

SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL PROCESO DE PASTEURIZACIÓN ARTESANAL DE LECHE

Ana M. Martínez^a y Mario R. Rosenberger^b

^a*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>*

^b*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 reducción de los microorganismos patógenos hasta un nivel aceptable para el ser humano y de esta forma extender el tiempo de vida útil. El enfriamiento es la última etapa de la pasteurización, durante esta etapa el producto debe ser enfriado drásticamente a la temperatura de inhibición bacteriana (4 °C). El tiempo de calentamiento en la pasteurización es un parámetro importante, ya que si es breve no destruye el número suficiente de microorganismos y, por lo tanto, su población podría volver a aumentar hasta niveles que pongan en riesgo la salud de los consumidores, por otro lado si es muy grande se incurren en pérdidas económicas y se degrada la calidad del producto.

El objetivo de este trabajo es la optimización de la pasteurización artesanal de leche, para aprovechar la producción regional de las chacras de la provincia de Misiones y realizar la transferencia a pequeños productores. Se analizó el proceso de pasteurización lenta, que emplea temperaturas de entre 63°C y 65 °C y un tiempo mínimo de 30 minutos. Se efectuó la simulación numérica del proceso de pasteurización empleando el método de elementos finitos. Se utilizaron modelos de simetría axial del sachet para distintos valores de temperatura del agua de calefacción y del agua de enfriamiento. Los modelos fueron validados con medidas experimentales de la temperatura dentro y fuera del sachet conteniendo un litro de agua mediante un termistor Pt100 y termómetros, durante los procesos de calentamiento y enfriamiento.

Se analizaron los resultados identificando los puntos que necesitaban más tiempo en calentarse en el interior del sachet. Con la historia térmica de esos puntos se calculó el tiempo necesario para destruir distintos tipos de los microorganismos de acuerdo a su resistencia intrínseca y así determinar el tiempo óptimo de pasteurización. También se tuvieron en cuenta otros dos parámetros para analizar la eficiencia de la pasteurización, la ausencia de fosfatasa alcalina, ya que su eliminación asegura la eliminación de los microorganismos patógenos y la presencia de lactoperoxidasa, que es un indicador de la calidad del producto. Finalmente se determinaron recomendaciones de tiempos óptimos para diferentes temperaturas del agua de calefacción y una forma más eficiente del enfriamiento del producto comprendiendo dos etapas.

1 INTRODUCCION

El método de pasteurización artesanal convencional consiste en tratar la leche a 65 °C durante 30 minutos. Posteriormente, se la traslada a un baño de agua con hielo hasta llegar a la temperatura de inhibición bacteriana de 4 °C (Fernández, P. et. al. 2011; Catálogo de Proyectos CeDITec, 2010; Dumke, T. et. al. 2009). Aumentando el tiempo o la temperatura de procesamiento mayor es el número de microorganismos patógenos muertos. Aunque nunca se eliminan totalmente, la pasteurización debe asegurar la mayor destrucción de bacterias patógenas que pueden estar presentes en el producto crudo con el objetivo de mejorar su capacidad de conservación. Por otro lado, la temperatura y el tiempo deben ser reducidos a aquellos necesarios para producir la muerte de las bacterias de manera que, los cambios en sabor sean minimizados y no se altere el valor nutritivo de la leche. Utilizando simulación computacional se puede optimizar el proceso, ya que permite predecir las temperaturas dentro del sachet en función de la temperatura del baño térmico que sea más adecuado, teniendo en cuenta los valores de parámetros cinéticos de destrucción de microorganismos y sustancias en la leche.

Los pequeños productores de las chacras de la provincia de Misiones suelen vender leche cruda entre otros artículos elaborados artesanalmente en las ferias francas. Sin embargo, como el Código Alimentario Argentino (CAA) prohíbe la venta al público de leche cruda (CAA, Art. 556bis - Res 2270, 14.9.83) el gobierno de la provincia de Misiones les ofrece a los pequeños productores asesoramiento gratuito para que puedan pasteurizar en forma económica sus productos, a través de un proceso discontinuo (Fernández, P. et. al. 2011; Catálogo de Proyectos CeDITec, 2010; Dumke, T. et. al. 2009) y, que permita pasteurizar otros productos como ser: jugos de diferentes cítricos, jugo de tomate, mosto, etc.

La eficiencia de la pasteurización se puede evaluar mediante la destrucción de las enzimas fosfatasa alcalina y lactoperoxidasa, experimentalmente o mediante cálculo utilizando los datos cinéticos de degradación en función de la temperatura. La fosfatasa alcalina es ampliamente utilizada para controlar la pasteurización en leche, la eliminación de la misma asegura la eliminación de los microorganismos patógenos. Por otro lado, si se degrada lactoperoxidasa es porque se produjo sobrecalentamiento de la leche, (BOSCÁN, L. A., 1983), es decir, el tratamiento térmico fue excesivo, lo que conduce a una pérdida del valor nutritivo. La situación óptima es reducir al mínimo los microorganismos (o la fosfatasa alcalina) sin degradar la lactoperoxidasa.

Este tipo de análisis fue aplicado a otros productos, tales como: cerveza, tomates, cítricos, etc. (Patiño, L.A., et. al., 2001; Rodríguez Rojas, C.P., 2005; Lespinard, A.R., 2009) y a mostrado ser una herramienta valiosa para la selección de los parámetros de procesamiento. Por ejemplo, en los líquidos envasados (cerveza, cítricos, etc.), existe un calentamiento más intenso en las zonas cercanas a las paredes de los envases, el producto sufre un calentamiento no uniforme, y las pérdidas de calidad son mayores en dichas áreas (Lespinard, A.R., 2009; Fazio Aguilar, H. de, 2009).

Por lo anterior, resulta de gran interés el diseño y optimización de la pasteurización de leche siguiendo el procedimiento clásico. Observando los efectos del tiempo y la temperatura de proceso en la destrucción de microorganismo y en cambios en el valor nutritivo.

2 METODOLOGIA

2.1 Dominio del problema

La pasteurización se realiza en una olla de 50 litros (con capacidad para 10 sachets de 1 un

litro cada uno), los sachets son de polietileno de 0,085 mm de espesor, y están soportados por una cesta de de alambre tejido de trama abierta. Se usa agua como baño térmico para calentar los sachets. El baño a su vez se calienta con una resistencia eléctrica de 2000 W, que se regula para controlar la temperatura del baño. El sachet toma la forma de un cilindro elíptico de baja excentricidad al ser colocarlo en la canastilla rectangular, para su modelización se realiza una simplificación y se lo considera como un cilindro circular. El sachet (de 4,08 cm de radio y 21 cm de altura, Figura 1) contiene 1 litro de leche más aire, dentro de una olla de aluminio cilíndrica de 20 cm de radio y 40 cm de altura que contiene agua hasta una altura de 30 cm.

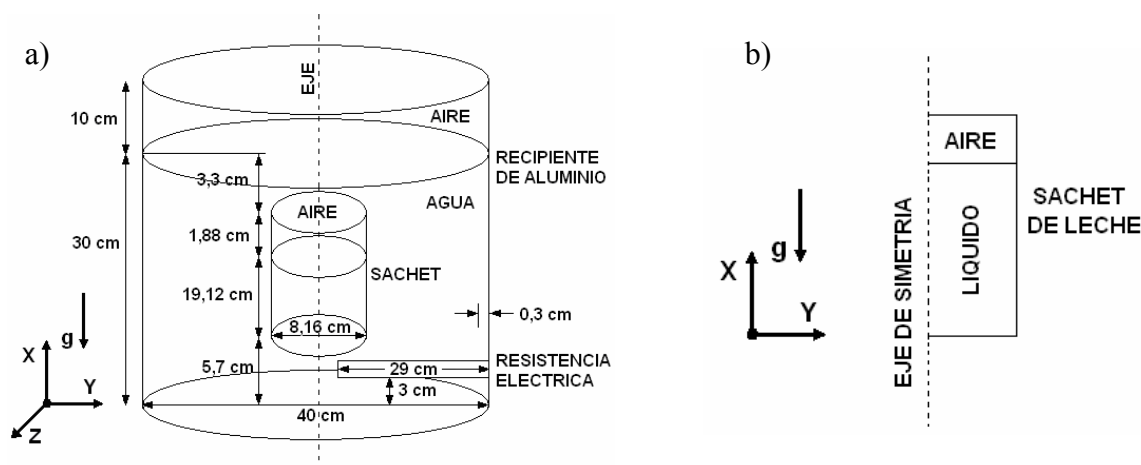


Figura 1. a) Gráfico que detalla las dimensiones de la olla y el sachet y la altura del agua de pasteurización y, b) Dominio del problema reducido al sachet.

2.2 Modelo matemático

El modelo se desarrolló en torno al sachet, en dos dimensiones con simetría axial, como se puede observar en la Figura 1. El interior del sachet está formado por dos regiones la superior con aire y la inferior con leche. El dominio es discretizado usando una malla estructurada de elementos cuadriláteros isoparamétricos constituidos por nueve nodos (Figura 2).

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.

Para resolver el problema se plantearon las ecuaciones de conservación de la masa, conservación del momento y conservación de la energía. Se impuso un fluido de viscosidad, densidad, conductividad térmica y calor específico constantes para la leche y el aire en el interior del sachet considerándolos independientes de la temperatura. Se usaron propiedades a una temperatura promedio entre la temperatura del ambiente y la máxima alcanzada. Los modelos para flujo se consideran laminares (ver detalles en 3.2).

Las condiciones de contorno utilizadas en la simulación computacional fueron:

- Los contornos superior, inferior y lateral están sometidos a convección con un coeficiente de convección variable 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 consideran dos temperaturas del baño térmico (agua): 65 °C y 75 °C.

Las propiedades fisicoquímicas de los materiales se detallan en la [Tabla 2](#).

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 (que

consiste en asumir a la densidad constante en todo el modelo excepto en el termino de flotación, [Kreith F. and Bohn, M. S., 1993](#)), tanto para el aire como para el líquido dentro del sachet.

Para resolver el problema en función del tiempo se empleó el método implícito de Crank-Nicolson, usando pasos de tiempos variables. El sistema de ecuaciones se resolvió usando Newton-Raphson, con una tolerancia de 10^{-4} .

MATERIALES	PROPIEDADES	VALORES
AIRE (Holman, J.P., 1998)	DENSIDAD (Kg/m ³)	$0,001293/(1+0,00367*T)*1000$
	CONDUCTIVIDAD (W/m.K)	$0,00396+0,0000737293*T$
	CALOR ESPECIFICO (J/Kg.K)	$976,88716+0,09209*T$
	COEFICIENTE DE EXPANSIÓN (1/K)	0,00367
	VISCOSIDAD (Pa.s)	$0,00000416941+0,0000000474411*T$
AGUA (Fazio Aguilar, H. de, 2009)	DENSIDAD (Kg/m ³)	$(1040,7 - 0,2665*T - 0,0023*T^2) - x_f*(1,011+0,00976*T-0,0000481*T^2)$
	CONDUCTIVIDAD (W/m.K)	$0,5692+T/538-T^2/133333$
	CALOR ESPECIFICO (J/Kg.K)	$0,00000052013*T^4 - 0,00021528*T^3 + 0,041758*T^2 - 2,6171*T + 4227,1$
	COEFICIENTE DE EXPANSIÓN (1/K)	$-0,0000617803+0,0000158794*T - 0,000000142273*T^2 + 0,00000000662031*T^3$
	VISCOSIDAD (Pa.s)	$(21,482*((A2-8,435)+(8078,4+(A2-8,435)^2)^{0,5}) - 1200)^{-1}$
LECHE (Fazio Aguilar, H. de, 2009)	DENSIDAD (Kg/m ³)	$0,0000208*T^3 - 0,006668*T^2 + 0,04675*T + 999,9$
	CONDUCTIVIDAD (W/m.K)	$(0,528 + 0,00213*T - 0,00000732*T^2)*(1 - x_f*(0,843+0,0019*T))$
	CALOR ESPECIFICO (J/Kg.K)	$1675 - 2512*x_w$
	COEFICIENTE DE EXPANSIÓN (1/K)	$-0,0000617803+0,0000158794*T - 0,000000142273*T^2 + 0,00000000662031*T^3$
	VISCOSIDAD (Pa.s)	$((0,9565 - 0,0013004*T + 0,0001958*T^2) + x_f*(0,4766 - 0,0114*T + 0,000072642*T^2))*0,001$
POLIETILENO (Shackelford J. F. y Alexander, W., 2001)	DENSIDAD (Kg/m ³)	960
	CONDUCTIVIDAD (W/m.K)	0,33
	CALOR ESPECIFICO (J/Kg.K)	2100

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

El dominio, ver Figura 1.b se subdividió usando una malla estructurada, que se detalla en la Figura 2, girada 90 °, que muestra una malla con un total de 6.255 nodos y 1.825 elementos.

En los extremos de la zona líquida se realizó un mayor refinamiento de la malla, por ser las zonas más críticas durante el intercambio de calor entre el sachet y el agua de pasteurización.

2.3 Mediciones experimentales de temperaturas en la pasteurización

Se midió la temperatura en función del tiempo, durante el calentamiento como en el enfriamiento, utilizando agua dentro del sachet, para validar la simulación.

El sachet se llenó con 1 litro de agua a temperatura ambiente, y se lo sumergió en una olla

con agua caliente en el equipo de pasteurización (Figura 1.a). Se emplearon dos temperaturas del baño térmico para el calentamiento: una de 69 °C y otra de 75 °C, se controló la temperatura con una precisión de 1 °C. El equipo de pasteurización se llenó previamente con agua hasta 30 cm de altura y se cubrió totalmente el sachet (ver dimensiones en la Figura 1.a). Se midieron las temperaturas dentro y fuera del sachet con un termistor Pt100. La temperatura dentro del sachet se midió colocando el termistor aproximadamente a 1 cm del fondo del mismo (correspondiente al nodo 1011, de coordenadas z ; $r = -0,0708215$ m; 0 m),

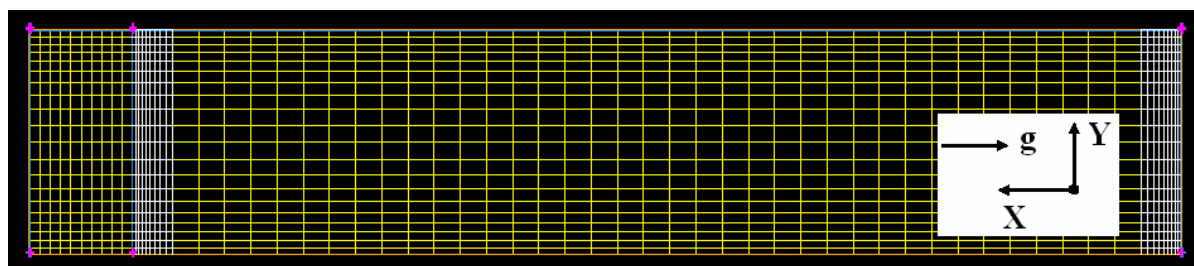


Figura 2. Malla del sachet girado 90 ° hacia la izquierda.

Se propusieron dos formas de enfriamiento del producto. La primera en una etapa, usando una mezcla de agua y hielo mantenida a 2 °C durante 90 minutos. La segunda en dos etapas donde al principio se enfría durante 10 minutos con agua a temperatura ambiente de 27 °C luego durante 50 minutos con una mezcla de agua y hielo que se mantiene a 3 °C.

2.4 Destrucción por calor de microorganismos en la leche

Para determinar el grado de destrucción de los microorganismos, la inactivación enzimática y la degradación de algunos factores de calidad de la leche se utiliza una cinética de tipo exponencial de primer orden, expresado por la Ec. (1):

$$\frac{dN}{dt} = K_d * N \quad (1)$$

donde: N es el número de microorganismos vivos en cada instante [células] o [células/ml]; K_d es la constante cinética de muerte térmica a la temperatura T . Frecuentemente, K_d es reemplazada por el tiempo de reducción decimal D , definido como el tiempo necesario para reducir en un 90% el número de microorganismos, su relación con K_d esta dada por la Ec. (2):

$$D = \frac{2,303}{K_d} \quad (2)$$

Si la temperatura del proceso varía con el tiempo el valor de D también varía. Se encontró que para la generalidad de los microorganismos la relación entre el valor del logaritmo de D con la temperatura es lineal, y la relación se puede expresar por la siguiente expresión:

$$\log\left(\frac{D_{Ref}}{D}\right) = \frac{(T - T_{Ref})}{z} \quad (3)$$

Donde: z es la temperatura de reducción decimal y la relación D/D_{ref} es una medida de destrucción de microorganismos a la temperatura T respecto de una T de referencia y se

conoce como letalidad “L”. Los valores de referencia para los microorganismos y las sustancias químicas usadas en este trabajo se muestran en la [Tabla 3](#).

Una propiedad importante de L es que es aditiva, por lo que es posible cuantificarla para un proceso donde la temperatura varía continuamente, según la siguiente ecuación:

$$L = \text{Log}\left(\frac{N_0}{N}\right) = \frac{1}{D_{REF}} \int_0^t 10^{\frac{(T-T_{REF})}{z}} * dt \quad (4)$$

En la en la [Tabla 3](#) se puede observar diferencias en los datos para una misma especie según diferentes autores los cuales se puede deber a que las condiciones de calentamiento y del medio influyen en la resistencia de los microorganismos. Por otra parte, diferentes cepas de una especie pueden tener diferentes resistencias al calor, y también la agrupación de células puede aumentar la resistencia al calor ([Wendie L., et al., 2002](#); [Grant, I., et al., 2002](#); [Stabel, J.R., et al., 2001](#)). Otro punto a considerar es la posibilidad de la adaptación microbiana a las condiciones de procesamiento más graves.

MICROORGANISMOS	Tref (°C)	D (minutos)	z (°C)	Referencia Bibliográfica
escherichia coli	62,8	0,13	4,6	Claeys, W.L., 2002
aeromonas	48	3,2-6,2	5,5-7,7	Claeys, W.L., 2002
bacillus cereus	95	1,8	9,4	Claeys, W.L., 2002
bacillus cereus spores	121	0,04	9,55	Claeys, W.L., 2002
bacillus licheniformis	111	0,48	8	Claeys, W.L., 2002
bacillus stearothermophilus spores	121	5,5	9,5	Claeys, W.L., 2002
campylobacter jejuni	50	4,5	7	Claeys, W.L., 2002
clostridium botulinum	115	0,21-0,3	7,9	Claeys, W.L., 2002
clostridium botulinum spores	110	0,85	9,5	Claeys, W.L., 2002
listeria monocytogenes	65	0,1	6,6	Claeys, W.L., 2002
pseudomonas fluorescens	60	3,2	7,5	Claeys, W.L., 2002
pseudomonas fragi	49	7,0-9,0	10,0-12,0	Claeys, W.L., 2002
salmonella (6 spp.)	62,8	3	4,6	Claeys, W.L., 2002
staphylococcus aureus (1)	62,8	18,5	5,1	Claeys, W.L., 2002
staphylococcus aureus (2)	60	0,9	9,5	Claeys, W.L., 2002
yersinia enterolitica	58	1,6	4,26	Claeys, W.L., 2002
microbacterium tuberculosis	60	14,10	4,4	Claeys, W.L., 2002
listeria monocytogenes (2)	60	2,03	5,5	Toledo, R.T., 2007
escherichia coli (2)	60	1,50	6,9	Toledo, R.T., 2007
salmonella spp. (2)	60	0,52	6,9	Toledo, R.T., 2007
staphylococcus aureus (3)	60	0,90	9,5	Toledo, R.T., 2007
aeromonas hydrophyla (2)	60	0,18	7,7	Toledo, R.T., 2007
yersinia enterolitica (2)	60	0,51	5,8	Toledo, R.T., 2007
lactoperoxidasa	71	38,6	4,3	Claeys, W.L., 2002
fosfatasa alcalina	60	24,6	5,3	Claeys, W.L., 2002

Tabla 3. Parámetros cinéticos de destrucción de microorganismos y sustancias en la leche.

La enzima fosfatasa alcalina es inactivada a temperaturas y tiempos ligeramente superiores que muchos microorganismos, por ese motivo es utilizada como control de la adecuada pasteurización de la leche. ([Eckner, K., 1992](#); [Girotti, et al., 1994](#); [Murthy, G., et al., 1990](#); [Painter, C. y Bradley, R., 1997](#)).

Según normas internacionales, la leche diseñada para el almacenamiento refrigerado (leche pasteurizada) debe recibir un tratamiento térmico diseñado para reducir la probabilidad de supervivencia del *L. monocytogenes*, por al menos, un factor de 10^4 ([FIL-IDF, 1994](#)).

Tomando un margen de seguridad, por lo general, se considera una reducción logarítmica de 6 ($L = 6$). En este trabajo se analiza también considerando un $L = 12$, para el caso de que haya una importante contaminación de la leche cruda.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Resultados experimentales

En las Figura 3.a y 3.b 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, respectivamente. En ambos casos la temperatura alcanza un valor estacionario, de 67,5 °C y 72 °C, respectivamente. En la Figura 4.a se representa la evolución de la temperatura del agua dentro del sachet en función del tiempo para el enfriamiento en una etapa y en la Figura 4.b para el enfriamiento en dos etapas, ambos partiendo de un sachet calentado en un baño a 69 °C.

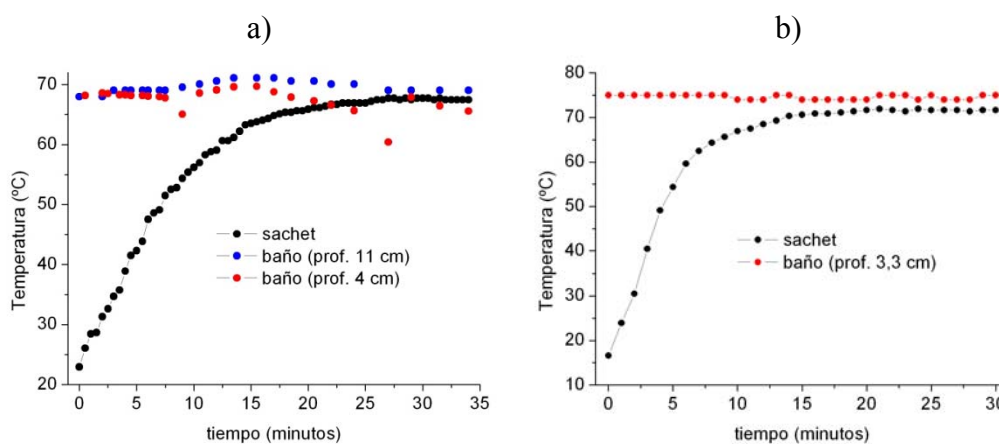


Figura 3. Temperatura durante el calentamiento del sachet, durante la pasteurización: a) con un baño térmico de 69 °C (prom.) y, b) con un baño térmico de 75 °C (prom.).

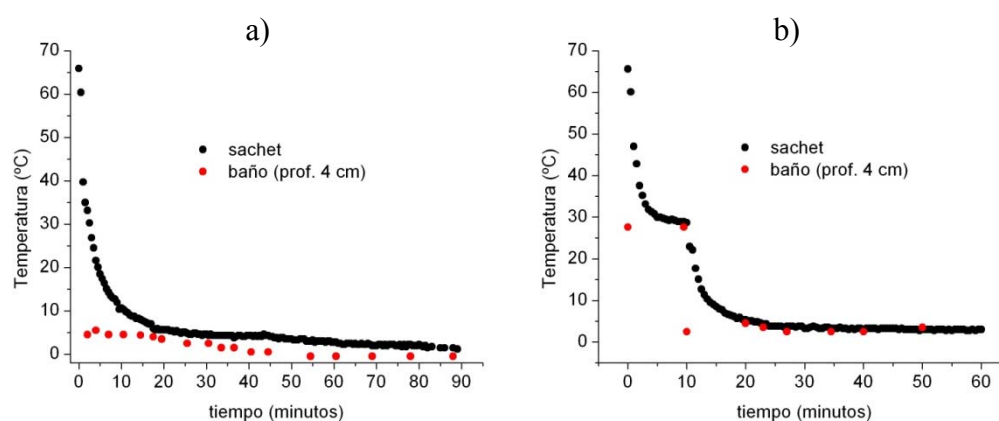


Figura 4. Temperatura durante el enfriamiento del sachet, a partir de los 69 °C: a) en una etapa, con temperaturas del agua de 2 °C (prom.) y, b) en dos etapas, con temperaturas del agua de 27 °C (prom.) en la primera etapa y 3 °C (prom.) en la segunda etapa.

3.2 Cálculo del coeficiente de transferencia de calor por convección

Las condiciones de contorno térmicas que establecen la transferencia de calor entre el baño

térmico y el sachet son por el mecanismo de convección, se acuerdo a la Ecuación (5):

$$\dot{Q}_{conv} = h * A_s * (T_s - T_\infty) \quad (5)$$

donde: \dot{Q} es el calor transferido, A_s es la superficie de transferencia y h es el coeficiente promedio de transferencia de calor en la superficie, T_s es la temperatura de la superficie y T_∞ es la temperatura del baño térmico.

Se realizan varias simulaciones teniendo en cuenta diferentes correlaciones empíricas de h , hasta encontrar aquellas que ajusten adecuadamente a los experimentos de las Figura 3 y Figura 4.

Las correlaciones están expresadas en términos del Número de Nusselt (Nu), donde su relación con el coeficiente de transferencia de calor por convección está dada por la Ec. (6):

$$h = \frac{Nu * k}{L_c} \quad (6)$$

Donde: k es la conductividad térmica del fluido y L_c es una longitud característica que depende de la geometría analizada. En las correlaciones la propiedades del fluido se evalúan a la temperatura promedio entre la temperatura de la superficie y del baño térmico.

Las correlaciones se eligieron teniendo en cuenta la disposición del sachet en el recipiente del baño, y sus respectivas dimensiones, ver Figura 1.a.

Correlaciones para el calentamiento

Analizando la superficie superior del sachet se observa que tiene una menor temperatura que el baño y la superficie del agua está asilada, por lo tanto se considera que no se establecerá una corriente de convección vertical. Por lo tanto, la transferencia de calor será por conducción, sin embargo, se usó una correlación de cavidad cerrada de tal forma que $Nu=1$, para considerar el aporte de la capa de agua (3 cm) por sobre el sachet.

Para la superficie lateral del cilindro se utilizó una correlación para un cilindro vertical, de acuerdo a la Ec. (7) (Kreith, F. y Bohn, M.S., pag. 305, 1993):

$$\overline{Nu} = 0,0210 * (Gr * Pr)^{\frac{2}{5}} \quad \text{para valores de } (Gr.Pr) > 10^9 \quad (7)$$

Donde Gr y Pr son los números adimensionales de, Grashof y Prandtl, respectivamente. El número de Grashof está dado por la ecuación Ec. (8), y el Prandtl por la ecuación Ec. (9):

$$Gr = \frac{g * \beta * (T_s - T_\infty) * L_c^3}{\nu^2} \quad (8)$$

$$Pr = \frac{\mu * C_p}{k} = \frac{\nu}{\alpha} \quad (9)$$

Donde: g es la aceleración de la gravedad; β es el coeficiente volumétrico de expansión térmica; L_c es la altura del cilindro, C_p es el calor específico, ν es la viscosidad cinemática

del fluido, δ es la densidad del fluido, μ = viscosidad dinámica del fluido.

La superficie inferior del sachet esta en contacto con una porción muy delgada de agua del baño térmico (ver Figura 1.a), por lo que no es muy adecuada la adopción de una correlación convencional para el coeficiente de convección alrededor de superficie horizontales. Se considera más adecuado usar una correlación para una cavidad cerrada horizontal cuya superficie superior está más fría, se seleccionó la ecuación Ec. (10) (Yunus A. Cengel, pag. 479, 2002):

$$Nu = 0,069 * Ra^{1/3} * Pr^{0,074} \quad 3 \times 10^5 < Ra < 7 \times 10^9 \quad (10)$$

Donde “Ra” es el número de Rayleigh, que expresa el producto de $Gr \cdot Pr$. En este caso para el cálculo de la longitud L_c se tiene en cuenta el área de la superficie sobre su perímetro.

Correlaciones para el enfriamiento

El proceso de enfriamiento se realiza en un recipiente diferente, donde los sachets se ubican verticalmente, soportados por una canasta metálica, sobre una superficie metálica, enfriada por abajo por el agua de refrigeración y cubierta por arriba por una placa metálica también en contacto con el fluido de enfriamiento. Su superficie lateral se encuentra en contacto con el baño de refrigerante. Con esta disposición las condiciones de contorno superior e inferior se consideran de temperatura constante igual a la del baño refrigerante y la superficie lateral del sachet sometida a enfriamiento por convección.

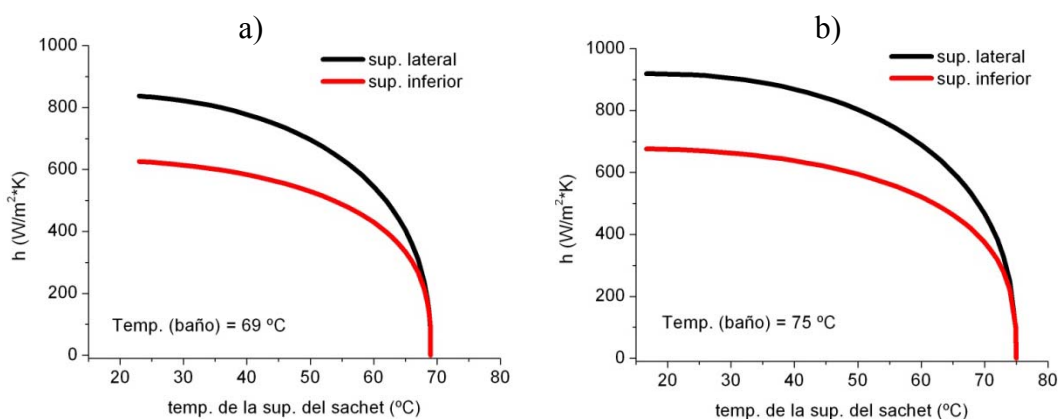


Figura 5. Gráfico del coeficiente de transferencia de calor por convección natural del agua “h”, en función de la temperatura de la superficie del sachet para una temperatura del agua de pasteurización de: a) 69 °C y, b) 75 °C.

En la superficie lateral se usó una correlación para un cilindro vertical, la Ec. (11) (Yunus A. Cengel, 2002), con un rango más amplio de valores de $Gr \cdot Pr$ que la Ec. (7) y ha mostrado ser mejor para reflejar el enfriamiento.

$$Nu = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 * (Gr * Pr)^{1/6}}{\left[1 + (0,492 / Pr)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2 \quad (11)$$

En la Figura 5.a se muestra h como función de T_s para el calentamiento con un baño a 69 °C. En la Figura 5.b corresponde al coeficiente para el calentamiento con un baño a 75 °C. En la Figura 6.a se muestra el coeficiente para el enfriamiento en una etapa y en la Figura 6.b el coeficiente para el enfriamiento en dos etapas. Estos valores se usaron en las simulaciones.

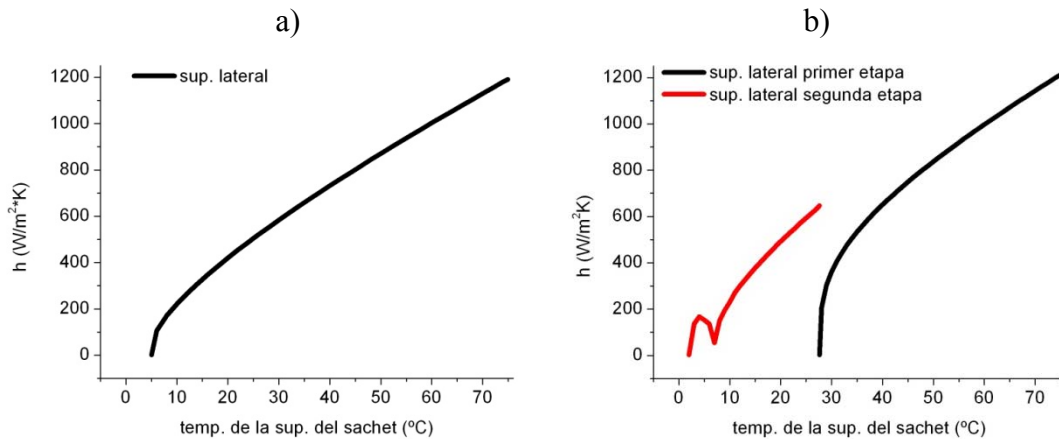


Figura 6. Gráfico del coeficiente de transferencia de calor por convección natural del agua " h ", en función de la temperatura de la superficie del sachet, para una temperatura del agua de enfriamiento promedio de: a) 2 °C, en una etapa de enfriamiento y, b) 27 °C en la primera etapa y 3 °C en la segunda etapa.

Correlaciones para el régimen de flujo en el interior del sachet

Para fenómenos de flujo por convección libre en el interior de un espacio cerrado vertical se empleó el criterio de [MacGregor y Emery, 1969](#) extraída del [Holman, J.P., pag. 322, 1998](#), donde para $Ra > 10^7$ el flujo de capa límite es turbulento. Esta aproximación se empleó para establecer el régimen de flujo dentro del sachet. Se utilizó la misma dado que no se encontró en la bibliografía geometrías que se adapten exactamente al proceso donde el recinto es calentado desde abajo, arriba y el costado. Según el criterio usado cuando $\Delta T > 7$ °C el $Ra > 10^7$ y esto ocurre en los primeros 4 minutos, con un Ra máximo de $6,5 \times 10^7$ que va decayendo con el tiempo y luego del minuto 4 el régimen de flujo es laminar. Además, como las ecuaciones de cantidad de movimiento del fluido pudieron resolverse, no se obtuvieron inestabilidades numéricas y las soluciones fueron convergentes, se puede considerar que el resultado es confiable asumiendo un régimen de flujo laminar.

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

Validación del modelo

Las curvas simuladas y experimentales fueron comparadas usando del error relativo porcentual, en una posición equivalente a la posición del termistor (correspondiente al nodo 1011, de coordenadas z ; $r = -0,0708215$ m; 0 m), ver Figura 1.a.

En los primeros 10 minutos el error es del 10%, luego la diferencia baja al 1 % o menor. Para el cálculo se usó la media móvil de los valores de la simulación, ya que en la misma no existe la inercia presente en las medidas experimentales. En la Figura 7.b se comparan las curvas experimentales y de la simulación para una temperatura del baño térmico de 75 °C. En todo el proceso el error es del 3 % o menor. En la Figura 8.a se representa la comparación de las curvas experimentales y simuladas durante el enfriamiento en una etapa. Se observa una diferencia del 30% en los primeros 20 minutos del proceso cuando la temperatura es mayor a 8 °C, luego la diferencia disminuye a un 20 % hasta el final del proceso donde se alcanzan los

4 °C.

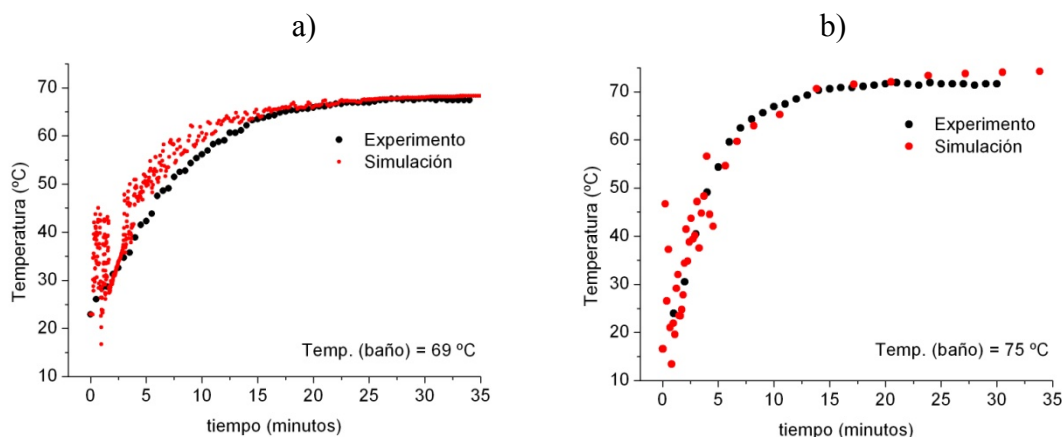


Figura 7. Comparación de la temperatura experimental de pasteurización vs. la simulada, en el nodo 1011, con una temperatura del baño de pasteurización de: a) 69 °C y, b) 75 °C.

En la Figura 7.a se representan las curvas experimental y simulada, para un baño de 69 °C.

En la Figura 8.b se representa la comparación de las curvas experimentales y simuladas durante el enfriamiento en dos etapas. En la primera etapa el error es del 1 % o menor. En la segunda etapa, desde el minuto 10 al 20 el error es del 10 %, luego el error aumenta al 30%, en esta última parte la temperatura es menor a los 6 °C. Para los fines prácticos el modelo es satisfactorio.

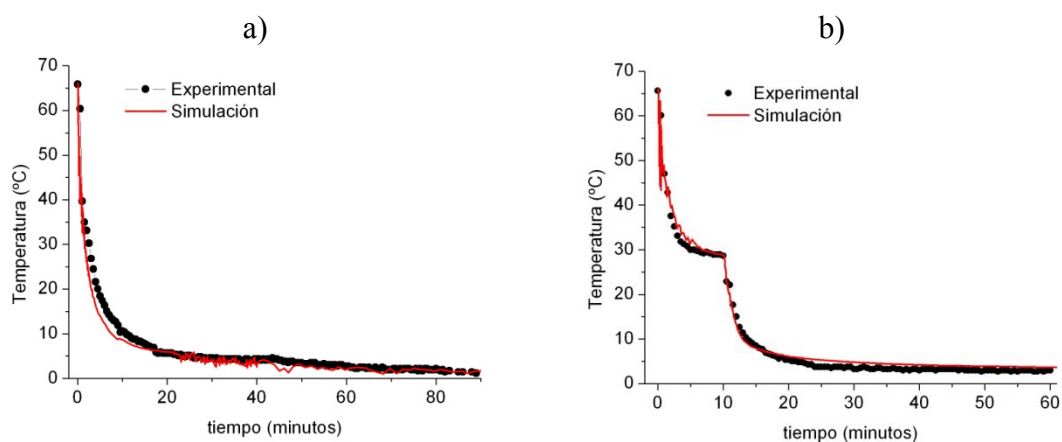


Figura 8. Comparación de la temperatura experimental vs. la simulada, en el nodo 1011, durante el enfriamiento del sachet, a partir de los 69 °C: a) en una etapa, con temperaturas del agua de 2 °C (prom.) y, b) en dos etapas, con temperaturas del agua de 27 °C (prom.) en la primera etapa y 3 °C (prom.) en la segunda etapa.

Eficiencia del proceso de Pasteurización

Se estudian los puntos del dominio que tardan más y menos en calentarse y en enfriarse. Esos son los extremos más favorables y desfavorables del proceso respectivamente. Y sobre esos puntos se calculará la Letalidad total, integrando numéricamente la ecuación Ec. (4).

En la Figura 9.a se grafican los perfiles de temperatura simulados para el nodo más caliente durante el enfriamiento en una etapa y para algunos nodos vecinos en dirección radial hasta la superficie, durante los 30 minutos del proceso completo de pasteurización a 69 °C. En la Figura 9.b se grafican los perfiles de temperatura de algunos nodos sobre el eje de simetría para observar la variación de temperatura en forma axial.

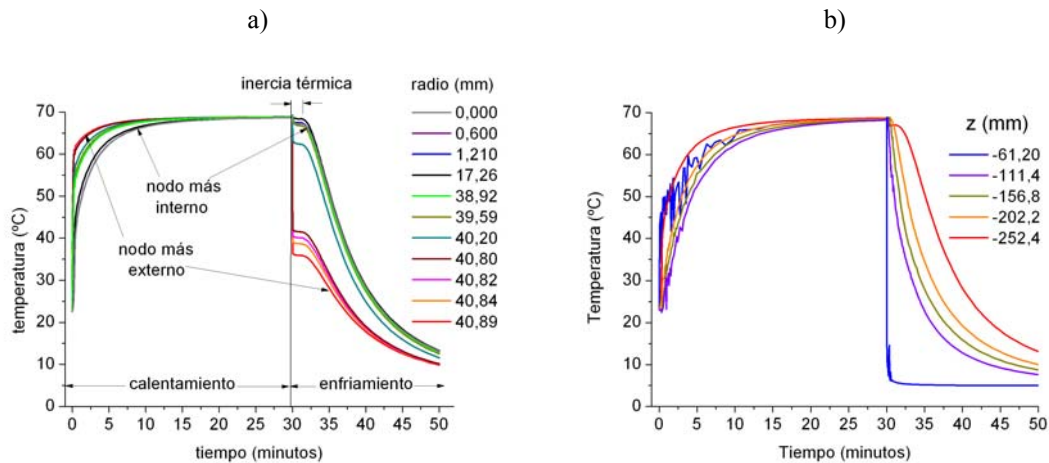


Figura 9. Perfiles de temperatura simulados, para una pasteurización a 69 °C durante 30 minutos: a) durante el proceso combinado de calentamiento – enfriamiento en forma radial, para $z = -252,15$ mm y, b) durante el proceso combinado de calentamiento – enfriamiento en forma axial, para $r = 0$ mm.

En la Figura 9.a se observa que durante el calentamiento hay una leve diferencia entre las curvas, que se acentúa al iniciar el enfriamiento, esta diferencia de temperaturas es un indicador de la magnitud de la inercia térmica. Los nodos interiores incrementan su temperatura aún iniciada la etapa de enfriamiento, en cambio los nodos exteriores responden más rápidamente a las condiciones de contorno. Debe mencionarse que estos perfiles no son exactamente la ruta que siguen todos los puntos del dominio. En las Figura 10 y Figura 11 se observan los casos extremos de inercia térmica con los nodos más fríos y calientes durante el calentamiento y enfriamiento.

Del análisis de las Figura 9.a y Figura 9.b se aprecia que los cambios de temperatura en la dirección radial son de menor magnitud que en la dirección axial, lo que indica que el efecto convectivo predomina sobre el difusivo en esta dirección radial.

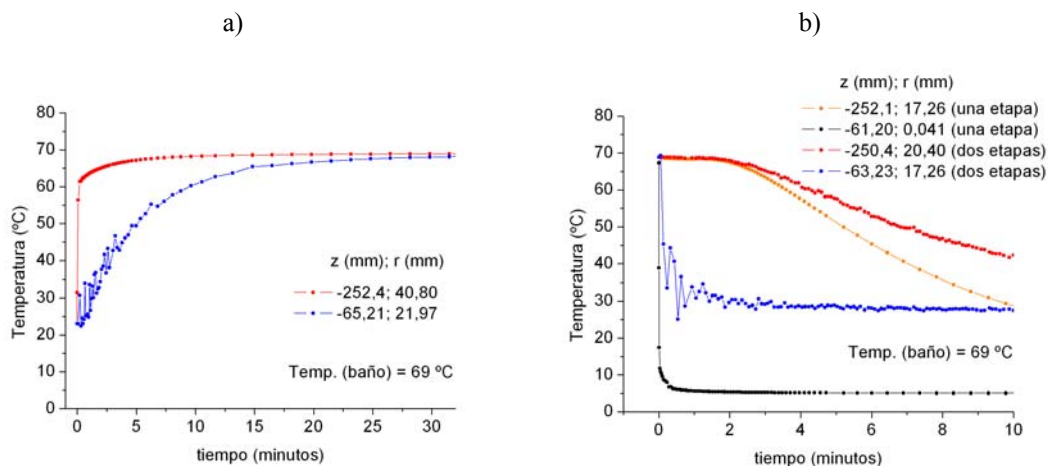


Figura 10. Nodos más fríos y más calientes para: a) la pasteurización de la leche a 69 °C durante 30 minutos y, b) para un enfriamiento en una etapa y, para un enfriamiento en dos etapas.

En las tablas [Tabla 4](#) y [5](#) se muestra el resultado de la letalidad total del proceso durante el calentamiento a 69 °C y a 75 °C, respectivamente, para cada microorganismo. De acuerdo a los datos cinéticos de la [Tabla 3](#), hay 6 microorganismos cuya temperatura de destrucción es elevada (bacillus cereus, bacillus cereus spores, bacillus licheniformis, bacillus

stearothermophilus spores, clostridium botulinum, clostridium botulinum spores) está entre 95 y 121 °C, con lo cual no es posible su eliminación procesando la leche a 69 o 75 °C en un tiempo razonable.

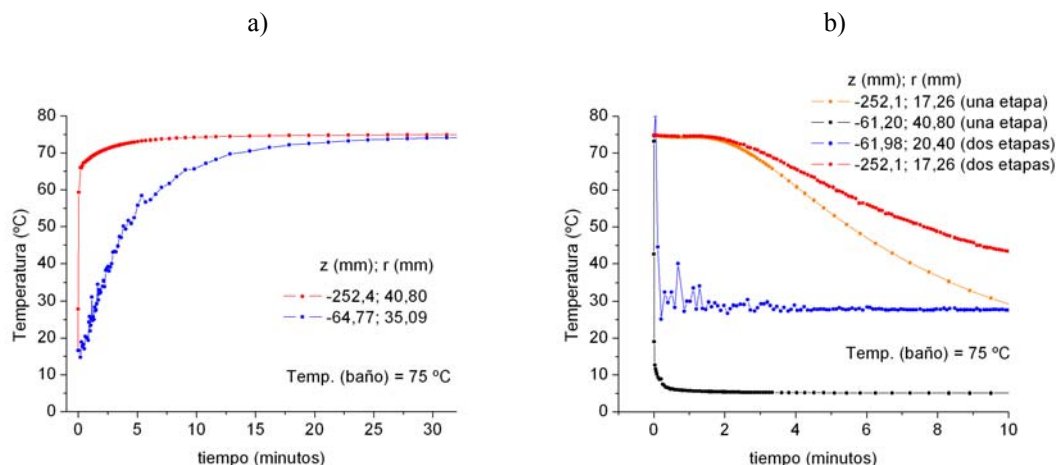


Figura 11. Nodos más fríos y más calientes para: a) la pasteurización de la leche a 75 °C durante 30 minutos y, b) para un enfriamiento en una etapa y, para un enfriamiento en dos etapas.

MICROORGANISMOS	TIEMPO DE ELIMINACION (minutos)	
	Log(N ₀ /N) = 6	Log(N ₀ /N) = 12
<i>escherichia coli</i>	10,822	11,776
<i>aeromonas</i>	6,673 - 8,534	7,451 - 9,756
<i>campylobacter jejuni</i>	8,688	9,850
<i>listeria monocytogenes</i>	10,900	12,181
<i>pseudomonas fluorescens</i>	15,336	18,466398
<i>pseudomonas fragi</i>	10,466 - 12,303	12,353 - 15,112
<i>salmonella (6 spp.)</i>	17,161	20,170
<i>staphylococcus aureus (1)</i>	29,552	38,744
<i>staphylococcus aureus (2)</i>	11,758	13,903
<i>yersinia enterolitica</i>	10,879	11,714
<i>lactoperoxidasa</i>	NO se destruye	NO se destruye
<i>fosfatasa alcalina</i>	22,425	27,860
<i>microbacterium tuberculosis</i>	17,281	20,249
<i>listeria monocytogenes (2)</i>	13,268	14,896
<i>escherichia coli (2)</i>	12,939	14,865
<i>salmonella spp. (2)</i>	10,604	12,007
<i>staphylococcus aureus (3)</i>	11,758	13,903
<i>aeromonas hydrophyla (2)</i>	8,618	9,872
<i>yersinia enterolitica (2)</i>	10,688	11,859

Tabla 4: Letalidad integrada para cada microorganismo en el nodo que más se demora en calentar (el más frío, nodo N°: 3452), durante el calentamiento de la leche a 69 ° C.

En la [Tabla 4](#) se pueden observar los tiempos máximos (del nodo más frío, N° 3452, de coordenadas z; r = -0,0652067 m; 0,021970 m) de reducción de los microorganismos. El *staphylococcus aureus* es el microorganismo que más tiempo demora para su eliminación, seguida por el *microbacterium tuberculosis*. Con respecto al *staphylococcus aureus* como hay tres fuentes de datos cinéticos diferentes que se consignaron ([Tabla 3](#)) se toma el más severo, que se elimina a los 29,6 minutos, para L = 6. En cambio, para L=12, se eliminaría a los 38,7 minutos, tiempo que supera los 30 minutos del tratamiento convencional.

Analizando la fosfatasa alcalina se observa en la [Tabla 4](#) que para una reducción con L = 6

se elimina a los 22,4 minutos de pasteurización. Mientras que si $L = 12$ se eliminaría a los 27,9 minutos. La eliminación de la misma asegura la eliminación de los microorganismos patógenos si no se considera la referencia del *staphylococcus aureus* más resistente. Sin embargo, en este trabajo se considerará que es conveniente un tratamiento de al menos 30 minutos para una pasteurización efectiva ($L = 6$).

La lactoperoxidasa se analiza para el nodo más caliente (Nº: 42, de coordenadas z ; $r = -0,2524$ m; $0,0408$ m). Tomando 30 minutos de proceso de calentamiento, la lactoperoxidasa solamente se reduce 1,5 ($= 10^{0,181}$) veces la cantidad inicial. Ese nivel de reducción es insuficiente para considerar una pérdida del valor nutritivo de la leche por la destrucción de nutrientes.

Haciendo un análisis similar para la pasteurización a $75\text{ }^{\circ}\text{C}$, (para el nodo más frío, Nº 3466, de coordenadas z ; $r = -0,0647759$ m; $0,0350927$ m), se encuentra, analizando la [Tabla 5](#), que el *staphylococcus aureus* se reduce en 15,2 minutos para $L = 6$. En ese tiempo la lactoperoxidasa indica una disminución igual a 38,8 veces respecto de la inicial, con lo cual tenemos una pérdida importante del valor nutritivo de la leche. Por tal razón no se efectúa el análisis de la letalidad integrada en el enfriamiento para este caso.

MICROORGANISMOS	TIEMPO DE ELIMINACION (minutos)	
	Log(No/N) = 6	Log(No/N) = 12
<i>escherichia coli</i>	7,942	8,485
<i>aeromonas</i>	5,231 - 6,712	5,577 - 7,542
<i>campylobacter jejuni</i>	6,770	7,547
<i>listeria monocytogenes</i>	8,167	8,940
<i>pseudomonas fluorescens</i>	10,912	12,353
<i>pseudomonas fragi</i>	8,182 - 9,467	9,340 - 11,287
<i>salmonella</i> (6 spp.)	11,273	12,230
<i>staphylococcus aureus</i> (1)	15,150	17,355
<i>staphylococcus aureus</i> (2)	8,925	10,260
<i>yersinia enterocolitica</i>	7,930	8,444
<i>lactoperoxidasa</i>	se reduce 10^6 veces en 42,082	se reduce 10^6 veces en 42,082
<i>fosfatasa alcalina</i>	13,167	14,825
<i>microbacterium tuberculosis</i>	11,275	12,189
<i>listeria monocytogenes</i> (2)	9,358	10,314
<i>escherichia coli</i> (2)	9,354	10,517
<i>salmonella</i> spp. (2)	8,056	8,860
<i>staphylococcus aureus</i> (3)	8,925	10,260
<i>aeromonas hydrophyla</i> (2)	6,767	7,614
<i>yersinia enterocolitica</i> (2)	7,992	8,660

Tabla 5: Letalidad integrada para cada microorganismo en el nodo que más se demora en calentar (el más frío, nodo Nº: 3466), durante el calentamiento de la leche a $75\text{ }^{\circ}\text{C}$.

A raíz de que durante el enfriamiento ciertos nodos tienen inercia térmica muchos de ellos permanecen a temperaturas donde la eliminación aún es apreciable. Por eso en las [Tabla 6](#) y [Tabla 7](#) se informa la letalidad correspondientes al enfriamiento en una y en dos etapas, respectivamente. Como se trata del enfriamiento la capacidad de eliminación de microorganismos va disminuyendo con el tiempo, consecuentemente la letalidad crece hasta llegar a un valor máximo al que se acerca asintóticamente.

En la [Tabla 6](#) se indica la letalidad máxima y el tiempo en el que se alcanza para el nodo más frío (Nº 1, de coordenadas z ; $r = -0,0612$ m; $0,0408$ m) y el más caliente (Nº 2625, de coordenadas z ; $r = -0,25215$ m; $0,0172588$ m).

microorganismos	TIEMPO (minutos) para el nodo más caliente	Letalidad total para el nodo más caliente	TIEMPO (minutos) para el nodo más frío	Letalidad total para el nodo más frío
<i>escherichia coli</i>	3,590	288,6256457	0,00869	0,0490
<i>aeromonas</i>	3,963 - 4,5492	3777,212 - 184,024	0,00869 - 0,0295	0,660 - 0,0330
<i>campylobacter jejuni</i>	4,391	235,992	0,00869	0,0421
<i>listeria monocytogenes</i>	4,241	80,611	0,00869	0,0144
<i>pseudomonas fluorescens</i>	4,549	10,470	0,00869	0,00187
<i>pseudomonas fragi</i>	6,006 - 6,891	34,311 - 13,424	20	0,00174
<i>salmonella</i> (6 spp.)	3,590	12,507	0,00869	0,00212
<i>staphylococcus aureus</i> (1)	3,833	1,574	0,00869	0,000272
<i>staphylococcus aureus</i> (2)	6,006	23,124	0,0295	0,00412
<i>yersinia enterocolitica</i>	3,478	386,943	0,00869	0,0645
<i>lactoperoxidasa</i>	3,478	0,0144	0,00869	2,416E-06
<i>fosfatasa alcalina</i>	3,833	3,661	0,00869	0,000637
<i>microbacterium tuberculosis</i>	3,590	12,977	0,00869	0,00218
<i>listeria monocytogenes</i> (2)	3,963	39,175	0,00869	0,00685
<i>escherichia coli</i> (2)	4,391	27,375	0,00869	0,00488
<i>salmonella</i> spp. (2)	4,391	78,968	0,00869	0,0141
<i>staphylococcus aureus</i> (3)	6,006	23,124	0,0295	0,00412
<i>aeromonas hydrophyla</i> (2)	4,549	175,208	0,0295	0,0314
<i>yersinia enterocolitica</i> (2)	3,963	131,469	0,00869	0,0231

Tabla 6: Letalidad integrada para cada microorganismo en el nodo más caliente (Nº: 2625) y en el nodo más frío (Nº: 1), en el enfriamiento de la leche en una etapa, para una pasteurización con un baño a 69 °C

El microorganismo de mayor letalidad acumulada es la *aeromona* donde a los 4,5 minutos alcanza una letalidad constante de 184 y a los 4 minutos alcanza una letalidad constante de 3777. Para el *staphylococcus aureus* se alcanza una letalidad máxima de 1,6 a los 3,8 minutos.

microorganismos	TIEMPO (minutos) para el nodo más caliente	Letalidad total para el nodo más caliente	TIEMPO (minutos) para el nodo más frío	Letalidad total para el nodo más frío
<i>escherichia coli</i>	4,123	357,197	0,231	17,024
<i>aeromonas</i>	4,404 - 5,117	4605,051 - 221,183	0,230	0,000463 - 200,851
<i>campylobacter jejuni</i>	4,943	284,477	0,231	11,044
<i>listeria monocytogenes</i>	4,765	97,356	0,231	3,889
<i>pseudomonas fluorescens</i>	5,117	12,597	0,231	0,473
<i>pseudomonas fragi</i>	5,992 - 6,547	41,067 - 16,070	1,143 - 0,537	0,497 - 1,356
<i>salmonella</i> (6 spp.)	4,123	15,479	0,231	0,738
<i>staphylococcus aureus</i> (1)	4,123	1,927	0,231	0,0873
<i>staphylococcus aureus</i> (2)	5,992	27,710	0,537	0,934
<i>yersinia enterocolitica</i>	4,0366	482,646	0,231	23,925
<i>lactoperoxidasa</i>	4,0366	0,0180	0,231	0,000889
<i>fosfatasa alcalina</i>	4,123	4,467	0,231	0,199
<i>microbacterium tuberculosis</i>	4,037	16,121	0,231	0,786
<i>listeria monocytogenes</i> (2)	4,404	47,761	0,231	2,083
<i>escherichia coli</i> (2)	4,765	32,960	0,231	1,290
<i>salmonella</i> spp. (2)	4,765	95,077	0,231	3,722
<i>staphylococcus aureus</i> (3)	5,992	27,710	0,537	0,934
<i>aeromonas hydrophyla</i> (2)	5,117	210,586	0,231	7,819
<i>yersinia enterocolitica</i> (2)	4,404	159,673	0,231	6,793

Tabla 7: Letalidad integrada para cada microorganismo en el nodo más caliente (Nº: 2799) y en el nodo más frío (Nº: 3327), en el enfriamiento de la leche en dos etapas, para una pasteurización con un baño a 69 °C

Por otro lado, la lactoperoxidasa tiene una letalidad máxima de 0,0144. Observando al nodo más frío, la **Tabla 6** muestra que la *aeromona* tiene el mayor valor de letalidad, a los 0,0295 minutos alcanza un valor de 0,033 y a los 0,00869 minutos alcanza los 0,660. El

staphylococcus aureus alcanza una letalidad de $2,7 \cdot 10^{-4}$.

En la tabla **Tabla 7** se indica la letalidad máxima durante el enfriamiento de la leche en dos etapas. Analizando el nodo más caliente (N° 2799, de coordenadas $z; r = -0,250374 \text{ m}; 0,0204 \text{ m}$), el microorganismo de mayor letalidad acumulada es la *aeromona* donde a los 5,1 minutos alcanza una letalidad constante de 221,2 y a los 4,4 minutos alcanza una letalidad constante de 4605. Para el *staphylococcus aureus* se alcanza una letalidad máxima de 1,9 a los 4,1 minutos. Por otro lado, la lactoperoxidasa contiene una letalidad máxima de 0,0180.

En la tabla **Tabla 7** también se puede observar la letalidad acumulada durante el enfriamiento de la leche para el nodo más frío (N° 3327, de coordenadas $z; r = -0,0632257 \text{ m}; 0,0172588 \text{ m}$). El microorganismo de mayor letalidad acumulada es la *aeromona* con una variación de la misma entre: 0,000463 - 200,851, donde a los 0,230 minutos alcanza una letalidad constante de 0,000463 o de 200,8 según la referencia. El *staphylococcus aureus* alcanza una letalidad de 0,0873.

4 CONCLUSIONES

Se analizó la fluidodinámica y la transferencia de energía térmica en la pasteurización artesanal de la leche y su posterior enfriamiento mediante la simulación numérica a través del método de Elementos Finitos y las principales conclusiones obtenidas son las siguientes:

Se tuvieron en cuenta diferentes correlaciones empíricas del coeficiente de transferencia de calor por convección y propiedades constantes de los fluidos en función de la temperatura. Las temperaturas predichas en la simulación en estado transiente, tanto para el período de calentamiento como para el de enfriamiento del sachet, fueron validadas satisfactoriamente con los datos experimentales para el agua.

La pasterización a 69 °C por 30 minutos reduce en 10^6 veces la población inicial de *staphilococcus aureus* sin degradar el valor nutritivo de la leche, analizado por la destrucción de la lactoperoxidasa (la cual se reduce 1,5 veces la cantidad inicial.). En cambio un tratamiento a 75 °C durante 15 minutos destruye a ese microorganismo en la misma medida pero también degrada apreciablemente el valor nutritivo de la leche (ya que la lactoperoxidasa indica una disminución igual a 38,8 veces respecto de la inicial).

La distribución de temperaturas en el interior del sachet presenta diferencias que son más acentuadas en sentido axial que en el radial. Y en general el efecto de inercia térmica se observa en los nodos interiores durante el proceso de enfriamiento. Esta inercia es beneficiosa para la destrucción de microorganismos sin embargo es perjudicial si degrada las sustancias que proveen el valor nutritivo de la leche.

En la etapa de enfriamiento también se produce la destrucción microbiana, la cual debe ser tenida en cuenta en el proceso de pasteurización ya que su aporte a la letalidad acumulada disminuiría el tiempo de exposición de la leche al calor. El enfriamiento en dos etapas tiene un mayor aporte al la disminución de los microorganismos ya que posee un mayor valor de la letalidad acumulada para cada microorganismo.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Boscán, L. A. Guías Prácticas del Laboratorio de Industrias Lácteas. 11ª Ed. FCV-LUZ, 1983.
 Catálogo de Proyectos CeDITec, Pasteurización en bolsa: sistema de pasteurización apropiada para pequeños productores, CEDIT. Mnes, Argentina, 16-17, 2010.
 Claeys, W.L., Van Loey, A.M., and Hendrickx, M.E., *Intrinsic time temperature integrators for heat treatment of milk*. Trends in Food Science & Technology, 13: 293–311, 2002.
 Código Alimentario Argentino (CAA). Cap. VIII: Alimentos Lácteos. Art. 556bis- Res 2270, 14.9.83.

- 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.
- Eckner, K., *Fluorometric analysis of alkaline phosphatase inactivation correlated to Salmonella and Listeria inactivation*. Journal of Food Protection, 55: 960–963, 1992.
- 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.
- FIL-IDF. *Recommendations for the hygienic manufacture of milk and milk based products*. Fédération Internationale de Laiterie-International Dairy Federation, Bulletin 292, Brussels, Belgium, 1994.
- Grant, I., Hitchings, E., Mc Cartney, A., Ferguson, F., & Rowe, M., *Effect of commercial-scale high-temperature, short-time pasteurization on the viability of Mycobacterium paratuberculosis in naturally infected cows' milk*. Applied and Environmental Microbiology, 68: 602–607, 2002.
- Holman, J.P., *Transf. de calor* 8 va ed., 1° en español, Mc Graw Hill, Iiteramericana de España, pág. 441, 1998.
- Keswani, J., and Frank, J.F., *Thermal inactivation of Mycobacterium paratuberculosis in milk*. J. Food Prot. 61:974-978, 1998.
- Kreith F. and Bohn, M.S., *Principles of Heat Transfer*, 5° ed., PWS Publishing Company, 1993.
- Lepinard, 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*, XXVIII: 3067-3077, 2009.
- MacGregor, R. K., and A. P. Emery: Free Convection through Vertical Plane Layers: Moderate and High Prandtl Number Fluids, J. Heat Transfer, vol. 91, p. 391, 1969.
- Murthy, G., Bradshaw, J., and Peeler, J., Thermal inactivation of phosphatase by the AOAC-V method. Journal of Food Protection, 53: 969–971, 1990.
- Painter, C., and Bradley, R., *Residual alkaline phosphatase activity in milks subjected to various time-temperature treatments*. Journal of Food Protection, 60: 525–530, 1997.
- Patiño, L. A., Espinoza, H. y Velásquez, O., *Estudio numérico de la transferencia de calor en la cerveza en el proceso de pasteurización*. Revista Ciencia e Ingeniería, 22(3): 19-25 2001.
- Rodríguez Rojas, C.P., *Simulación Computacional de Procesos de Conducción de Calor en Alimentos de Formas Irregulares Complejas*, Tesis, Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias, Escuela de Ingeniería en Alimentos. VALDIVIA, CHILE, 2005.
- Shackelford J. F. y Alexander, W., *The CRC Materials Science and Engineering Handbook*, 3rd ed., CRC Press, Boca Raton, F.L., 2001.
- Stabel, J.R., *On-farm batch pasteurization destroys Mycobacterium paratuberculosis in waste milk*. J. Dairy Sci. 84:524-527, 2001.
- Toledo, R.M., *Fundamentals of Food Process Engineering*, Food Science Text Series, Third Edition, Springer, 2007.
- Yunus A. Cengel, *Heat Transfer: A Practical Approach*, Mcgraw-Hill (Tx); 2nd edition, November 1, 2002.
- Zienkiewicz, O.C., and Taylor, R.L., *The finite element method*, II. McGraw Hill, 1991.