PREDICCIÓN DE TIEMPOS DE CONGELACIÓN Y DESCONGELACIÓN DE ALIMENTOS

Ramírez Juidias, E.*; León Bonillo, M.J.*

*Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Agrícola de la Universidad de Sevilla. Carretera de Utrera km 1, código postal 41013, Sevilla. erjuidias@us.es.; leonbo@us.es.

Resumen

La congelación es una técnica ampliamente usada para conservar alimentos. Los fabricantes y usuarios de equipos de congelación y descongelación de alimentos, necesitan sencillos métodos de predicción para calcular los tiempos en que se realizan ambos procesos. El objetivo del presente artículo, no es otro que extender el uso de un método simple de predicción, desarrollado para la congelación y descongelación de alimentos unidimensionales, para predecir los tiempos de congelación y descongelación de alimentos multidimensionales, usando para ello diferentes fórmulas que permiten evaluar los factores de forma.

Palabras clave: factor de forma, cálculo adimensional, procesado de alimentos.

Introducción

Entre las distintas tecnologías de conservación de alimentos, la congelación es una de las más difundidas, ya que los alimentos congelados pueden ser almacenados por largos períodos manteniendo prácticamente inalterada su calidad original.

La congelación también es empleada para conservar materias primas o productos semiprocesados, los cuales sufren una etapa de descongelación a nivel industrial previa a la elaboración final.

Desde el punto de vista de la ingeniería, resulta primordial contar con métodos simples y precisos para calcular los tiempos de congelación y descongelación respectivos.

Durante la congelación de alimentos, se produce la formación de hielo en un amplio rango de temperaturas, a partir de la temperatura de comienzo de cambio de fase (T_f en °C). El cambio de fase del agua conlleva una variación importante de las propiedades físicas que caracterizan el fenómeno de transferencia de calor (densidad "ρ" en kg/m^3, calor específico a presión constante "Cp" en J/(kg * °C) y conductividad térmica, "k" en W/(m * °C)). Esto hace que no exista una solución analítica general y exacta que prediga los tiempos de proceso contemplando las condiciones habituales de congelación y descongelación.

Diversos autores han planteado distintas soluciones numéricas que resuelven el problema de transferencia de calor y calculan los tiempos de procesado con precisión. Sin embargo, a pesar de que nos encontramos en la era de la informática, existen muchas situaciones en las cuales resulta más práctico utilizar métodos de precisión rápidos y sencillos.

En la bibliografía existen un gran número de métodos de predicción de los tiempos de congelación (t_c) y descongelación (t_d) para formas unidimensionales, sin embargo, no ocurre lo mismo cuando la forma del alimento es tal que la transferencia de calor ocurre en más de una dirección. Para las formas de más de una dimensión se han seguido dos caminos: a) desarrollo de métodos específicos para cada forma; b) adaptación de métodos de predicción de formas simples mediante factores de forma que contemplan el aporte en más de una dirección.

El objetivo del presente artículo, no es otro que extender el uso de un método simple de predicción, desarrollado para la congelación y descongelación de alimentos unidimensionales, para predecir los tiempos de congelación y descongelación de alimentos multidimensionales, usando para ello diferentes fórmulas que permiten evaluar los factores de forma.

Predicción de los tiempos de congelación y descongelación

Un método habitual de contemplar la transferencia de calor multidimensional en el cálculo de los tiempos de calentamiento, enfriamiento, congelación, etc, consiste en combinar ecuaciones de predicción desarrolladas para una placa infinita con el método de factores de forma. Estos factores, dependen principalmente de la geometría y sólo de manera secundaria de las condiciones operativas.

<u>Cálculo de tiempos de congelación y descongelación de una placa plana infinita</u>

Para realizar éste, diversos autores han desarrollado ecuaciones de predicción empírica para geometrías simples unidimensionales. Dichas ecuaciones de predicción, que son válidas para alimentos con alto contenido inicial de agua, fueron obtenidas mediante regresión de resultados teóricos dependientes de las propiedades del alimento en estado fresco (difusividad térmica "α_0" en m2/s, y conductividad térmica, "k_0" en W/(m * °C)).

Las ecuaciones ya mencionadas, junto con su rango de validez, se exponen a continuación:

Tabla 1.- Ecuaciones para el cálculo de los tiempos de congelación y descongelación de distintos alimentos y rango de validez.

Para tiempos de congelación	
Rango de validez	*Aplicable a los siguientes alimentos*
$2°C \leq Ti \leq 25°C$ $-45°C \leq Ta \leq -25°C$ $1 \leq Bi \leq 50$	Carnes, pescados, hortofrutícolas
Ecuación	
$t_{c,pp} = (L^2/\alpha_0) * (-1{,}272 * T_c + 65{,}489) * (Bi^{-1} + 0{,}184) * (1 + T_i)^{0{,}096} * (-1 - T_a)^{-1{,}070}$	
Para tiempos de descongelación	
Rango de validez	*Aplicable a los siguientes alimentos*
$-31°C \leq Ti \leq -10°C$ $5°C \leq Ta \leq 35°C$ $1 \leq Bi \leq 150$	Carnes, pescados, puré de patatas
Ecuación	
$t_{d,pp} = (L^2/\alpha_0) * (0{,}321 * T_c + 23{,}637) * (Bi^{-1} + 0{,}435) * (-1 - T_i)^{0{,}099} * (1 + T_a)^{-0{,}763}$	

Siendo:

$t_{c,pp}$ = Tiempo de congelación de placa plana infinita.
$t_{d,pp}$ = Tiempo de descongelación de placa plana infinita.
L = Longitud característica: semiespesor (m).
T_c = Temperatura final del centro térmico (°C).
Bi = Número de Biot definido como $(h*L)/k_0$.
h = Coeficiente de transferencia calorífica ($W/(m^2 * °C)$).
T_i = temperatura inicial (°C).
T_a = Temperatura del medio calefactor (descongelación) o del refrigerante (congelación) (°C).

Cálculo de los factores de forma

Varios autores proponen considerar la forma del alimento mediante el uso de un volumen adimensional "V^*" y un área de transferencia también adimensional "A^*". El uso adecuado de ambos factores, permite realizar la corrección de métodos aproximados de la forma:

$$t_{c,pp} = f_1(T_a, T_i, T_c, L) * ((C_1/Bi) + C_2)$$

$$t_{d,pp} = f_2(T_a, T_i, T_c, L) * ((C_3/Bi) + C_4)$$

La expresión general de la ecuación corregida quedaría:

$$t_c = V^* * f_1(T_a, T_i, T_c, L) * ((C_1/Bi) + C_2 * A^*)$$

$$t_d = V^* * f_2(T_a, T_i, T_c, L) * ((C_3/Bi) + C_4 * A^*)$$

Donde "t_c" y "t_d" son los tiempos de congelación y descongelación respectivamente.

Los factores adimensionales volumen y área, solo dependen de la geometría. El volumen adimensional es muy aproximado al cociente entre el volumen del alimento y el producto de su área y la longitud característica "V/(A*L)" (valor cercano al inverso de las dimensiones equivalentes de transferencia de calor "E"). Por su parte, el área adimensional da una medida de la contribución preferencial a altos "Bi" de las caras del cuerpo correspondientes a las zonas de menor espesor. Ambos coeficientes se hallan tabulados para las formas más frecuentes. Los valores correspondientes a las geometrías utilizadas en el presente artículo se exponen en la tabla 2.

Tabla 2.- Valores de los factores de forma V^* y A^* en función de la geometría utilizada.

Geometría	**V^***	**A^***
Varilla rectangular infinita	$1/(1 + \beta_1^{-2})$	1
Bloque tridimensional	$1/(1 + \beta_1^{-2} + \beta_2^{-2})$	$(1 + (\beta_1/\beta_2)^2)^{0,5}$
Cilindro finito	$1/(2 + \beta_1^{-2})$	$(\beta_1^{-2} + 1)^{0,5}$

Siendo:

β_1 = Relación de dimensiones (L_2/L_1).
B_2 = Relación de dimensiones (L_3/L_1).

Se puede postular, que el tiempo de congelación o descongelación de un producto multidimensional puede evaluarse en función del tiempo correspondiente a una placa infinita del mismo espesor que la menor dimensión del alimento y procesada bajo las mismas condiciones operativas, y a un factor de forma geométrico "E" denominado número equivalente de dimensiones de transferencia de calor. Así, el tiempo de congelación o descongelación de un alimento de cualquier forma, puede expresarse mediante la siguiente expresión:

$$t_c = t_{c,pp}/E \qquad y \qquad t_d = t_{d,pp}/E$$

El parámetro “E” compara la contribución total a la transferencia de calor en un objeto multidimensional con la contribución que realiza únicamente la dimensión de menor longitud. Para una placa plana infinita, un cilindro infinito y una esfera, se tiene que el valor de “E” sería, respectivamente igual a 1, 2 y 3. Para objetos de otras formas los valores de “E” están comprendidos entre los de placa plana y esfera, dependiendo fundamentalmente de la forma y de manera secundaria de las condiciones del proceso.

En el ámbito Internacional, se han desarrollado sucesivas expresiones de la fórmula de cálculo del factor geométrico “E”, aunque los métodos que mejor pueden ajustarse al cálculo del mismo son:

Método de Hossain et al. ➔ Este procedimiento desarrolla expresiones analíticas para el cálculo de los factores de forma “E” (Ean), que varían en función de la forma del alimento. “Ean” se obtuvo como el cociente entre el tiempo de congelación de una placa plana infinita y el correspondiente obtenido para una forma multidimensional, utilizando expresiones analíticas para ambos deducidas suponiendo que el cambio de fase ocurre a una única temperatura.

Los valores del factor de forma obtenidos por este método y en función de la geometría son:

Para varilla rectangular infinita:

$$Ean = (1 + (2/Bi)) * (((1 + (2/Bi)) – 4 * \sum_{n=1,\infty} (sen\ (Zn)/(Zn^3 * D *F)))^{-1}$$

Donde:

$$D = 1 + (sen^2(Zn)/Bi) \qquad y \qquad F = (Zn/Bi) * senh\ (Zn * \beta_1) + cosh\ (Zn * \beta_1)$$

Siendo "Zn" las raíces de:

$$Bi = Zn * tan\ (Zn)$$

Para paquetes tridimensionales:

$$Ean = (1 + (2/Bi)) * (((1 + (2/Bi)) – 4 * \sum_{n=1,\infty} (sen\ (Zn)/(Zn^3 * D *F)) – 8 * \beta_2^2 * \sum_{n=1,\infty} \sum_{m=1,\infty} (sen\ (Zn) * sen\ (Zm) * ((cosh\ (Znm) + (Znm * senh\ (Znm))/(Bi * \beta_2)) * Zn * Zm * Znm^2 * (1 + (sen^2\ (Zn))/Bi) * (1 + (sen^2\ (Zm))/(Bi * \beta_1)))^{-1}))^{-1}$$

Donde Zn, Zm y Znm quedan definidos por:

$$Bi = Zn * tan\ (Zn)$$

$$Bi * \beta_1 = Zm * tan\ (Zm)$$

$$Znm^2 = (Zn^2 * \beta_2^2) + Zm^2 * (\beta_2/\beta_1)^2$$

Para cilindro finito alargado (altura > diámetro):

$$Ean = (2 + (4/Bi)) * ((1 + (2/Bi)) - 8 * \sum_{n=1,\infty} (y_n^3 * J_1(y_n) * (1 + (y_n^2/Bi^2) * (\cosh (y_n * \beta_1) + (y_n * \mathrm{senh} (y_n * \beta_1))/Bi))^{-1})^{-1}$$

Donde los valores de y_n son las raíces de:

$$y_n * J_1(y_n) - Bi * J_0(y_n) = 0$$

y J_0 y J_1 las funciones de Bessel de orden 0 y 1 respectivamente.

Método de Cleland el al. ➔ Por este procedimiento se obtuvo la siguiente expresión:

$$E = G_1 + G_2 * E_1 + G_3 * E_2$$

Las constantes geométricas "G_i" dependen únicamente de la geometría, siendo sus valores los detallados en la tabla 3.

Tabla 3.- Constantes geométricas para el cálculo del factor de forma "E".

Geometría	**G_1**	**G_2**	**G_3**
Varilla rectangular finita	1	1	0
Bloque tridimensional	1	1	1
Cilindro finito	2	0	1

Los valores de E_1 y E_2 son funciones de Biot y de las relaciones adimensionales β_1 y β_2, de tal forma que:

$$E_1 = (1/ \beta_1) * X(2,32/ \beta_1^{1,77}) + (1 - X(2,32/ \beta_1^{1,77})) * 0,73/ \beta_2^{2,50}$$

$$E2 = (1/ \beta_2) * X(2{,}32/ \beta_2^{1{,}77}) + (1 - X(2{,}32/ \beta_2^{1{,}77})) * 0{,}50/ \beta_2^{3{,}69}$$

$$X(x) = x/(Bi'^{1{,}34} + x)$$

Siendo Bi' el número de Biot definido como "$(h * 2L)/k_s$", tal que "k_s" es la conductividad térmica del alimento congelado.

Método de Cleland and Earle ➔ Mediante este método se obtuvo como ecuación general del factor de forma "E", la que sigue:

$$E = 1 + W_1 + W_2$$

Las respectivas ecuaciones para varilla rectangular infinita (1) y cilindros finitos alargados (2) se exponen a continuación:

(1) $E = 1 + W_1$

(2) $E = 2 + W_2$

Las funciones W_1 y W_2, dependen del número de Biot Bi' y de las relaciones β_1 y β_2, tal que:

$$W_1 = ((Bi'/(Bi' + 2)) * 5/(8 * \beta_1^3)) + (2/(Bi' + 2)) * 2/(\beta_1 * (\beta_1 + 1)))$$

$$W_2 = ((Bi'/(Bi' + 2)) * 5/(8 * \beta_2^3)) + (2/(Bi' + 2)) * 2/(\beta_2 * (\beta_2 + 1)))$$

Resultados

Los distintos métodos de cálculo del factor de forma han sido inicialmente testados por sus autores con tiempos de congelación o descongelación obtenidos numéricamente. Sin embargo, la manera correcta de evaluar la bondad de un método de predicción es verificar los valores predichos correspondientes al conjunto de datos experimentales disponibles. De esta manera, se obtiene que las distintas ecuaciones de cálculo del factor de forma conducen a resultados comparables.

Conclusión

Un método de predicción del tiempo de congelación o descongelación específico para placa plana infinita, utilizado conjuntamente con uno o dos factores de forma, permite predecir con buena precisión tiempos de proceso de alimentos multidimensionales regulares.

Este método es de muy fácil y rápida aplicación, y especialmente adecuado para su utilización en plantas elaboradoras, ya que solo requiere el conocimiento de las temperaturas de operación, las dimensiones del paquete a congelar, las propiedades del producto fresco y los coeficientes de transferencia de calor que se pueden obtener con relativa facilidad de tablas y/o correlaciones para la gran mayoría de los equipos industriales.

La corrección mediante V^* y A^* da lugar a resultados precisos, siendo el método de más fácil y rápida utilización.

En cuanto al número de dimensiones equivalentes “E”, está comprobado que los resultados obtenidos con las ecuaciones de regresión son tanto o más precisos que los correspondientes al número de dimensiones obtenido analíticamente, con la ventaja de la sencillez de cálculo de los primeros.

Bibliografía

CLELAND, A.C.; EARLE, R.L. (1982). Freezing time prediction for foods: a simplified procedure. *Int. J. Refrig*., 5, 134-140.

CLELAND, D.J.; CLELAND, A.C.; EARLE, R.L. (1987a). Prediction of freezing and thawing times for multidimensional shapes by simple methods: Part I – regular shapes. *Int. J. Refrig.*, 10, 156-164.

HOLDSWORTH, S.D. (1987). Physical and engineering aspects of food freezing. *Developments in food preservation*. 4. S. Thorne Ed. 153-204.

HOSSAIN, Md.M.; CLELAND, D.J.; CLELAND, A.C. (1992a). Prediction of freezing and thawing times for foods of regular multidimensional shape by using an analytically derived geometric factor. *Int. J. Refrig.*, 15, 227-234.

HOSSAIN, Md.M.; CLELAND, D.J.; CLELAND, A.C. (1992b). Prediction of freezing and thawing times for foods of two dimensional irregular shape by using a semi-analytical geometric factor. *Int. J. Refrig.*, 15, 235-240.

HOSSAIN, Md.M.; CLELAND, D.J.; CLELAND, A.C. (1992c). Prediction of freezing and thawing times for foods of three dimensional irregular shape by using a semi-analytical geometric factor. *Int. J. Refrig.*, 15, 241-246.

SUCCAR, J. (1989). Heat transfer during freezing and thawing of foods. *Developments in food preservation*. 5. S. Thorne Ed. 253-304.