

Transferencia de materia y transmisión de calor en la precocción del listado (*Katsuwonus pelamis*).*

Por

J. M. GALLARDO ** y A. VÁZQUEZ **

INTRODUCCIÓN

La calidad de los alimentos enlatados depende del procesamiento a que se somete, siendo necesario el establecimiento de la temperatura de coagulación de las proteínas por el calor y la idónea para enlatar el producto que no suministre exudado acuoso, así se evita una sobrecocción que da lugar a una reducción en el rendimiento y a la aparición de sabores no característicos que afectan a las propiedades organolépticas.

Dada la importancia de la precocción en las fábricas de conservas, es fundamental prestar atención a aspectos tan fundamentales como la transferencia de materia y transmisión del calor.

Si se tiene en cuenta el gran desarrollo de esta industria conservera y el importante impacto económico de las conservas, muy particularmente las de túnidos, se deduce que los datos de transmisión de calor son muy necesarios para desarrollar un procedimiento óptimo que permita un ahorro energético y obtener un mejor producto y rendimiento final.

Para ello, se debe estudiar la distribución de temperaturas en muestras de listado sometidas a la precocción y aplicar fórmulas teóricas para el cálculo de la transmisión de calor por conducción para cuerpos de determinada forma geométrica que permitan conocer las temperaturas y tiempos de cocción idóneos.

* Recibido el 20 de junio de 1977.

** Laboratorio del Instituto de Investigaciones Pesqueras. Muelle de Bouzas. VIGO.

CARSLAW et al. (1959) y HAYAKAWA (1970, 1972) han aplicado una serie de fórmulas teóricas que permiten predecir las temperaturas en estos procesos.

CARLHEIM-GYLLESKÖLD (1970), da detalles sobre la evolución de la temperatura interior en función del tiempo, a diferentes profundidades en muestras de carne y pescado.

Son de destacar los trabajos realizados por THILLE et al. (1932), FERRER et al. (1972) y FUNK y BOYLE (1972), referencias de BENGTSSON et al. (1976), sobre la velocidad de transmisión del calor en carnes en función del medio, de la temperatura y de la composición de las muestras.

OBJETO

Resaltada la importancia de la transmisión del calor en los procesos de precocción y esterilización, la principal dificultad es conocer el tiempo que debe durar dicho proceso para que el pescado se cueza justamente, ya que una cocción corta lo hace inapetecible y, por el contrario, una cocción excesiva lo vuelve insípido, viéndose afectados el rendimiento y propiedades organolépticas.

Existen una serie de fórmulas para estimar la temperatura en el interior de los sólidos; algunas expresiones matemáticas son complejas y casi todas teóricas. Las fórmulas teóricas se obtienen por resolución de la ecuación de Fourier de conducción del calor, y son las que se han aplicado en este trabajo a fin de encontrar una relación entre los tiempos de cocción, temperatura y propiedades físicas.

Los objetivos de este trabajo son:

1) Establecer para el listado (*Katsuwonus pelamis*) la temperatura de coagulación de la proteína y la temperatura central más idónea que evite en el enlatado el exudado acuoso.

2) Aplicar la teoría de transmisión del calor, por conducción en estado no estacionario, a la precocción del listado a fin de obtener unos diagramas que nos permitan conocer el tiempo de cocción y comprobar si existe la linealidad en este sistema biológico.

3) Correlacionar los tiempos de cocción con el cociente Peso (kg) del listado/Longitud (cm) del listado.

PARTE TEÓRICA

Si en la transmisión del calor por conducción en cada punto la temperatura varía con el tiempo, la transmisión del calor por conducción tiene

lugar en régimen transitorio o no estacionario. El régimen no estacionario tiene lugar en muchos procesos industriales tales como en la fabricación del vidrio, cocido de ladrillos, vulcanización del caucho, etc.

Cuando se introduce un sólido en un medio que está a una temperatura determinada y uniforme y su permanencia en el medio es prolongada, la temperatura en un punto del sólido tiende asintóticamente a la del medio calefactor. En la figura 1, se puede ver como la temperatura del listado en la parte central va tendiendo a la del medio.

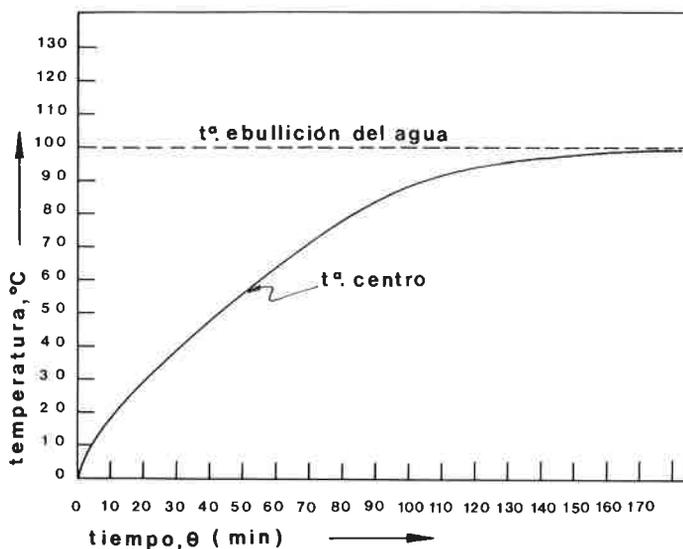


Fig. 1.—Relación tiempo-temperatura por el calentamiento en régimen transitorio del listado (*Katsuwonus pelamis*).

Hay una serie de desarrollos matemáticos necesarios para calcular las relaciones entre la temperatura y el tiempo en diversos puntos del sólido de forma geométrica variable; dichas relaciones incluyen soluciones gráficas, y van implicadas una serie de propiedades físicas o térmicas como son: la conductividad térmica, densidad, calor específico, forma geométrica, coeficiente de transmisión del calor entre el medio y la superficie, y la temperatura del medio.

La ecuación diferencial general de la conducción del calor en estado no estacionario se obtiene de la de Fourier y para un flujo unidireccional es:

$$\frac{\delta t}{\delta \theta} = \frac{k}{\rho C_p} \frac{\delta^2 t}{\delta x^2} \quad (1) \quad \frac{k}{\rho C_p} = \alpha$$

donde: k = Conductividad térmica, ρ = Densidad, C_p = Capacidad calórica, siendo el coeficiente $\frac{k}{\rho \cdot C_p}$ una constante llamada difusividad térmica.

El análisis dimensional de la ecuación general (1), nos conduce a la siguiente expresión:

$$Y = t - t_m / t - t_o = f \left(\frac{\alpha \theta}{x^2}, \frac{h \cdot x}{k}, \frac{x}{x_m} \right) \quad (2)$$

en la que el módulo de temperatura $t - t_m / t - t_o$ es función del módulo de tiempo, $\alpha \cdot \theta / x^2$, del de transmisión del calor, $h \cdot x / k$ y del de posición x / x_m .

Si suponemos que el listado tiene forma cilíndrica, la ecuación 2 se convierte en:

$$-\frac{\delta t}{\delta \theta} = \alpha \left(\frac{\delta^2 t}{\delta r^2} + \frac{1}{r} \frac{\delta t}{\delta r} \right) \quad (3)$$

donde r es el radio del cilindro.

Aplicando el análisis dimensional a esta última ecuación, se obtiene la siguiente función de la temperatura:

$$t - t_m / t - t_o = f \left(\frac{\alpha \theta}{R^2}, \frac{hR}{k}, \frac{x}{R} \right) \quad (4)$$

y la temperatura en el centro del listado, sobre el eje cilíndrico será:

$$\frac{t - t_m}{t - t_o} = f \left(\frac{hR}{k}, \frac{\alpha \theta}{R^2} \right) \quad (5)$$

Muchos de estos cálculos han sido reproducidos de la publicación de McADAMS (1954), los diagramas obtenidos en función de los módulos adimensionales se representan sobre papel semilogarítmico, de manera que a lo largo del eje Y se representa el módulo de temperatura, y a lo largo del eje X el módulo de tiempo para cada valor del número de Biot, $h \cdot R / k$.

La aplicación de estos conceptos a un sistema biológico es interesante, ya que no siempre hay concordancia con los diagramas de McADAMS (1954), lo cual indica la complejidad del sistema.

Estas pequeñas diferencias se deben con gran exactitud a las variaciones de densidad y conductividad térmica que tienen lugar cuando se coagula la proteína; sin embargo, parece lógico pensar que estas variaciones no afectaran a la relación lineal de los módulos de temperatura y tiempo,

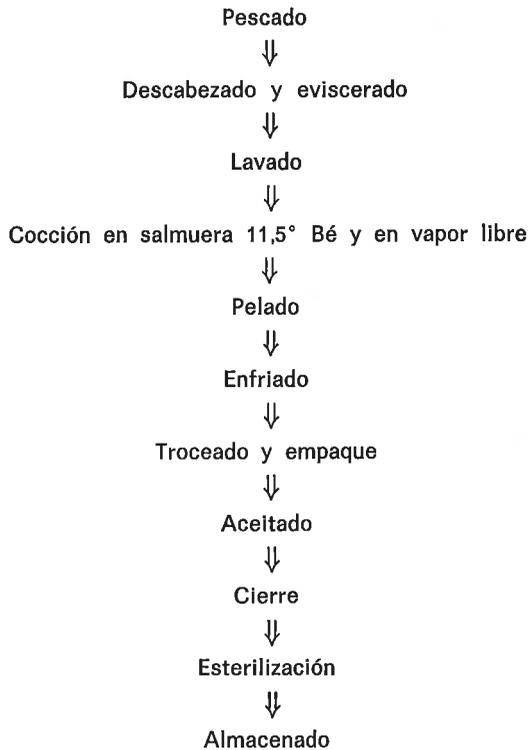
lo cual probaría que el tiempo necesario para alcanzar una temperatura central final determinada varía inversamente proporcional a la difusividad térmica y directamente proporcional al cuadrado del espesor.

PARTE EXPERIMENTAL

Proceso de fabricación.

En el cuadro I se describe el proceso de fabricación que se ha seguido para la conserva de listado.

CUADRO I



Materia prima

La materia prima utilizada en este trabajo está constituida por listado (*Katsuwonus pelamis*), de las siguientes características:

- peso en kg desde 1,5 a 2,8
- longitud en cm desde 43,0 a 52,5

Las relaciones Peso/Longitud coinciden con las suministradas por la bibliografía, LENARZ, W. H. (1971) y CHATWIN, B. M. (1959).

Las muestras empleadas estaban congeladas y se procedió a su descongelación para la cocción.

Medida de la temperatura

Las temperaturas internas de los listados se midieron con un termómetro digital «Schneider TT300», después de introducir las distintas sondas en la parte central, en la zona superior más ancha del pescado.

Después de la precocción se comprobó de nuevo la posición de la sonda en el interior del pescado.

Método de fabricación de las conservas

El listado procedente de la cámara congeladora se deja descongelar y posteriormente se eviscera, descabeza y lava.

Se introduce en la balsina de cocción para cocerlo en una salmuera de 11,5° Bé o en un cocedero de vapor libre según el sistema que se desee emplear.

Una vez cocido se deja enfriar alrededor de las 18 horas y finalmente se limpia y se empaca mediante una máquina apropiada, se añade aceite, se cierra en caliente y se esteriliza.

RESULTADOS EXPERIMENTALES

Métodos de cocción

En el cuadro II se muestran los valores medios de las pérdidas de peso que tienen lugar en la precocción del listado (*Katsuwonus pelamis*) en vapor directo y en un baño de salmuera de 11,5° Bé.

CUADRO II

Valores medios de pérdidas de peso en la cocción del listado

Lote	Tiempo cocción (minutos)	Pérdidas de peso %					
		0 h		6 h		20 h	
		V	S	V	S	V	S
A	45	9,9	9,3	14,1	13,8	14,8	14,6
B	60	11,9	13,1	17,2	17,4	17,9	18,1
C	75	14,5	15,5	18,1	19,8	19,1	21,6

Nota: V = Precocción al vapor

S = Precocción en salmuera

El análisis de varianza aplicado nos indica que no se aprecian diferencias significativas entre los sistemas de precocción empleados.

Sin embargo, las diferencias respecto al tiempo de precocción son muy significativas.

De estas experiencias de precocción se ha comprobado que la temperatura central a la cual se desnaturaliza la proteína del listado está en el rango de 57-58° C.

CUADRO III

Contenido medio en exudado acuoso del listado enlatado en función de la temperatura central final de la precocción

Temperatura central final (°C)	Exudado (cc)
51	4,0
64	1,5
70	0,0

En el cuadro III se pueden ver los valores medios del contenido en exudado acuoso de las conservas del listado empleado y precocinado a diferentes temperaturas internas.

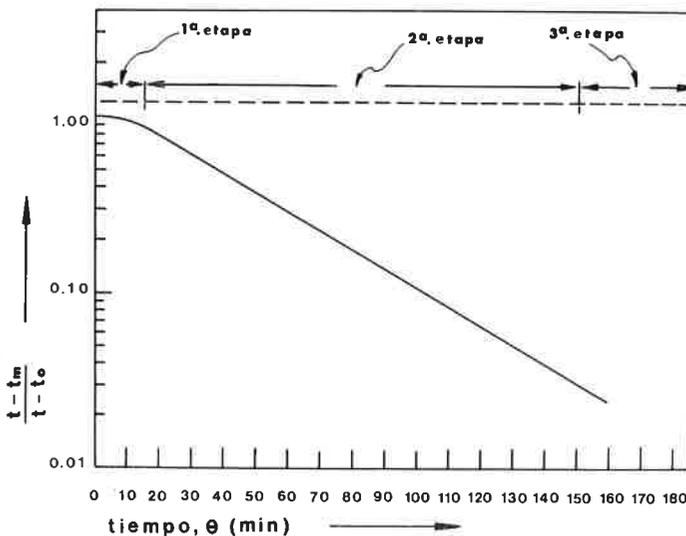


Fig. 2.— Variación relativa de la temperatura con el tiempo en el listado (*Katsuwonus pelamis*).

Se puede observar que el exudado acuoso está afectado por la temperatura central alcanzada y naturalmente por el tiempo de cocción, el análisis de varianza nos indica que se aprecian diferencias significativas con respecto a la temperatura.

Por otra parte, se deduce de estas experiencias que la temperatura central más idónea que debe alcanzar un listado que va a enlatarse es del orden de 64-70° C.

En la figura 2, se observa que el logaritmo del exceso de temperatura varía linealmente con el tiempo en todos los puntos del listado.

Cuando el calentamiento es prolongado $t \rightarrow \infty$, y $F_0 \rightarrow \infty$, todos los puntos adquieren la misma temperatura, estableciéndose el proceso estacionario.

En la figura 2, se puede ver como el proceso de transmisión de calor se divide en tres etapas; en la primera hay un régimen irregular, que se caracteriza por la influencia de la temperatura inicial y ocurre en un intervalo pequeño.

La segunda etapa es de régimen regular, en ella se observa que la velocidad de calentamiento es una constante que representa la pendiente de la recta y depende de las propiedades físicas y geometría del pescado y de las condiciones de transmisión de calor.

La tercera etapa es de menor importancia y en ella todos los puntos del pescado adquieren la temperatura del medio calefactor, estableciéndose el equilibrio térmico. Esta etapa es similar a la transmisión de calor en estado estacionario.

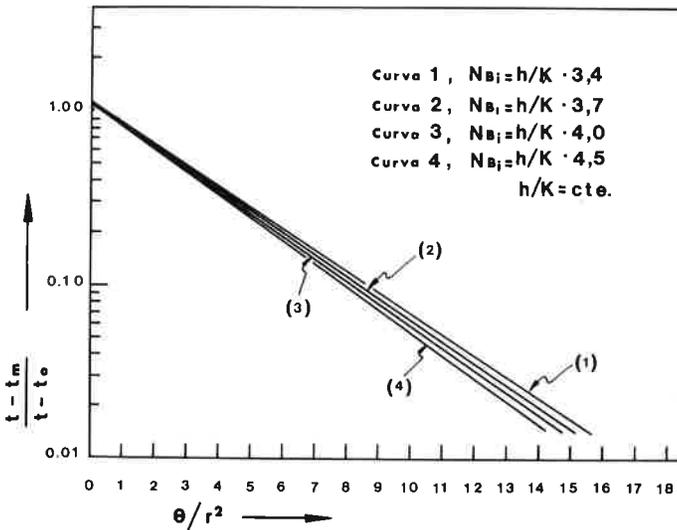


Fig. 3.— Variación relativa de la temperatura frente al módulo de tiempo θ/r^2 para listados (*Katsuwonus pelamis*) de diferente biometría.

En la figura 3, se representan las variaciones relativas de temperaturas, $t - t_m/t - t_0$, frente al módulo de tiempo, θ/r^2 para listados de diferente biometría. Se ha supuesto que α y h/k son constantes en todas las experiencias; tanto en la cocción al vapor como en salmuera agitada, el valor del coeficiente de transferencia, h , es elevado.

Las ecuaciones de las curvas de la figura 3, son del tipo:

$$Y = A \cdot e^{-BX} \quad (6)$$

en la que $Y = \text{Módulo de temperatura} = t - t_m/t - t_0$

$X = \text{Módulo de tiempo} = \theta/r^2$

Los valores de A y de B obtenidos se muestran en el cuadro IV. Con coeficientes de correlación de 0,9999 ($P < 0,01$).

CUADRO IV

Radio del listado (cm)	A	B
3,4	1,13	-0,24
3,7	1,08	-0,28
4,0	1,07	-0,29
4,5	1,07	-0,30

De cada una de las curvas y para cualquier temperatura final se puede deducir el tiempo de cocción en minutos en función del cuadrado del radio.

Asimismo, se han correlacionado los tiempos de cocción con las relaciones Peso (kg)/Longitud (cm), P/L , habiéndose observado que en el rango de trabajo $0,036 \leq \frac{P}{L} \leq 0,052$ que comprende los tamaños comerciales procesados, los datos se ajustan a una línea recta y a una curva potencial, cuyos parámetros dependen de la temperatura inicial, de la del medio y de la central que se desee alcanzar.

Para el caso particular de este estudio en el que la temperatura en el eje que debe alcanzar un listado que va a enlatarse es de 64°C , partiendo de una temperatura inicial de $0-2^\circ \text{C}$ y con una temperatura de salmuera del orden de los 100°C , la ecuación deducida es:

$$\theta \text{ (minutos)} = 1443,28 \text{ (Peso/Longitud)} - 5,43 \quad (7)$$

con un coeficiente de correlación de 0,9450 ($P < 0,01$).

Para poder corroborar si es la recta o la curva potencial la que ajusta

mejor los datos sería conveniente ampliar el presente trabajo, utilizando ejemplares de mayor tamaño.

CONCLUSIONES

1.º) El análisis de varianza de las experiencias de precocción del listado *Katsuwonus pelamis*, nos muestra que las diferencias según los tiempos de cocción son significativas así como con los tiempos de secado, no apreciándose diferencias entre los dos sistemas de cocción empleados.

2.º) De las experiencias de precocción se concluye que la temperatura de coagulación de la proteína para el *Katsuwonus pelamis* es del orden de 57-58° C y que la mayor pérdida de humedad tiene lugar alrededor de los 65° C, con lo cual se ve una mayor dependencia de la temperatura que del tiempo.

3.º) Del análisis de las conservas de listado se deduce que el exudado acuoso es mínimo o nulo cuando la temperatura central final del listado cocido está en el rango 64-70° C.

4.º) La representación experimental de los datos de transmisión de calor en diagramas como el de la figura 3, nos permite confirmar la existencia de una relación lineal y calcular el tiempo de cocción y la temperatura central del listado de las dimensiones dadas.

5.º) Se confirma la existencia de una relación lineal entre el tiempo de precocción y el cociente (Peso kg/Longitud cm) que nos permite de una manera rápida y sencilla calcular el tiempo de cocción en minutos.

NOMENCLATURA

C_p = Calor específico Kcal/kg °C

F_o = Número de Fourier, adimensional, $= \alpha\theta/R^2$

h = Coeficiente superficial de transmisión de calor entre el medio y el listado, Kcal/h · m² °C

k = Conductividad térmica del listado, Kcal/h · m · °C

N_{Bi} = Número de Biot = $h \cdot R/k$

R = Radio del cilindro, cm

t = Temperatura del medio (salmuera), °C

t_m = Temperatura en el centro en un instante θ , °C

t_o = Temperatura inicial del listado, °C

$\alpha = k/\rho \cdot C_p =$ Difusividad térmica, m²/h

x = Distancia normal de un punto a la superficie, m

x_{in} = Distancia del eje central a la superficie, m

θ = Tiempo desde la iniciación del calentamiento, minutos

ρ = Densidad del listado, kg/m³

AGRADECIMIENTO

Agradecemos a los doctores LÓPEZ-BENITO y FRANCO y a L. PASTORIZA, M. P. GONZÁLEZ, E. C. LÓPEZ VEIGA y G. SAMPEDRO la lectura y crítica de este trabajo.

SUMMARY

MASS AND HEAT TRANSFER IN THE COOKING OF SKIPJACK TUNA (*Katsuwonus pelamis*). — In this paper a study on precoction of skipjack tuna, *Katsuwonus pelamis*, in brine and steam is presented.

The difference in the loss weight in both cases were found not to be significative.

During heating the temperatures in the center of the body were determined as a function of heating time. The protein denaturation occurs mainly between 57-58° C.

When the experimentally determined time-temperature relationship during boiling, were plotted in a diagram, according to McADAMS (1954), a stright line was found. The linear relationship obtained means that the time to reach a given center temperature of the body vary inversely with the thermal diffusivity and directly with the square of the radius of the product.

A equation for estimating the optimize cooking time for the Weight/Lenght relationship is obtained.

BIBLIOGRAFÍA

- BENGTSSON, N. E., B. JAKOBSSON and M. DAGERSKOG. — 1976. Cooking of beef by oven roasting: A study of heat and mass transfer. *J. Food Sci.*, 41: 1047-1053.
- CARSLAW, H. S. and J. C. JAEGER. — 1959. *Conduction of heat in solids*. Ed. Oxford, University Press, London.
- CHATWIN, B. M. — 1959. The relationships between length and weight of yellowfin tuna (*Neothunnus macropterus*) and skipjack tuna (*Katsuwonus pelamis*) from the eastern tropical Pacific Ocean. *Inter. Am. Trop. Tuna Comm. Bull.*, 3 (7).
- DICKERSON, R. N. Jr. and R. B. READ Jr. — 1968. Calculation and measurement of heat transfer in foods. *Food Technol.*, 22: 1533-1548.
- HAYAKAWA, K. — 1969. New parameters for calculating mass average sterilizing value to estimate nutrients in thermally conductive food. *Can. Inst. Food Technol. J.*, 2: 165-172.
- 1970. Experimental formulas for accurate estimation of transient temperature of food and their application to thermal process evaluation. *Food Technol.*, 24: 1407-1418.
- 1972. Estimating temperatures of foods during various heating or cooling treatments. *Ashrae J.*, 65-69.
- HAYAKAWA, K. and C. O. BALL. — 1968. A note on theoretical heating curve of cylindrical can of thermally conductive food. *Can. Inst. Food Technol. J.*, 1: 54-60.
- HAYAKAWA, K. and G. E. TIMBERS. — 1976. Transient state heat transfer in stacks of heat processed food stored in a commercial warehouse. *J. Food Sci.*, 41: 833-839.
- HILL, J. E., T. D. LEITMAN and J. E. SUNDERLAND. — 1967. Thermal conductivity of various meats. *Food Technol.*, 21: 1143-1148.
- JARVIS, N. D. — 1951. Canning «Little tuna» (*Enthynnus alleteratus*). *J. Food Technol.*, 6: 113-117.
- KOPELMAN, I. J. and I. J. PFLUG. — 1968. The relationship of the surface, mass average and geometric center temperatures in transient conduction heat flow. *Food Technol.*, 22: 799-804.
- LENARZ, W. H. — 1971. Length-weight relations for five Atlantic scombrids. Doc. SCRS 71/20 SA présenté à la Réunion de I.C.C.A.T. Madrid, December 1971.
- McADAMS, W. H. — 1954. *Heat transmission*. 3ed. McGraw-Hill, Book Co. New York.
- MEESEMAICKER, R. and Y. SOHIER. — 1959. Experiments in cooking sardines. *Food Manufacture*, 34: 193-196.
- SMITH, R. E., G. L. NELSON and R. L. HENRICKSON. — 1967. Analyses on transient heat transfer from anomalous shapes. *Transactions of the ASAE*, 10: 236-245.
- VON ROSENBERG, D. V. — 1969. *Methods for the numerical solution of partial differential equations*. American Elsevier Publishing Co. Inc. New York.
- WOODAMS, E. E. and J. E. NOWREY. — 1968. Literature values of thermal conductivities of food. *Food Technol.*, 22: 494-502.