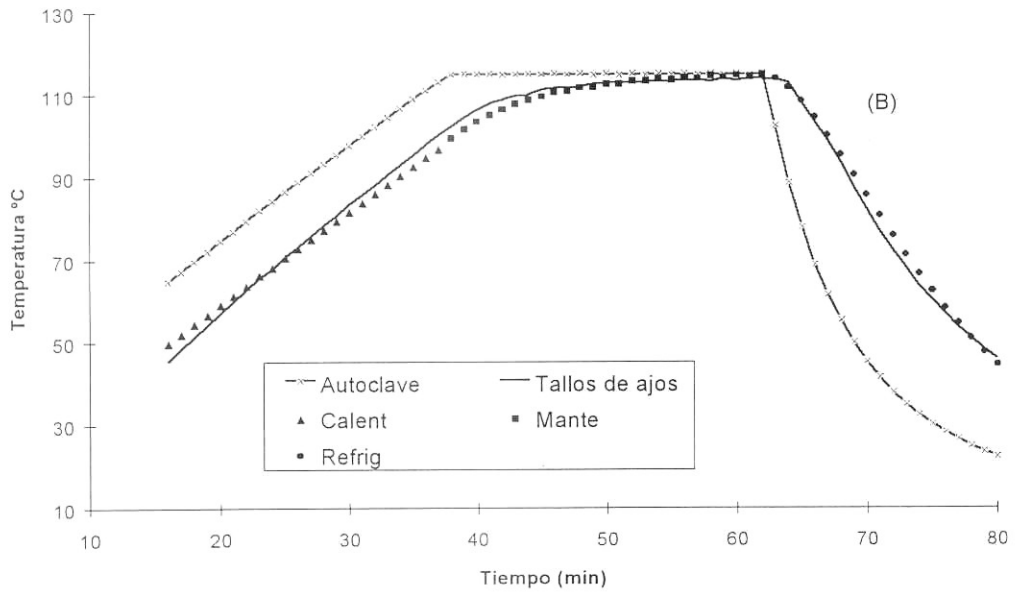


Fig. 1.- Comparación de la evolución de la temperatura del autoclave y del centro térmico del producto para el caso de: (A) agua, (B) tallos de ajos tiernos y (C) judías cortadas en tiras.

Los valores obtenidos de E en las simulaciones realizadas han sido para el caso del agua de $E=270$ s, mientras que para el caso de las judías verdes cortadas en tiras y de los tallos de ajos tiernos

$E \approx 390$ s (392.4 s para judías verdes en tiras y 396.6 s para tallos de ajos tiernos).

Las desviaciones relativas en los procesos completos de esterilización de los productos son muy bajas: $D=0.94\%$ para el agua, $D=2.08\%$ para judías cortadas en tiras y $D=2.07\%$, para tallos de ajos tiernos, siendo en todos los casos estos valores muy inferiores al 10% admitido habitualmente.

CONCLUSIONES

El sistema propuesto ha demostrado ser útil para simular la evolución térmica del producto, por convección, durante el proceso de esterilización. Por lo tanto se confirma como una herramienta para el estudio del efecto de las distintas condiciones de proceso sobre los productos antes de abordar los ensayos en planta piloto o instalación industrial.

La variación en el coeficiente de inercia térmica entre los distintos productos depende por un lado de la relación entre el volumen de sólidos y el volumen de salmuera y por otro de la disposición de los sólidos en la salmuera.

REFERENCIAS

Akterian, S.G. Numerical simulation of unsteady heat transfer in canned mushrooms in brine during

sterilization processes. *J. of Food Engineering*, 25 (1): 45-53. (1995).

Bimbenet, J.J y Michiels, L. Convective heat transfer in canning process. *Proc. IV Int Congress Food Sci. and Technol.* Vol. IV: 361-179. (1974).

Datta, A.K. y Teixeira, A.A. Numerical Modeling of natural Convection Heating in Canned Liquid Foods. *American Society of Agricultural Engineers*, 30 (5): 1542-1551. (1987).

Kumar, A.; Bhattacharya, M. y Blaylock, J. Numerical Simulation of Natural Convection Heating of Canned Thick Viscous Liquid Food Products. *J. of Food Science*, 55 (5): 1403-1411. (1990).

Moure, J.; Vírveda, P. y Abril, J. Control por ordenador del proceso de esterilización de conservas vegetales. 1.- Transmisión de calor por conducción. *Rev. Int. Información Tecnológica*, en prensa (1997)

Vírveda, P.; Abril, J. Simulación numérica en estado no estacionario de espárragos durante el proceso de esterilización. *Alimentaria*. N° 280: 43-46. (1997)