

PREDICCIÓN DE HISTORIAS TÉRMICAS DURANTE LA TRANSMISIÓN DE CALOR EN  
MÁS DE UNA DIMENSIÓN EMPLEANDO FUNCIONES DE TRANSFERENCIA OBTENIDAS  
NUMERICAMENTE

Rodolfo H Mascheroni

Centro de Investigación y Desarrollo en Criotecnología  
de Alimentos. CIDCA. (U.N. La Plata - CIC - CONICET)  
Facultad de Ciencias Exactas.  
La Plata - Argentina

RESUMEN

Se emplean funciones de transferencia o factores de respuesta térmica para la predicción de historias térmicas en transmisión de calor multidimensional, tanto para geometría plana como cilíndrica.

Los coeficientes de las funciones se obtienen por métodos numéricos y se utilizan para calcular la respuesta a distintas formas de perturbación en la temperatura externa (escalones, curvas sinusoidales, seno - exponenciales, etc.)

Los valores calculados se comparan muy favorablemente con los obtenidos experimentalmente para latas de alimentos y paralelepípedos de acrílico.

ABSTRACT

Transfer functions or thermal response factors are employed to predict thermal histories in multidimensional heat transfer, for planar or cylindrical geometries.

Function coefficients are obtained through numerical methods and are employed to calculate the response to different types of perturbations in the external temperature (steps, sinusoidal or sinusoidal-exponential curves).

Computed values are very favourably compared to those obtained experimentally for cans of food and acrylic parallelepipeds.

## INTRODUCCION

Son numerosos los casos de interés práctico en que existe transmisión de calor multidimensional por conducción: almacenamiento de alimentos refrigerados o congelados, esterilización de latas o paquetes de alimentos sólidos, acondicionamiento de habitáculos, congelación de suelos y cañerías, etc.

Para realizar estudios sobre variación de temperatura en dichos sistemas se deben normalmente o realizar experiencias muchas veces de larga duración y costo o de difícil implementación, o proceder a la predicción teórica.

En este último caso, son raras las situaciones en que existe una solución analítica al problema planteado y normalmente debe recurrirse al empleo de métodos numéricos. Aquí aparece la complicación del desarrollo del algoritmo de cálculo y además que el programa de computadora generado, que generalmente ocupa mucha memoria y emplea largo tiempo de máquina, debe correrse cada vez que se desee simular una nueva condición de trabajo.

Una alternativa, con un orden de precisión similar al de los métodos numéricos pero con una gran simplicidad de cálculo, es el empleo de las llamadas funciones de transferencia del sistema.

Este método se utiliza desde hace algún tiempo en estudios de transmisión de calor unidireccional en cerramientos, suelos, etc. (1), (2), (3), pero sólo muy recientemente se ha aplicado a casos con flujo térmico multidimensional.

En el presente trabajo se obtienen los coeficientes de dichas funciones o factores de respuesta térmica, por métodos numéricos y se los utiliza para predecir historias térmicas para distintas formas de variación de la temperatura externa. Se emplean dos tipos de geometría: plana con transmisión de calor bi o tridireccional y cilíndrica con transmisión de calor axial y radial. En todos los casos se comparan los valores calculados con los obtenidos experimentalmente.

## FUNCIONES DE TRANSFERENCIA

Si a un punto de un sistema se le aplica una perturbación temporal de cualquier tipo (por ej: la A en la Fig. 1) y se mide la respuesta en otro punto de dicho sistema (por ej: el B de dicha figura), la

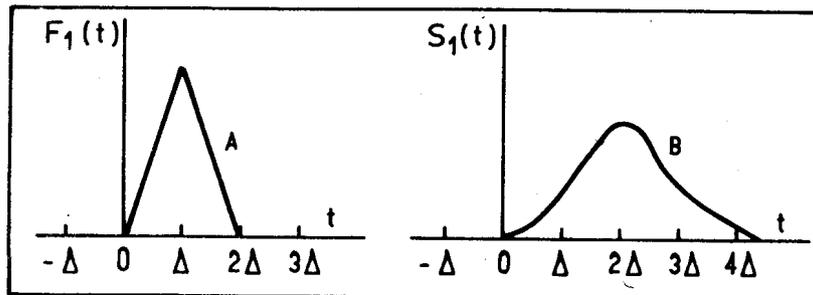


Fig. 1 Esquema de funciones de entrada en A y de salida en B.

relación entre ambas funciones temporales es un invariante del sistema si éste está gobernado por una ecuación diferencial lineal, y se llama función de transferencia. Una vez obtenida esa función, para calcular como responderá el punto B a cualquier otra perturbación en A simplemente se multiplica esa perturbación por dicha función de transferencia.

Es decir si la función aplicada en A es  $F_1(t)$  y su correspondiente respuesta en B es  $S_1(t)$  para cualquier otra entrada en A,  $F(t)$  la respuesta en B se calcula según:

$$S(t) = \frac{S_1(t)}{F_1(t)} F(t) = K_{AB} F(t) \quad (1)$$

donde  $K_{AB}$  es la función de transferencia entre A y B y  $t$  el tiempo. Las  $F(t)$  pueden ser continuas o no, las  $S(t)$  siempre lo son.

El razonamiento hasta aquí empleado es absolutamente exacto, el principal problema es que las  $K_{AB}$  y generalmente la  $F_1(t)$  son funciones continuas, lo que complica mucho los cálculos. Por ello se emplea la siguiente simplificación: si a una función continua  $F(t)$  (Fig. 2 (a)) se la muestrea a intervalos regulares de tiempo  $\Delta$ , la salida del sistema muestreador es un tren de pulsos (Fig. 2 (b)). Su transformada de Laplace vale:

$$F(s) = F(0) + F(\Delta) e^{-s\Delta} + F(2\Delta) e^{-2s\Delta} + \dots$$

si se hace  $z = e^{s\Delta}$ , se obtiene

$$F(z) = F(0) + F(\Delta) z^{-1} + F(2\Delta) z^{-2} + \dots$$

que se llama la transformada  $z$  de  $F(t)$ . La principal ventaja de este tipo de transformada es que los valores  $F(0)$ ,  $F(\Delta)$ ,  $F(2\Delta)$ , etc., son simplemente los valores de  $F(t)$  para  $t=0$ ,  $\Delta$ ,  $2\Delta$ , etc.

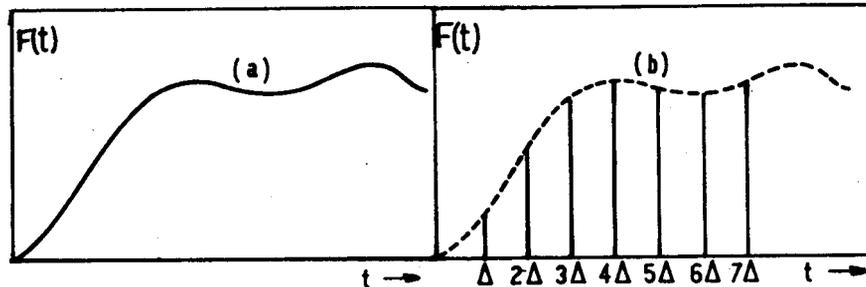


Fig. 2 Función continua (a) y muestreada (b).

Si expresamos las funciones de entrada y salida en términos de sus transformadas  $z$  tendremos:

$$K_{AB}(z) = \frac{S_1(z)}{F_1(z)} = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_n z^{-n}}{a_0 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_n z^{-n}} \quad (2)$$

Es importante aclarar que  $K_{AB}(z)$  se puede obtener tanto experimentalmente como teóricamente (método numérico, solución exacta, ana

logía eléctrica, etc.) cuando se posee la información necesaria.

Para simplificar su obtención, de las funciones normalmente empleadas para  $F_1(t)$  (escalón positivo o negativo, rampa o doble rampa, etc.) se utiliza la doble rampa o diente de sierra de ancho  $2\Delta$  y altura  $I$  (Fig. 1). Este tiene la ventaja que su transformada en  $z$  vale  $F_1(z) = a_1 z^{-1}$  y en  $S_1(z)$  es  $b_0 = 0$ , con lo que se simplifica el cálculo, ya que se tendrá:

$$K_{AB}(z) = \frac{b_1 + b_2 z^{-1} + \dots + b_n z^{-(n-1)}}{a_1} \quad (3)$$

Para cualquier otra entrada  $F(z)$  muestreable como

$$F(z) = F_1 z^{-1} + F_2 z^{-2} + \dots \quad (4)$$

se tendrá una respuesta tal como

$$S(z) = S_1 z^{-1} + S_2 z^{-2} + \dots \quad (5)$$

calculable según

$$S(z) = F(z) K_{AB}(z) \quad (6)$$

como (5) y (6) son iguales y ambos segundos miembros son polinomios en  $z^{-n}$ , los coeficientes de los términos en  $z^{-n}$  deben ser idénticos en ambas expresiones, entonces de (1), (2) y (6) tendremos

$$S = \frac{F_n b_1 + F_{n-1} b_2 + \dots + F_1 b_n}{a_1} \quad (7)$$

que es el valor de la respuesta en  $B$  al tiempo  $n\Delta$ , en función de la entrada en ese instante y de las entradas en los  $n$  intervalos anteriores. La igualdad (7) se puede expresar como:

$$S_B(t) = S_B(m\Delta) = \sum_{i=1}^n F_A((m+1-i)\Delta) b_i \quad (8)$$

La gran ventaja del cálculo según (8) es que es necesario realizar sólo la determinación de la respuesta del sistema a un pico en la temperatura del medio externo, con condiciones de contorno del mismo tipo que las de los casos que se va a predecir. Así se obtienen los coeficientes  $b_i$  para todos los puntos en que interese conocer posteriormente la historia térmica. Para cualquier otro cálculo basta elegir la curva de temperatura del medio externo  $F_A(t)$  deseada y obtener la respuesta según (8), lo que sólo insume un mínimo de tiempo y memoria de máquina.

#### OBTENCIÓN DE LOS COEFICIENTES

Las funciones de transferencia pueden obtenerse en forma experimental o por medios teóricos (resolución exacta, métodos numéricos analogía eléctrica, etc.).

En trabajos previos (4), (5), se determinaron por solución exacta, diferencias finitas y en forma experimental, para un paralelepípedo de acrílico, comprobándose que el método numérico era el

más fácil de implementar y que los coeficientes así obtenidos eran los que permitían simular con mayor exactitud de datos experimentales.

En este trabajo se consideran dos geometrías y dos tipos de condición de contorno que permiten cubrir gran parte de las variantes hallables en transferencia de calor:

I Un paralelepípedo con transmisión de calor bi o tridimensional y condiciones de contorno convectivas,

II Un cilindro finito con transmisión de calor radial y axial y temperatura superficial constante.

En todos los casos se suponen propiedades termofísicas constantes en el material, ya que cuando esto no se cumple, el empleo de funciones de transferencia deja de tener validez teórica.

I. Paralelepípedo con condiciones de contorno convectivas

La ecuación diferencial para transferencia no estacionaria multidimensional en coordenadas cartesianas es:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T \quad (9)$$

donde  $\alpha$  es la difusividad térmica del material.

En nuestro caso podrá haber transmisión de calor en las tres direcciones ortogonales o sólo en  $x$  e  $y$ .

Se supone inicialmente el sistema a temperatura uniforme  $T_i$ .

Las condiciones de contorno serán:

$$\pm k \frac{\partial T}{\partial x} = h_x (T - T_{ext}) \quad \text{para } x = \pm L_x \quad (10)$$

$$\pm k \frac{\partial T}{\partial y} = h_y (T - T_{ext}) \quad \text{para } y = \pm L_y \quad (11)$$

Para transmisión bidimensional se tendrá además:

$$\frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad \text{para } z = \pm L_z \quad (12)$$

que implica que ambas caras  $z$  están aisladas.

Para transmisión tridimensional con la cara inferior aislada y la superior descubierta se cumplirá que:

$$\frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad \text{para } z = -L_z \quad (13)$$

$$y \quad -k \frac{\partial T}{\partial z} = h_z (T - T_{ext}) \quad \text{para } z = L_z \quad (14)$$

El origen de coordenadas se toma en el centro del paralelepípedo  $L_x$ ,  $L_y$  y  $L_z$  son las semilongitudes de los ejes principales;  $k$  la conductividad térmica,  $h_x$ ,  $h_y$  y  $h_z$  los coeficientes de transferencia calórica;  $T_{ext}$  la temperatura del medio externo.

Esta última varía con el tiempo según:

$$T_{ext} = \begin{cases} T_i & \text{para } t \leq 0 \text{ y } t \geq 2\Delta \\ T_i + (I/\Delta)t & \text{para } 0 \leq t \leq \Delta \\ T_i + 2I - (I/\Delta)t & \text{para } \Delta \leq t \leq 2\Delta \end{cases} \quad (15)$$

que es la fórmula del "diente de sierra" de la Fig. 1A, donde  $I$  es la altura de la señal.

La ecuación diferencial (9) con las condiciones de contorno (10), (11), (12) y (15) o (10), (11), (13), (14) y (15) fue resuelta empleando un método numérico de diferencias finitas explícitas, ya que en trabajos previos (6), (7), (8), se ha demostrado que éstas tienen una precisión comparable a la de los implícitos y al mismo tiempo menores complicaciones de programación y necesidad de memoria de computadora.

Al haber simetría en  $x=0$  e  $y=0$ , se puede trabajar con sólo 1/4 del volumen del sistema.

La ecuación general discretizada y reordenada es:

$$T_{i,j,k}^{n+1} = T_{i,j,k}^n \left( 1 - 2\alpha \left( \frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} + \frac{1}{\Delta z^2} \right) \right) + \frac{\alpha \Delta t}{\Delta x^2} (T_{i+1,j,k}^n + T_{i-1,j,k}^n) + \frac{\alpha \Delta t}{\Delta y^2} (T_{i,j+1,k}^n + T_{i,j-1,k}^n) + \frac{\alpha \Delta t}{\Delta z^2} (T_{i,j,k+1}^n + T_{i,j,k-1}^n) \quad (16)$$

Desarrollos similares se obtienen para las condiciones de contorno. En estas ecuaciones  $i, j, k$  se refieren a los índices en las direcciones  $x, y, z$  respectivamente, tomados como 1 en el centro;  $\Delta x, \Delta y, \Delta z$  a los espaciados en esas tres direcciones;  $\Delta t$  al incremento de tiempo y  $n$  al intervalo de tiempo que se considera ( $t = n\Delta t$ ).

En este caso el programa de cálculo obtenido se implementó en lenguaje BASIC en una computadora HP 9826, utilizando una grilla de 17 x 11 x 11 puntos y un intervalo de tiempo de 0,48 min.

Para simular las medidas experimentales los cálculos se hicieron considerando al paralelepípedo formado de metilmetacrilato de metilo (acrílico) de  $\alpha = 1,21 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{seg}$ ,  $k = 0,2092 \text{ W/m}^\circ\text{K}$ ,  $L_x = 0,1495 \text{ m}$ ,  $L_y = 0,10025 \text{ m}$ ,  $L_z = 0,0495 \text{ m}$ . Los valores de los coeficientes de transferencia (calculados a partir de las velocidades del aire sobre las caras durante las experiencias) fueron  $h_x = h_y = 260 \text{ W/m}^2\text{K}$ ,  $h_z = 11 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

Las medidas experimentales se realizaron en 6 puntos emplazados a lo largo de un eje longitudinal situado a  $2/3 L_z$  de la cara superior. Dichos puntos nominados P1 a P6 estaban situados respectivamente en la

superficie y a  $\frac{1}{8}$  Lx,  $\frac{1}{4}$  Lx,  $\frac{1}{2}$  Lx, Lx y  $\frac{3}{2}$  Lx de profundidad.

Se corrieron programas para transmisión en dos y tres direcciones y en ambos casos para  $I=5^{\circ}\text{C}$ ,  $\Delta=1$  h o  $I=10^{\circ}\text{C}$  y  $\Delta=2$  h para poder posteriormente estudiar la influencia del valor de  $\Delta$  en la precisión de los cálculos. A manera de ejemplo en la Fig. 3 se presentan los coeficientes calculados para transmisión tridimensional con  $I=5^{\circ}\text{C}$  y  $\Delta=1$  h.

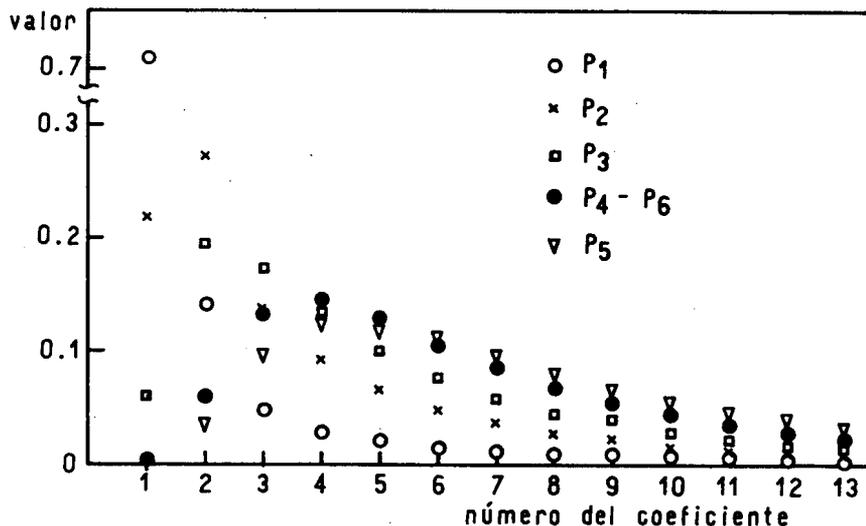


Fig.3 Coeficiente de las funciones de transferencia para 6 puntos de un paralelepípedo de acrílico con transmisión de calor tridimensional y condiciones de contorno convectivas.

## II. Cilindro finito con temperatura superficial constante.

La ecuación diferencial para transmisión de calor bidimensional, no estacionaria en un cilindro finito es:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (17)$$

El sistema se supone a temperatura inicial uniforme  $T_i$  y al tiempo  $t=0$  la superficie se coloca en contacto con un fluido de temperatura constante y uniforme  $T_{ext}$ , alcanzándose instantáneamente en ella dicha temperatura ( $h=\infty$ ).

Es decir, las condiciones de contorno son:

$$T = T_{ext} \quad \text{para } r = R \quad (18)$$

$$T = T_{ext} \quad \text{para } z = \pm L_z \quad (19)$$

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad \text{para } r = 0 \quad (20)$$

$$\frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad \text{para } z = 0 \quad (21)$$

El origen de coordenadas se toma en el centro del sistema, R es el radio y Lz la semi altura.

La ecuación diferencial (17) con las condiciones (15) y (18) a (21) fue discretizada en diferencias finitas explícitas. Por simetría se consideró sólo la zona con z y r positivas.

Se empleó una grilla de 21 x 21 puntos. El programa de cálculo resultante se escribió en lenguaje FORTRAN IV y se ejecutó en una computadora IBM Serie 1.

La fórmula de cálculo final quedó expresada por:

$$T_{m,k}^{n+1} = T_{m,k}^n \left( 1 - 2\alpha\Delta t \left( \frac{1}{\Delta r^2} + \frac{1}{\Delta z^2} \right) \right) + \frac{\alpha\Delta t}{\Delta r^2} (T_{m+1,k}^n + T_{m-1,k}^n) + \frac{\alpha\Delta t}{2r\Delta r} (T_{m+1,k}^n - T_{m-1,k}^n) + \frac{\alpha\Delta t}{\Delta z^2} (T_{m,k+1}^n + T_{m,k-1}^n) \quad (22)$$

donde m y k indican los índices en las direcciones r y z respectivamente,  $\Delta r$  es el valor del incremento de espacio en la dirección radial.

Para los valores de m y k en los que se aplican las condiciones de contorno se desarrollaron expresiones del mismo tipo, siendo importante la aplicación de (20) que lleva a expresar (22) según:

$$T_{1,k}^{n+1} = T_{1,k}^n \left( 1 - 2\alpha\Delta t \left( \frac{2}{\Delta r^2} + \frac{1}{\Delta z^2} \right) \right) + \frac{4\alpha\Delta t}{\Delta r^2} T_{2,k}^n + \frac{\alpha\Delta t}{\Delta z^2} (T_{1,k+1}^n + T_{1,k-1}^n)$$

Los programas se corrieron empleando  $\Delta t = 3$  s,  $I = 5^\circ\text{C}$ ,  $\Delta = 1, 2$  ó 5 min según el caso experimental que se quería simular.

#### MEDIDAS EXPERIMENTALES Y PREDICCIÓN EMPLEANDO FUNCIONES DE TRANSFERENCIA

##### I. Paralelepípedo con condiciones de contorno convectivas

Las medidas se realizaron (5) colocando el bloque de acrílico con 1 o 2 de sus caras z aisladas en una cámara de conservación especialmente diseñada. En ésta la temperatura del aire se podía programar de forma que cumpliera cualquier historia térmica prefijada, la cual era controlada y registrada automáticamente, junto con las temperaturas de los puntos de medida en el bloque. Ello se realizaba a través de dos scanners automáticos AUTODATA controlados por una computadora Hewlett Packard 9826.

Tanto para transmisión bi como tridireccional se programaron para el aire variaciones sinusoidales o curvas seno - exponenciales (tipo ciclo de cámara frigorífica) de un sólo período de 6 o 24 hs de duración total.

Para simular los valores así generados y medidos se emplearon las funciones de transferencia obtenidas numéricamente utilizando los  $\Delta$  de 1 y 2 h para comparar la influencia de la discretización sobre la precisión del cálculo.

Como ejemplo de valores medidos y calculados en la Fig.4 se presentan las respuestas para el punto P2 a una perturbación sinusoidal de amplitud 10 °C y período 24 hs para transmisión de calor bidimensional.

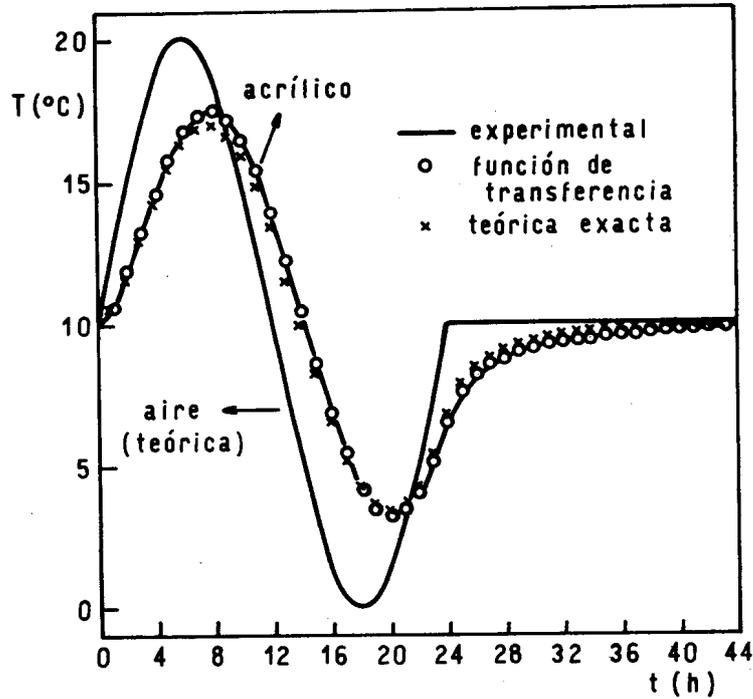


Fig. 4 Comparación de las respuestas a una señal sinusoidal obtenidas por distintos métodos.

En forma similar, la Fig.5 representa la curva sinuso-exponencial programada en el aire de amplitud 5°C y período total 6 hs, y las respuestas para el punto P4, con transmisión de calor tridimensional.

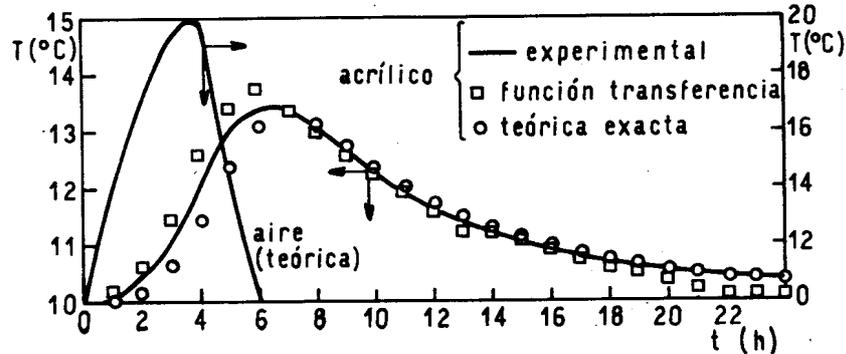


Fig. 5 Comparación de las respuestas a una señal sinuso-exponencial obtenidas por distintos métodos.

En ambos casos se emplearon coeficientes con  $\Delta = 1h$ , observándose que en la Fig. 4 la predicción por funciones de transferencia es prácticamente perfecta. En el caso de la Fig.5 la precisión aún no siendo tan grande sigue siendo buena, comparable a la de la solución exacta. Las desviaciones son probablemente debidas a conducción de calor por la termocupla de medida y al no perfecto seguimiento por parte de la cámara experimental de la historia térmica programada, al ser la variación de temperatura del aire muy abrupta. Dicho factor posiblemente influya generando errores por la discretización de la función de entrada y el empleo de  $\Delta = 0,25$  ó  $0,5$  h diese mayor precisión.

Ello puede también comprobarse de la interpretación de la Fig.6 donde se grafica la respuesta del punto P1 a un seno de amplitud  $5^\circ\text{C}$  y período 6 hs en transmisión bidireccional. Los coeficientes han sido obtenidos para  $\Delta = 1$  y 2 h. Se observa que en las zonas de variación rápida de la señal de entrada el empleo de un  $\Delta$  grande introduce errores de discretización (aparte de obtenerse menor cantidad de información al poder sólo calcularse cada  $\Delta$  horas), mientras que para  $\Delta = 1$  h el seguimiento es perfecto.

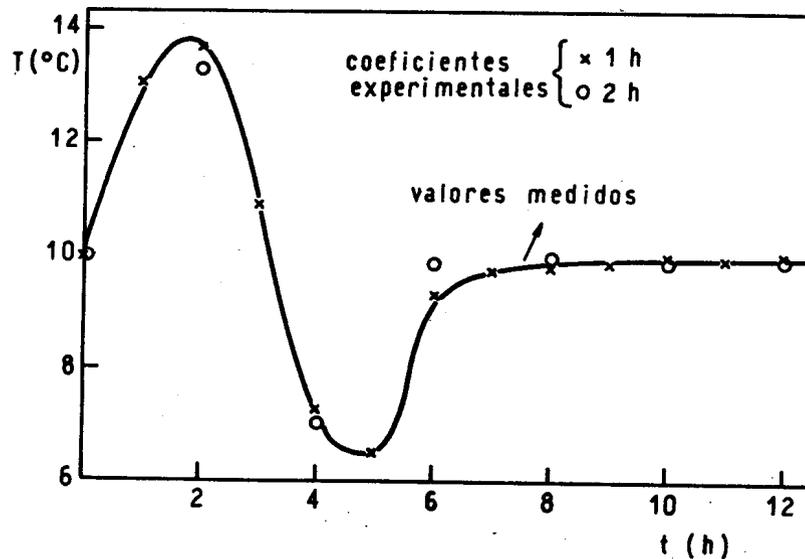


Fig. 6 Ejemplo de la influencia del valor  $\Delta$  en la respuesta calculada para la superficie de un paralelepípedo de acrílico. Comparación con los valores experimentales.

## II. Cilindro finito con temperatura superficial constante

Se emplearon datos experimentales de esterilización de latas de alimentos de materiales para los cuales la transmisión de calor se realiza prácticamente por conducción, siendo despreciables los efectos convectivos. En todos los ejemplos la temperatura graficada es la del centro geométrico de la lata, que es la que importa conocer para realizar los cálculos de supervivencia de microorganismos y tiempo de procesamiento.

La Fig. 7 corresponde al calentamiento en autoclave con vapor de una lata de caballa, de  $R = 3,412$  cm,  $Lz = 5,08$  cm,  $\alpha = 1,383810^{-7} \text{ m}^2/\text{seg}$ , con  $T_i = 30$  °C y  $T_{ext} = 111$  °C (9) .

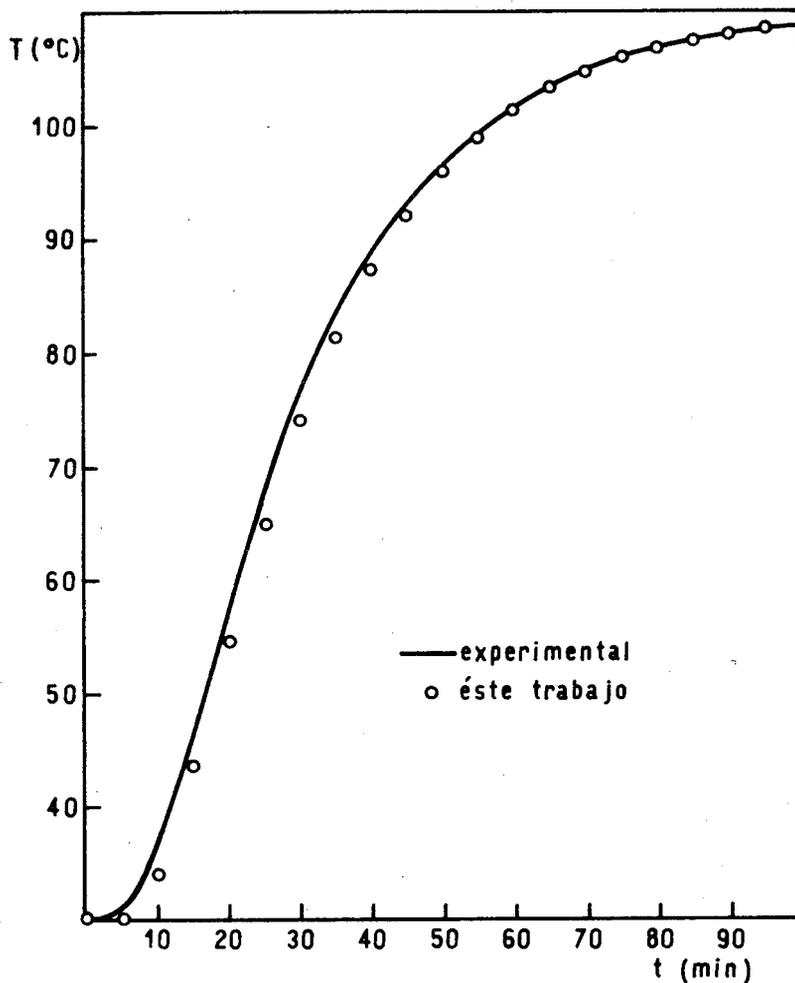


Fig. 7 Temperatura medidas y calculadas para el calentamiento de una lata de caballa.

La Fig. 8 representa el procesamiento de una suspensión de bentonita en agua al 9,09 % en una lata de  $R = 5,159$  cm,  $Lz = 3,889$  cm,  $\alpha = 1,616 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{seg}$ .

Se hallaba a  $T_i = 24,17$  °C y se sumergió en agua hirviendo fuertemente agitada ( $T_{ext} = 100$  °C) durante 96 min. y luego en agua corriente ( $T_{ext} = 11,28$  °C) (10).

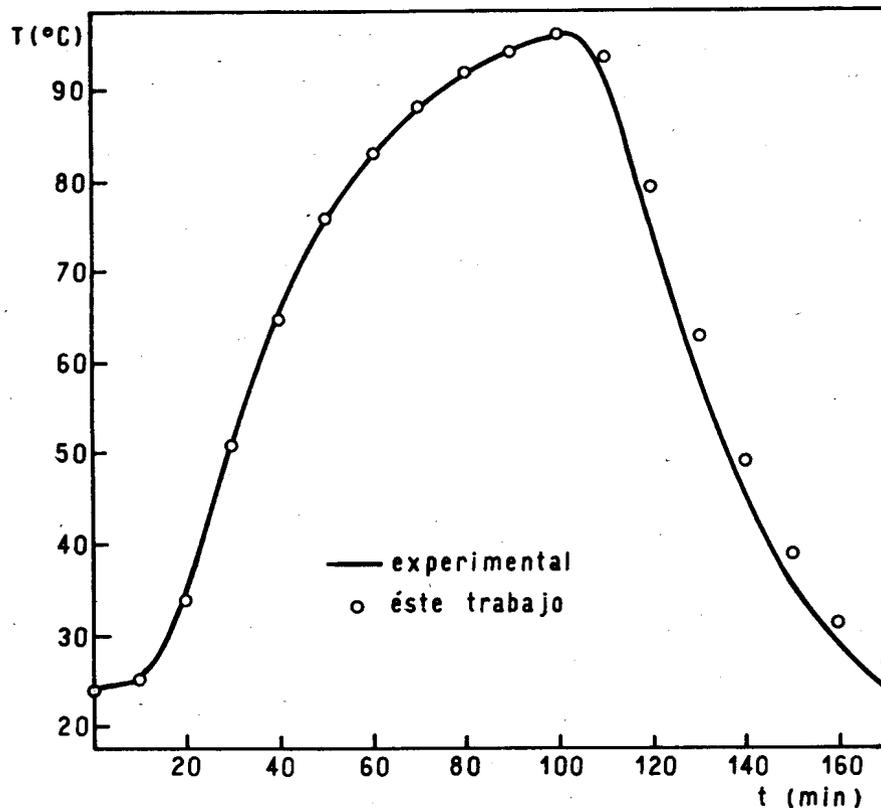


Fig. 8 Temperaturas medidas y calculadas para el procesamiento de una lata conteniendo solución de bentonita en agua al 9,09 %.

Finalmente, la Fig. 9 corresponde al calentamiento de un guiso denso de mariscos, de  $T_i = 76,67^\circ\text{C}$  en una lata de  $R = 3,27$  cm y  $L_z = 3,33$  cm. El material tiene  $\alpha = 1,634 \times 10^{-7}$  m<sup>2</sup>/seg y se calienta en vapor a  $T_{ext} = 121,11^\circ\text{C}$  (10).

Como puede observarse de las 3 figuras la predicción, realizada empleando coeficientes obtenidos con  $\Delta = 1$  min e  $I = 50^\circ\text{C}$ , es prácticamente perfecta. Las pequeñas desviaciones son más imputables a problemas experimentales (no uniformidad en la  $T_{ext}$ , la composición o error en la posición del sensor de temperatura), que en el método de cálculo.

#### DISCUSION Y CONCLUSIONES

El método de predicción presentado es muy sencillo, fácil de implementar matemáticamente y de cálculos simplísimo.

Su precisión es similar o mayor que la de métodos analíticos o experimentales, siempre que el  $\Delta$  sea pequeño con respecto a la duración total del fenómeno y que las propiedades termofísicas del material sean

constantes.

Las funciones de transferencia pueden obtenerse teóricamente, en forma relativamente sencilla, con el sólo requisito de conocer las propiedades físicas del sistema.

Su aplicación es igualmente válida para cualquier forma de variación en la temperatura externa.

Es especialmente útil para predicción en transmisión de calor multidimensional, paredes compuestas y otros sistemas de cálculo difícil y lento.

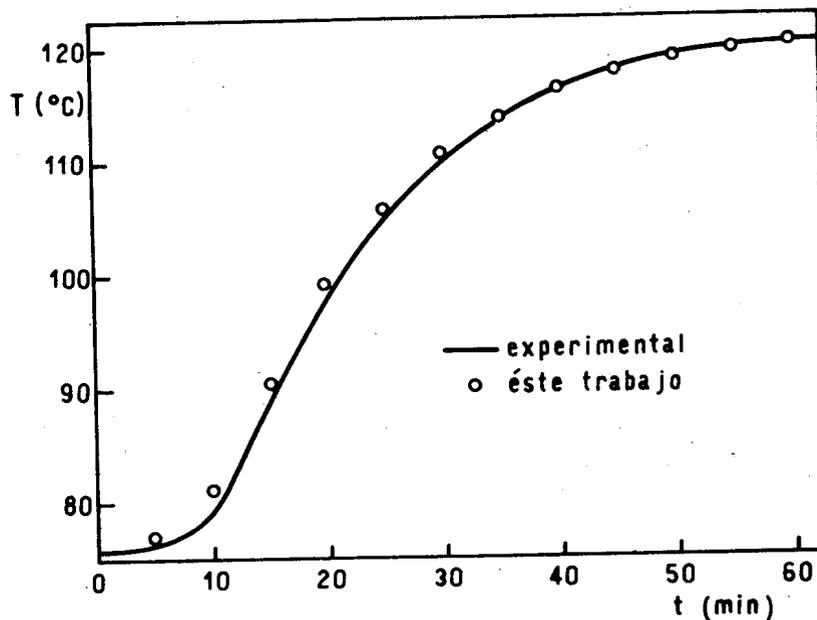


Fig. 9 Temperaturas medidas y calculadas para la esterilización de una lata de guiso denso de mariscos.

#### REFERENCIAS

- (1) Stephenson, D.G y Mitalas, G.P., "Calculation of Heat Conduction Transfer Functions for Multi-layer Slabs", ASHRAE Trans. Vol. 77, (II), 1971, pags. 117 - 126.
- (2) Carrasco, J.A., "Aprovechamiento de la Inercia Térmica en el Ahorro de Energía", Tesis, Instituto Químico de Sarriá, 1983.
- (3) Kimball, B.A., "Conduction Transfer Functions for Predicting Heat Fluxes into Various Soils", ASHRAE Trans., Vol. 89, 1983, pags. 284 - 314.
- (4) Mascheroni, R.H., Sanz, P.D. y Domínguez Alonso, M., "Resolución de

la Ecuación de Transmisión de Calor Empleando Funciones de Transferencia Obtenidas Experimental y Teóricamente. Comparación de los Resultados con Métodos Aproximados, Exactos y Experimentales". XIII Jornadas sobre Investigación en Ccias. de la Ing. Qca. y Qca. Aplicada. Trabajo n°24-02, 5 pags.

- (5) Sanz, P.D., Mascheroni, R.H., Domínguez, M. y García de Vinuesa, S., "Time - Temperature Prediction Curves of Foodstuffs by Means of the Z - Transfer Function Method," Int. Journal of Refrigeration, en viado para su publicación.
- (6) Mascheroni, R.H., "The Utilization of Numerical Methods for the Solution of the Heat Balance During the Thawing of Meat Blocks Under Industrial Conditions". Lat. Am. J. Heat Mass Transf., Vol.6, 1982 (1/2), pags. 13 - 29.
- (7) Cleland, A.C. y Earle, R.L., "The Effect of Freezing Rate on the Accuracy of Numerical Freezing Calculation". Int. J. Refrig., Vol. 5, 1982, (5), pags. 294- 301.
- (8) Flores, E.S. y Mascheroni, R.H., "Technical and Experimental Study of Thawing of Frozen Food Blocks by Aspersión with Water", Lat. Am. J. Heat & Mass Transf., Vol. 7, 1983, (3/4) pags. 263 - 279.
- (9) Yeannes. M.I., Soulé, C.L., Elgue, A.E. y Lupín, H.M., "Effective Thermal Diffusivity in Canned Argentine Sardine, Fueguine Sardine and Mackerel", Lat. Am. J. Heat & Mass Transfer, Vol. 2, 1978, (1/2), pags. 53 - 61.
- (10) Hayakawa, K.I., "Estimating the Central Temperature of Canned Food during the Initial Heating or Cooling Period of Heat Process", Food Techn, Vol. 23, 1969, (11), pags. 141 - 145.