



Mecánica Computacional Vol XXXII, págs. 2485-2501 (artículo completo)  
Carlos G. García Garino, Aníbal E. Mirasso, Mario A. Storti, Miguel E. Tornello (Eds.)  
Mendoza, Argentina, 19-22 Noviembre 2013

## MODELADO NUMÉRICO DE PASTEURIZACIÓN ARTESANAL DE LECHE Y JUGOS NATURALES

Ana M. Martínez<sup>a</sup> y Mario R. Rosenberger<sup>b</sup>

<sup>a</sup>*CEDIT – CeDITec (Comité Ejecutivo de Desarrollo e Innovación Tecnológica Centro de Desarrollo e Innovación Tecnológica), Posadas - Misiones, Argentina, anamartinez.tutora@gmail.com, <http://www.cedit.misiones.gov.ar>*

<sup>b</sup>*IMAM – CONICET – UNaM, FEQyN. Félix de Azara 1552, 3300 Posadas, Pcia. de Misiones, Argentina, rrmario@fceqyn.unam.edu.ar, <http://www.fceqyn.unam.edu.ar>*

**Palabras clave:** Campo de temperaturas, Transferencia de calor, Convección, Pasteurización artesanal, Optimización, Elementos finitos.

**Resumen.** El proceso de pasteurización consiste en el calentamiento de líquidos hasta una temperatura tal que permita la eliminación de los microorganismos patógenos y de esta forma de extender el tiempo vida útil. El tiempo de pasteurización es un limitante importante, ya que si el tratamiento térmico es excesivo el producto pierde su valor nutritivo y puede incluso contraer características desagradables en su gusto, aroma, color y textura. La duración del proceso debe ser la óptima, ya que si es breve no se alcanza a destruir el número suficiente de microorganismos y, por lo tanto, podría volver a aumentar su número hasta niveles que pongan en riesgo la salud de los consumidores.

El objetivo de este trabajo es la optimización de la pasteurización artesanal de leche y jugo de naranja, para aprovechar la producción regional de las chacras de la provincia de Misiones y realizar la transferencia a pequeños productores. Para lo cual se efectuó la simulación numérica del proceso de pasteurización empleando el método de elementos finitos. Se realizaron modelos de simetría axial y del sachet y del sistema sachet y batea para distintos valores de temperatura del agua de calefacción. Se analizaron los resultados identificando los puntos que necesitaban más tiempo en calentarse y de esta manera se determinaron recomendaciones de tiempos óptimos para diferentes temperaturas del agua. Para validar dichos modelos de simulación se realizó la pasteurización artesanal de jugo de naranja y se midieron las temperaturas dentro y fuera del sachet del producto mediante termocuplas y termómetros durante el proceso de pasteurización.

## 1 INTRODUCCION

La pasteurización mejoró la calidad de vida al permitir que productos como la leche pudieran transportarse sin descomponerse. En la pasteurización no es el objetivo primordial la "eliminación de los elementos patógenos" sino la disminución de sus poblaciones, hasta niveles que no causen intoxicaciones alimentarias (asumiendo que el producto pasteurizado se ha refrigerado correctamente y que se consume antes de la fecha de caducidad).

La pasteurización debe realizarse siguiendo estrictamente la relación tiempo-temperatura recomendada, para asegurar la destrucción de todas las bacterias patógenas que pueden estar presentes en el producto crudo con el objetivo de mejorar su capacidad de conservación. Por otro lado, la pasteurización a temperatura superior a la recomendada, conlleva a una reducción del valor nutricional de la leche, evidenciada con la pérdida de vitaminas (como la riboflavina, ácido ascórbico y otras) y además de una reducción en la disponibilidad de algunos aminoácidos esenciales como la lisina junto al efecto negativo sobre los caracteres organolépticos del producto obtenido.

La pasteurización no mata todos los microorganismos, pero los reduce en número. En la pasteurización se eliminan bacterias como *Escherichia coli* y aquellas productoras de: Brucelosis, Tuberculosis, Fiebre, Salmonelosis, Fiebre escarlatina, estafilococos, *Coxiella burnettii* (*Rickettsia* causante de la fiebre Q), pero no destruye los microorganismos mastíticos tales como el *Staphylococcus aureus* o el *Streptococcus pyogenes*, como así tampoco destruye algunos microorganismos responsables de la acidez como los *Lactobacillus* (Dávila Fernández N. y Hernández García, J.E., 2006; Ferreccio, J.P. y Medrano, J.I., 2011; Spreer, E., 1991; National Advisory Committee on Microbiological Criteria for Foods, 2006; Food and Drug Administration. Department of Health and Human Services, 2003).

Dos factores afectan la muerte de las bacterias:

- La temperatura a la que se incrementa la leche;
- El tiempo durante el cual la leche se mantiene a dicha temperatura.

Aún así, los cambios en la temperatura y la duración de tiempo deben de ser minimizados a aquellos necesarios para producir la muerte de las bacterias de manera que, los cambios en sabor sean minimizados.

Las distintas combinaciones de temperatura y tiempo se detallan en la [Tabla 1](#) (Food and Drug Administration. Department of Health and Human Services, 2003).

Temperatura (°C)	tiempo
63	30 minutos
72	15 s
89	1,0 s
90	0,5 s
94	0,1 s
96	0,05 s
100	0,01 s

Tabla 1. Combinaciones tiempo-temperatura de pasteurización.

La leche, después de pasteurizar, debe ser enfriada drásticamente a la temperatura de inhibición bacteriana (4 °C) y envasada. La leche pasteurizada a estas temperaturas no produce el sabor desagradable de leche cocida y afecta muy poco su valor nutritivo. La leche pasteurizada no está estéril, de manera que es preciso enfriarla rápidamente después de la

pasteurización a fin de prevenir la multiplicación de las bacterias sobrevivientes.

Es posible esterilizar la leche más que pasteurizarla mediante el uso de tratamientos térmicos más fuertes. Si se emplea una temperatura suficientemente alta, el tiempo puede ser muy breve, pero éste proceso aporta a la leche un suave sabor a cocción debido a una suave caramelización de la lactosa (azúcar de la leche). El proceso es conocido como UHT ('Ultra High Temperature') y consiste en exponer la leche durante un corto plazo (de 2 a 4 segundos) a una temperatura que oscila entre 135 y 140 °C y seguido de un rápido enfriamiento, no superior a 32 °C. Con el método UHT no se consigue una completa esterilización (que es la ausencia total de microorganismos y de sus formas de resistencia), se consigue la denominada esterilización comercial, en la que se somete al alimento al calor suficiente para destruir las formas de resistencia de *Clostridium botulinum*, pero sí existirán algunos microorganismos como los termófilos, que no crecen a temperatura ambiente. A los alimentos se aplica esterilidad comercial, ya que la esterilidad absoluta podría degradar de manera innecesaria la calidad del alimento (Tortora, G.L. et. al. 2007). La leche UHT debe ser envasada en condiciones de esterilidad y no requiere ser refrigerada y tiene una vida típica de seis a nueve meses, antes de que se abra.

Los zumos envasados (e incluso los néctares) se someten a dos tipos diferentes de procesos de pasteurización: el proceso "batch" (empleado en los productores de pequeño tamaño de producción) y el UHT (empleado en los productores de mayor producción). Dependiendo del origen de los zumos se tienen diferentes microorganismos incluidos que deben ser reducidos en la concentración total de sus poblaciones mediante la pasteurización de los mismos. Los zumos pueden sufrir alteraciones en el color de la bebida, tendiendo al marrón debido al deterioro enzimático de la polifenoloxidasas. Esto es debido en parte a la presencia de oxígeno en el líquido, esta es la razón por la que los zumos y los néctares suelen ser liberados del aire antes de entrar en el proceso de pasteurización. De la misma forma la pérdida de vitamina C y de caroteno se ve disminuida por la aireación previa (Hours, R.A., 2005; Pinto, A., 2010; Ávila Pineda, G.T. y Fonseca Moreno, M.M., 2008; Cevallos Cedeno, R.E. y Velásquez Murillo, L.D., 2007).

Según la cantidad de producto que se desea pasteurizar se pueden elegir diferentes métodos. En el caso de la producción regional de las chacras de la provincia de Misiones el método más conveniente para ellos es el empleo de un proceso "batch". Los pequeños productores suelen comercializar en las ferias francas de la provincia de Misiones, donde se vende leche cruda y otros productos naturales y artesanales. Pero el Código Alimentario Argentino (CAA) prohíbe la venta al público (CAA, Art. 556bis - Res 2270, 14.9.83) de leche cruda, es por tal razón que el gobierno de la provincia de Misiones les ofrece a los pequeños productores un asesoramiento gratuito para que puedan pasteurizar en forma económica sus productos artesanales, para mejorar la calidad de los mismos. Se les aconseja la construcción de un equipo eficaz de pasteurización para pequeñas escalas de trabajo (Figura 1.a), que permita pasteurizar no solamente leche cruda sino otros productos tales como: jugos de diferentes cítricos, jugo de tomate, mosto, etc. (Fernández; P. et. al. 2011; Catálogo de Proyectos CeDITec, 2010; Dumke, T. et. al. 2009). La pasteurización manual en bolsa para pequeños productores ayuda a mejorar la calidad de la leche (Catálogo de Proyectos CeDITec, 2010). Por tal motivo es importante que se realice el análisis fisicoquímico y microbiológico de los productos que se desea pasteurizar, teniendo como referencia los parámetros establecidos por el CAA (CAA, Art.555, 557 y 558; CAA- Metodología analítica oficial, productos lácteos: leche). El proceso consiste en llenar diez sachets de 1 litro, se los cierra con una selladora manual eléctrica. Los sachets se colocan en una canastilla. Luego se realiza el proceso térmico que consiste en llenar la olla de 50 litros con agua hasta 30 cm de altura, sumergir la canastilla

con los diez sachets dentro de la olla –con el agua calentada previamente y mantenerlos a una temperatura entre los 63 a 65 °C durante 30 minutos (para el control del tiempo el dispositivo cuenta con un microcontrolador electrónico). Posteriormente, se trasladan los sachets a un baño de agua a temperatura ambiente por 10 min para un preenfriamiento y luego al baño con hielo y agua a 2-5°C durante 2 horas (Catálogo de Proyectos CeDITec, 2010).

En los líquidos envasados (leche, cítricos, etc.), existe un calentamiento más intenso en las zonas cercanas a las paredes de los envases que los contienen, obteniéndose así un producto con un grado de calentamiento no uniforme. Consecuentemente las pérdidas de calidad son mayores en dichas áreas, siendo estas aún más elevadas en productos envasados en recipientes de gran diámetro (Lespinard, A.R., 2009; Fazio Aguilar, H. de, 2009). Por lo anterior resulta de gran interés el diseño y optimización del tratamiento térmico de productos líquidos envasados a los fines de minimizar dichas pérdidas. En este sentido el modelado y simulación de dicho proceso es una valiosa herramienta, la cual permite determinar la distribución y evolución de las temperaturas en el producto, minimizando los procedimientos experimentales, reduciendo los costos y tiempos de desarrollo.

Este trabajo tiene por objetivo desarrollar un modelo que permita predecir la evolución de la temperatura y variación de índices de calidad en cítricos y leche envasadas en sachets de plástico, a los fines de optimizar el proceso y mejorar la calidad final del producto.

El objetivo de la simulación por computadora del proceso de pasteurización artesanal consiste en elaborar un modelo que permita predecir las temperaturas dentro del sachet como función de la temperatura del baño térmico, tal que permita realizar un proceso óptimo de pasteurización de distintas sustancias, tales como: leche, cítricos, etc.

## 2 METODOLOGIA

### 2.1 Dominio del problema

La pasteurización se realiza en una olla de 50 litros de capacidad máxima (que permite efectuar la pasteurización artesanal de 10 sachets de 1 un litro de leche ó cítricos), los sachets son de polietilenos de 0,2 mm de espesor, el elemento calefactor es una resistencia eléctrica de 2000 W, los sachets se soportan dentro de la olla en un canasto de alambre tejido de trama abierta.



Figura 1.a. Esquema real del sistema a modelar (vista de atrás, con el detalle del controlador electrónico),

Figura 1.b. Fotografía de un sachet de plástico dentro de la canastilla.

El control de temperatura del baño térmico se realiza con un controlador electrónico, el

líquido del baño térmico es agua.

En la [Figura 1.a](#) se puede observar una fotografía del sistema real a modelar. En la [Figura 1.b](#) se puede ver una fotografía de un sachet dentro de la canastilla. En la [Figura 2.a](#) se detalla las dimensiones de la olla y del sachet y la altura del agua de pasteurización y de la leche en el interior del sachet.

El sistema que se desea modelar consiste en un sachet de plástico cilíndrico (de 4,08 cm de radio y 21 cm de altura) que contiene 1 litro de leche dentro de una olla de aluminio cilíndrica de 20 cm de radio y 40 cm de altura que contiene agua hasta 30 cm de altura. Se considera que la olla está inmersa en un medio ambiente a 25 °C.

## 2.2 Modelo matemático

El modelo se construyó considerando un dominio constituido por el sachet conteniendo leche, en dos dimensiones con simetría axial, como se puede observar en la [Figura 2.b](#). El dominio es discretizado usando una malla estructurada de elementos cuadriláteros isoparamétricos constituidos por nueve nodos. El interior del sachet está formado por dos regiones la superior con aire y la inferior con leche.

Simplificando el modelo asumiendo simetría axial da una solución aproximada, sin embargo, permite reducir considerablemente el número de nodos de la malla, disminuyendo así el tiempo de cálculo y la memoria necesaria para el procesamiento.

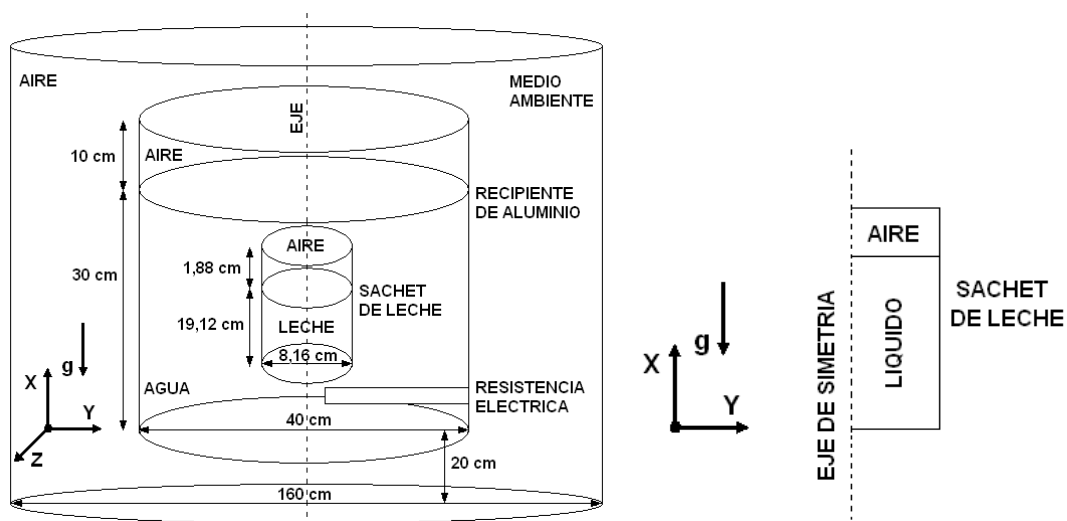


Figura 2.a. Gráfico que detalla las dimensiones de la olla y el sachet y la altura del agua de pasteurización, Figura 2.b. Dominio del problema reducido al sachet.

Para resolver el problema se plantearon las ecuaciones de:

- Conservación de la masa.
- Conservación del momento.
- Conservación de la energía.

Y se impuso un fluido de viscosidad, densidad y conductividad térmica y calor específico constantes para la leche y el aire en el interior del sachet considerando independientes de la temperatura. Por lo tanto, se adoptaron valores de las propiedades a una temperatura media entre la temperatura ambiente y la temperatura máxima alcanzada.

Los modelos para flujo son laminares tanto en el aire como en la leche,

Las condiciones de contorno utilizadas fueron las siguientes:



- Los contornos superior, inferior y lateral están sometidos a convección con un valor de coeficiente de convección constante y la temperatura del baño térmico se considera constante.
- Sobre el eje de simetría el flujo de calor es nulo en la dirección perpendicular a él.
- La temperatura inicial del sachet es la temperatura ambiente = 25 °C.
- Se consideraron dos diferentes temperaturas del baño térmico (agua) para realizar la pasteurización: 65 °C y 70 °C.

Las propiedades fisicoquímicas de los materiales se buscaron en la literatura disponible y se vuelcan en la [Tabla 2](#) (por ejemplo ver [Fazio Aguilar, H. de, 2009](#); [Shackelford J. F. y Alexander, W., 2001](#)).

MATERIAL	PROPIEDAD	VALOR	UNIDADES
AIRE	DENSIDAD	0,1122E-02	Kg/m <sup>3</sup>
	CONDUCTIVIDAD	0,262E-01	W/m.K
	CALOR ESPECIFICO	1012	J/Kg.K
	COEFICIENTE DE EXPANSIÓN	0,367E-02	1/K
	VISCOSIDAD	0,186E-04	Pa.s
LECHE	DENSIDAD	1013.60231	Kg/m <sup>3</sup>
	CONDUCTIVIDAD	0,64023	W/m.K
	CALOR ESPECIFICO	3885,56	J/Kg.K
	COEFICIENTE DE EXPANSIÓN	0,677E-03	1/K
	VISCOSIDAD	0,0017	Pa.s

Tabla 2. Propiedades fisicoquímicas utilizadas en la simulación para los fluidos involucrados.

Para resolver las ecuaciones de conservación se empleó el Método de Elementos Finitos usando el algoritmo de Galerkin de residuos pesados ([Zienkiewicz and Taylor, 1991](#)). Para considerar el movimiento de fluido por convección se empleó el modelo Boussinesq ([Kreith F. and Bohn, M. S., 1993](#)), tanto para el aire como para la leche dentro del sachet. Para resolver el problema en función del tiempo se empleó el método implícito de Crank-Nicolson, se utilizaron pasos de tiempos variables. El sistema de ecuaciones se resolvió usando Newton-Raphson, la tolerancia utilizada como límite de cálculo para las iteraciones fue de  $10^{-4}$ .

El dominio, ver [Figura 2.b](#), se subdividió usando una malla estructurada. En la [Figura 3](#) se detalla la malla del dominio del problema, rotado 90 °, que muestra una estructura de la malla con un total de 22.321 nodos y 5.870 elementos

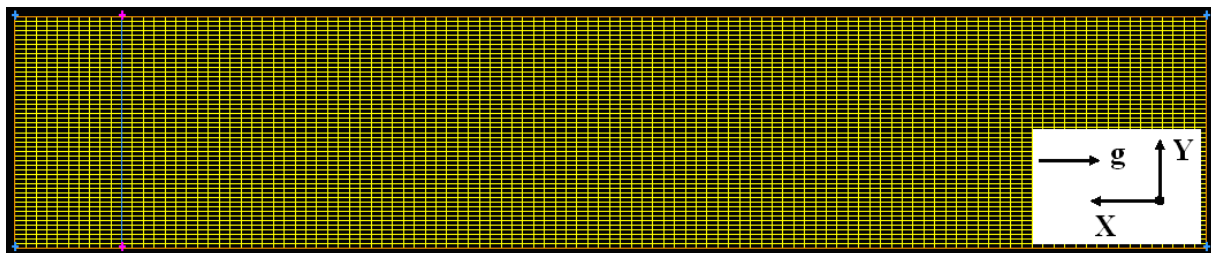


Figura 3. Malla del sachet.

## 2.3 Mediciones experimentales de temperaturas en la pasteurización

Se realizaron experiencias donde se midió la temperatura en función del tiempo del calentamiento de leche en un sachet de polietileno, durante todo el proceso de pasteurización. El sachet se llenó con 1 litro de leche a temperatura ambiente, y se lo sumergió en una olla con agua caliente. Se tomaron dos temperaturas: una de 69 °C y otra de 75 °C, el controlador permitió controlar la temperatura con una precisión de 1 °C. El equipo de pasteurización se llenó con agua hasta 30 cm de altura y cubrió totalmente el sachet. Las temperaturas se midieron con un termistor Pt100. La temperatura dentro del sachet se midió colocando el termistor aproximadamente a 1 cm del fondo del mismo.

En la [Figura 4](#) se grafica la evolución de la temperatura de la leche dentro del sachet en función del tiempo.

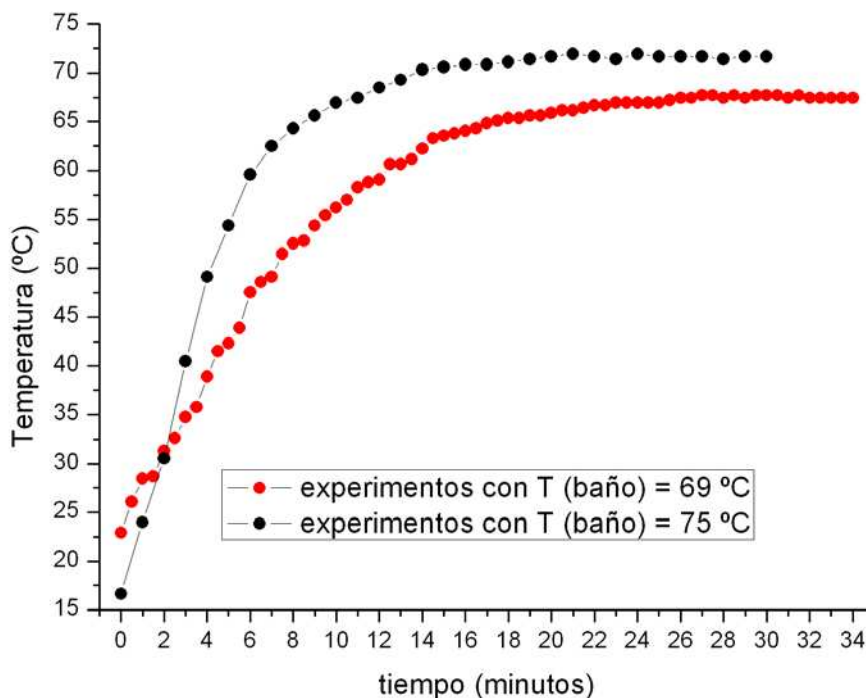


Figura 4. Evolución de la temperatura de la leche dentro del sachet a 1 cm del fondo, en función del tiempo para distintas temperaturas del agua de pasteurización.

## 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1 Resultados experimentales

En la [Figura 4](#) se grafica la evolución de la temperatura del agua dentro del sachet en función del tiempo para dos temperaturas del baño térmico: 69 °C y 75 °C. En ambos casos se ve que la temperatura dentro del sachet alcanza un valor estacionario, de 67,5 °C y 72 °C, respectivamente. En el primer caso la temperatura inicial fue de 23 °C y en el segundo de 17°C.

Estos valores de temperatura en función del tiempo se utilizarán para validar los resultados del modelo.

### 3.2 Cálculo del coeficiente de transferencia de calor por convección del sachet sumergido en agua

Una condición de contorno para el modelo de elementos finitos es la condición de transferencia de calor por convección entre el baño térmico y el sachet. Como el mismo no es conocido se realizan varias simulaciones teniendo en cuenta diferentes valores de coeficientes de transferencia de calor por convección ( $h$ ); (por ej., véase la Ec. (1)).

$$Q = A \cdot h \cdot (T_{\text{sup}} - T_{\text{medio}}) \quad (1)$$

El rango de valores del  $h$  ha sido determinado asimilando al sachet como un cilindro orientado de forma vertical, y calculando los valores del coeficiente de transferencia de calor por convección para un cilindro en agua según las relaciones empíricas siguientes: ((Kreith, F. and Bohn, M. S., pag. 324, 1993) Ec. (2) y Ec. (3)).

$$\overline{Nu} = 0,555 \cdot (Gr \cdot Pr)^{\frac{1}{4}} \quad \text{para valores de } (Gr \cdot Pr) < 10^9 \quad (2)$$

$$\overline{Nu} = 0,0210 \cdot (Gr \cdot Pr)^{\frac{2}{5}} \quad \text{para valores de } (Gr \cdot Pr) > 10^9. \quad (3)$$

Donde  $Nu$ ,  $Gr$  y  $Pr$  son los números adimensionales de Nusselt, Grashof y Prandtl, respectivamente.

El número de Grashof se define por medio de la Ec. (4):

$$Gr = \frac{\rho^2 \cdot g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot D^3}{\mu^2} \quad (4)$$

$\rho$  = densidad del fluido

$g$  = aceleración debido a la gravedad de la tierra

$\beta = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial T} = \frac{1}{T}$ , coeficiente volumétrico de expansión térmica (con  $T$  en Kelvin).

$\Delta T = (T_{\infty} - T_s)$ : diferencia de temperatura entre el cuerpo y el fluido ambiente

$T_{\infty}$  = temperatura del baño térmico.

$T_s$  = temperatura de la superficie del sachet.

$L$  = longitud característica (ó  $D$  = dimensión característica del cuerpo).

$\mu$  = viscosidad dinámica del fluido.

El número de Prandtl se define por medio de la Ec. (5):

$$Pr = \frac{\mu \cdot C_p}{k} = \frac{\nu}{\alpha} \quad (5)$$



$\mu$  = viscosidad dinámica ( $\mu/\rho$ ) (Pa.s = Kg/ms).

$\alpha$  = difusividad térmica ( $k/\rho.C_p$ ). ( $m^2/s$ ).

$C_p$  = calor específico a P=cte. (J/KgK).

$\nu$  = viscosidad cinemática ( $\mu/\rho$ ) ( $m^2/s$ ).

$k$  = conductividad térmica (J/msK).

Suele emplearse otro número adimensional en problemas de convección libre o natural, el número de Rayleigh (Ra), que señala el umbral entre el régimen laminar y turbulento en el caso de convección libre, (por ej., véase la Ec. (6)):

$$Ra = (Gr)*(Pr) \quad (6)$$

El número de Nusselt se define por medio de la Ec. (7):

$$Nu = \frac{h * L}{k} \quad (7)$$

Para el cálculo de “h” se promediaron las propiedades del agua entre 30 °C y 70 °C (Fazio Aguilar, H. de, 2009).

El coeficiente de transferencia de calor por convección natural del sachet en agua se calculó según las ecuaciones: Ec. (2) y Ec. (3) y los resultados se graficaron como función de la temperatura de la superficie del sachet, para un valor de temperatura del baño igual a 65 °C y 70 °C (ver Figura 5).

En la Figura 5 se observa que a medida que aumenta la temperatura de la superficie del sachet, acercándose a la temperatura del baño térmico, además de disminuir la fuerza impulsora para calentar la leche dentro del sachet (temperatura del baño térmico menos temperatura de la superficie del sachet), también disminuye el coeficiente “h”.

Calculando el valor medio del coeficiente de transferencia de calor por convección natural del sachet en agua, resulta un valor de:  $h$  (medio) = 875 W/m<sup>2</sup>\*k.

Según los resultados de los cálculos usando los números adimensionales el coeficiente de transferencia de calor por convección entre el baño térmico y el sachet pueden tomar valores comprendidos entre 300 y 1200 W/(m<sup>2</sup>.K). Por lo tanto, se realizaron simulaciones del proceso de calentamiento considerando que el valor de  $h$  es constante durante el mismo e igual a 300, 500, 800 y 1200 W/(m<sup>2</sup>.K), también se simuló con los valores 50 y 100 W/(m<sup>2</sup>.K), para comparación en todos los casos tomando dos temperaturas del baño térmico 65 °C y 70 °C. La temperatura del baño del agua para la pasteurización y el valor de “h” son las variables críticas del proceso (Lespinard, A.R., 2009; Fazio Aguilar, H. de, 2009).

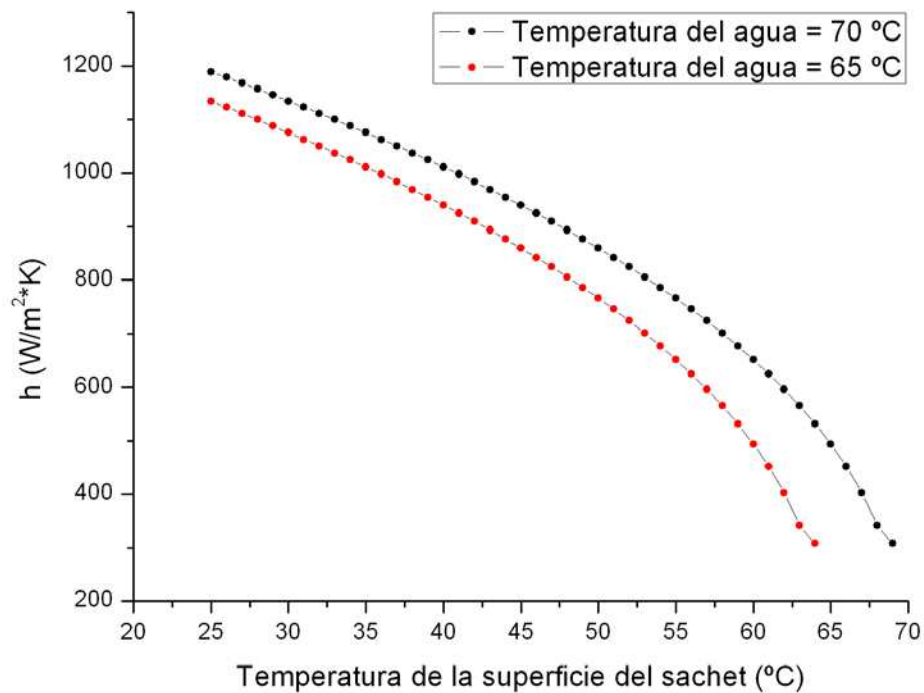


Figura 5. Gráfico del coeficiente de transferencia de calor por convección natural del agua “h”, en función de la temperatura de la superficie del sachet.

El número de **Reynolds** para un fluido que circula por el interior de una tubería circular recta, viene dado por la Ec. (8):

$$\text{Re} = \frac{\rho \cdot v_s \cdot D}{\mu} \quad (8)$$

donde:  $\rho$ : densidad del fluido,  $v_s$ : velocidad característica del fluido,  $D$ : diámetro de la tubería a través de la cual circula el fluido o longitud característica del sistema y  $\mu$ : viscosidad dinámica del fluido.

Para valores de  $\text{Re} \leq 2100$  el flujo es laminar. El flujo se mueve siguiendo una delgada línea paralela a las paredes del tubo. En nuestro caso, para el sachet de leche podemos calcular el valor máximo de la velocidad tal que  $\text{Re}=2100$ , así el valor del número de  $\text{Re}$  es:

$$\text{Re} = \frac{1013,60231 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot v_s \cdot 0,21\text{m}}{0,0017 \text{Pa}\cdot\text{s}}$$

Por lo tanto, la máxima velocidad dentro del sachet para que el sea laminar es de 0,0168 m/s. Los valores medios de la velocidad obtenidos de las diferentes simulaciones realizadas indican valores de velocidad del orden de 0,002 m/s con valores máximos de 0,0146 m/s muy localizados en un a pequeña región del centro del sachet.

### 3.3 Resultados de la simulación de la temperatura del interior del sachet

En la Figura 6 se realiza un esquema que indica el número y posición de los nodos analizados en función del tiempo para analizar la distribución de temperaturas y determinar la eficiencia del proceso de pasteurización.

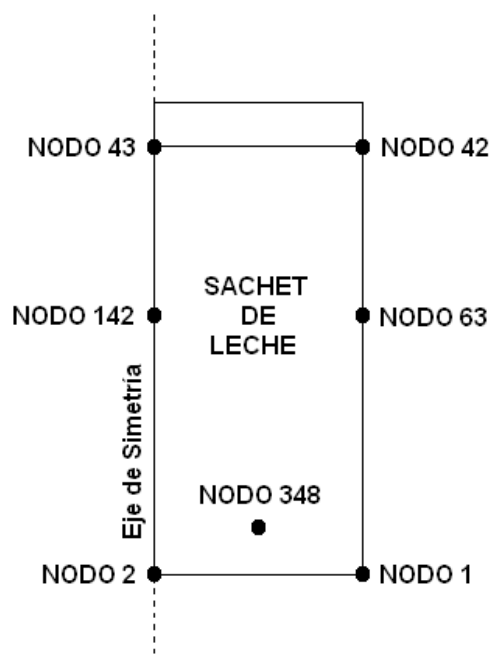


Figura 6. Nodos examinados en función del tiempo.

#### **Resultados para: $T_i = 25\text{ }^\circ\text{C}$ y $T_\infty = 70\text{ }^\circ\text{C}$ y $h = 1200\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$**

En la Figura 7.a se pueden observar las isotermas de temperatura dentro del sachet para 430 segundos de iniciado el proceso (7,17 minutos). En la Figura 7.b se pueden observar las isotermas de temperatura dentro del sachet para 1800 segundos (30 minutos). Donde la distribución de temperaturas observada es aceptable para ambos tiempos seleccionados para realizar la pasteurización, ya que las temperaturas son superiores a  $63\text{ }^\circ\text{C}$ . Para un sachet de leche a  $25\text{ }^\circ\text{C}$ , sumergido en agua a  $70\text{ }^\circ\text{C}$ , en un medio ambiente a  $25\text{ }^\circ\text{C}$ , se necesita un período de precalentamiento de 7,17 minutos para llegar a la temperatura de pasteurización. A partir de ese instante se necesita que el tratamiento de pasteurización sea de 30 minutos a temperaturas comprendidas entre  $63\text{ }^\circ\text{C}$  y  $65\text{ }^\circ\text{C}$ .

El aire ubicado en la parte superior del interior del sachet se calienta antes que la leche debido su baja capacidad calorífica y eso produce que la parte superior del sachet aumente su temperatura más rápidamente que la parte inferior del mismo. Por lo tanto, la zona crítica para controlar la temperatura de la leche es la parte inferior del sachet. En la Figura 8 se grafica la evolución temporal del nodo 348 (indicado en la Figura 6) ubicado en la parte inferior del sachet.

Si analizamos la evolución de la temperatura en el tiempo, se puede observar que el tiempo limitante lo impondrá la parte inferior del sachet, la cual resulta ser la que se calienta más lentamente. La temperatura del nodo 348 permite hacer de testigo de la evolución de la temperatura de esa parte del sachet, ver Figura 8, para compararla con los valores de los experimentos. En la Figura 8 se ve que para 360 s (6 minutos) las temperaturas alcanzan la temperatura mínima de pasteurización ( $63\text{ }^\circ\text{C}$ ); sin embargo no todo el sachet alcanzó los  $63\text{ }^\circ\text{C}$ ,

la parte inferior aun está a menor temperatura y recién a los 430 s todas las temperaturas de la leche son superiores a 63 °C ver la [Figura 7.a](#).

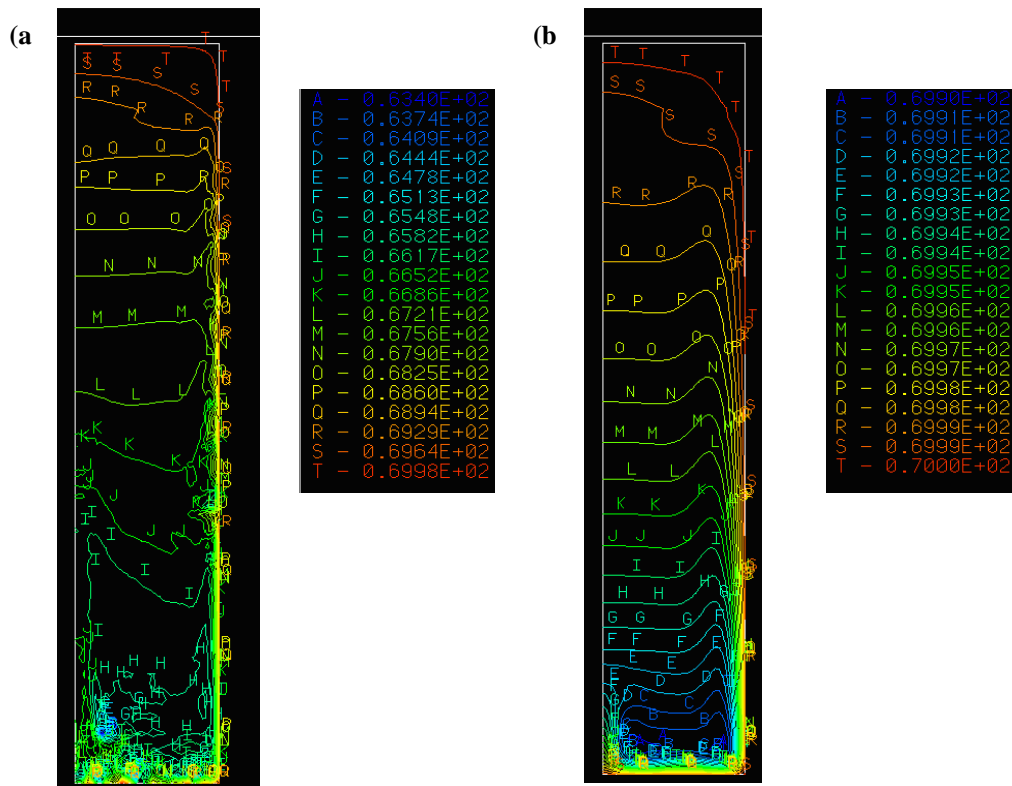


Figura 7.a. Isothermas de temperatura para 430 s, con  $h = 1200 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  y  $T_\infty = 70 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  
 Figura 7.b. Isothermas para 1800 s, con  $h = 1200 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  y  $T_\infty = 70 \text{ }^\circ\text{C}$

Para esta simulación ( $h = 1200 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  y  $T_\infty = 70 \text{ }^\circ\text{C}$ ), se considera que a los 430 s, comienza la pasteurización, las temperaturas dentro del sachet, varían desde 63,4 °C hasta 69,9 °C, mostrando una diferencia de temperatura entre el fondo y la parte superior del sachet igual a 6,5 °C . En cambio a los 1800 s el rango de temperaturas varía desde 69,9 °C hasta 70,0 °C (ver [Figura 7.b](#)), con lo cual la diferencia de temperatura entre el fondo y la parte superior del sachet disminuye a 0,1 °C, al final de la pasteurización.

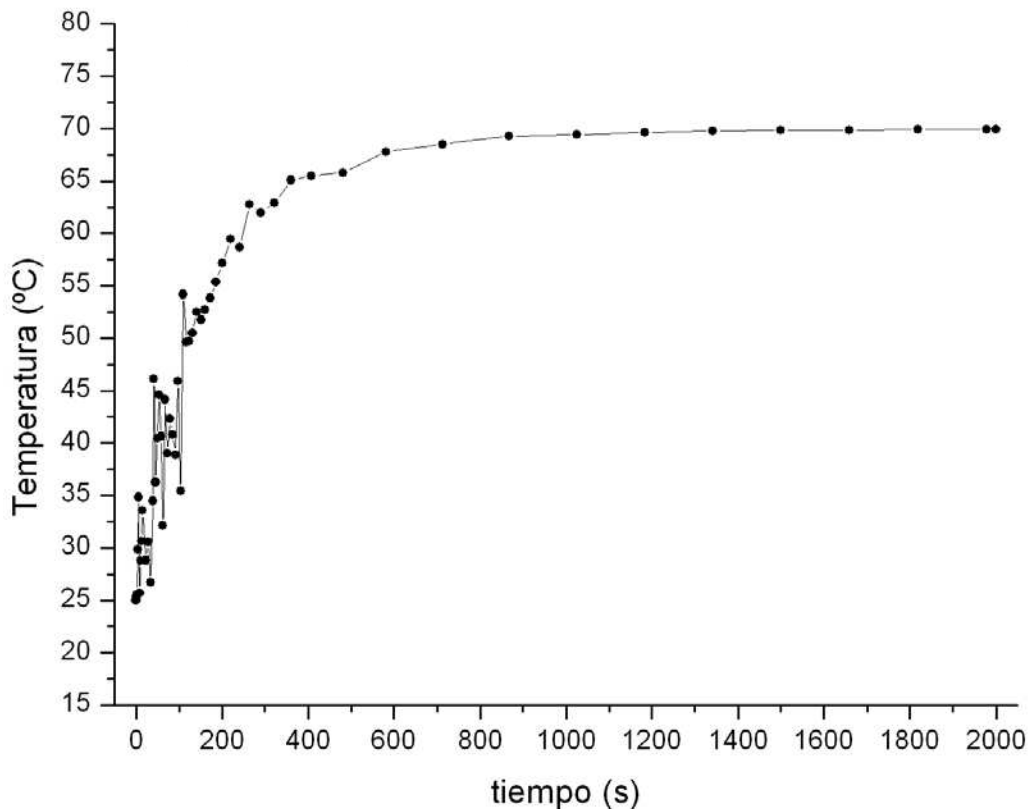


Figura 8. Evolución de la temperatura del nodo 348 en función del tiempo de pasteurización.

Los resultados de las simulaciones para diferentes valores del coeficiente  $h$  y temperatura de baño térmico se resumen en la [Tabla 3](#), se indican el tiempo de inicio de la pasteurización, la diferencia de temperaturas al inicio y el tiempo final de pasteurización para mantener el producto a temperaturas mayores a  $63^{\circ}\text{C}$  durante 1800 s.

$h$ ( $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ )	$T_{\infty}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	Tiempo de inicio de pasteurización (s)	Diferencia de temperaturas entre fondo y parte superior del sachet ( $^{\circ}\text{C}$ )	Tiempo total (s) de inmersión
1200	70	430	6,5	2230 (37,2 min)
1200	65	670	1,92	2470 (41,2 min)
800	70	450	6,61	2250 (37,5 min)
800	65	800	1,91	2600 (43,3 min)
500	70	600	7,34	2400 (60,0 min)
500	65	1000	1,74	2800 (46,7 min)
300	70	800	6,57	2600 (43,3 min)
300	65	1300	1,93	3100 (51,7 min)
100	70	>1800	69,83-63,22	> 3500 (58,3 min)
50	70	>1800		> 3600 (60 min)
50	65	>1800		> 3600 (60 min)

Tabla 3: Tiempo de inicio y finalización de la pasteurización y diferencia de temperaturas al inicio, para diferentes valores de coeficiente  $h$  y  $T_{\infty}$ .

En la **Figura 9** se representa la comparación de las curvas experimentales de pasteurización artesanal respecto de las obtenidas por simulación para distintos valores del coeficiente “h” y para diferentes temperaturas del baño  $T_{\infty}$ : 65 °C y 70 °C. Ambos grupos de curvas, experimentales y teóricas son similares en cuanto a forma (exponencial creciente), todas alcanzan un plató con un valor menor que la temperatura del baño térmico ó  $T_{\infty}$ . Sin embargo las curvas experimentales muestran una diferencia entre ellas de 1,5°C y 3°C para los  $T_{\infty}$  de 65°C y 70°C, respectivamente. En cambio los resultados de los modelos muestran una diferencia de 0,1 °C, en general. Esto se debe a que los modelos se simularon con un valor de coeficiente “h” constante. Sin embargo, en los experimentos el valor del coeficiente “h” varia constantemente disminuyendo según una tendencia como la mostrada en la **Figura 5**. Esto hace que cuando la temperatura del sachet aumente la transferencia de calor disminuya.

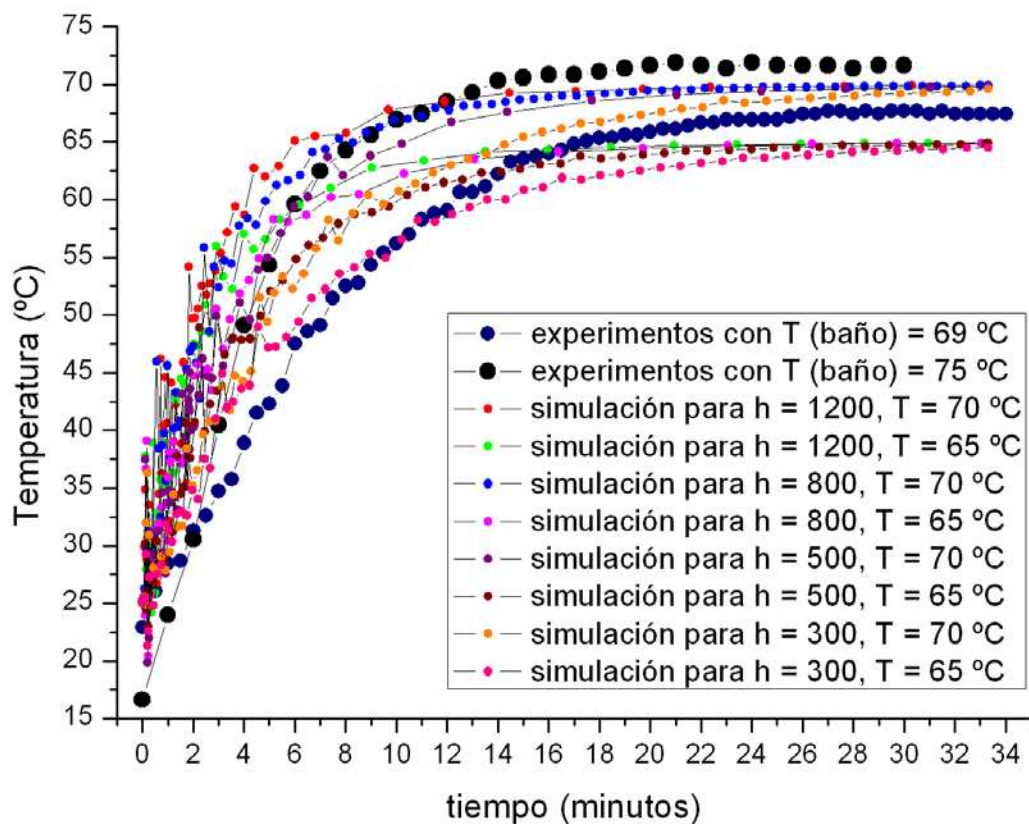


Figura 9. Comparación de la temperatura experimental de pasteurización vs. la de simulación, para distintos valores de  $h$  ( $W/m^2 \cdot K$ ).

A pesar de la diferencia manifiesta se puede observar que las curvas teóricas pueden utilizarse para predecir tiempos de proceso con una diferencia sistemática de 4 minutos adelantada a los experimentos, comparando la curva experimental con el baño térmico a 69°C y la curva teórica con  $T_{\infty}=70$  °C y  $h = 500$   $W/(m^2 \cdot K)$ ; se utiliza esta curva pues a una temperatura de 63 °C el valor del coeficiente “h” es aproximadamente 500  $W/(m^2 \cdot K)$ ; según la **Figura 5**. Esta diferencia podría ser corregida si se incorpora al modelo la dependencia del coeficiente “h” con la temperatura.

En la **Tabla 3** se detalla el período de precalentamiento de la leche antes de la pasteurización y el tiempo total de pasteurización de un sachet de leche para distintos valores del coeficiente de transferencia de calor por convección natural del agua “h”. Cuando se sumerge el sachet de



leche en la olla con agua, el agua se encuentra a una temperatura de referencia constante ( $T_s$ ) y la temperatura del medio ambiente es  $T_\infty = 25\text{ °C}$  al igual que la leche dentro del sachet. De la [Tabla 3](#) se puede concluir que si el agua para realizar la pasteurización está a  $70\text{ °C}$  en el mejor de los casos para un coeficiente de transferencia de calor por convección natural del agua de  $1200\text{ W/m}^2\cdot\text{k}$ , el período de precalentamiento del sachet con leche llevaría un tiempo de 7,17 minutos, con lo cual tiempo total en el cual un sachet con leche debe estar inmerso en el agua es de 37,2 minutos. El caso más desfavorable se presenta cuando el coeficiente de transferencia de calor por convección natural del agua es de  $300\text{ W/m}^2\cdot\text{k}$ , en este caso el período de precalentamiento del sachet con leche llevaría un tiempo de 13,30 minutos, con lo cual tiempo total en el cual un sachet con leche debe estar inmerso en el agua resulta mucho mayor, de 43,3 minutos.

Si el agua para realizar la pasteurización está a  $65\text{ °C}$  en el mejor de los casos para un coeficiente de transferencia de calor por convección natural del agua de  $1200\text{ W/m}^2\cdot\text{k}$ , el período de precalentamiento del sachet con leche llevaría un tiempo de 11,17 minutos, con lo cual tiempo total en el cual un sachet con leche debe estar inmerso en el agua es de 41,2 minutos. El caso más desfavorable se presenta cuando el coeficiente de transferencia de calor por convección natural del agua es de  $300\text{ W/m}^2\cdot\text{k}$ , en este caso el período de precalentamiento del sachet con leche llevaría un tiempo de 21,7 minutos, con lo cual tiempo total en el cual un sachet con leche debe estar inmerso en el agua resulta mucho mayor, de 51,7 minutos.

En la [Tabla 3](#) se informa también la diferencia de temperaturas máximas en el sachet, la diferencia es menor a  $2\text{ °C}$  cuando la temperatura  $T_\infty$  es de  $65\text{ °C}$  y es superior a  $6\text{ °C}$  cuando la  $T_\infty$  es  $70\text{ °C}$ . Una gran diferencia de temperaturas dentro del sachet puede ser perjudicial para la calidad del producto, una diferencia de  $6\text{ °C}$  es desfavorable frente a una diferencia de  $2\text{ °C}$ . Por lo tanto, es recomendable desde este aspecto utilizar la temperatura de baño térmico menor.

De acuerdo a los valores experimentales de la evolución de la temperatura del agua dentro del sachet en función del tiempo (ver [Figura 4](#) y [Figura 9](#)), el período de precalentamiento del agua es de 14,5 minutos cuando la temperatura del baño térmico es de  $69\text{ °C}$ , al cabo del cual le corresponden  $63,3\text{ °C}$ , si el sachet se introduce a  $23\text{ °C}$  dentro de la olla. Y el período de precalentamiento del agua está comprendido entre 7 y 8 minutos cuando la temperatura del baño térmico es de  $75\text{ °C}$ , al cabo del cual le corresponden  $62\text{ °C}$  y  $64\text{ °C}$  respectivamente, si el sachet se introduce a  $17\text{ °C}$  dentro de la olla.

De acuerdo a los resultados experimentales y de la simulación debería agregarse el tiempo necesario para que el sachet alcance los  $63\text{ °C}$  (precalentamiento) al tiempo total del proceso de pasteurización, si se emplea el equipo recomendado para la pasteurización artesanal en bolsa (que recomienda que se aplique como mínimo  $63\text{ °C}$  durante 30 minutos).

Para que el producto experimente las condiciones adecuadas de pasteurización, el agua de la olla se podría mantener entre  $65\text{ °C}$  y  $70\text{ °C}$ , con lo cual el tiempo de pasteurización sería como mínimo de 37,2 minutos y como máximo de 43,3 minutos. Ya que se debe incluir el período de precalentamiento del sachet, que contiene leche a temperatura ambiente. Si el líquido del sachet está a  $25\text{ °C}$  y se lo sumerge en el agua caliente a temperaturas entre  $65\text{ °C}$  y  $70\text{ °C}$ , demora como mínimo 7,17 minutos y como máximo 13,30 minutos en llegar a la temperatura deseada, de esta manera se podrían alcanzar los 30 minutos requeridos para la pasteurización. Esto está de acuerdo con los resultados experimentales, ya que se pudo verificar que el período de precalentamiento oscila entre 7 y 14,5 minutos (si el sachet con leche está a una temperatura comprendida entre  $17\text{ °C}$  y  $23\text{ °C}$  al momento de sumergirse).

#### 4 CONCLUSIONES

Se simularon por medio del método de elementos finitos los perfiles de temperatura durante el calentamiento convectivo de leche envasada en sachet de plástico. Las temperaturas predichas en la simulación en estado transiente, para el período de pre-calentamiento del sachet fueron validadas exitosamente con los datos experimentales para el agua.

A mayor temperatura del baño térmico el tiempo de precalentamiento es menor, sin embargo la diferencia de temperaturas dentro del sachet es mayor y por lo tanto puede disminuir calidad el producto. Asumiendo una situación de compromiso, es deseable extender el tiempo de proceso antes de disminuir la calidad, por eso serian recomendables las temperaturas del baño menores.

En la simulación computacional realizada en estado transiente se pudo determinar que el tiempo de pasteurización debe ser de 51,7 minutos si el agua para efectuar la pasteurización se mantiene a 65°C. Esto se debe a que existe un período de precalentamiento del sachet que dura como mínimo 11,17 minutos y como máximo 21,7 minutos.

Las velocidades dentro del sachet con leche resultaron bajas, con valores inferiores a  $v \leq 0,0168$  m/s, resultando un flujo del fluido laminar.

El empleo del modelo desarrollado es aceptable, permite predecir la evolución de las temperaturas en alimentos líquidos envasados en recipientes de plástico para procesos térmicos equivalentes y, por consiguiente, el diseño y optimización de los mismos. Mejoras en el modelo incluirían una variación del coeficiente h con la temperatura de la superficie del sachet.

#### REFERENCIAS

- Ávila Pineda, G.T., Fonseca Moreno, M.M., Calidad microbiológica de jugos preparados en hogares de bienestar familiar en la zona norte de Cundinamarca, *Trabajo de grado de Microbiología Industrial, Pontificia Universidad Javeriana*, Bogotá, D.C., 2008.
- Catálogo de Proyectos CeDITec, Pasteurización en bolsa: sistema de pasteurización apropiada para pequeños productores, CEDIT. Mnes, Argentina, 16-17, 2010.
- Cevallos Cedeño, R.E., Velásquez Murillo, L.D., Comparación de la temperatura-tiempo de retención de pasteurización y su efecto en la concentración de vitamina "c" en el zumo de naranja, *Trabajo de grado de Ingeniería Agroindustrial, Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí, Calceta*, 2007.
- Código Alimentario Argentino (CAA). Cap. VIII: Alimentos Lácteos. Art. 556bis- Res 2270, 14.9.83.
- Código Alimentario Argentina (CAA). Cap. VIII: Alimentos Lácteos. Art.555, 557 y 558.
- CAA- Metodología analítica oficial, productos lácteos: leche, *Revista del Instituto Nacional de Farmacología y Bromatología*, 130-139.
- Dávila Fernández, N., Hernández García, J.E., Métodos de ensayos rápidos de detección de microorganismos en la leche. *REDVET Revista electrónica de Veterinaria*, volumen VII, N° 7, 1-18, 2006.
- Dumke, T.; Iurinic, M.; Fernández, P.; Saldivar, C.; Trela, V.; Pasteurización manual de leche para pequeños productores. Análisis físico-químicos y microbiológicos, CeDITec. Misiones, Argentina, 2009.
- Fazio Aguilar, H. de, Modelado matemático y validación experimental de la pasteurización de leche a través de la evaluación histórica de temperaturas y mortandad en un trocador de placas, *Maestría en Ingeniería, Escuela Politécnica de la Universidad de San Pablo*, 2009.
- Fernández; P., Dumke; T., Saldivar; C., Iurinic; M., Trela; V., Pucciarelli, A., Pasteurización de leche para pequeños productores, *Revista Tecnología Láctea Latinoamericana*, Año

- XVI, N°68, 34-40, 2011.
- Food and Drug Administration. Department of Health and Human Services.* 2003. Grade “A” Pasteurized Milk Ordinance, USA. FDA U.S. Revisión, 2003. Disponible en: <<http://www.cfsan.fda.gov/~ear/pmo03toc.html>> Consultado el 21 de octubre de 2008.
- Ferreccio, J.P. y Medrano, J.I., Pasteurizadora para micro productores lecheros, Trabajo de grado del nivel V en el Taller de Diseño Industrial, UBA - Facultad de Arquitectura Diseño y Urbanismo, Buenos Aires, 2011.
- Hours, R.A., Ferreyra, M.M., Schvab, M.C., Gerard, L.M., Zapata, L.M., Davies, C.V., Caracterización fisicoquímica y microbiológica de jugos de naranja destinados a vinificación, *Ciencia, Docencia y Tecnología N° 31*, Año XVI, 219-239, 2005.
- Kreith F. and Bohn, M.S., Principles of Heat Transfer, 5° edición, PWS Publishing Company, 1993.
- Lespinard, A.R., Bambicha, R.R., Agnelli, M.E., Mascheroni, R.H., Modelado de la transferencia de calor y variación de índices de calidad en mermeladas durante el proceso de pasteurización, *Mecánica Computacional*, volumen XXVIII, 3067-3077, 2009.
- National Advisory Committee on Microbiological Criteria for Foods, Requisite Scientific Parameters for Establishing the Equivalence of Alternative Methods of Pasteurization, *Journal of Food Protection*, volumen 69, No. 5, 1190–1216, 2006.
- Pinto, A., Lopez, A., Briceño, M., Jugo de naranja pasteurizado, Universidad de Carabobo Facultad de Ingeniería Escuela de Industrial Departamento de Ingeniería Química procesos químicos, Naguanagua, Venezuela, 2010.
- Shackelford J. F. y Alexander, W., The CRC Materials Science and Engineering Handbook, 3rd ed., CRC Press, Boca Raton, F.L., 2001.
- Spreer, E., Lactología industrial: leche, preparación y elaboración. Máquinas, instalaciones y aparatos. Productos lácteos, Segunda edición. España. Ed. ACRIBIA, 45, 1991.
- Tortora, G.J., Funke, B.R. y Case, C.L., “Capítulo 7”. *Introducción a la microbiología* (9° edición). Panamericana, 188-189, 2007.
- Zienkiewicz, O.C., and Taylor, R.L., *The finite element method*, volume II. McGraw Hill, 1991.