

## DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO INDUSTRIAL DE CONGELACIÓN DE CRUSTÁCEOS MARINOS MEDIANTE SIMULACIÓN NUMÉRICA

Santos María V.<sup>1,3</sup>, Dima Jimena B.<sup>2</sup>, Barón Pedro J.<sup>2</sup>, Califano Alicia N.<sup>1</sup> y Zarithky Noemí E.<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Centro de Investigación y Desarrollo en Criotecología de Alimentos-Facultad de Ciencias Exactas, UNLP, CONICET, 116 y 47, La Plata (CP 1900).

<sup>2</sup>Centro Nacional Patagónico (CONICET-CENPAT)-Blvd Brown 2825 Puerto Madryn-Chubut.

<sup>3</sup>PROAL Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, UNLP, 47 y 115. [mvsantosd@gmail.com](mailto:mvsantosd@gmail.com)

**Palabras claves:** Congelación, Simulación Numérica, Cangrejos, Proceso industrial

### INTRODUCCIÓN

Las especies de cangrejos *Ovalipes trimaculatus* y *Platyxanthus patagonicus* son reconocidas como recursos de valor pesquero, cuya comercialización puede generar productos de alto valor agregado. La industria procesadora de carnes proveniente de cangrejos constituye una actividad incipiente en nuestro país y por ende es de interés para el sector pesquero de la Provincia de Chubut, contar con información adecuada para el diseño y adquisición de los equipos de congelación necesarios para esta actividad. Una de las maneras en que pueden ser comercializados es como productos congelados con aplicación previa de un tratamiento térmico (Codex Alimentario 1983). Para estimar los requerimientos energéticos y diseñar adecuadamente los equipos de congelación es necesario predecir los tiempos de proceso de manera precisa. A través de trabajos conjuntos con el CENPAT (Centro Nacional Patagónico- Puerto Madryn) se estudió la congelación de sistemas complejos tales como pulpa de cangrejo cocida envasada en películas plásticas al vacío (pouches) y pinzas de cangrejo cocida que incluyen la lámina calcárea. La simulación numérica del proceso de transferencia de energía permite calcular las distribuciones tiempo-temperatura en todo el dominio del alimento variando distintos parámetros como son la temperatura del aire refrigerante y los coeficientes de transferencia de calor, entre otros. Simular numéricamente el proceso de transferencia de energía con cambio de fase, como es el caso de la congelación implica resolver un problema matemático fuertemente no lineal dado que las propiedades termofísicas del alimento intervinientes en la ecuación diferencial (conductividad térmica, calor específico y densidad) son función de la temperatura. La variación de estas propiedades termofísicas con la temperatura es muy abrupta debido a la conversión de agua a hielo en el alimento durante la congelación. El método de los elementos finitos es el más adecuado para resolver problemas en sistemas de geometrías irregulares como las presentadas por algunos de los productos a base de crustáceos marinos. Para solucionar los problemas numéricos que se presentan al utilizar el método de los elementos finitos con propiedades variables con la temperatura (problemas con cambio de fase) se puede usar una formulación entálpica y de Kirchhoff (Scheerlinck et al. 2001, Fikiin 1996) para simular la congelación de "pouches" (bolsas) de pulpa de cangrejo en túnel. Esta formulación ha sido utilizada con éxito para la simulación de procesos de congelación en productos alimenticios de geometrías irregulares tridimensionales (Santos et al, 2010, Santos y Lespinard, 2011). Sin embargo esta formulación presenta dificultades cuando existen dos o más materiales con distintos valores de entalpía en íntimo contacto. En este tipo de problemas, la energía se transfiere a través de resistencias en serie; específicamente para pinzas de cangrejo, el sistema está representado mediante dos dominios con distintas propiedades termofísicas: la carne de cangrejo en contacto con una lámina calcárea. En la condición de contorno correspondiente a la interfase entre ambos materiales no existe unicidad en los valores de entalpía y función de Kirchhoff, lo cual hace imposible su resolución mediante esta metodología (Pham 2008). Por lo tanto en el caso de materiales heterogéneos se puede utilizar un método propuesto por el software COMSOL Multiphysics para simular la transferencia de energía con cambio de fase cuando existen resistencias en serie. Los objetivos del presente trabajo son: a) utilizar un modelo numérico en términos de la formulación Entálpica y de Kirchhoff para

simular el proceso de congelación de “pouches” de carne de cangrejo; b) utilizar el simulador comercial COMSOL para predecir los tiempos de congelación en pinzas de cangrejo teniendo en cuenta dos aspectos relevantes, la estructura heterogénea del alimento (tejido cárneo y capa calcárea) y la geometría irregular del producto; c) validar los modelos numéricos mediante experimentos de congelación en la planta industrial.

### SIMULACIÓN NUMERICA

#### Modelado de la congelación de carne de cangrejo en “pouches”

La ecuación de conducción de calor en términos de temperatura es:

$$\rho(T) C_p(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k(T) \nabla T) \quad (1)$$

Realizando el siguiente cambio de variables:  $H(T) = \int_{T^*}^T \rho(T) C_p(T) dT$  ;  $E(T) = \int_{T^*}^T k(T) dT$  (2)

Donde H se define como la entalpía volumétrica que es la integral del Cp volumétrico, E es la función de Kirchhoff que representa la integral de la conductividad. T\* es una temperatura de referencia que correspondiente al valor cero de entalpía y función de Kirchhoff. Las condiciones iniciales y de contorno son las siguientes:

$$T = T_0 \quad t = 0 \quad \text{en } \Omega \quad (3)$$

$$k \frac{\partial T}{\partial x} n_x + \frac{\partial T}{\partial y} n_y + \frac{\partial T}{\partial z} n_z = h'_{\text{placa-p}} (T - T_{\text{ext}}) \quad t \geq 0 \quad \text{en } \delta\Omega_{\text{placa-p}} \quad (4)$$

$$k \frac{\partial T}{\partial x} n_x + \frac{\partial T}{\partial y} n_y + \frac{\partial T}{\partial z} n_z = h'_{\text{p-aire}} (T - T_{\text{ext}}) \quad t \geq 0 \quad \text{en } \delta\Omega_{\text{p-a}} \quad (5)$$

donde los  $h'_{\text{placa-p}}$  y  $h'_{\text{p-a}}$  corresponden a los coeficientes de transferencia en la interfase placa-producto y producto-aire respectivamente e incluyen la resistencia al flujo calórico debido al material plástico, que contiene a la carne. Combinando Ecs. (1), (2), con las condiciones iniciales y de contorno representadas por las Ec. (3-5) se obtiene la siguiente formulación fuerte (Santos y col., 2010):

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \nabla^2 E \quad \text{en } \Omega \quad t \geq 0 \quad (6)$$

$$(\nabla E) \cdot n = h'_{\text{placa-p}} (T - T_{\text{ext}}) \quad \text{en } \delta\Omega_{\text{placa-p}} \quad t \geq 0 \quad (7)$$

$$(\nabla E) \cdot n = h'_{\text{p-a}} (T - T_{\text{ext}}) \quad \text{en } \delta\Omega_{\text{p-a}} \quad t \geq 0 \quad (8)$$

$$H = H_0 \quad t = 0 \quad (9)$$

Aplicando el método de residuos ponderados (Zienkiewicz y Taylor 1994), incorporando las condiciones de contorno (Ecuaciones 7 y 8) en la formulación variacional y reorganizando luego de aplicar el método de Galerkin: se obtiene:

$$CG \frac{dH}{dt} + FG \cdot T(H) + KG \cdot E(H) = m \quad (10)$$

donde: CG es la matriz global de capacitancia, KG es la matriz global de conductancia, FG es la matriz global convectiva y m es el vector térmico global. H, E, y T son los valores nodales de entalpía, de función Kirchhoff y Temperatura, respectivamente. Para la obtención de la solución numérica de la ec. 10 se desarrolló un código computacional propio que fue codificado en Matlab 6.4 y descrito en Santos y col. (2010). Dada las dimensiones de los pouches el sistema se podía asimilar a un proceso de transferencia de calor unidimensional, considerando sólo el espesor del dominio (Fig. 1a)

#### Modelado de la congelación de Pinzas de Cangrejo

En el caso de pinzas de cangrejo se tiene un sistema compuesto por dos dominios con propiedades termofísicas diferentes: carne de cangrejo y lámina calcárea. En el caso de la carne de cangrejo esta sufre un proceso de cambio de fase durante la congelación, en cambio la lámina calcárea presenta propiedades termofísicas constantes en todo el rango de estudio. Las ecuaciones que describen el sistema son las siguientes:

$$\rho_c(T) C_{p_c}(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k_c(T) \nabla T) \quad \text{en } \Omega_c \quad (11)$$

$$\rho_{LC} C_{p_{LC}} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k_{LC} \nabla T) \quad \text{en } \Omega_{LC} \quad (12)$$

donde el subíndice “c” y “LC” corresponde a la carne de cangrejo y lámina calcárea, respectivamente. Las condiciones iniciales y de contorno son las siguientes:

$$T = T_0 \quad t = 0 \quad \text{en } \Omega_c \text{ y } \Omega_{LC} \quad (13)$$

$$k_{LC} \frac{\partial T}{\partial x} n_x + \frac{\partial T}{\partial y} n_y = h_{placa-p} (T - T_{ext}) \quad t \geq 0 \quad \text{en } \delta\Omega_{placa-p} \quad (14)$$

$$k_{LC} \frac{\partial T}{\partial x} n_x + \frac{\partial T}{\partial y} n_y = h_{p-a} (T - T_{ext}) \quad t \geq 0 \quad \text{en } \delta\Omega_{p-a} \quad (15)$$

Se han utilizado coeficientes de transferencia individuales, teniendo que resolver simultáneamente las ecuaciones 11 y 12 de conducción de calor en los dominios del tejido muscular y la lamina calcárea. Asimismo se mantiene la diferencia en cuanto al tipo de interfase a la que está expuesta la superficie de la lámina calcárea de acuerdo a si está en contacto con la placa o con el aire refrigerante (Fig. 1b).

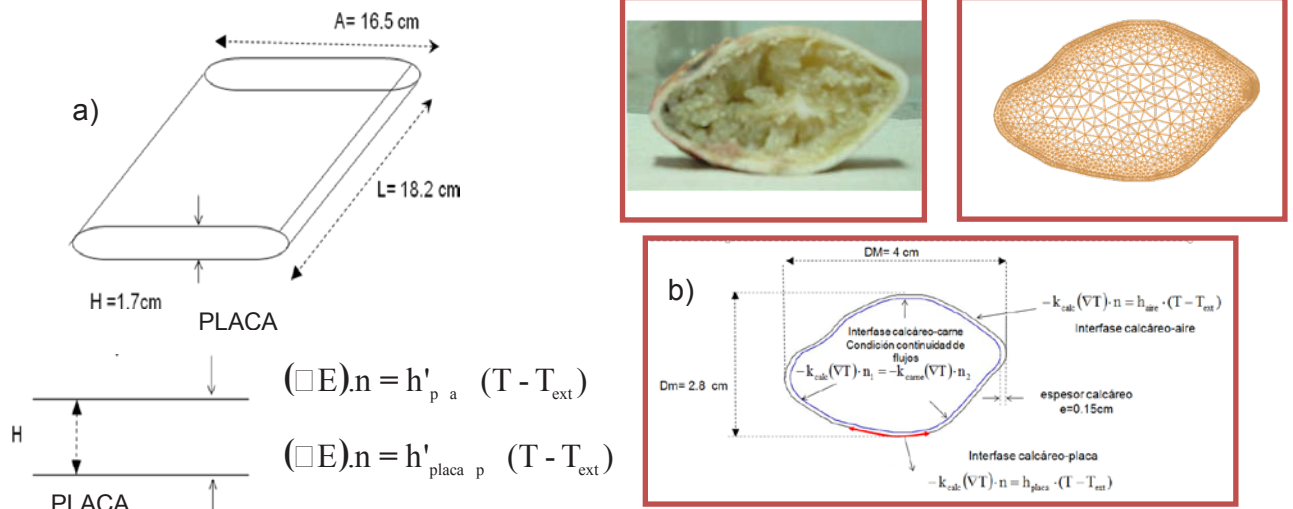


Figura 1: a) Dimensiones de los “pouches” con carne de cangrejo y esquema del sistema unidimensional modelado b) Imagen digital de la sección transversal de una pinza de cangrejo, dimensiones características y condiciones de contorno del modelo bidimensional utilizado. Contorno irregular discretizado en elementos triangulares. Sección transversal con visualización de ambos dominios (capa calcárea y tejido muscular).

El calor específico aparente (que incluye el cambio de fase) fue representado mediante la suma de las funciones Heaviside y Gaussiana, lo cual genera una función más suave en todo el rango de temperaturas especialmente en la zona de cambio de fase, evitando inestabilidades numéricas para la resolución por elementos finitos, según lo recomendado por el manual del COMSOL (COMSOL Multiphysics vs. 3.4 Manual).

$$C_{p_c}(T) = C_{p_{cc}} + \frac{\Delta H_m}{T_s} f(H_{ca}) + D \Delta H_m \quad (16)$$

donde el  $C_{p_{cc}}$  corresponde al valor de calor específico de carne de cangrejo congelada,  $T_m$  la temperatura del pico de congelación (equivalente a la media  $\mu$  en la curva gaussiana),  $\Delta H_m$  es el calor latente de fusión, y  $D$  es la función Gaussiana definida como :

$$D(T) = \frac{e^{-\frac{(T-T_m)^2}{dT^2}}}{\sqrt{\pi d T^2}} \quad (17)$$

donde  $dT$  es la mitad del rango de transición,  $2dT$  corresponde a la diferencia de temperatura donde ocurre la liberación del 84% del calor latente de fusión (Neeper 2000),  $f(H_{ea})$  es una función escalón Heaviside, codificada en el entorno del programa COMSOL-Matlab y tiene la gran ventaja de tener derivadas segundas continuas, lo cual permite al software resolver el problema a pesar de la abrupta variación del calor específico aparente, respetando los parámetros físicos, como es el rango de cambio de fase, temperatura de congelación, calor latente de fusión, etc.

### TRABAJO EXPERIMENTAL

Se analizó la composición proximal de la carne de cangrejo cocida, se determinó el contenido de humedad, proteína, lípidos, glucógeno y cenizas del músculo del cuerpo y las pinzas de ambas especies siguiendo la metodología descrita en Dima y col. (2012).

El calor específico de la carne de cangrejo  $C_p$  en estado congelado y sin congelar, la temperatura de congelación inicial, la cantidad de agua no congelada y el calor latente de congelación, se midieron utilizando calorimetría diferencial de barrido (DSC) en un Equipo TA modelo Q100 controlado por un módulo TA 5000 (TA Instruments, New Castle, Delaware, USA). La conductividad térmica, la densidad y el calor específico aparente de la carne en función de la temperatura se calcularon utilizando los modelos de Choi y Okos (1986) teniendo en cuenta la composición de la carne a base de cangrejo. La dependencia de la conductividad térmica y la densidad con la temperatura se estimó utilizando un modelo en paralelo (Choi y Okos 1986). El calor específico aparente de la carne de cangrejo se estimó usando la ecuación de Miles (1983). Para el caso de pouches de carne a base de cangrejo una vez obtenidas las propiedades térmicas,  $C_p$ ,  $k$ , y  $\rho$  se procedió a integrarlas en función de la temperatura para obtener la función Entalpía vs. Temperatura y la función de Kirchhoff vs. Temperatura. En el caso de pinzas de cangrejo se utilizó el calor latente de fusión junto con el calor específico aparente de la carne de cangrejo en estado completamente congelado en las ecuaciones 16 y 17.

**Validación experimental del modelo de congelación:** Se realizaron mediciones de temperatura-tiempo durante la congelación a los efectos de validar experimentalmente el modelo numérico implementado en elementos finitos. Las muestras se congelaron en un equipo perteneciente a la empresa Refmar S.R.L, situado en la Planta "Madryn Mariscos". El mismo es un túnel de congelación horizontal continuo de 6 metros de largo con un área transversal de  $3.6 \text{ m}^2$ . El equipo cuenta con seis ventiladores adaptados en la parte superior del túnel que trabajan a una frecuencia máxima de 50Hz y puede alcanzar una temperatura de  $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ . El tiempo máximo de residencia de los productos dentro del túnel es de 40 minutos, pudiéndose regular dicha velocidad para producir menores tiempos de residencia para la congelación. Otra característica del equipo es que el producto a congelar se coloca sobre una cinta metálica móvil, la cual se encuentra a la temperatura del equipo, por lo tanto la transferencia de energía durante la congelación se producía tanto por convección (aire) como por conducción en la parte inferior (placa metálica de apoyo). La velocidad del aire a lo largo del equipo se registró por medio de un anemómetro STANDARD (Modelo ST82) digital portátil, siendo en promedio de  $4.16 \text{ m/s}$  para una frecuencia de trabajo de 40 Hz y  $1.56 \text{ m/s}$  para una frecuencia de 30 Hz. Se registraron experimentalmente las historias térmicas en el túnel de congelación de los productos pinzas de cangrejo cocidas y pouches de carne de cangrejo envasada al vacío. Las curvas se registraron a  $4.16 \text{ m/s}$  y  $1.56 \text{ m/s}$  de velocidad del aire, durante 35 min. y a una temperatura externa de  $-40^\circ\text{C}$ . El registro de las historias térmicas tiempo -temperatura se realizó para pinzas de cangrejo cocidas mediante termocuplas calibradas tipo K, y adquisidor de datos (Omega, USA). Para la carne de cangrejo envasada al vacío, debido a que la inserción de una termocupla producía pérdida de vacío, se utilizó un data logger muy pequeño de temperatura, digital (iButton® Sensors, Maxim products USA) de rango de trabajo  $-55^\circ\text{C}$  a  $100^\circ\text{C}$ , con mediciones cada 1 minuto que se colocó dentro del producto empaquetado en el centro geométrico del envase.

Los coeficientes de transferencia calórica en interfase se determinaron experimentalmente utilizando piezas regulares (esfera y prisma) construidas en aluminio a las cuales se les insertaron termocuplas tipo K en el centro geométrico para registrar la temperatura en

función del tiempo al ser introducidas en el equipo de congelación en túnel. Se realizaron experimentos numéricos variando el valor de  $h$  con el fin de encontrar el valor de  $h$  que minimizaba las diferencias entre las corridas experimentales y numéricas. En el caso de pouches los coeficientes de transferencia calórica que mejor ajustaron con el modelo fueron  $h'_{p-a}$ (producto-aire)=  $10\text{W/m}^2\text{K}$ , y  $h'_{placa-p}$ (placa-producto) =  $80\text{W/m}^2\text{K}$ . En el caso de las pinzas fueron  $h_{p-aire}=20\text{W/m}^2\text{K}$  y  $h_{placa-p}=500\text{W/m}^2\text{K}$ .

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el caso de congelación de pouches se muestra en la Fig. 2 a) la comparación del modelo numérico desarrollado en Matlab con una de las experiencias donde las condiciones fueron Temperatura inicial  $T_i=7\text{ }^\circ\text{C}$ , Temperatura del aire  $T_{ext}=-40\text{ }^\circ\text{C}$ , coeficientes de transferencia  $h'_{p-a}$  (producto-aire)= $10\text{W/m}^2\text{K}$  y  $h'_{placa-p}$ (placa-producto)= $80\text{W/m}^2\text{K}$ . La posición de la termocupla era  $0.85 \times 10^{-2}\text{m}$  (centro del pouch). En el caso de congelación de pinzas las condiciones fueron las siguientes,  $T_i=8.8\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_{ext}=-40\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $h_{p-aire}=20\text{W/m}^2\text{K}$ ,  $h_{placa-p}=500\text{W/m}^2\text{K}$  y posición de la termocupla  $x=0.015\text{m}$ ,  $y=0.01\text{m}$  (Fig. 2 b).

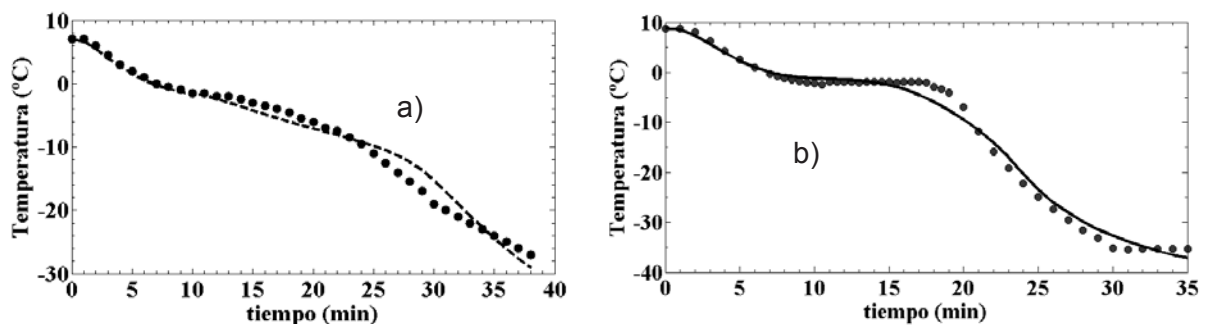


Figura 2: ● Temperatura experimental, — Temperatura predicha por el modelo a) utilizando formulación Entlálpica y de Kirchoff para congelación de pouches, b) utilizando el simulador COMSOL para congelación de pinzas.

Como puede observarse existe una buena concordancia entre los valores experimentales y los predichos por el modelo, tanto para pouches como para pinzas de cangrejos. El desvío

$$\text{estándar promedio RMSE} = \sqrt{\frac{\sum (T_{\text{exp}} - T_{\text{pred}})^2}{N}}$$

fue de  $1.5^\circ\text{C}$  tanto para pouches como para pinzas, siendo  $N =$  número de datos. Una vez validados ambos modelos numéricos se procedió a su utilización para simular condiciones operativas diferentes variando temperaturas externas de aire y el coeficiente de transferencia de calor entre el producto y el aire, simulando las distintas velocidades del fluido refrigerante.

En la Fig. 3 se observan las distribuciones de temperaturas en la pinza de cangrejo a distintos tiempos luego de haber sido introducida en el túnel de congelación. En el caso de pouches se calcularon los tiempos para que el punto  $x=0.85\text{cm}$  (Fig. 1) alcance una temperatura final de  $-15\text{ }^\circ\text{C}$ , siendo la Temp inicial del producto de  $7^\circ\text{C}$  y considerando distintos valores de Temp. externa del aire refrigerante ( $-20, -30$  y  $-40^\circ\text{C}$ ) y

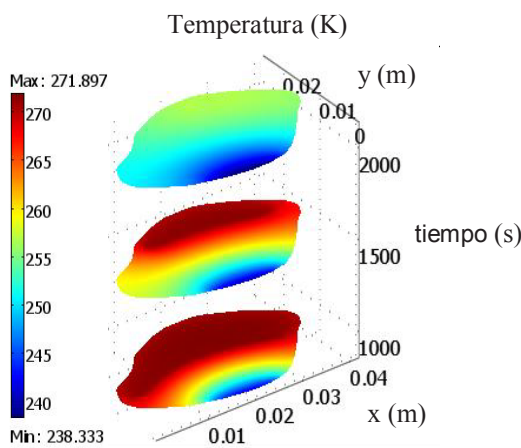


Figura 3: Distribución de temperaturas dentro de la pinza a los 15, 25, y 30 minutos luego de haber ingresado al congelador.  $T_i=8.8\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_{ext}=-40\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $h_{p-aire}=20\text{W/m}^2\text{K}$ ,  $h_{placa-p}=500\text{W/m}^2\text{K}$

coeficientes globales de transferencia correspondientes a la superficie producto-aire ( $h_{p-aire}=5, 10, 15\text{W/m}^2\text{K}$ ). A partir de los datos numéricos obtenidos (tiempos de congelación) se procedió a realizar una regresión polinomial mediante el método "step-wise forward" utilizando SYSTAT 12.0 con el objeto de obtener una ecuación algebraica que permita determinar los tiempos de congelación ( $t_c$ ) en pouches, válida en los siguientes rangos



operativos,  $-40^{\circ}\text{C} \leq T_{\text{ext}} \leq -20^{\circ}\text{C}$ , y  $5 \leq h_{\text{p-aire}} \leq 15 \text{W/m}^2\text{K}$  ( $R^2 = 0.99982$ ):

$$tc(\text{min}) = 202.6 + 7.715 (T_{\text{ext}}) - 1.89333(h'_{\text{p-aire}}) + 0.08783 (T_{\text{ext}})^2 (h'_{\text{p-aire}}) - 0.036(h'_{\text{p-aire}})(T_{\text{ext}}) \quad (18)$$

Del mismo modo se estimó en el caso de pinzas los tiempos para que el punto  $x=0.022\text{m}$   $y=0.017\text{m}$  (Fig. 3) alcance una temperatura final de  $-15^{\circ}\text{C}$ , siendo la Temperatura inicial del alimento de  $8.8^{\circ}\text{C}$ . La regresión polinomial obtenida para los siguientes rangos operativos;  $-40^{\circ}\text{C} \leq T_{\text{ext}} \leq -20^{\circ}\text{C}$ , and  $5 \leq h_{\text{p-a}} \leq 20 \text{W/m}^2\text{K}$  fue ( $R^2 = 0.99925$ ):

$$tc(\text{min}) = 46.34690 + 0.04783(T_{\text{ext}}) - 0.01385(h_{\text{p-aire}})^2 + 0.03541(T_{\text{ext}})(h_{\text{p-aire}}) - 0.00102(h_{\text{p-aire}})^2(T_{\text{ext}}) \quad (19)$$

Estas ecuaciones algebraicas permiten calcular tiempos de congelación variando la temperatura del aire refrigerante y los coeficientes de transferencia calórica, constituyendo herramientas útiles para su aplicación industrial

## CONCLUSIONES

Se desarrolló un programa en elementos finitos utilizando el lenguaje Matlab, que permitió conocer la temperatura en función del tiempo para la congelación de pouches conteniendo carne de cangrejo. Se modeló numéricamente el proceso de congelación de pinzas de cangrejo considerando las distintas propiedades termofísicas de los componentes del alimento: capa de calcáreo y carne. Se consideró el proceso de transferencia de energía conductivo, placa-producto, y el proceso convectivo, producto-aire, utilizando coeficientes de transferencia de calor adecuados. Se incorporaron a cada modelo de simulación las propiedades termofísicas de los productos utilizando datos experimentales y ecuaciones predictivas teniendo en cuenta la fracción de hielo con la temperatura. Se analizó el efecto de la velocidad del aire en el túnel y temperatura externa refrigerante en los tiempos de proceso. Las predicciones numéricas concordaron satisfactoriamente con los resultados experimentales permitiendo determinar de manera rápida y precisa los tiempos de congelación de estos productos lo cual permite la optimización del proceso.

## BIBLIOGRAFÍA

- Dima J.B, Santos M.V., Barón P., Califano A., Zaritzky N. 2012. Modelado matemático del proceso industrial de congelación de crustáceos marinos IV Congreso Internacional de Ciencia y Tecnología de los Alimentos, Córdoba, Argentina, 14 a 16 de Noviembre.
- Choi Y, Okos MR. 1986. Effects of temperature and composition on the thermal properties of foods. En Le Maguer M, Jelen P., editores. Food engineering and process applications, volume 1. Elsevier Applied Science: New York.
- Codex.1983.Código internacional recomendado para cangrejos (Codex:CAC/RCP 28).
- COMSOL Multiphysics™ documentation, [www.comsol.com](http://www.comsol.com).
- Fikiin KA. 1996. Generalized numerical modeling of unsteady heat transfer during cooling and freezing using an improved enthalpy method and quasi-one-dimensional formulation. International Journal of Refrigeration, 19 (2): 132 -140.
- Miles CA, van Beek G, Veerkamp CH. 1983. Calculation of the Thermophysical Properties of Foods. En Jowitt R et al., editores. Physical Properties of Foods. London: Appl. Sci. Publ. pag 269-312.
- Neeper, DA. 2000. Thermal dynamics of wallboard with latent heat storage. Solar Energy, 68 (5): 393–403.
- Pham QT. 2008. Modelling of freezing processes. En Evans J, editor. Frozen Food Science and Technology. Blackwell Publishing: Oxford.
- Santos MV, Lespinard A. 2011. Numerical simulation of mushrooms during freezing using the FEM and an enthalpy: Kirchhoff formulation. Heat and Mass Transfer, 47:1671–1683.
- Santos MV, Vampa V, Califano A, Zaritzky N. 2010. Numerical simulations of chilling and freezing processes applied to bakery products in irregularly 3D geometries. Journal of Food Engineering, 100: 32-42.
- Scheerlinck N, Verboven P, Fikiin KA, De Baerdemaeker J, Nicolaï BM. 2001. Finite element computation of unsteady phase change heat transfer during freezing or thawing of food using a combined enthalpy and Kirchhoff transform method. Transactions of the ASAE, 44 (2): 429 – 438.
- Zienkiewicz OC, Taylor RL. 1994. El método de los elementos finitos, volumen I. McGraw-Hill, Barcelona.
- AGRADECIMIENTOS:** Los autores agradecen la contribución a este trabajo de las siguientes Instituciones: Universidad Nacional de La Plata, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (CONICET), Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCYT), y CENPAT ( Centro Nacional Patagónico- CONICET) y al Ing. Miguel Galarza, responsable de la empresa REFMAR S.R.L. en Puerto Madryn.