

CAPITULO 3

1. ESTUDIO TÉCNICO DE UN SISTEMA DE CONTROL DE PRECOCINADO

3.1 Fundamentos del precocinado de atún

Los propósitos del precocinado en el atún son los siguientes:

- Deshidratación parcial de la carne para evitar que estos fluidos aparezcan posteriormente en el proceso de cocción en las latas (Proceso de esterilización).
- Coagular la proteína de la carne y aflojarla de la espina
- Mejorar las propiedades de la carne en cuanto a textura y sabor

Existen 2 tipos de cocinado:

- Cocinado en salmuera
- Cocinado en vapor

Los cocinadores a salmuera están formados por una serie de compartimientos en los que se mantiene salmuera calentada a vapor donde son introducidos los atunes. Este es un método en el que el atún no pierde humedad, pero se sacrifica calidad en sabor y textura. Actualmente es un método poco utilizado, salvo requerimiento especial de algún cliente.



Fig. 23a Cocinador de salmuera Fig. 23b Cocinador de salmuera

El cocinado a vapor se lo realiza en estructuras de forma rectangular construidas en acero de 1/4 de pulgada reforzada con tetones de hierro de aspecto cúbico con una compuerta anterior y una posterior y cuya capacidad oscila entre las 2 y 5 toneladas distribuidas en coches o racks donde se coloca el pescado. Están equipados con entradas para vapor, salidas para drenaje de condensado y válvulas de venteo y alivio o "bleeders" y por lo general también tienen termómetros y manómetros. Los cocinadores modernos generalmente tienen forma cilíndrica y son construidos en acero inoxidable.

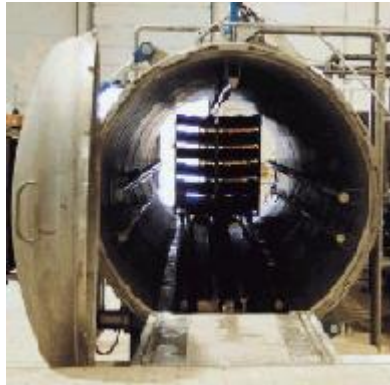


Fig.24 Cocinador a vapor

Las ventajas¹ del cocinado al vapor en relación al cocinado en salmuera son:

1. Mejor Color
2. Mejor Presentación
3. Cocción Uniforme
4. Mayor Rendimiento
5. Mejor Retención Líquidos y Proteínas
6. Menos tiempo de Proceso Completo

¹Tomado de <http://www.foodcanning.com>

3.1.1 Física y bioquímica del precocinado

El proceso de cocinado tiene un dramático efecto sobre la textura de las carnes en general. El incremento de temperatura causa mayor o menor degradación de las proteínas en las fibras musculares lo que causa una disminución en la capacidad de retener líquido y que los tejidos se encojan volviéndose más duros y compactos. Por otra parte el tejido conectivo se convierte en gelatina y es por esto que la carne cocinada tiende a desprenderse con mayor facilidad.

Se puede resumir el proceso de cocinado de la carne como un ablandamiento del tejido conectivo y un endurecimiento de las fibras musculares como resultado de la coagulación de las proteínas y la pérdida de agua.

Para el caso particular del proceso industrial del atún, estos entran al cocinador previa descongelación parcial a aproximadamente -3°C . Luego su temperatura aumenta a medida que el cocinador se va llenando de vapor y la temperatura ambiente va aumentando. Durante el cocinado se distinguen 3 etapas que involucran cambios bioquímicos de la carne los cuales generan presiones internas que forzan el

transporte de agua hacia la superficie y la consiguiente pérdida de humedad y cambio en las propiedades mecánicas.

Como consecuencia del proceso de endurecimiento de la carne y la gelatinización del tejido conectivo, la labor de limpieza del atún se vuelve mucho más sencilla y eficiente por lo que el proceso de precocinado no es sólo importante para la calidad final del producto sino también para el rendimiento general de la operación.

Cambios bioquímicos

- Degradación de la miosina: Ocurre principalmente entre los 40 y 55°C y es la causante de los cambios en las propiedades contráctiles, elásticas y de birrefringencia de la carne.
- Degradación del colágeno: Ocurre principalmente entre los 55 y 64°C y es el causante del ablandamiento del tejido conectivo que se convierte en gelatina.
- Degradación de la actina: Ocurre principalmente entre los 64 y 71°C y causa cambios similares en las propiedades

de la carne similares a los producidos por la degradación de la miosina. Normalmente en las plantas procesadoras no se trabaja en este rango de temperaturas salvo requerimientos especiales de los clientes.

Cambios físicos (contenido de humedad)

El atún crudo contiene entre un 68 y 76% de agua. Durante el precocinado, el agua, la gelatina y otras sustancias son removidas del pescado y se depositan junto al condensado del vapor que recorre todo el cocinador. El contenido de agua del atún cae a valores entre el 65 y el 71% después del precocinado.

Para obtener un adecuado cocinado se requiere que el punto crítico o punto más frío del atún en proceso alcance una temperatura que oscila entre los 50 y 70 grados centígrados, dependiendo de la variedad de atún y la calidad de la materia prima.

Mantener el cocinado más allá de la temperatura ideal sólo genera pérdidas en peso que no agregan ningún valor al producto, e inclusive afectan negativamente su calidad ya que los

mercados internacionales requieren ciertos valores mínimos de humedad en el producto.

En la figura siguiente se observa la relación obtenida por interpolación experimental entre el contenido de agua del atún yellowfin y la temperatura en el centro del atún (o temperatura de espina) al final de un precocinado.

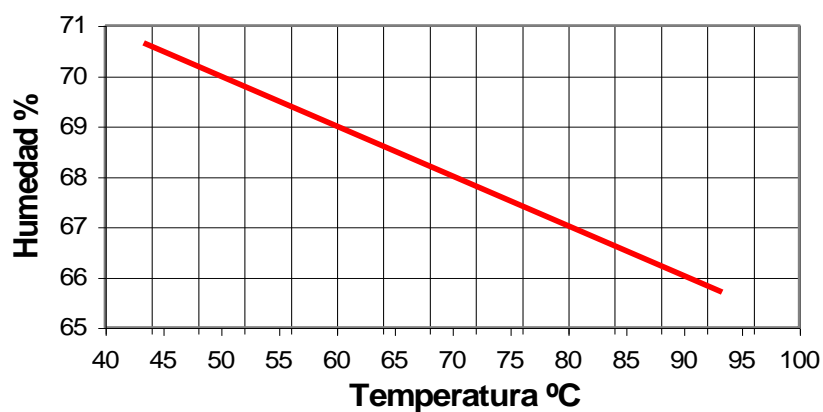


Gráfico 13 Variación del contenido de humedad con la temperatura

Fuente: Borgstrom Georg, "Fish as Food" Vol 4

3.2 Modelo matemático del proceso de cocinado

Se podría expresar la relación que gobierna las variables en un proceso de cocinado según la ecuación de transferencia de calor.

$$\frac{\rho C_p}{k} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (1)$$

Donde,

ρ = densidad del atún (kg/m³)

C_p = calor específico del atún (J/kg °C)

k = conductividad térmica del atún (W/m °C)

T = temperatura

t = tiempo

x, y, z = distancia en los ejes coordenados

Según las características geométricas de lo que se va a cocinar tendríamos 2 casos:

- a) Atunes enteros (sección elíptica)
- b) Filetes de sección rectangular

a) Modelo de la ecuación del calor para atunes enteros

Dadas las características geométricas se cambia a un sistema de coordenadas cilíndricas y se tiene la ecuación:

$$\frac{\rho C_p}{k} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (2)$$

r = distancia del centro a la superficie

θ = ángulo en la sección transversal

z = distancia longitudinal

Si se asume que el diámetro del filete es igual a lo largo del cuerpo y que la transferencia de calor se realiza exclusivamente a través del área lateral del pescado de manera uniforme, se tiene que:

$$\frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial T}{\partial \theta} = 0$$

y se puede reducir la ecuación a su forma unidimensional en coordenadas polares:

$$\frac{\rho C_p}{k} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \quad (3)$$

Definiendo el centro del pescado como $r=0$ y la distancia del centro a la superficie como $r=L$ se asumen las siguientes condiciones:

Condición inicial: la temperatura inicial es la misma en toda la sección transversal del pescado.

$$T = T_0, \quad 0 \leq x \leq L, \quad t = 0$$

Condición de frontera 1: no hay transferencia de calor desde el centro del pescado hacia ningún lado.

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0, \quad r = 0, \quad t \geq 0$$

Condición de frontera 2: la temperatura en la superficie varía según la diferencia de temperaturas entre la superficie y el ambiente, donde k es la conductividad térmica del atún y h el coeficiente de transferencia de calor por convección.

$$-k \frac{\partial T}{\partial r} = h(T_a - T_s) \quad , \quad r = L, \quad t > 0$$

La solución para este tipo de ecuación está dada por la siguiente relación:

$$T(r,t) = T_e(r) + \sum_{n=1}^{\infty} A_n e^{-\frac{\rho C p \lambda_n^2 t}{k}} J_0(\lambda_n r) \quad (4)$$

Donde la temperatura de estado estacionario cuando t tiende al infinito obedece a:

$$T_e(r) = \frac{hr(T_a - T_i)}{hL + k} + T_i$$

Los λ_n se obtienen de las soluciones de la ecuación trascendental:

$$\frac{J_0(\lambda L)}{J_1(\lambda L)} - \frac{k\lambda}{h} = 0$$

donde J_0 y J_1 son las funciones de Bessel de orden 0 y 1 respectivamente. Por otra parte los coeficientes A_n se obtienen desarrollando la serie de Bessel definida para $n = 1, 2, 3, 4, \dots$

$$A_n = \frac{2}{J_1^2(\lambda_n)} \int_0^L \frac{r^2 h (T_i - T_a)}{hL + k} J_0(\lambda_n r) dr$$

En la figura 26 se observa el comportamiento de la temperatura a lo largo de una sección transversal del atún en el estado transiente.

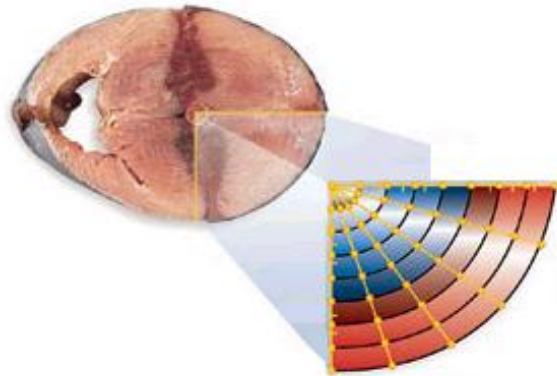


Fig.25 Distribución de temperatura durante el precocinado

Fuente: Food Engineering Magazine

b) Modelo de la ecuación del calor para filetes de sección rectangular

En este caso, que puede ser el de los atunes más grandes se elige la ecuación (1) para geometría rectangular y se asume que no existe conducción de calor en la dirección longitudinal

$$\frac{\partial T}{\partial z} = 0$$

Con lo que la ecuación (1) se reduce a

$$\frac{\rho C_p}{k} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (5)$$

Definiendo los bordes verticales como $x=0$ y $x=a$ y los bordes horizontales como $y=0$ y $y=b$, se asumen las siguientes condiciones:

Condición inicial: la temperatura inicial en toda la sección transversal es la misma

$$T = T_0, \quad 0 \leq x \leq a, \quad 0 \leq y \leq b \quad t = 0$$

Condición de frontera 1: transferencia de calor por convección en los bordes verticales:

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} = h(T - T_a) \quad , x=0, \quad x=a, \quad t > 0$$

o despejando para $T(y)$:

$$T(y) = T_a - \frac{k}{h} \frac{\partial T}{\partial x} \quad , x=0, \quad x=a, \quad t > 0$$

Condición de frontera 2: transferencia de calor por convección en los bordes horizontales:

$$-k \frac{\partial T}{\partial y} = h(T - T_a) \quad , y=0, \quad y=b, \quad t > 0$$

o despejando para T(x):

$$T(x) = T_a - \frac{k}{h} \frac{\partial T}{\partial y} \quad , y=0, \quad y=b, \quad t > 0$$

La solución para este tipo de ecuación está dada por la siguiente relación:

$$\begin{aligned}
 T(x, y, t) = & T_e(x, y) + \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} A_{mn} \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi x}{a}\right) \operatorname{sen}(\lambda_m y) e^{\frac{-\rho C_p (\lambda_m^2 + \frac{n^2 \pi^2}{a^2}) t}{k}} \\
 & + \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{i=0}^{\infty} B_{in} \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi x}{a}\right) \left(\cos(\lambda_i y) - \frac{h}{k \lambda_i} \operatorname{sen}(\lambda_i y) \right) e^{\frac{-\rho C_p (\lambda_i^2 + \frac{n^2 \pi^2}{a^2}) t}{k}} \\
 & + \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} C_{mn} \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \operatorname{sen}(\lambda_m x) e^{\frac{-\rho C_p (\lambda_m^2 + \frac{n^2 \pi^2}{b^2}) t}{k}} \\
 & + \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{i=0}^{\infty} D_{in} \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \left(\cos(\lambda_i x) - \frac{h}{k \lambda_i} \operatorname{sen}(\lambda_i x) \right) e^{\frac{-\rho C_p (\lambda_i^2 + \frac{n^2 \pi^2}{a^2}) t}{k}} \quad (6)
 \end{aligned}$$

Los λ_m y λ_i se obtienen de las soluciones de las ecuaciones trascendentales:

$$\tan \lambda + \frac{k\lambda}{h} = 0$$

$$\tan \lambda - \frac{k\lambda}{h} = 0$$

Por otra parte los coeficientes A_{mn} , B_{in} , C_{mn} y D_{in} , de la ecuación (17) se obtienen igualando cada miembro con sumatorias a la condición inicial del estado transiente (To-Te) y despejándolos según el desarrollo generalizado de Fourier para un conjunto de funciones ortogonales:

$$A_{mn} = \frac{2}{a \int_0^b \sin^2 \lambda_m y \, dy} \int_0^a \int_0^b (T_0 - T_e) \sin\left(\frac{n\pi x}{a}\right) \sin \lambda_m y \, dx dy$$

$$B_{in} = \frac{2}{a \int_0^b \left(\cos \lambda_i y - \frac{h}{k\lambda_i} \sin \lambda_i y \right)^2 dy} \int_0^a \int_0^b (T_0 - T_e) \sin\left(\frac{n\pi x}{a}\right) \left(\cos \lambda_i y - \frac{h}{k\lambda_i} \sin \lambda_i y \right) dx dy$$

$$C_{mn} = \frac{2}{b \int_0^a \sin^2 \lambda_m x \, dx} \int_0^a \int_0^b (T_0 - T_e) \sin\left(\frac{n\pi y}{a}\right) \sin \lambda_m x \, dy dx$$

$$D_{in} = \frac{2}{b \int_0^a \left(\cos \lambda_i x - \frac{h}{k\lambda_i} \sin \lambda_i x \right)^2 dx} \int_0^a \int_0^b (T_0 - T_e) \sin\left(\frac{n\pi y}{a}\right) \left(\cos \lambda_i x - \frac{h}{k\lambda_i} \sin \lambda_i x \right) dy dx$$

Te es la temperatura de estado estacionario y que obedece a la relación:

$$T_e(x, y) = \sum_{n=1}^{\infty} \left(E_n \sinh\left(\frac{n\pi(a-y)}{a}\right) + F_n \sinh\left(\frac{n\pi y}{a}\right) \right) \sin\left(\frac{n\pi x}{a}\right) \\ + \sum_{n=1}^{\infty} \left(G_n \sinh\left(\frac{n\pi(a-x)}{b}\right) + H_n \sinh\left(\frac{n\pi x}{b}\right) \right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right)$$

Los coeficientes E_{mn} , F_{mn} , G_{mn} y H_{mn} , están dados por

$$E_n = \frac{2}{a} \int_0^a \left(\frac{-k}{h} \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} - T_a \right) \sin\left(\frac{n\pi x}{a}\right) dx \\ \sinh\left(\frac{n\pi b}{a}\right)$$

$$F_n = \frac{2}{a} \int_0^a \left(\frac{-k}{h} \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=b} - T_a \right) \sin\left(\frac{n\pi x}{a}\right) dx \\ \sinh\left(\frac{n\pi b}{a}\right)$$

$$G_n = \frac{2}{b} \int_0^b \left(\frac{-k}{h} \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} - T_a \right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) dy \\ \sinh\left(\frac{n\pi a}{b}\right)$$

$$H_n = \frac{2}{b} \int_0^b \left(\frac{-k}{h} \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=a} - T_a \right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) dy \\ \sinh\left(\frac{n\pi a}{b}\right)$$

3.2.1 Validez del modelo matemático.

Las ecuaciones (4) y (6) se pueden resolver para el centro del pescado $r=0$ o $(x,y)=(a/2, b/2)$, y de esta manera calcular la temperatura en la espina o en el centro del filete en cualquier tiempo de forma analítica con ayuda de una hoja electrónica o numérica si se dispone de un programa que maneje algoritmos de diferencias o elementos finitos.

Sin embargo el tiempo de cocinado depende de las constantes k , ρ , C_p , T_0 , h y T_a correspondientes al coeficiente de transferencia térmica, densidad, calor específico del pescado, coeficiente de transferencia por convección, la temperatura inicial en la espina y la temperatura inicial del cocinador. Dadas las inexactitudes que se producen en algunos de estos parámetros como consecuencia de una asignación teórica, el error total en la determinación de la temperatura de espina real es mucho mayor.

Por ello aún cuando además del modelo matemático, existen las tablas con tiempos experimentales de cocinado determinados para cada especie y según el tamaño de los pescados, dado que las constantes físicas antes mencionadas varían según la zona de pesca y época del año, tratamiento térmico previo de

congelación y descongelación, el control de cocinado exclusivamente mediante tiempos no sería recomendable.

Dado que los cambios en la constitución del pescado están mucho más directamente relacionados con la temperatura que con el tiempo, es conveniente realizar un control de cocinado por temperaturas.

No obstante es importante controlar el gradiente de Temperatura / tiempo de manera tal que no solo baste conocer la temperatura real del pescado sino también su velocidad de cocinado con el fin de obtener óptimos resultados. Para determinar este gradiente y a falta de otros estudios, es necesario apoyarse en datos experimentales. Luego de la determinación del gradiente experimental para cada intervalo de tiempo, mediante una relación matemática obtenemos la temperatura del cocinador apropiada para mantener dicho gradiente.

3.2.2 Determinación del gradiente Temperatura tiempo

El gradiente de temperatura tiempo en la espina o el centro del filete se lo puede obtener para cada instante de tiempo t , derivando las ecuaciones (4) y (6) con respecto al tiempo y

reemplazando las coordenadas para el centro del pescado, temperatura inicial y todas las constantes físicas, lo que daría una ecuación dependiente del tiempo y de la temperatura del cocinador **f(t, Ta)**.

Para saber cual debe ser el valor adecuado de la temperatura del cocinador T_a para cada tamaño, se utiliza el gradiente temperatura tiempo obtenido experimentalmente según la tabla 8.

to_i (min)	tf_i (min)	% tiempo	To (°C)	Tf (°C)	Grad (°C/min)
0	11,6	10%	2,5	5	0,22
11,6	23,2	10%	5	8	0,26
23,2	34,8	10%	8	13	0,43
34,8	46,4	10%	13	24	0,95
46,4	58	10%	24	32,5	0,73
58	69,6	10%	32,5	41	0,73
69,6	81,2	10%	41	48	0,60
81,2	92,8	10%	48	55	0,60
92,8	104,4	10%	55	61	0,52
104,4	116	10%	61	67	0,52

Tabla 8 Gradiente de temperatura durante el precocinado

Elaborada por: Abel Olivares

Esta tabla representa los valores en la temperatura de espina para un pescado determinado en diferentes intervalos de tiempo y se calcula el gradiente temperatura tiempo promedio para 10 intervalos que corresponden cada uno al 10% del tiempo total de cocción (116 minutos) mediante la siguiente relación:

$$\text{Grad} = \frac{T_f - T_o}{t_f - t_o} \quad (7)$$

A continuación se reemplaza en $f(t, T_a)$ el valor central de tiempo en cada intervalo $(t_{fi} - t_{oi})/2 + t_{oi}$ y se iguala esta ecuación al gradiente experimental para el intervalo correspondiente.

$$f\left(\frac{t_{fi} - t_{oi}}{2} + t_{oi}, T_a\right) = \text{Gradiente experimental} \quad (8)$$

Finalmente se despeja para T_a y se obtiene el valor que debe tener T_a en cada intervalo de tiempo del precocinado.

$$T_a = g\left(\frac{t_{fi} - t_{oi}}{2} + t_{oi}, \text{Grad. exp}\right) \quad (9)$$