

FORMULACION Y EVALUACION DE UN MODELO MATEMATICO PARA LA PREDICCION DE PERDIDAS DE NUTRIENTES DURANTE EL PROCESAMIENTO TERMICO DE ALIMENTOS ENLATADOS

José A. Barreiro Méndez, George R. Salas, Irma Herrera Morán,*

Departamento de Tecnología de Procesos Biológicos y Bioquímicos. Universidad Simón Bolívar - Apartado 80.659
Caracas 108, Venezuela

R E S U M E N

En el presente trabajo se desarrolló un modelo matemático para la predicción de la pérdida de nutrientes, con cinética de degradación térmica de orden uno, durante el procesamiento térmico de alimentos enlatados que se calientan por conducción. Este modelo es de tipo teórico, ya que no requiere datos experimentales de penetración de calor para su aplicación. Se encontró, en contraposición a otros modelos existentes, que es completamente general, ya que funciona en cualquier posible caso que se pueda presentar. El modelo fue evaluado en base a datos experimentales, encontrándose que en todos los procesos estudiados los resultados caían dentro del intervalo de 90% de confianza de los valores experimentales. Dichos resultados fueron obtenidos mediante la resolución computacional del modelo con un programa escrito en lenguaje Fortran IV, el cual tuvo una duración de dos minutos con diez segundos en una computadora PDP 11/45, siendo más eficiente desde el punto de vista computacional que otros modelos existentes.

I N T R O D U C C I O N

El procesamiento térmico de los alimentos, está dirigido

Recibido el 25-10-76.

Contribución N° 19 del Dpto. de Tecnología de Procesos Biológicos y Bioquímicos, U.S.B.

* Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas, Departamento de Matemáticas.

a la inactivación de los microorganismos y conlleva un efecto destructor en los nutrientes, enzimas y otros factores bioquímicos.

La predicción de la pérdida de nutrientes ha sido estudiada por varios autores. Stumbo (1) presentó un procedimiento basado en el concepto de esterilización másica promedio que proporciona resultados erróneos, como el aumento de la cantidad de nutrientes después del procesamiento. Posteriormente Ball y Olson (2), desarrollaron un método que emplea el concepto de las capas finitas, del cual se obtenían resultados alejados de la realidad, como demostró Hayakawa (3) al comparar este método con el desarrollado por él, el cual utilizaba el concepto del valor de esterilización másica promedio, combinado con la corrección de algunos aspectos matemáticos no considerados por los dos autores antes señalados.

El método de Stumbo (1), fue corregido y ampliado por Jen et al. (4), quienes lograron resultados satisfactorios y mejores que los que se obtenían por el método de Hayakawa (3). Este método se desarrolló para unas temperaturas fijas del agua de enfriamiento y del producto después de enfriado las cuales se utilizaron para el cálculo de los valores $f_h/U:g$ en los cuales se basaron los autores. Estas restricciones no corresponden al caso real donde estas temperaturas pueden ser variables. Tampoco se presentaron factores de corrección que considerasen este aspecto. Todos estos métodos requieren del conocimiento de los valores j y f_h (para esta nomenclatura consúltese a Stumbo (5)), por lo que se hace necesario estimarlos de las curvas experimentales de penetración de calor.

Teixeira et al. (6), desarrollaron un modelo completamente teórico, que utilizaba un procedimiento de diferencias finitas para la resolución de la ecuación del calor. Aunque el modelo es completamente teórico tiene la restricción de que la temperatura final del producto enlatado, después de procesado, debe ser inferior a la temperatura inicial de éste. Esta restricción no es válida en general, por ejemplo, no lo es en el caso bastante corriente de que el producto sea envasado a temperatura ambiente y se desee que su temperatura final, después del enfriamiento, sea 50 °C, con el fin de evitar la corrosión externa de las latas; o en el caso en que el pro-

ducto sea envasado en frío y la temperatura del agua de enfriamiento no permita, por simples consideraciones termodinámicas, enfriar el producto por debajo de la temperatura de ésta, para alcanzar una temperatura final inferior a la inicial. Esta restricción le resta generalidad al método, ya que lo hace inaplicable en muchos casos prácticos.

Recientemente Teixeira et al. (7), realizaron una evaluación experimental de los métodos de Teixeira et al. (6), y Jen et al. (4), concluyendo que ambos métodos arrojan resultados satisfactorios, dentro del intervalo de 90% de confianza de los valores medios experimentales.

El objetivo del presente trabajo fue el desarrollo de un modelo matemático para la predicción de la pérdida de nutrientes, con cinética de degradación de orden uno, durante el procesamiento térmico de alimentos enlatados que se calienten por conducción, que sea de tipo teórico, completamente general, que proporcione resultados satisfactorios comparables al mejor de los modelos teóricos existentes (Teixeira et al.) y sea más eficiente desde el punto de vista computacional.

FORMULACION DEL METODO

Consideraciones Básicas

Con el fin de alcanzar los objetivos señalados, se desarrolló un modelo que considera la resolución analítica de la ecuación del calor en coordenadas cilíndricas, tanto durante el período de calentamiento como en el de enfriamiento, del proceso de esterilización convencional de alimentos enlatados. Las ecuaciones tiempo-temperatura, así obtenidas, se relacionaron con las de cinética para la obtención del modelo. Conceptualmente, la resolución analítica de la ecuación del calor, tiene ventajas sobre la resolución por diferencias finitas, ya que no se presentan las restricciones en cuanto a la generalidad del método que se anotaron en el modelo de Teixeira et al. (6) y en principio se pueden obtener resultados más exactos, debido a que las ecuaciones son exactas desde el punto de vista matemático, en comparación con el método numérico de las diferencias finitas, que como tal es aproximado.

Las siguientes consideraciones fueron hechas para el desarrollo del modelo:

a) La transferencia de calor en el interior del producto enlatado se realiza por conducción.

b) El producto se encuentra envasado en latas (cilindros finitos) de radio a y altura $2l$, ocurriendo transferencia de calor tanto en la superficie cilíndrica, como en las tapas superior e inferior.

c) La difusividad térmica del producto es constante durante los períodos de calentamiento y enfriamiento.

d) La temperatura inicial del producto V_0 y la concentración inicial del nutriente en éste, C_0 , son constantes y su distribución uniforme en todo el producto.

e) Durante el período de calentamiento, la temperatura superficial del producto enlatado es constante e igual a la temperatura del medio de calefacción. Esta suposición implica un coeficiente infinito (o en la práctica muy grande) de transferencia de calor y una resistencia térmica del envase muy pequeña.

f) La resistencia térmica del envase metálico es despreciable en comparación con la del producto.

g) Durante el período de enfriamiento con agua, la temperatura del medio de enfriamiento (TAF) permanece constante, siendo la temperatura de la superficie del producto igual a la del medio de enfriamiento. Esta suposición implica los mismos hechos señalados en e).

h) Al comenzar el período de enfriamiento existe una distribución de la temperatura $i(r, z)$ en el interior del envase.

i) La cinética de la degradación térmica del nutriente analizado es de primer orden y la constante de velocidad de la reacción sigue la ecuación de Arrhenius.

j) La degradación del nutriente durante el tiempo de ajuste inicial en los períodos de calentamiento y enfriamiento, es despreciable en relación a la que ocurre durante el tiempo total de procesamiento.

Consideraciones Cinéticas sobre la Cantidad Remanente de Nutriente en un Punto Cualquiera del Envase

Una gran cantidad de nutrientes, especialmente vitami-

nas y aminoácidos, así como microorganismos, enzimas y factores de color, presentan cinética de degradación térmica de orden uno. En este caso debe cumplirse la relación

$$d C(r,z,t)/d t = - k_1 C(r,z,t) \quad (1)$$

La constante de velocidad de la reacción k_1 es función de la temperatura $V_i(r,z,t)$. Si esta dependencia cumple con la ecuación de Arrhenius, se puede demostrar que

$$k_1 = \ln 10 /DO \cdot 10^{((250 - V_i(r,z,t)) /ZO)} \quad (2)$$

Substituyendo (2) en (1) y operando:

$$d C(r,z,t)/dt = (-\ln 10/DO) \exp ((V_i(r,z,t) - 250)/(ZO/\ln 10)) \cdot C(r,z,t) \quad (3)$$

Separando variables e integrando entre los límites C_0 y $C(r, z, t)$ y 0 y θ , se tiene,

$$C(r,z,t)/C_0 = \exp \left\{ - (\ln 10/DO) \int_0^\theta \exp((V_i(r,z,t) - 250)/(ZO/\ln 10)) dt \right\} \quad (4)$$

siendo $C(r,z,t)/C_0$ la fracción de nutriente que permanece sin degradar en un punto del envase de coordenadas (r,z) a un tiempo θ después de comenzado el procesamiento.

La ecuación (4) representa el modelo para la predicción de la cantidad remanente de nutriente en cualquier punto del envase, después de un tiempo de procesamiento θ y es válida tanto para el período de calentamiento como para el de enfriamiento del producto enlatado.

Predicción de la Temperatura durante el Período de Calentamiento ($\theta \leq t_{ic}$)

La ecuación para la predicción de la temperatura en cualquier punto del envase cilíndrico durante el período de calentamiento fue indicada por Carslaw y Jaeger (8):

$$V_1(r,z,t) = \frac{8}{\pi a} \sum_{\mu} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{J_0(\mu r)}{(2n+1)\mu J_1(\mu a)} \sin \left\{ \frac{(2n+1)\pi}{2l}(z+1) \right\} \exp \left\{ -\alpha \left(\mu^2 + \frac{(2n+1)^2 \pi^2}{4l^2} \right) t \right\} \quad (5)$$

siendo μ las raíces de la ecuación

$$J_0(\mu a) = 0 \quad (6)$$

Esta ecuación supone las siguientes condiciones iniciales y de borde:

$$V_1(r,z,0) = 1 \quad (7) \quad \text{(la temperatura inicial del producto es constante e igual uno)}$$

$$V_1(a,z,t) = 0 \quad (8) \quad \text{(la temperatura de la superficie del producto, ya sea en la superficie cilíndrica o en las tapas superior e inferior es constante e igual a cero).}$$

$$V_1(r,\pm 1,t) = 0 \quad (9)$$

Debido a que las condiciones reales existentes en el proceso son las siguientes:

$$V_1(r,z,0)_R = V_o, \text{ cuando } V_1(r,z,0) = 1 \quad (10)$$

$$V_1(a,z,t)_R = V_v, \text{ cuando } V_1(a,z,t) = 0 \quad (11)$$

$$V_1(r,\pm 1,t)_R = V_v, \text{ cuando } V_1(r,\pm 1,t) = 0 \quad (12)$$

es necesario realizar el siguiente cambio de variables para convertir los resultados que se obtienen a partir de (5) en temperaturas reales:

$$V_1(r,z,t)_R = V_1(r,z,t) (V_o - V_v) + V_v \quad (13)$$

Las condiciones de borde (8) y (9) ó (11) y (12) se cumplen durante el procesamiento térmico de alimentos enlata-

cos, debido al elevado coeficiente de transferencia de calor existente, lo cual hace que la temperatura de la superficie del producto sea prácticamente igual a la temperatura del vapor de calefacción.

Predicción de la Temperatura durante el Período de Enfriamiento ($\theta > t_{fc}$)

Aunque el enfriamiento durante el procesamiento térmico de alimentos enlatados se realiza en agua, usualmente bajo condiciones de convección natural (o bajo ligera convección forzada), sin embargo, se pudo estimar que bajo las condiciones típicas reinantes en el proceso de enfriamiento, el coeficiente superficial de transferencia de calor era superior a 488 kcal/h m² °C (100 Btu/h pie²°F), lo cual hace que la temperatura de la superficie del producto se pueda considerar virtualmente igual a la del agua de enfriamiento. La ecuación que rige el proceso es la siguiente (8):

$$V_2(r,z,t) = \sum_{\mu} \sum_{n=0}^{\infty} A_{\mu,n} J_0(\mu r) \operatorname{sen} \frac{(2n+1)\pi}{2l}(z+l) \exp \left\{ -\alpha \left(\mu^2 + \frac{(2n+1)^2 \pi^2}{4l^2} \right) t \right\} \quad (14)$$

obteniéndose μ de las raíces de la ecuación

$$J_0(\mu a) = 0 \quad (15)$$

Los coeficientes $A_{\mu,n}$ vienen dados por:

$$A_{\mu,n} = \frac{8}{(2n+1)\mu J_1(\mu a)} \left\{ (V_0 - V_v) \exp \left\{ -\alpha \left(\mu^2 + \frac{(2n+1)^2 \pi^2}{4l^2} \right) t_{fc} \right\} + (V_v - T_{AF}) \right\} \quad (16)$$

La distribución de temperatura al final del período de ca-

lentamiento ($t = t_{fc}$) en general no es uniforme, pudiéndose expresar como una función $f(r,z)$. Esta distribución inicial de temperatura en el período de enfriamiento debe ser igual a la distribución existente al final del período de calentamiento y por consiguiente vendrá dada por la ecuación (5) con $t = t_{fc}$, siendo entonces la condición inicial de la ecuación (14):

$$V_2(r,z,0) = f(r,z) \quad (17)$$

Las condiciones de borde que se emplearon, implican que el coeficiente de transferencia de calor superficial es elevado y que el medio de enfriamiento se encuentra a temperatura cero.

Debido a que el medio de enfriamiento no se encuentra, en general, a una temperatura de cero, se hace menester realizar el siguiente cambio de variables, con el fin de obtener la temperatura real, a partir del valor dado por la ecuación (14):

$$V_2(r,z,t)_R = V_2(r,z,t) + TAF \quad (18)$$

Modelo para la Degradación Promedio de Nutriente en el Envase

Una vez que se conocen las temperaturas en cualquier punto del envase $V_i(r,z,t)$ ($i = 1$ para el período de calentamiento e $i = 2$ para el de enfriamiento), calculadas a partir de las ecuaciones (5), en el caso de $V_1(r,z,t)$ para $\theta \leq t_{fc}$ (período de calentamiento) y (14), en el caso de $V_2(r,z,t)$, para $\theta > t_{fc}$ (período de enfriamiento), es posible introducir las en la ecuación (4) para calcular la fracción remanente de nutriente en cualquier momento del procesamiento en un punto cualquiera del envase.

Al final del período de calentamiento ($\theta = t_{fc}$) existe un perfil de concentración de nutrientes creciente, desde los bordes de la lata hacia el centro de ésta. Por consiguiente, cada punto del envase tendrá una concentración $C(r,z,t_{fc})$, al comenzar el período de enfriamiento. Debido a esto, la concentración inicial de nutriente en cada punto del producto, al comenzar el período de enfriamiento será variable. Este hecho debe ser tomado en cuenta al aplicar la ecuación (4).

La concentración $C(r,z,t_{fc})$ se calcula introduciendo la ecuación (5) en la (4), haciendo $\theta = t_{fc}$:

$$C(r,z,t_{fc})/C_0 = \exp\{(-1n10/DO) \int_0^{t_{fc}} \exp((V_1(r,z,t)-250)/(ZO/1n10))dt\} \quad (19)$$

El valor de $C(r,z,t_{fc})$ así calculado se substituye por el valor de C_0 (concentración inicial) en la ecuación (4), para los cálculos en el proceso de enfriamiento.

Durante el enfriamiento ($\theta > t_{fc}$), el perfil de temperatura en el producto envasado se calcula mediante la ecuación (14). Haciendo estas substituciones se obtiene que:

$$C(r,z,t)/C_0 = \exp\{(-1n10/DO) \int_0^{t_{fc}} \exp((V_1(r,z,t)-250)/(ZO/1n10))dt\} \exp\{(-1n10/DO) \int_0^{\theta-t_{fc}} \exp((V_2(r,z,t)-250)/(ZO/1n10))dt\} \quad (20)$$

La ecuación (20) representa la fracción remanente de nutriente en un punto de coordenadas (r,z) del envase, una vez que el producto ha sido calentado por un tiempo t_{fc} , y enfriado por un tiempo $\theta - t_{fc}$, siendo θ el tiempo total de procesamiento, incluyendo el calentamiento y el enfriamiento.

La fracción promedio de nutriente remanente en el envase después de un tiempo θ de procesamiento, se puede estimar tomando la integral doble de la función dada por la ecuación (20) en el volumen del cilindro:

$$\bar{C}/C_0 = \frac{2}{1 a^2} \int_0^1 \int_0^a (C(r,z,t)/C_0) r' dr dz \quad (21)$$

substituyendo (20) en (21):

$$\bar{C}/C_0 = \frac{2}{1 a^2} \int_0^1 \int_0^a \exp(-1n10/DO) \cdot$$

$$\int_0^{t_{fc}} \exp((V_1(r,z,t)-250)/(ZO/1n10))dt).$$

$\exp(-1n10/DO).$

$$\int_0^{\theta-t_{fc}} \exp((V_2(r,t,z)-250)/(ZO/1n10))dt. r dr dz \quad (22)$$

viniedo $V_1(r,z,t)$ y $V_2(r,z,t)$ dadas por las ecuaciones (5) y (14) respectivamente.

La ecuación (22) representa el modelo matemático para la predicción de la fracción promedio de nutriente remanente en el producto envasado, después de su procesamiento técnico.

Resolución Computacional del Modelo

El modelo matemático desarrollado en este trabajo representado en la ecuación (22), fue resuelto computacionalmente mediante la elaboración de un programa, escrito en lenguaje Fortran IV. La entrada de los datos al programa es la siguiente:

- a) En la primera tarjeta: semialtura de la lata (XL) y radio de la lata (A), en pulgadas.
- b) En la segunda tarjeta: difusividad térmica (XK) del producto (en pulgada²/min), el tiempo de reducción decimal a 250 °F (XKO) (en minutos) y el inverso de la pendiente de la curva de destrucción térmica del nutriente (AA) (en °F).
- c) En la tercera tarjeta: temperatura inicial del producto (TO) (en °F), la temperatura del vapor (TV) (en °F), la temperatura del agua de enfriamiento (TAF) (en °F), el tiempo de calentamiento (TFC) (en minutos) y el tiempo de enfriamiento (TFE) (en minutos).

En todos los casos los datos pueden tener hasta cinco decimales y ocupan diez columnas, sin importar donde se encuentre el punto decimal dentro de éstas. Por ejemplo, en

la tercera tarjeta, el tiempo de calentamiento, puede ocupar cualquier espacio comprendido entre las columnas 31 y 40 (ambas inclusive), con un punto decimal.

En los resultados del programa se escribe la temperatura en el centro de la lata al final del período de calentamiento y al final del proceso. El primer valor de VAL (fracción de nutriente remanente en el producto) es de uno, para recordar que se comenzó con un 100 por ciento de concentración de nutriente en el producto. El segundo valor de VAL es la fracción remanente de nutriente al final del proceso.

En caso de que se desee estudiar la destrucción térmica de otra substancia o de un microorganismo con cinética de degradación térmica de orden uno, basta con cambiar en los datos las constantes de cinética (XKO y AA); si el producto cambia, también se cambiará la difusividad térmica de éste (XK).

El programa fue desarrollado y probado en una computadora PDP 11/45. En el caso de que éste fuese a ser utilizado en otra máquina, bastará en general, cambiar las unidades de entrada y salida por las unidades correspondientes. El listado del programa puede ser solicitado directamente a los autores.

EVALUACION DEL MODELO

Con el fin de evaluar el modelo aquí desarrollado, se utilizaron datos obtenidos experimentalmente. Para la obtención de los mismos, se procedió a la elaboración de un modelo de alimento simulado y a la realización de procesamientos térmicos que cumpliesen con las condiciones iniciales y de borde del modelo, con el fin de estimar la pérdida de nutrientes.

Preparación de un Modelo de Alimento Simulado

Para la obtención de un modelo alimentario que se calentara por conducción, se preparó una mezcla de almidón de maíz al 6.0%, con carboximetilcelulosa al 1.75%, la cual tenía una difusividad térmica de $0.101677 \text{ cm}^2/\text{min}$ ($0.01576 \text{ pulg}^2/\text{min}$).

Debido a que el modelo matemático desarrollado supo-

ne cinética de primer orden para la degradación térmica de nutrientes, se escogió para el estudio a la vitamina B1 o tiamina, por presentar fácil dispersión, ser termolábil y poseer cinética de degradación térmica de orden uno (9).

Las mezclas de almidón de maíz y carboximetilcelulosa, se prepararon dispersando estos componentes en solución de buffer de fosfato de pH 6. Se escogió este valor de pH debido a que la tiamina es termolábil a dicho valor y a que se dispone de las constantes de la cinética de la reacción de degradación a este pH. Estas constantes fueron calculadas por los autores de este trabajo a partir de los datos presentados por Mulley et al. (10) (11). Los valores obtenidos para las constantes cinéticas fueron de $DO = 157.2$ min y $ZO = 7.2^{\circ}C$ ($45^{\circ}F$).

El procedimiento seguido para la elaboración del modelo alimentario fue el siguiente: se preparó el buffer de fosfato a pH 6 y a una cierta cantidad de ese buffer se le añadió carboximetilcelulosa, en la proporción antes indicada, con agitación constante. Una vez disuelta ésta, se agregó el almidón de maíz, (grado U.S.P.), previamente disuelto en una pequeña cantidad del mismo buffer. Después de homogeneizado, se calentó durante aproximadamente 25 minutos con mechero, hasta que se alcanzó la temperatura de ebullición a presión atmosférica (aproximadamente 670 mm Hg) de $92^{\circ}C$. Esta operación se realizó con el fin de gelatinizar el almidón. Aproximadamente cinco minutos antes de que se alcanzara la temperatura antes indicada, se le añadió tiamina (en forma de clorhidrato de tiamina) en una proporción aproximada de 10 mg. por cada 100 g. de mezcla y se homogeneizó cuidadosamente antes de que ocurriera la gelatinización del almidón en la mezcla. La mezcla así preparada, se enfrió, homogeneizó, enlató y se llevó a una refrigeradora ($5.6^{\circ}C$) por aproximadamente 24 horas y se tomaron muestras para determinar el contenido inicial de tiamina en el producto enlatado.

Después de estabilizadas térmicamente, las mezclas enlatadas fueron procesadas en un autoclave vertical. Este autoclave posee un control automático de temperatura ($\pm 0.56^{\circ}C$), y está dotado de un sistema de enfriamiento por agua a presión atmosférica. Las muestras fueron procesadas a diversas temperaturas por diferentes períodos. Una vez fina-

lizado el calentamiento, para cada caso, las muestras fueron enfriadas con agua dentro del autoclave, llevadas a una refrigeradora a 5.6°C y analizadas para determinar el contenido residual de tiamina. En todos los casos se llevaron a cabo estudios de penetración de calor durante el procesamiento térmico, según el procedimiento descrito por Alstrand y Ecklund (12).

Análisis Químico de la Tiamina

Para el análisis de la tiamina en las muestras, antes y después de su procesamiento térmico, se utilizó el método del tiocromo, descrito en detalle en la literatura (13).

Antes de realizar los análisis, se tuvo especial cuidado de homogeneizar perfectamente las muestras.

Diseño Experimental

Con el fin de evaluar las pérdidas de tiamina durante el procesamiento térmico, se realizaron tres corridas, la primera a 120°C (248°F) durante 44.5 minutos, en latas 211 x 300; la segunda a 118.9°C (246°F) por 59 minutos, en latas 307 x 409 y la tercera por 60 minutos a 126.1°C (259°F), en latas 211 x 300.

En cada corrida se determinó la fracción de tiamina retenida de la siguiente manera: el modelo alimentario preparado fue envasado en cinco latas, una de las cuales (control) no fue procesada, siendo analizada por triplicado para determinar el contenido inicial de tiamina. Las otras cuatro fueron procesadas térmicamente, siendo utilizada una de ellas como testigo en los experimentos de penetración de calor. Después de procesadas se descartó la lata utilizada como testigo, siendo las otras analizadas individualmente con el fin de determinar el contenido residual de tiamina.

En cada determinación de tiamina se preparó suficiente cantidad de solución, de forma que se pudiesen realizar cuatro replicados de cada muestra, obteniéndose por consiguiente doce replicados de las muestras procesadas e igual número del control, sin procesar.

Los resultados así obtenidos fueron tratados estadísticamente, para determinar los promedios, las desviaciones es-

tandar y los intervalos de confianza.

RESULTADOS Y DISCUSION

El modelo desarrollado fue evaluado en base a los resultados obtenidos experimentalmente. En todos los casos se procedió a simular los diversos procesos térmicos en una computadora digital PDP 11/45. En ninguno de éstos se pudo simular el modelo de Teixeira et al. (6), debido a que las restricciones del modelo hicieron imposible tal simulación, al no funcionar en ninguno de ellos.

Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 1. Dichos resultados fueron tratados estadísticamente con el fin de obtener los intervalos de 90% de confianza en los valores medios, para ello se utilizó la distribución "t" de Student.

En todos los casos, los valores predichos por el modelo se encuentran dentro del intervalo de 90% de confianza y por consiguiente se pueden considerar satisfactorios. Las desviaciones porcentuales de los valores teóricos con relación a los valores medios de los intervalos fueron de 2.3, 1.0 y 0.2% en los casos uno, dos y tres respectivamente.

Se pudo constatar que las ecuaciones empleadas para la predicción de la temperatura, tanto durante el calentamiento como durante el enfriamiento (ecuaciones 5 y 14) eran satisfactorias, ya que los resultados de ellas obtenidos presentaron desviaciones porcentuales comprendidas entre cero y 2.4% con relación a los valores experimentales, siendo el promedio de las desviaciones de 0.66%.

La resolución computacional del modelo no tuvo las restricciones del programa de Teixeira et al. (6), siendo completamente general y por consiguiente aplicable a cualquier caso.

La duración del programa presentado en una computadora PDP 11/45, fue aproximadamente de dos minutos con 10 segundos y no dependió de las condiciones de procesamiento térmico. La duración del programa desarrollado por Teixeira et al. (6) es variable, dependiendo de las condiciones de procesamiento, oscilando en las pruebas realizadas entre dos minutos con 30 segundos y cuatro minutos con cinco segundos, llegando en algunos casos con tiempos largos de calentamiento a sobrepasar los seis minutos. Por lo cual, el programa presentado es más eficiente desde el punto de vis-

TABLA 1.- Fracción de tiamina retenida en diversos procesos térmicos en un modelo de alimento simulado* (almidón: 6%, carboximetilcelulosa: 1.75%) con pH 6. $\alpha = 0.10168 \text{ cm}^2/\text{min}$ ($0.01576 \text{ pulg}^2/\text{min}$).

Ca so	Lata	V _o °C (°F)	V _v °C (°F)	TAF °C (°F)	t _{fc} min	t _{fe} min	V ₁ (0,0,t _{fc}) V ₂ (0,0,t _{fe}) °C (°F)	Fracción de tiamina retenida		
								Modelo de este tra- bajo	Experi- mental	Intervalo de 90% de confianza
1	211x 300	5.56 (42)	120.0 (248)	24.4 (76)	44.5	50.5	108.6(227.4) 28.9(84.0)	0.775	0.793	± 0.021
2	307x 409	5.56 (42)	118.9 (246)	25.0 (77)	59.0	91.0	95.1(203.1) 27.9(82.3)	0.790	0.798	± 0.023
3	211x 300	4.44 (40)	126.1 (259)	23.3 (74)	50.0	60.0	117.7(243.9) 25.9(82.3)	0.596	0.597	± 0.008

* DO = 157.2 min, ZO = 7.2 °C (45°F) (valores calculados de los datos presentados por Mulley et al. (10) (11).

ta computacional que el de esos autores. La comparación de ambos programas fue realizada con valores de $NR = NH = 10$ y $DU = 0.125$ para el programa de Teixeira et al. (6) y con valores de $N=M=MM=NMIU=3$ y $NPE=NPC=20$ para el programa de este trabajo.

De todo lo anterior se puede concluir lo siguiente:

- a) El modelo aquí desarrollado es completamente general, ya que funciona en cualquier posible caso que se le pueda presentar.
- b) El modelo de este trabajo arroja resultados satisfactorios en todos los casos estudiados experimentalmente, dentro del intervalo de 90% de confianza. Algo análogo ocurrió con los resultados obtenidos del modelo de Teixeira et al. (7), por consiguiente ambos modelos proporcionan resultados comparables en cuanto a su grado de confiabilidad.
- c) Los tiempos de computación requeridos para el modelo desarrollado son menores que los requeridos para el modelo de Teixeira et al. (6) y por consiguiente se puede afirmar que el primero es más eficiente desde el punto de vista computacional.

SUMMARY

Formulation and evaluation of a mathematical model to predict losses in nutrients during the thermal processing of canned foods.

The purpose of this paper was the development of a mathematical model to predict losses of nutrients with first order degradation kinetics during the thermal processing of conduction-heated foods. The model do not require experimental heat penetration data and operate for any possible case. It was evaluated experimentally for different thermal processes, being all the results within the 90% confidence interval on the mean experimental values. These results were obtained with a Fortran IV computer program elaborated for this purpose. The duration of this program was two minutes and ten seconds in a PDP 11/45 computer and was more efficient than others presented in the literature.

BIBLIOGRAFIA

1. Stumbo, C. R. New procedures for evaluating thermal process for

- foods in cylindrical containers. *Food Technol.* 7: 309. 1953.
2. Ball, C. O. y F. C. W. Olson. *Sterilization in Food Technology*. McGraw Hill, Nueva York, 1957. Cap. 12.
 3. Hayakawa, K. New parameters for calculating mass average sterilizing values to estimate nutrients in thermally conductive food. *Can. Inst. Food Technical. J.* 2: 167, 1969.
 4. Jen, Y., Mansow, J. E., Stumbo, C. R. y J. W. Zahradnik. A procedure for estimating sterilization of and quality factor degradation in thermally processed foods. *J. Food Sci.* 36: 692. 1971
 5. Stumbo, C. R. *Thermobacteriology in Food Processing*. 2nd ed., Academic Press, Nueva York, 1973. Cap. 9.
 6. Teixeira, A. A., Dixon, J. R., Zahradnik, J. W. y G. E. Zinsmeister. Computer optimization of nutrient retention in the thermal processing of conduction-heated foods. *Food Technol.* 23: 845. 1969.
 7. Teixeira, A. A., Stumbo, C. R. y J. W. Zahradnik. Experimental evaluation of mathematical and computer models for thermal process evaluation. *J. Food Sci.* 40: 653. 1975.
 8. Carslaw, H. S. y J. C. Jaeger. *Conduction of Heat in Solids*. 2nd. ed., Oxford University Press, Londres, 1959. Cap. 8.
 9. Feliciotti, E. H. y W. B. Esselen. Thermal destruction rates of
 10. Mulley, E. A., Stumbo, C. R. y W. H. Hunting. Kinetics of thiamine degradation by heat. Effect of pH and form of vitamin on its rate of destruction. *J. Food Sci.* 40: 989. 1975.
 11. Mulley, E. A., Stumbo, C. R. y W. H. Hunting. Kinetics of thiamine degradation by heat. A new method for studying reaction rates in model systems and food products at high temperatures. *J. Food Sci.* 40: 985. 1975.
 12. Alstrand, D. V. y O. F. Ecklund. The mechanics and interpretation of heat penetration tests in canned foods. *Food Technol.* 6: 185. 1952.
 13. Association of Official Agricultural Chemists. *Official Methods of Analysis of the AOAC*. 11th ed., Washington, D. C., 1970. p. 771.

LISTA DE SIMBOLOS

Letras Latinas

- a: radio del envase cilindrico (cm).
- C_0 : concentración inicial de nutriente en el envase, constante (mg/g).
- $C(r,z,t)$: concentración de nutriente en cualquier punto del envase (mg/g).
- C : concentración promedio de nutriente en el envase (mg/g).
- DO: tiempo para destruir 90% de los nutrientes (o de los microorganismos) a una temperatura de 121,1 °C (250 °F) (min).
- $f(\)$: función de
 - i: subíndice, igual a 1 para el calentamiento e igual a 2 para el enfriamiento.
 - k_1 : constante de velocidad de la reacción (min^{-1}).

- l:** semialtura del envase cilíndrico (cm)
n: número entero positivo.
r: coordenada radial (cm)
TAF: temperatura promedio del agua de enfriamiento ($^{\circ}\text{C}$)
t: tiempo (min)
 t_{fc} : tiempo final de calentamiento (min)
 t_{fe} : tiempo final de enfriamiento (min)
 $V_i(r,z,t)$: temperatura ficticia en cualquier punto del envase cilíndrico, dada por las ecuaciones (5) y (14) ($^{\circ}\text{C}$)
 $V_i(r,z,t)_R$: temperatura real en cualquier punto del envase cilíndrico ($^{\circ}\text{C}$)
 V_o : temperatura inicial del producto envasado, constante ($^{\circ}\text{C}$)
 V_v : temperatura del medio de calefacción, constante ($^{\circ}\text{C}$)
z: coordenada axial (cm)
ZO: inverso de la pendiente de la curva de destrucción térmica de los nutrientes ($^{\circ}\text{C}$)

Letras Griegas

- α :** difusividad térmica del producto envasado (cm^2/min)
 μ : parámetro definido en el texto como raíz de la ecuación $J_0(\mu a) = 0$
 θ : tiempo total de procesamiento, incluyendo calentamiento y enfriamiento (min).