

GUIA PRÁCTICA DE TRANSFERENCIA DE CALOR:

Determinación experimental de los coeficientes de transferencia de calor en un pasteurizador de placas

OBJETIVO GENERAL

Determinar experimentalmente los coeficientes de transferencia de calor en un pasteurizador de placas

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar el coeficiente de transferencia de calor por convección aplicando la Ley de Enfriamiento de Newton y números adimensionales.
- Calcular el error en el diseño del pasteurizador de placas de la planta de lácteos aplicando modelos matemáticos de transferencia de calor.
- Calcular las NTU y las eficiencias de transferencia de calor en cada una de las zonas del pasteurizador de placas de la planta de lácteos.

INTRODUCCIÓN

La transferencia de calor es una de las operaciones unitarias del procesamiento de alimentos, ya sea en forma de entrada de calor o en forma de eliminación del mismo, para modificar las características físicas, químicas y biológicas del producto. Un intercambiador de calor es un dispositivo diseñado para transferir calor entre dos medios, que estén separados por una barrera (Brown & Booth 1991), el más utilizado en alimentos es el intercambiador de calor de placas (pasteurizador). El equipo consta de una serie de placas de acero inoxidable apretadas cada una contra la siguiente y montadas sobre un bastidor. Las placas suelen tener figuras geométricas grabadas en la superficie para provocar un aumento en el área y de la turbulencia en el fluido procesado, mejorando así la transferencia de calor (Maldonado & Castillo, 2008).

La pasteurización es un tratamiento térmico de baja intensidad utilizado para destruir la flora patógena, disminuir la flora banal y para desactivar las enzimas que modifican los sabores de ciertos alimentos (Wilbey R.A. 2003, Michael *et al.*, 2004.). En la industria láctea, para la pasteurización de la leche, se utiliza temperaturas entre 70 a 85°C por un tiempo de residencia 12 a 20s, y finalmente, enfriado hasta una temperatura aproximada de 10°C; con estas condiciones se garantiza la calidad nutricional del producto, además de ser un proceso de bajo costo. Este método es el más aplicado por la industria alimentaria a gran escala, ya que permite realizar la pasteurización de grandes cantidades de alimento en relativamente poco tiempo (Trevatt C. 2014).

En la pasteurización de flujo continuo, el alimento se hace circular entre las placas de acero inoxidable, por tres zonas diferentes (Ver Diagrama 1). El alimento crudo entra a la primera zona, denominada *zona de regeneración* (Zona I), donde se calienta en contracorriente con alimento pasteurizado, que a su vez se

enfría. Luego, el alimento precalentado pasa a la *zona de pasteurización* (Zona II) donde la transferencia de calor se da entre el agua caliente de servicio con el producto, que debe ser pasteurizado entre 72-75°C por 20s. El alimento pasteurizado pasa a la *zona de regeneración* (Zona I), donde cede parte de su calor sensible. Finalmente, el producto pasa a la *zona de enfriamiento* (Zona III), donde se enfría con agua helada ($T: 4^{\circ}\text{C}$) hasta temperaturas entre 8-9°C (Sharma *et al.*, 2003).

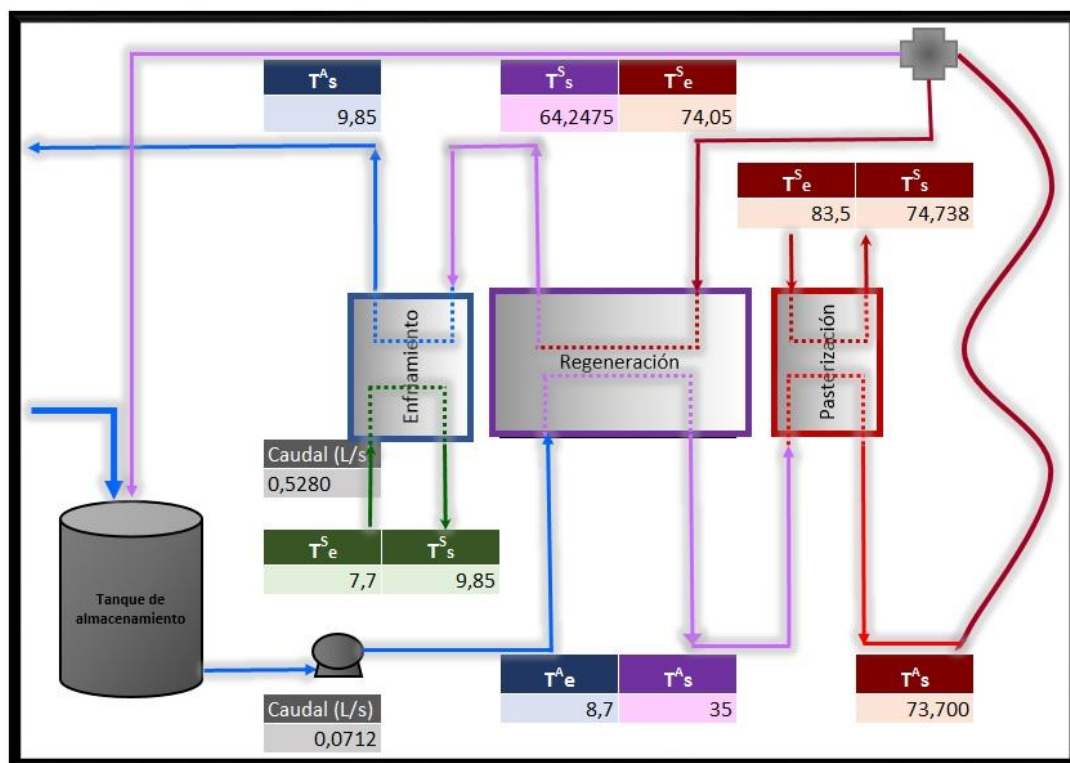


Figura 1. Proceso de pasteurización de leche en el pasteurizador de flujo continuo de la planta de procesos lácteos

Modelos de cálculo

En la Tabla 1 se muestran las Especificaciones técnicas del pasteurizador de placas de la planta de lácteos de la Universidad de Antioquia.

Tabla 1. Especificaciones técnicas del pasteurizador para cada una de las zonas

Datos placas	Valor
Material	Acero Inoxidable AISI 316
Conductividad térmica (K: W/m °C)	16
Ancho de la placa (a: m)	0,1
Largo de las placas (L: m)	0,48
Distancia entre placas (w: m)	0,003
Diámetro equivalente (D_{eq} : m)	0,006
Calibre (m)	0,00075
Espesor placas (m)	0,003
Área de circulación (S : m ²)	0,0003
Coefficiente de Obstrucción	0,000035
Número de placas N	N=6 para la zona de pasterización y enfriamiento y N=8 para la zona de regeneración

A continuación se describen los modelos de cálculo para el estudio de los fenómenos de transferencia de calor en las zonas de pasterización, regeneración y enfriamiento en un pasteurizador de placas (Ibarz & Ribas, 2005, Singh& Heldman, 2001 y Mendieta, D.G. 2008):

1. Balance de energía en el pasteurizador de placas

El balance de energía se debe evaluar en cada una de las secciones del intercambiador, en la siguiente ecuación se muestra el balance de energía para la sección de pasterización:

$$Q = \dot{m}_s C_p (T_e^s - T_s^s) = \dot{m}_A C_p (T_s^A - T_e^A)$$

Dónde: Q es el flujo de calor (J/s), T_e^s y T_s^s son las temperaturas del fluido de servicio a la entrada y a la salida de la sección (°C), T_e^A y T_s^A son las temperaturas del alimento a la entrada y a la salida, \dot{m}_A y \dot{m}_s son los flujos másicos del alimento y del fluido de servicio (kg/S), C_p es la capacidad calorífica de ambos fluidos (J/kg°C).

2. Determinación de la temperatura de salida de la leche pasterizada en la zona de regeneración:

La leche debe alcanzar una temperatura de pasterización de 75°C, y posteriormente una disminución respectiva de la temperatura a 4°C al final del proceso térmico. En la zona de regeneración, se aprovecha el calor aportado a la leche por medio del calentamiento de la misma en la zona de pasterización, intercambiando calor con alimento crudo que ingresa al sistema, lográndose una utilización aproximada del calor del 85% (Mendieta, D.G. 2008). Con esta información se determina la temperatura del alimento que entra a la zona de calentamiento usándose la siguiente ecuación:

$$R = \frac{T_s^s - T_e^A}{T_e^s - T_e^A} \times 100$$

R es el porcentaje de retención, T_e^s y T_s^s son las temperaturas del fluido de servicio a la entrada y a la salida de la sección de regeneración ($^{\circ}\text{C}$), T_e^A es las temperaturas del alimento a la entrada de la zona de regeneración.

3. Determinación del coeficiente de transferencia de calor por convección real (h_R) utilizando la ley de enfriamiento de Newton:

$$Q = h_R A (T_{\text{pared}} - T_m^A) \Rightarrow h_R = \frac{Q}{A(T_{\text{pared}} - T_m^A)}$$

$$A = a_p b_p N$$

Para estimar la temperatura aproximada de la pared de la placa se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$T_m^A = \frac{T_e^A + T_s^A}{2} \quad T_m^s = \frac{T_e^s + T_s^s}{2} \quad T_{\text{pared}} = \frac{T_m^A + T_m^s}{2}$$

Dónde: h_R es el coeficiente individual de TC del alimento ($\text{W/m}^2 \text{ } ^{\circ}\text{C}$), A es el área de transferencia de calor (m^2), T_{pared} es la temperatura estimada de la pared de la placa ($^{\circ}\text{C}$), T_m es la temperatura media del alimento ($^{\circ}\text{C}$). T_e^A y T_s^A son las temperaturas de entrada y de salida del alimento en cada zona ($^{\circ}\text{C}$), y T_e^s y T_s^s son las temperaturas de entrada y de salida de los fluidos de servicio en cada zona.

4. Determinación del coeficiente de transferencia de calor por convección teórico (h_T) utilizando números adimensionales:

Una de las ecuaciones más utilizadas para el cálculo de los coeficientes individuales de transmisión de calor (h_T) en un intercambiador de calor de placas, en régimen turbulento ($\text{Re} > 400$) es:

$$h_T = 0.2536 \left(\frac{k_f}{D_{eq}} \right) (\text{Re})^{0.65} [\text{Pr}]^{0.4}$$

Dónde: h_T es el coeficiente individual de transferencia de calor teórico ($\text{W/m}^2 \text{ } ^{\circ}\text{C}$), k_f es la conductividad térmica del fluido ($\text{W/m } ^{\circ}\text{C}$), D_{eq} es el diámetro hidráulico equivalente (m), Re y Pr son los número de Reynolds y de Prant.

4.1 Cálculo del Número de Reynolds

$$\text{Re} = \frac{G_f D_{eq}}{\mu_f}$$

Dónde: Re es el número de Reynolds, D_{eq} es el diámetro hidráulico equivalente (m), μ_f es la viscosidad del fluido (kg/m.s).

$$A_f = a_p w_p n \quad D_{eq} = 4R_H = \frac{4a_p w_p}{2a_p} \Rightarrow D_{eq} = 2w_p \quad G_f = \frac{\dot{m}}{A_f}$$

Dónde: A_f es el área de flujo (m^2), a_p es el ancho efectivo de cada placa (m), w_p es la separación entre placas (m) y n es el número de canales. D_{eq} es el diámetro equivalente que se define como 4 veces el radio hidráulico (R_H), siendo este la razón entre el área de paso del fluido entre las placas y el perímetro mojado. G_f es la densidad d flujo másica global ($kg/s.m^2$) y \dot{m} es el flujo másico del fluido (kg/s).

4.3 Cálculo del Número de Prant

$$Pr = \frac{c_p \mu_f}{k_f}$$

5. Validación experimental del diseño del pasteurizador de placas de la planta de lácteos

Con los resultados obtenidos con los coeficientes de transferencia de calor reales (h_R) y teóricos (h_T) se puede evaluar si el pasteurizador simula un proceso real de transferencia de calor, aplicando la siguiente ecuación:

$$\% Error = \left| \frac{h_T - h_R}{h_T} \right| \times 100$$

6. Determinación del coeficiente global de transferencia de calor (U) en el pasteurizador:

$$Q = UA_T MLDT \Rightarrow U = \frac{Q}{A_T MLDT}$$

$$MLDT = \left[\frac{(T_e^s - T_s^A) - (T_s^s - T_e^A)}{\ln \left[\frac{(T_e^s - T_s^A)}{(T_s^s - T_e^A)} \right]} \right]$$

Dónde: Q es el flujo de calor (W), U es el coeficiente global de transferencia de calor para cualquiera de las 3 zonas ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$), A_T es el área de transferencia de calor de la zona de trabajo (m^2), $MLDT$ es la temperatura media logarítmica ($^\circ C$), T_e^s y T_s^s son la temperatura de entrada y de salida del fluido de servicio, T_e^A y T_s^A son la temperatura de entrada y de salida del alimento.

7. Determinación del Número de Unidades de transferencia de calor (NUT)

El NUT es la relación entre el incremento de temperaturas que experimenta el alimento y el incremento medio logarítmico de las temperaturas. Valores muy grandes de NTU (>3.5) significa que económicamente no se justifica el uso de un intercambiador de calor, ya que este es una medida directa del tamaño de un intercambiador, puesto que es directamente proporcional al área de transferencia de calor. Para los cálculos de considera aceptable valores de NTU entre 2 y 3.5 (Ibarz & Ribas, 2005).

Programa Ingeniería de Alimentos, Facultad de Ciencias Farmacéuticas y Alimentarias, Universidad de Antioquia
Elaborado por: Gelmy Ciro Gómez, John Jairo Ortiz, Camilo Agudelo Cuartas

$$NTU = \frac{T_s^A - T_e^A}{MLDT}$$

8. Cálculo de la efectividad de intercambiador de calor: (ε)

La efectividad de un IC se refiere a la relación entre el flujo de calor real y el flujo de calor máximo posible; este último valor se obtendría en un IC que funciona en contracorriente y cuya área de intercambio es infinita (Ibarz & Ribas, 2005, Singh & Heldman, 2001). La efectividad de un IC se calcula con la siguiente relación matemática:

$$\varepsilon = \frac{\exp[(1 - C^*)xNTU] - 1}{\exp[(1 - C^*)xNTU] - C^*}$$

$$C^* = \frac{(\dot{m}C_p)_{\min}}{(\dot{m}C_p)_{\max}}$$

Dónde: $(\dot{m}C_p)_{\min}$ es el valor menor entre el producto $(\dot{m}C_p)$ para el fluido frío o el fluido caliente, mientras que el valor $(\dot{m}C_p)_{\max}$ es el valor mayor.

Comentario [C1]: Acá me perdi, valor menor de qué?

9. Cálculo de las pérdidas de carga

Para el cálculo de las pérdidas de carga o presión que experimentan los fluidos a su paso por el intercambiador de calor de placas se puede utilizar la ecuación de Fanning (Ibarz & Ribas 2005):

$$\Delta P = 2f \frac{G^2 L}{g D_{eq} \rho} \quad f = \frac{2.5}{(Re)^{0.3}}$$

Dónde: ΔP es la caída de presión que experimenta el fluido (Pa), L es la longitud de la placa (m), g es la constante gravitacional (m/s^2) y f es el factor de fricción de Fanning.

PROCEDIMIENTO

1. Actividades previas al encendido

- ✓ Verificar que el termo este lleno de agua para que haya agua suficiente que recircula por el calentador a gas.
- ✓ Encender el compresor y asegurarse que la presión esté entre 80 a 100 lb
- ✓ Abrir la válvula de entrada de aire para la válvula de desviación
- ✓ Abrir la válvula entrada de agua al termo de calentamiento y dejar entrar hasta alcanzar el nivel de agua indicado por reboso.

Programa Ingeniería de Alimentos, Facultad de Ciencias Farmacéuticas y Alimentarias, Universidad de Antioquia
Elaborado por: Gelmy Ciro Gómez, John Jairo Ortiz, Camilo Agudelo Cuartas

Comentario [C2]: Sería bueno tener una imagen real del equipo y ver la ubicación de cada una de las partes antes del encendido....

- ✓ Abrir la válvula de entrada de agua al tanque de balance y llenarlo hasta la mitad
- ✓ Abrir las válvulas de entrada y salida de fluido de refrigeración (agua de banco de hielo)
- ✓ Encender bomba del fluido de servicio refrigerante

2. Encendido y puesta en marcha

- ✓ Pulsar el botón de encendido general del gabinete de control
- ✓ Abrir la válvula de gas propano
- ✓ Pulsar el botón de encendido de la bomba de agua caliente y verificar la luz del piloto de control, el calentador de gas debe encender inmediatamente para iniciar calentamiento.
- ✓ Pulsar el botón de encendido de la bomba de leche, verificar la luz del piloto de control y la recirculación correcta del agua por el equipo.
- ✓ Verificar que el equipo este opción “NORMAL” para que se controle a válvula de diversión.
- ✓ Tomar los datos de temperatura de entrada y de salida del fluido de servicio caliente y del fluido de servicio refrigerante.
- ✓ Tomar medidas del caudal del alimento y del fluido refrigerante con la ayuda de una probeta
- ✓ Llenar la siguiente tabla de datos

Comentario [C3]: Mismo comentario anterior

Tabla 1: Tabla de datos

Zonas	Temperaturas (°C)			
	Alimento		Fluido de servicio (s)	
	T_e^A	T_s^A	T_e^s	T_s^s
Regeneración				
Pasteurización				
Enfriamiento				

	Volumen (mL)	Tiempo (s)	Volumen (mL)	Tiempo (s)
Caudales				

3. Esperar hasta que la muestra alcance la temperatura y tiempo de pasteurización

- ✓ El equipo automáticamente abre la válvula de diversión y se comienza a admitir o vaciar la leche cruda desde el tanque de balance.
- ✓ Se conduce la leche pasteurizada hasta su disposición final: Tinas o marmitas abriendo las válvulas que direccionan el flujo.
- ✓ Se deben observar los datos de las variables de control: Temperaturas de agua caliente, entrada de leche, pasteurización y salida de producto.
- ✓ Se muestrea la leche pasteurizada para realizar pruebas.

Comentario [C4]: Relacionarlo con la imagen del equipo

4. Al terminar el proceso de pasteurización

- ✓ Abrir la válvula de entrada de agua del tanque de balance y se pasa por el equipo hasta sacar toda la leche por la tubería de la disposición final.
- ✓ Pulsar el botón de paso forzado para recircular agua caliente por la válvula de diversión.
- ✓ Admitir por el tanque de balance las soluciones de lavado

5. Procedimiento para apagado del equipo:

- ✓ Pulsar el botón de apagado de bombas en el orden: Agua caliente y leche, verificar que los pilotos de control se encuentren apagados.
- ✓ Apagar las resistencias pulsando el botón.
- ✓ Cerrar las válvulas de entrada de agua.
- ✓ Pulsar en apagado el botón general de control eléctrico del gabinete.

CALCULOS

- Determinar el coeficiente de transferencia de calor por convección real y teórico para una de las zonas del pasteurizador de placas, y con ayuda del simulador en Excel, compararlos con las otras dos zonas.
-

BIBLIOGRAFÍA

Brown, M.H., & Booth, L.R. (1991). Food preservatives. In N.W. Russell & G.W. Gould (Eds.). London: Blackie.

Ibarz, A., & Ribas, A. I. (2005). Operaciones unitarias en la ingeniería de alimentos. Mundi-Prensa Libros.

Maldonado, T. J. C., & Castillo, M. P. (2008). Aplicación de modelo matemático predictivo para la determinación de incrustaciones en pasteurizadores a placas en la Industria Láctea. Tesis Doctoral.

Michael J. Lewis, N. J. Heppell, (2004). Continuous Thermal Processing of Foods: Pasteurization and Uht Sterilization. Pag. 44

Sharma, S. K., Mulvaney, S. J., & Rizvi, S. S. (2003). Ingeniería de alimentos: operaciones unitarias y prácticas de laboratorio. Limusa Wiley.

Singh, R.P. & Heldman, D.R. (2001). Introduction to Food Engineering. Cuarta Edición. Gulf Professional Publishing.

Trevatt, C. (2014). Developments in plate heat exchangers. Food Technology International Europe, Pag. 83-85.

Wilbey, R. A. (2003). Pasteurization of foods: Principles of pasteurization: In Encyclopedia of food science. Food Technology and Nutrition (Pag. 3437-3441), Academic Press.

Mendieta, D. G. (2008). Diseño de una línea piloto HTST para el laboratorio de operaciones unitarias de la carrera de ingeniería en alimentos (ESPOL). Trabajo de grado para optar al Título de Ingeniero de Alimentos. Escuela Superior Politécnica del Litoral.