

OPTIMIZACION DE PROCESOS DE CONGELACION POR CARGAS

*José A. Barreiro Méndez,¹ Sergio A. Antunes,² Emilio Saíz U.³
y Carmen Irazábal de Guariguata⁴*

**Universidad Simón Bolívar, Caracas, Venezuela, e Instituto
Oceanográfico, Universidad de Sao Paulo, Sao Paulo, Brasil**

RESUMEN

Se desarrolló un modelo para la optimización del proceso de congelación con miras a maximizar la producción diaria de un congelador de platos, proceso que culminó con una ecuación para predecir el espesor óptimo del producto a congelar.

El modelo se comprobó experimentalmente en un congelador de un plato, con un modelo alimentario consistente en una mezcla de bentonita al 90/o. Se demostró que el modelo desarrollado predice satisfactoriamente los

Manuscrito modificado recibido: 26-5-81.

- 1 Profesor Asociado del Departamento de Tecnología de Procesos Biológicos y Bioquímicos de la Universidad Simón Bolívar, Apartado 80659, Caracas 1080, Venezuela.
- 2 Instituto Oceanográfico de la Universidad de Sao Paulo, Sao Paulo, Brasil.
- 3 Miembro del Departamento de Tecnología de Procesos Biológicos y Bioquímicos de la citada Universidad Simón Bolívar.
- 4 Profesor Agregado, Departamento de Tecnología de Procesos Biológicos y Bioquímicos de la misma Casa de Estudios, Caracas, Venezuela.

tiempos de congelación y el espesor óptimo del producto. Asimismo, bajo las condiciones en que se llevó a cabo el experimento, se constató un espesor óptimo de 0.0142 m, con el cual era factible obtener en cinco cargas al día, una producción diaria máxima de 3.152 kg.

INTRODUCCION

Los alimentos congelados se han tornado en uno de los principales renglones de la industria alimentaria mundial. Sin embargo, la eficiencia en la utilización de equipos de congelación no es, en la mayoría de los casos, la más adecuada. Esta eficiencia puede ser mejorada mediante técnicas de optimización que frecuentemente se utilizan en la industria de procesos químicos.

El presente trabajo se llevó a cabo con el propósito de aplicar la ecuación de Plank modificada en el desarrollo de la optimización del proceso de congelación con miras a maximizar la producción diaria factible de obtener de un congelador que opere por cargas. El modelo en cuestión permite estimar el espesor óptimo que debe tener el empaque donde se procese el producto alimenticio para lograr la maximización, y puede ser aplicado, entre otros, a cualquier producto sólido como carnes de res, filetes de pescado y carnes de aves. De esta manera, se logra obtener la utilización máxima del equipo de congelación en lo que a capacidad de procesamiento se refiere, ya que se modifica y mejora el modelo desarrollado por Barreiro, Rao y Novak (1). Se da cuenta, asimismo, de su comprobación experimental.

PARTE EXPERIMENTAL

La congelación de alimentos puede llevarse a cabo en forma continua o por cargas, utilizando equipos que pueden ser clasificados en una de las siguientes categorías: congelación en aire, con convección natural o forzada; congeladores de platos; y congelación por inmersión. Cada uno de estos procesos tiene sus propias características, las cuales determinan el coeficiente de transferencia de calor superficial en el producto y, por ende, las tasas de transferencia de calor y tiempos de congelación.

Los parámetros que influyen sobre el proceso se pueden clasificar como sigue: 1) variables de procesamiento, tales como espesor del producto o dimensión característica, cantidad de pro-

ducto procesado, tiempo de congelación, y temperatura inicial y final del alimento; 2) características físicas del equipo, por ejemplo, capacidad (número de platos o dimensiones características), área ocupada por el producto, temperatura del medio refrigerante, limitaciones físicas del equipo, coeficiente superficial de transferencia de calor, y eficiencia mecánica; 3) propiedades físicas y térmicas del producto, o sea, densidad, calor específico, conductividad térmica, temperatura de congelación, calor latente de congelación, composición, y dimensiones del producto.

Luego se desarrolla un modelo para maximizar la producción diaria de un congelador de platos. Cabe agregar que este mismo procedimiento puede seguirse también para otros tipos de congeladores o bien para optimizar otras variables tales como ganancia bruta y costos de producción.

Descripción de Equipo de Congelación

Los congeladores de platos empleados en la industria alimentaria consisten en una serie de platos metálicos en cuyo interior circula un refrigerante; estos platos están montados paralelamente unos con otros, ya sea en forma horizontal o vertical. La distancia entre platos es variable, abriéndose para insertar el producto a ser congelado y cerrándose de forma que exista un íntimo contacto entre el producto alimenticio y la superficie de los platos a fin de que exista una buena transferencia de calor por ambas caras del producto hacia los platos superior e inferior. Con el fin de facilitar las operaciones de carga y descarga, el producto alimenticio empaquetado se coloca en bandejas de aluminio. La presión ejercida por los platos sobre el producto suele ser del orden de 0.1–0.3 kg/cm². Para evitar la compresión de los paquetes se suelen utilizar espaciadores sólidos ligeramente más estrechos que el espesor de los paquetes. El conjunto de platos va encerrado en un gabinete, el cual constituye la armazón externa del aparato.

Desarrollo y Optimización del Modelo⁵

La producción diaria de un congelador similar al descrito, está establecida por la ecuación:

$$DP = N w \quad (1)$$

5 Véase lista de símbolos utilizados al final del artículo.

El número de cargas que se puede procesar por día será:

$$N = \frac{t_d}{t + t_r} \quad (2)$$

La cantidad de producto factible de congelar en una carga, la establece la relación:

$$w = n A \rho (1-\epsilon) X \quad (3)$$

Sustituyendo las ecuaciones (2) y (3) en (1):

$$DP = \left(\frac{t_d}{t + t_r} \right) n A \rho (1-\epsilon) X \quad (4)$$

El tiempo de congelación requerido para congelar el producto se puede estimar mediante la ecuación de Plank modificada, presentada por Heldman (2):

$$t = \frac{\rho L}{T_i - T_m} \left(\frac{P X}{h} + \frac{R X^2}{K} \right) \quad (5)$$

siendo L definido por la relación:

$$L = C_{p1} (T_i - T_c) + \lambda + C_{p2} (T_c - T_f) \quad (6)$$

En el caso de una plancha semi-infinita $P = 1/2$ y $R = 1/8$; para una esfera $P = 1/6$ y $R = 1/24$ y para un cilindro semi-infinito $P = 1/4$ y $R = 1/16$ (2).

El coeficiente de transferencia de calor h varía con el tipo de congelador y las condiciones de procesamiento, y debe evaluarse experimentalmente en cada caso por cualquiera de los procedimientos señalados en la literatura (2-4).

En el caso de productos empaquetados en cartón u otro material aislante, se debe calcular un coeficiente global de transferencia de calor que considere la resistencia que ofrece el paquete a la transferencia de calor mediante la relación:

$$1/h_c = 1/h + X_p/K_p \quad (7)$$

Sustituyendo las ecuaciones (5) y (6) en (4) se obtiene:

$$DP = \frac{n A \rho (1 - \epsilon) X t_d}{\rho [C_{p1} (T_i - T_c) + \lambda + C_{p2} (T_c - T_f)] \left(\frac{PX}{h_c} + \frac{RX^2}{K} \right) + t_r} \quad (8)$$

La ecuación (8) representa la función objeto a ser optimizada. Esta función es de la forma $DP = f(X)$ y es continua para cualquier valor de $X \geq 0$. Presenta un máximo que se puede determinar derivando la ecuación (8) con respecto a X , igualando a cero y resolviendo para despejar X_{opt} , previa comprobación de que la derivada segunda es menor de cero. En este caso se obtiene:

$$X_{opt} = \sqrt{\frac{t_r K (T_i - T_m)}{R\rho [C_{p1} (T_i - T_c) + \lambda + 4C_{p2} (T_c - T_f)]}} \quad (9)$$

En el caso de los congeladores de platos existe una restricción física para el máximo espesor (X') del producto que se puede procesar, debido a que los platos pueden separarse entre sí una distancia dada. Por consiguiente, debe cumplirse que $X_{opt} \leq X'$. En el caso de que $X_{opt} > X'$, sólo se puede obtener un valor subóptimo de la función para $X_{opt} = X'$, ya que físicamente no se puede sobrepasar el valor de X' .

La determinación de X_{opt} mediante la ecuación (9) permite el cálculo de un tiempo de congelación óptimo al sustituir el valor de X_{opt} en la ecuación (5). Con dicho tiempo y con la ecuación (2), puede calcularse el número óptimo de cargas por día que corresponde a dicho valor de X_{opt} . La producción máxima obtenible por día se calcula con la ecuación (8).

El número óptimo de cargas por día (N_{opt}) debe ser un número entero. En general, el valor calculado por el método no lo es, estando comprendido entre dos números enteros consecutivos; es decir:

$$N_1 < N_{opt} < N_2 \quad (10)$$

$$y \quad N_2 - N_1 = 1 \quad (11)$$

Con el valor del número óptimo de cargas por día se obtiene el máximo valor posible de la producción diaria. Obviamente, los valores de la producción diaria obtenibles con el número de cargas por día que corresponde a los enteros consecutivos que comprenden al óptimo (N_1 y N_2), serán menores que el máximo; por lo tanto, la respuesta subóptima al problema será, entre N_1 y N_2 , aquel valor con el cual se obtenga la mayor producción diaria. A estos valores le corresponderán los espesores X_1 y X_2 y los tiempos de congelación t_1 y t_2 .

Si se toma en cuenta la restricción antes señalada de que $X < X'$, podría suceder que $X_1 > X'$, siendo en este caso eliminada dicha solución. Si ambos, $X_1 > X'$ y $X_2 > X'$, entonces la solución será establecida por el valor de N entero que dé la solución más cercana a X' por la izquierda, utilizando un criterio similar.

Comprobación Experimental del Modelo

La comprobación del modelo se llevó a cabo mediante la utilización de un congelador de un plato ($n = 1$), marca Labconco, por el interior del cual circulaba Freón 12 a una temperatura promedio de -21.8°C . Este plato permitía la transferencia de calor por una de las caras del producto, aislándose la otra cara con una capa de poliuretano. Bajo estas circunstancias, el espesor X que debe utilizarse para aplicar el modelo es el espesor total del producto; si hubiera habido transferencia de calor por ambas caras el valor X habría sido la mitad del espesor total. El coeficiente de transferencia de calor del congelador para las condiciones del estudio fue estimado en $16 \pm 3 \text{ Kcal/hr m}^2\text{ }^\circ\text{C}$, con un intervalo de confianza del 98%. Para ello se utilizó la ecuación de Plank modificada (2). El máximo espesor X' que se podía procesar era de aproximadamente 2.5 cm (0.025 m).

Como producto se empleó un modelo alimentario simulado, el cual presenta mecanismo de transferencia de calor por conducción (5), consistente en una dispersión al 9% de bentonita en agua, la cual se dejó expandir durante una noche.

Las propiedades térmicas y físicas se estimaron en:

- $\rho = 1.110 \text{ kg/m}^3$ (laboratorio)
- $C_{p1} = 0.93 \text{ Kcal/kg } ^\circ\text{C}$ (Siebel) (6)
- $C_{p2} = 0.47 \text{ Kcal/kg } ^\circ\text{C}$ (Siebel) (6)
- $k = 0.3 \text{ Kcal/hr m } ^\circ\text{C}$ (ASHRAE) (7)
- $\lambda = 72.8 \text{ Kcal/kg}$ (ASHRAE) (7)
- $T_c = 0^\circ\text{C}$ (laboratorio)

El producto se empacó en cajas de madera de aproximadamente 2 cm de espesor de 20 x 20 cm ($A = 0.04 \text{ m}^2$), en cuyo fondo se colocó papel de aluminio de 0.01 mm de espesor. La resistencia del aluminio a la transferencia de calor era despreciable en relación a la del producto y, por consiguiente, $h = h_c$ al aplicar la ecuación (7). Se fabricaron diez cajas, las cuales se podían llenar de producto hasta lograr espesores de 0.94, 2.00, 5.32, 4.36, 5.15, 6.00, 4.25, 3.15, 2.20 y 5.38 cm, respectivamente. En el tope superior se colocó una plancha de poliuretano de 1 cm de espesor aproximadamente.

La temperatura del plato y la existente en la cara aislada del producto se midieron con termopares de cobre-constantán, marca Ellab, especialmente fabricados para este fin. La temperatura fue registrada en un registrador Speedomax W, marca Leeds & Northrup, determinándose así las curvas de congelación. La temperatura inicial del producto (T_i) fue de 20.2°C, y la temperatura media del plato, de -21.8°C.

Con las curvas de congelación así obtenidas, se determinaron los tiempos de congelación requeridos para que la superficie o parte aislada del producto alcanzase una temperatura de -12.2°C, la cual se consideró como temperatura final de congelación (T_f). Estos datos experimentales se ajustaron mediante una regresión, calculándose el intervalo correspondiente de 95% de confianza. De igual manera, para cada espesor se calcularon los tiempos de congelación predichos por la ecuación de Plank modificada, y se compararon estos valores con los obtenidos experimentalmente.

Una vez comprobada la correspondencia entre los valores teóricos y los experimentales del tiempo de congelación en función del espesor del producto, a partir de los datos experimentales se calculó la producción diaria (DP) y el número de cargas por día que correspondía a cada espesor (X), determinándose el óptimo y comparando el valor obtenido con el predicho por la ecuación (9). El tiempo de reacondicionamiento (t_r) se fijó en 0.25 hr, siendo la fracción vacía $\epsilon = 0$, por ser la bentonita no porosa y ocupar toda el área de transferencia de calor estudiada.

RESULTADOS Y DISCUSION

Los resultados relativos a la determinación experimental del tiempo de congelación para cada uno de los diez espesores de producto sometidos a estudio se presentan en la Figura 1. Se encontró

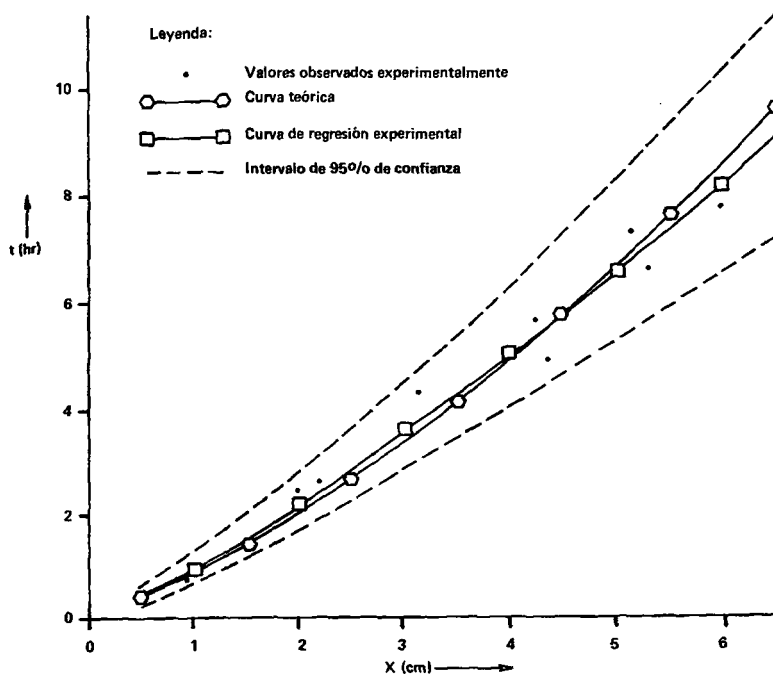


FIGURA 1

Tiempo de congelación en función del espesor del producto: curva teórica predicha por la ecuación de Plank modificada y curva de regresión de los valores experimentales, con intervalos de 95% de confianza

que el mejor ajuste para los datos experimentales lo establecía la relación:

$$t = 0.962 X^{1.191} \quad (12)$$

obteniéndose un coeficiente de correlación (r^2) de 0.99. Según se aprecia, en la Figura 1 se indica la curva de regresión con su respectivo intervalo de 95% de confianza para el rango de espesores estudiado. De igual manera, se exponen los valores predichos por la ecuación de Plank modificada.

Como puede observarse, los valores predichos por la ecuación de Plank modificada caen dentro del intervalo de 95% de confianza de la curva de regresión correspondiente al ajuste de los datos experimentales. Por consiguiente, dicha ecuación puede considerarse como adecuada para la predicción de tiempos de congelación.

A partir de cada uno de los tiempos de congelación estimados teórica o experimentalmente, es posible calcular diferentes valores de la producción diaria (DP), mediante el empleo de esa ecuación (8). Igualmente, se pueden calcular los valores del número diario de cargas correspondiente con la ecuación (2). Para este último caso se fijó un tiempo máximo de operación diario del congelador (t_d) de ocho horas.

Los resultados concernientes a la producción diaria (DP) y al número de cargas respectivo (N), calculados de la forma antes señalada, se presentan en la Tabla 1. Para el cálculo correspondiente se tomaron en cuenta los valores de los tiempos de congelación estimados con los valores medios y extremos del intervalo de 95% de confianza que constan en la Figura 1, para diferentes espesores del producto comprendidos entre 0.5 y 6.5 cm.

Según se observa en la Tabla 1, o si se hace una representación gráfica de la producción diaria en función del espesor del producto, se obtiene un valor máximo de la producción para un espesor del producto de 0.015 m (1.5 cm), con un valor medio de 2.944 kg y con valores extremos para el intervalo de 95% de confianza de 3.613 kg y 2.382 kg, respectivamente. El valor teórico predicho por el modelo y calculado por la ecuación (9) es de 0.015 m, análogo al estimado a partir de los datos experimentales.

El número de cargas por día (N) osciló entre 5.426 y 3.577 con un valor medio del intervalo de 4.421. En este caso $N_2 = 5$ y $N_1 = 4$. De la ecuación (2) y, según la Figura 1, se deriva que los tiempos de congelación que les corresponden serán $t_2 = 1.350$ hr y $t_1 = 1.750$ hr, con espesores del producto de $X_2 = 0.0142$ m, y $X_1 = 0.0175$ m, y producciones diarias $DP_2 = 3.152$ y $DP_1 = 3.108$ kg. Por consiguiente, el valor subóptimo con el cual se obtiene un número de cargas entero será el que corresponde a $N = 5$, con un espesor óptimo $X_{opt} = 0.0142$ m, y una producción diaria $DP = 3.152$ kg. Este espesor es menor que el máximo que se puede procesar (0.25 m).

Como se observa, los resultados del modelo son satisfactorios y éste sirve para predecir los espesores óptimos para maximizar la producción del congelador estudiado.

Es conveniente señalar que la predicción del modelo será tan

TABLA 1

**PRODUCCION DIARIA Y NUMERO DE CARGAS
CORRESPONDIENTES A DIVERSOS ESPESORES DEL PRODUCTO
PROCESADO EN EL CONGELADOR**

Espesor del pro- ducto (cm)	Producción diaria DP (kg)			Número de cargas por día N		
	Máxima	Media	Mínima	Máxima	Media	Mínima
0.5	3.190	2.651	2.140	14.365	11.942	9.640
1.0	3.595	2.935	2.140	8.097	6.607	5.315
1.5	3.613	2.944	2.382	5.426	4.421	3.577
2.0	3.562	2.899	2.355	4.012	3.270	2.652
2.5	3.498	2.851	2.314	3.152	2.568	2.085
3.0	3.437	2.801	2.270	2.581	2.102	1.704
3.5	3.382	2.746	2.225	2.176	1.767	1.432
4.0	3.333	2.700	2.182	1.877	1.520	1.228
4.5	3.290	2.655	2.141	1.646	1.329	1.071
5.0	3.250	2.616	2.102	1.464	1.179	0.947
5.5	3.215	2.579	2.066	1.317	1.056	0.846
6.0	3.184	2.544	2.032	1.195	0.955	0.763
6.5	3.155	2.513	1.999	1.093	0.871	0.693

buena como lo sea la predicción de la temperatura por la ecuación de Plank modificada, en la cual se basa éste. En el caso sometido al estudio aquí descrito, se comprobó que dicha ecuación sí era satisfactoria para el intervalo considerado.

Igualmente se pueden optimizar otras funciones objeto tales como costos de producción y ganancias brutas.

CONCLUSIONES

En el presente trabajo se desarrolló un modelo para la optimización de un proceso de congelación por cargas. El procedimiento se ilustró para un congelador de platos y se encontró un espesor óptimo, derivado de la ecuación (9), para maximizar la producción diaria en dicho congelador.

El modelo se comprobó experimentalmente utilizando un modelo alimentario simulado consistente en una mezcla al 90/o de bentonita. Se encontró que los valores predichos por la ecuación de Plank modificada, en la cual se basa el modelo, concordaban satisfactoriamente con los experimentales de los tiempos de congelación para diversos espesores del producto.

Para el producto antes señalado se encontró un espesor óptimo de 0.0142 m, con el cual se obtiene una producción diaria de 3.152 kg en cinco cargas al día. El tiempo de operación diaria del congelador de un plato estudiado se fijó en 8 hr y el tiempo de reacondicionamiento por carga en 0.25 hr. Los valores obtenidos son análogos a los predichos por el modelo, por lo cual éste se puede considerar satisfactorio para optimizar la producción.

SUMMARY

OPTIMIZATION OF THE FREEZING PROCESS BY LOADS

A model was developed for the optimization of batch freezing to maximize the daily production of a plate freezer. An equation for the prediction of the optimal product thickness was found.

The model was evaluated experimentally in a one-plate freezer with a food model consisting of a 90/o bentonite mixture. The model demonstrated it predicted adequately the freezing times and optimal product thickness. Under the experimental conditions used by the authors, an optimal thickness of 0.0142 m was found, with five batches per day. The maximum daily production was 3.152 kg.

LISTA DE SIMBOLOS

Caracteres latinos:

A	Area de un plato (m ²)
C _{p1}	Calor específico promedio por encima del punto de congelación (Kcal/kg °C)
C _{p2}	Calor específico promedio por debajo del punto de congelación (Kcal/kg °C)
DP	Producción diaria (kg/día)
h	Coefficiente de transferencia de calor del congelador (Kcal/hr m ² °C)

h_c	Coefficiente global de transferencia de calor (Kcal/hr m ² °C)
K	Conductividad térmica del producto congelado (Kcal/hr m °C)
K_p	Conductividad térmica del empaque (Kcal/hr m °C)
L	Calor requerido para llevar el producto de T_i a T_f incluyendo el calor latente (Kcal/kg)
N	Número de cargas por día (1/día)
n	Número de platos del congelador (adimensional)
P	Constante de la ecuación de Plank dependiente de la geometría del producto (adimensional)
R	Análogo a P
T_c	Temperatura de congelación del producto (°C)
T_f	Temperatura final del producto congelado (°C)
T_i	Temperatura inicial del producto (°C)
T_m	Temperatura del medio de refrigeración o plato (°C)
t	Tiempo requerido para congelar el producto (hr)
t_d	Tiempo de operación diaria del congelador (hr)
t_r	Tiempo de reacondicionamiento por carga, incluyendo carga, descarga y limpieza (hr)
w	Peso de producto procesado por carga (kg)
X	Espesor del producto o dimensión característica (m)
X_{opt}	Espesor óptimo (m)
X_p	Espesor del empaque (m)
X'	Máximo espesor del producto que es posible procesar (m)

Caracteres griegos

ϵ	Fracción sin ocupar en el congelador (adimensional)
λ	Calor latente de congelación (Kcal/kg)
ρ	Densidad del producto congelado (kg/m ³)

BIBLIOGRAFIA

1. Barreiro, J. A., M. R. R. Rao & A. F. Novak. Optimization of batch processing of fish in a multiplate freezer. Trabajo No. 74-e. Presentado en: 74th National Meeting, American Institute of Chemical Engineers, New Orleans, Louisiana, March 1973.
2. Heldman, D. E. **Food Process Engineering**. Westport, Conn., The AVI Pub. Co., 1975, p. 174-195.

3. Charm, S. E. **Fundamentals of Food Engineering**. 2nd ed. Westport, Conn., The AVI Pub. Co., 1971, p. 126 y 252.
4. Carslaw, H. S. & J. C. Jaeger. **Conduction of Heat in Solids**. 2nd ed. London, Oxford University Press, 1959, p. 176-187.
5. Hayakawa, K. I. Response charts for estimating temperatures in cylindrical cans of solid food subjected to time variable processing temperature. **J. Food Sci.**, 39: 1090-1098, 1974.
6. Siebel, J. E. Specific heat of various food products. **Ice Refrig.**, 2: 256, 1892.
7. ASHRAE. **Refrigeration Data Book**. New York, N. Y., Am. Soc. Heating Refrig. Air Cond. Engrs., 1969, p. 395.