



**Guía Práctica De Transferencia De Calor en Tanque agitado:
Estimación del tiempo de calentamiento y enfriamiento de alimentos líquidos en un
tanque agitado**

**Programa Ingeniería de Alimentos
Facultad de Ciencias Farmacéuticas y Alimentarias
Universidad de Antioquia**

Elaborado por:
Docentes: John Ortiz, Camilo Agudelo Cuartas y Gelmy Ciro Gómez
Monitores: Jhon Jairo Revelo Erazo

GUIA PRÁCTICA DE TRANSFERENCIA DE CALOR:

Determinación del tiempo de proceso de pasteurización en tanques agitados

OBJETIVOS

- Determinar experimentalmente los coeficientes de transferencia de calor individuales y los coeficientes globales de transferencia de calor del proceso de calentamiento y enfriamiento de un producto en tanque agitado.
- Estimar el tiempo de calentamiento y enfriamiento de un fluido alimentario utilizando modelos matemáticos de transferencia de calor
- Representar gráficamente las variaciones de las temperaturas de calentamiento y enfriamiento del producto pasteurizado con respecto al tiempo.

MARCO TEÓRICO

La transferencia de calor es la energía en tránsito debido a una diferencia de temperaturas (Incropera, F. 1999). Los mecanismos de transferencia de calor hacen parte de muchos procesos industriales, ya sea en forma de entrada de calor o de eliminación del mismo, para modificar las características físicas, químicas y biológicas de los alimentos, dentro de los procesos más importantes se encuentran: deshidratación, destilación, evaporación, pasteurización, esterilización, entre otros (Ibarz & Ribas, 2005). La importancia de estudiar los fenómenos de transporte en los cuales se involucra la transferencia de calor en un determinado proceso alimentario, radica en poder calcular el consumo de energía, las pérdidas de energía generadas, el tiempo óptimo del proceso, en el cual se garantice la inactivación de enzimas y/o destrucción de microorganismos alterantes y patógenos sin afectar las propiedades fisicoquímicas y sensoriales del alimento procesado (Ibarz & Ribas, 2005, Pérez & Córdoba, 2013). Motivo por el cual es necesario aplicar modelos matemáticos de transferencia de calor en los cuales se deben involucrar los balances energéticos en el sistema y el cálculo del coeficiente global de transferencia de calor, que permitirán determinar la velocidad o tiempo necesario para la pasteurización de un alimento en particular (Ibarz & Ribas, 2005, Palacios, A.C. 2011).

En procesos discontinuos de calentamiento de alimentos fluidos, como por ejemplo la pasteurización, con frecuencia se emplean tanques agitados con camisas o serpentines por los cuales circula el fluido de servicio (frio o caliente). Generalmente, el fluido al interior del tanque se debe mantener caliente por medio del uso de agua caliente o vapor de agua que circula por la camisa, y el empleo de agitadores asegura un buen intercambio de calor y un mezclado uniforme del alimento a procesar. Para predecir la velocidad de transferencia de calor en tanques agitados se requiere estimar el coeficiente convectivo de transferencia de calor, el cual depende de varios factores tales como: del arreglo particular del recipiente, del impulsor, de la chaqueta y de las propiedades fisicoquímicas del fluido (Piñeras & Rodríguez, E. 2009).

El coeficiente convectivo de transferencia de calor, también conocido como coeficiente de película, se define en términos de la resistencia térmica para la transferencia de calor entre dos fluidos (Incropera, F. 1999).

A continuación se muestra el procedimiento matemático para estimar el tiempo necesario para el calentamiento y enfriamiento de un alimento fluido durante el proceso de pasteurización:

Elaborado por:

Docentes: John Ortiz, Camilo Agudelo Cuartas y Gelmy Ciro Gómez

Monitores: Jhon Jairo Revelo Erazo

A. *Determinación del coeficiente de transferencia de calor al interior del tanque (h_T):* se utiliza la siguiente correlación de números adimensionales, *Nusselt, Reynolds y Prandtl*:

$$Nu = a Re^b Pr^{\frac{1}{3}} \left[\frac{\mu}{\mu_w} \right]^m \quad \text{Ec. 1}$$

Y en la ecuación 2 se muestra la ecuación anterior en términos de las variables involucradas en el proceso de transferencia de calor en tanque agitado como son: las características del tanque de agitación, el tipo de agitador y las propiedades del alimento a trabajar:

$$\frac{h_T D_{T,i}}{k} = a \left[\frac{D_A^2 \rho N}{\mu} \right]^b \left[\frac{c_p \mu}{k} \right]^{\frac{1}{3}} \left[\frac{\mu}{\mu_w} \right]^m \quad \text{Ec. 2}$$

Dónde: h_T es el coeficiente individual o de película del fluido que se encuentra al interior del tanque ($\text{W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$), $D_{T,i}$ es el diámetro interno del tanque (m), D_A es el diámetro del agitador (m), ρ es la densidad del fluido (kg/m^3), N es la velocidad de giro del agitador (rps), C_p es el calor específico del fluido ($\text{J/kg}^\circ\text{C}$), k es la conductividad térmica del alimento ($\text{W/m } ^\circ\text{C}$), μ y μ_w es la viscosidad del fluido en el centro y en la pared del tanque (kg/m.s), respectivamente. Los parámetros a , b y m dependen del tipo de agitador (Ver Tabla 1).

Tabla 1. Constantes de la ecuación 2 dependiendo del tipo de agitador

| Agitador | a | b | m | Reynolds |
|--|-------|-----|------|-----------------------|
| Paleta | 0.36 | 2/3 | 0.21 | 300 - 3×10^5 |
| Hélice | 0.54 | 2/3 | 0.14 | 30 - 2000 |
| Ancla | 1.00 | 1/2 | 0.18 | 10 - 300 |
| | 0.36 | 2/3 | 0.18 | 300 - 4×10^4 |
| Disco turbina paletas planas | 0.54 | 2/3 | 0.14 | 30 - 3×10^5 |
| Disco turbina paletas planas con deflectores | 0.74 | 2/3 | 0.14 | 500 - 3×10^5 |
| Banda helicoidal | 0.633 | 1/2 | 0.18 | 8 - 1×10^5 |

Fuente: Geankoplis, 2006

Para el cálculo del coeficiente de transferencia de calor del fluido que se encuentra al interior de la chaqueta (h_{ch}) se puede aplicar la siguiente relación matemática:

$$Nu = \frac{h_{ch} D_{equ}}{k} = 0.15 \times \left[\frac{c_p \mu}{k} \right]^{\frac{1}{3}} \left[\frac{\rho^2 \times (D_{equ})^3 \times g \times \beta \times MLDT}{\mu^2} \right]^{0.33} \quad \text{Ec. 3}$$

$$D_{equ} = \frac{D_{ch}^2 - D_{T,o}^2}{D_{T,o}} \quad \text{Ec. 4}$$

Estas dos ecuaciones se corrigieron

Elaborado por:

Docentes: John Ortiz, Camilo Agudelo Cuartas y Gelmy Ciro Gómez

Monitores: Jhon Jairo Revelo Erazo

$$MLDT = \left[\frac{(T_{ce} - T_{fs}) - (T_{cs} - T_{fe})}{\ln \left[\frac{(T_{ce} - T_{fs})}{(T_{cs} - T_{fe})} \right]} \right] \quad \text{Ec. 5}$$

Dónde: k es la conductividad térmica del fluido calefactor ($\text{W/m } ^\circ\text{C}$), D_{ch} es el diámetro interno de la chaqueta, $D_{T,i}$ y $D_{T,o}$ es el diámetro interno y externo del tanque, respectivamente, β es el coeficiente de expansión térmica del fluido ($1/^\circ\text{C}$), $MLDT$ es la temperatura media logarítmica ($^\circ\text{C}$), g es la gravedad específica (m/s^2), T_{ce} y T_{fe} son la temperatura de entrada del fluido caliente y frío, respectivamente, T_{cs} y T_{fs} son la temperatura de salida del fluido caliente y frío, respectivamente.

B. *Determinación del coeficiente global de transferencia de calor U en tanque agitado:* se debe considerar los coeficientes de película de los fluidos caliente y frío, así como del espesor y la conductividad térmica de la pared de la camisa, tal y como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{U_T} = \frac{1}{h_T} + \frac{r_{T,i}}{r_{T,o} k_T} (r_{T,o} - r_{T,i}) + \left(\frac{r_{T,i}}{r_{T,o}} \right)^2 \frac{1}{h_{ch}} + R_{f,o} \quad \text{Ec. 6}$$

Esta fórmula también se corrigió

Dónde: k_T es la conductividad del material de la pared del tanque ($\text{W/m } ^\circ\text{C}$), h_T es el coeficiente individual o de película del fluido en el tanque ($\text{W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$), respectivamente, $r_{T,i}$ y $r_{T,o}$ es el radio interno y externo del tanque, $R_{f,o}$ es factor de obstrucción por incrustaciones ($\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{W}$).

C. *Estimación del tiempo de calentamiento del producto en tanque agitado:* para régimen no estacionario y calentamiento isotérmico se emplea el siguiente modelo matemático:

$$t_c = \frac{m_p c_p}{U_T A_T} \ln \left[\frac{T_c - T_{pe}}{T_c - T_{ps}} \right] \quad \text{Ec. 7}$$

Dónde: t_c es el tiempo estimado de calentamiento (s), m_p es la masa del líquido a procesar (kg), C_p es el calor específico del líquido a pasteurizar ($\text{J/kg } ^\circ\text{C}$), A_T es el área de transferencia de calor (m^2), T_c es la temperatura inicial del líquido calefactor ($^\circ\text{C}$), T_{pe} y T_{ps} es la temperatura de entrada y de salida del producto a calentar ($^\circ\text{C}$), respectivamente.

D. *Estimación del tiempo de enfriamiento del producto en tanque agitado:* se debe realizar los cálculos descritos en el apartado A y B para determinar los coeficientes convectivos de transferencia de calor para la etapa de enfriamiento del producto, y finalmente utilizar la ecuación 8 para la estimación del tiempo necesario para el enfriamiento no isotérmico del producto:

$$t_f = \frac{m_p c_p}{w_R C_{p_R}} \times \left[\frac{K_2}{K_2 - 1} \right] \ln \left[\frac{T_{pe} - T_R}{T_{ps} - T_R} \right]; \text{ Dónde: } K_2 = e^{\left(\frac{U_f A_T}{w_R C_{p_R}} \right)} \quad \text{Ec. 8}$$

Elaborado por:

Docentes: John Ortiz, Camilo Agudelo Cuartas y Gelmy Ciro Gómez

Monitores: Jhon Jairo Revelo Erazo

Dónde: t_f es el tiempo estimado de enfriamiento (s), m_p es la masa del producto a pasteurizar (kg), C_p y C_{pR} es el calor específico del alimento y del refrigerante (J/kg °C), respectivamente, w_R es el flujo másico del refrigerante (kg/s), A_T es el área de transferencia de calor (m²), T_R es la temperatura inicial del fluido refrigerante (°C), T_{pe} y T_{ps} es la temperatura de entrada y de salida del alimento (°C).

METODOLOGÍA

1. Actividades previas al encendido del equipo

- ✓ Abrir la válvula de entrada de agua a la chaqueta.
- ✓ Verificar que la chaqueta este llena completamente de agua
- ✓ Cerrar la válvula de entrada del servicio del fluido refrigerante a la chaqueta
- ✓ Posicionar y colocar el agitador en forma de ancla.
- ✓ Girar la perilla del agitador hasta el punto 2 y medir las revoluciones por segundo del agitador
- ✓ Medir las dimensiones del tanque y del agitador

2. Encendido y puesta en marcha

- ✓ Pulsar el botón de encendido general del gabinete de control, verificar que los controles electrónicos estén encendidos
- ✓ Abrir la válvula de gas propano
- ✓ Pulsar el botón de encendido del tanque agitador y verificar que la luz del piloto de control se mantenga estable; esto se hace encendiendo y apagando el tanque agitador y verificar que esté a una marcha
- ✓ Fijar el *set point* del control de temperatura a 80°C y esperar a que el agua al interior de la chaqueta llegue a dicha temperatura
- ✓ Posicionar el interruptor del agitador en el punto 2
- ✓ Recoger 51L del fluido a analizar y registrar la temperatura inicial.
- ✓ Una vez alcanzada la temperatura de 80°C del tanque agitador agregar los 51L del fluido a analizar
- ✓ Tomar datos de temperatura del fluido en el tanque agitador cada minuto hasta obtener una temperatura constante.
- ✓ Apagar el calentador del tanque agitador y cerrar la válvula de gas propano
- ✓ Abrir completamente las válvulas de entrada y de salida del fluido refrigerante
- ✓ Encender la bomba del fluido de servicio refrigerante.
- ✓ Anotar la temperatura de entrada fluido refrigerante
- ✓ Tomar la temperatura inicial del fluido que se encuentra en el tanque
- ✓ Llevar registro de la temperatura del fluido del tanque y de la temperatura de salida del fluido refrigerante cada minuto hasta lograr una temperatura constante.
- ✓ Medir el caudal del fluido refrigerante.

3. Al terminar la práctica

- ✓ Apagar la bomba del fluido de servicio refrigerante.
- ✓ Cerrar la válvula de entrada del fluido refrigerante a la chaqueta del tanque agitador.
- ✓ Posicionar el interruptor del agitador hasta que este apagado completamente.
- ✓ Retirar el agitador del tanque con mucho cuidado.
- ✓ Vaciar completamente el agua del tanque agitador.
- ✓ Lavar el tanque agitador, con bastante agua jabonosa, desinfectante y enjuagar muy bien.

Elaborado por:

Docentes: John Ortiz, Camilo Agudelo Cuartas y Gelmy Ciro Gómez

Monitores: Jhon Jairo Revelo Erazo

- ✓ Pulsar el botón de apagado general del gabinete de control, verificar que los controles electrónicos estén apagados.
- ✓ Dejar el laboratorio completamente limpio y organizado

Tabla 1. Dimensiones del tanque de agitación y del agitador mecánico:

| Tanque | | | | | Agitador | | |
|---------------------|-----------------|-----------------|----------------------------|-----------------------------|---------------------|------------------|-----------------|
| D_{ch} (m) | D_{Te} (m) | D_{Ti} (m) | Altura del producto (m) | Volumen del producto (L) | Tipo | D_A (m) | rpm |
| 0.66 | | | | | | | |
| Fluidos de servicio | | | Fluido calefactor | | Fluido refrigerante | | |
| | | | T_c (°C) | | T_{Re} (°C) | T_{Rs} (°C) | w_R (m³/h) |
| | | | | | | | |

| Tanque | | | | | Agitador | | |
|---------------------|----------------|--------------|----------------------------|-----------------------------|---------------------|------------------|-----------------|
| D_{Ti} (m) | espesor (m) | D_{ch} (m) | Altura del producto (m) | Volumen del producto (L) | Tipo | Altura (m) | D_A (m) |
| 0.58 | 0.0037 | 0.66 | 0.29 | 51 | Ancla | 0.24 | 0.5 |
| Fluidos de servicio | | | Fluido calefactor | | Fluido refrigerante | | |
| | | | T_c (°C) | | T_{Re} (°C) | T_{Rs} (°C) | w_R (m³/h) |
| | | | 92 | | 23 | 28 | 1.44 |

Tabla 2: Tabla de datos experimentales

| Calentamiento | | | | Enfriamiento | |
|---------------|--------|-------|--------|--------------|--------|
| t (s) | T (°C) | t (s) | T (°C) | t (s) | T (°C) |
| 0 | 23,0 | 1110 | 65,3 | 0 | 90,2 |
| 30 | 34,5 | 1140 | 65,1 | 60 | 85,3 |
| 60 | 36,1 | 1170 | 66,6 | 120 | 79,4 |
| 90 | 37,9 | 1200 | 67,0 | 180 | 74,1 |
| 120 | 39,3 | 1230 | 67,8 | 240 | 68,9 |
| 150 | 40,4 | 1260 | 67,7 | 300 | 64,9 |
| 180 | 41,6 | 1290 | 68,3 | 360 | 60,6 |
| 210 | 42,4 | 1320 | 68,5 | 420 | 57,6 |
| 240 | 43,6 | 1350 | 70,3 | 480 | 54,3 |
| 270 | 44,5 | 1380 | 69,7 | 540 | 51,6 |
| 300 | 45,3 | 1410 | 70,4 | 600 | 49,2 |
| 330 | 46,1 | 1440 | 71,0 | 660 | 46,3 |
| 360 | 46,6 | 1470 | 71,3 | 720 | 44,7 |
| 390 | 47,9 | 1500 | 71,4 | 780 | 42,9 |
| 420 | 48,5 | 1530 | 72,2 | 840 | 41,4 |
| 450 | 49,2 | 1560 | 73,1 | 900 | 39,9 |

Elaborado por:

Docentes: John Ortiz, Camilo Agudelo Cuartas y Gelmy Ciro Gómez

Monitores: Jhon Jairo Revelo Erazo

| | | | | | |
|------|------|------|------|------|------|
| 480 | 50,1 | 1590 | 73,6 | 960 | 38,4 |
| 510 | 50,9 | 1620 | 74,2 | 1020 | 37,2 |
| 540 | 51,3 | 1650 | 74,2 | 1080 | 35,9 |
| 570 | 52,3 | 1680 | 75,1 | 1140 | 34,9 |
| 600 | 52,9 | 1710 | 75,8 | 1200 | 34,0 |
| 630 | 53,8 | 1770 | 76,9 | 1260 | 33,2 |
| 660 | 54,4 | 1830 | 78,4 | 1320 | 32,4 |
| 690 | 54,9 | 1890 | 78,9 | 1380 | 31,7 |
| 720 | 55,4 | 1950 | 79,3 | 1440 | 31,1 |
| 750 | 55,5 | 2010 | 82,0 | 1500 | 30,6 |
| 780 | 57,1 | 2070 | 82,7 | 1560 | 30,3 |
| 810 | 57,0 | 2130 | 83,4 | 1620 | 29,9 |
| 840 | 57,6 | 2190 | 84,5 | 1680 | 29,7 |
| 870 | 58,8 | 2250 | 85,3 | 1740 | 29,5 |
| 900 | 59,9 | 2310 | 86,4 | 1800 | 29,4 |
| 930 | 60,9 | 2370 | 87,5 | 1860 | 29,2 |
| 960 | 61,3 | 2430 | 87,7 | 1920 | 29,1 |
| 990 | 62,7 | 2490 | 88,9 | 1980 | 29,0 |
| 1020 | 63,2 | 2550 | 90,1 | 2040 | 28,9 |
| 1050 | 63,9 | 2610 | 90,5 | 2100 | 28,8 |
| 1080 | 64,7 | | 65,3 | 2160 | 28,8 |

RESULTADOS:

Tabla 1. Propiedades termofísicas del producto a procesar

| DATOS DEL ALIMENTO A PROCESAR | | | | |
|--------------------------------------|---------------------------------|----------------------|--------------------------------|----------------------|
| | Proceso de Calentamiento | | Proceso de Enfriamiento | |
| Parámetros | Valor | Unidades | Valor | Unidades |
| Volumen | 0.05 | m ³ | 0.05 | m ³ |
| Temperatura inicial | 23 | °C | 90.2 | °C |
| Temperatura calentamiento | 90.5 | °C | - | - |
| Temperatura enfriamiento | - | - | 28.8 | °C |
| Temperatura promedio* | 56.75 | °C | 59.5 | °C |
| Cp | 4184 | J/kg°C | 4186 | J/kg°C |
| K | 0.65 | W/m°C | 0.65 | W/m°C |
| μ | 4.89x10 ⁻⁴ | kg/ms | 4.53x10 ⁻⁴ | kg/ms |
| ρ | 984.66 | kg/m ³ | 983.64 | kg/m ³ |
| Rt | 0.0009 | m ² .°C/W | 0.0009 | m ² .°C/W |

*Las propiedades termofísicas del producto se trabajan a la temperatura promedio

Elaborado por:

Docentes: John Ortiz, Camilo Agudelo Cuartas y Gelmy Ciro Gómez

Monitores: Jhon Jairo Revelo Erazo

Tabla 1. Propiedades termofísicas de los fluidos de servicio

| DATOS FLUIDOS DE SERVICIO | | | | |
|----------------------------------|--------------------------|----------------------|--------------------------------|----------------------|
| | Fluido calefactor | | Fluido de refrigeración | |
| Parámetros | Valor | Unidades | Valor | Unidades |
| Flujo másico | - | kg/s | 0.4 | Kg/s |
| Temperatura inicial | 92 | °C | 23 | °C |
| Temperatura final | - | °C | 28 | °C |
| Temperatura promedio* | 92 | °C | 25.5 | °C |
| Cp | 4209 | J/kg°C | 4179 | J/kg°C |
| K | 0.677 | W/m°C | 0.613 | W/m°C |
| μ | 3.06x10 ⁻⁴ | kg/ms | 8.55x10 ⁻⁴ | kg/ms |
| ρ | 963.70 | kg/m ³ | 997.13 | kg/m ³ |
| Rt | 0.0009 | m ² .°C/W | 0.0009 | m ² .°C/W |
| β | 707.1x10 ⁻⁶ | 1/°C | 276.1x10 ⁻⁶ | 1/°C |
| g | 9.8 | m/s ² | 9.8 | m/s ² |

*Las propiedades termofísicas de los fluidos de servicio se trabajan a la temperatura promedio

A. Estimar el tiempo necesario de calentamiento para 50 L de agua desde una temperatura de 23°C hasta 90.5°C.

1.- Determinación de h_T al interior del tanque para el fluido que se está calentamiento

Tipo de agitador: Ancla $a = 0,36$ $b = 0,67$ $m = 0,18$

$$\frac{h_T D_T}{k} = a \left[\frac{D_A^2 \rho N}{\mu} \right]^b \left[\frac{c_p \mu}{k} \right]^{\frac{1}{3}} \left[\frac{\mu}{\mu_w} \right]^m \quad \text{Ec. 1}$$

Remplazando

$$\frac{h_T(0,58\text{m})}{0,65 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot ^\circ\text{C}}} = 0,36 \left[\frac{(0,5\text{m})^2 \left(984,66 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) (0,49\text{rps})}{4,89 \times 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}} \right]^{0,67} \left[\frac{\left(4184 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \right) \left(4,89 \times 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}} \right)}{0,65 \frac{\text{J}}{\text{m} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C}}} \right]^{\frac{1}{3}} [1]^{0,18}$$

Elaborado por:

Docentes: John Ortiz, Camilo Agudelo Cuartas y Gelmy Ciro Gómez

Monitores: Jhon Jairo Revelo Erazo

$$\frac{h_T(0,58m)}{0,65 \frac{W}{m \cdot ^\circ C}} = 0,36 (2,467 \times 10^5)^{0,67} \times (3,15)^{\frac{1}{3}} \times (1)^{0,18}$$

$$h_T = \frac{(2163,51) \left(0,65 \frac{W}{m \cdot ^\circ C}\right)}{(0,58m)}$$

$$h_T = 2424,62 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

2.- Determinación de h_{ch} para la etapa de calentamiento

$$Nu = \frac{h_{ch} D_{equ}}{k} = 0.15 \times \left[\frac{c_p \mu}{k} \right]^{\frac{1}{3}} \left[\frac{\rho^2 \times (D_{equ})^3 \times g \times \beta \times MLDT}{\mu^2} \right]^{0.33}$$

2.1 Cálculo de la temperatura media logarítmica

$$MLDT = \left[\frac{(T_{ce} - T_{fs}) - (T_{cs} - T_{fe})}{\ln \left[\frac{(T_{ce} - T_{fs})}{(T_{cs} - T_{fe})} \right]} \right]$$

Remplazando:

$$MLDT = \left[\frac{23^\circ C - 90,5^\circ C}{\ln \left(\frac{92^\circ C - 90,5^\circ C}{92^\circ C - 23^\circ C} \right)} \right] = 17,63^\circ C$$

2.2 Calculando diámetro equivalente D_{eq} de la chaqueta

$$D_{equ} = \frac{D_{ch}^2 - D_{T,o}^2}{D_{T,o}} = \frac{(0.66 \text{ m})^2 - (0.5874 \text{ m})^2}{0.5874 \text{ m}} = 0.154 \text{ m} \quad \text{Ec. 4}$$

$$Nu = \frac{h_{ch} D_{equ}}{k} = 0.15 \times \left[\frac{c_p \mu}{k} \right]^{\frac{1}{3}} \left[\frac{\rho^2 \times (D_{equ})^3 \times g \times \beta \times MLDT}{\mu^2} \right]^{0.33}$$

Elaborado por:

Docentes: John Ortiz, Camilo Agudelo Cuartas y Gelmy Ciro Gómez

Monitores: Jhon Jairo Revelo Erazo

$$\frac{h_{ch} (0.154 \text{ m})}{0.677 \frac{J}{sm^2 \text{ } ^\circ C}} = 0.15 \times \left[\frac{\left(4209 \frac{J}{kg \text{ } ^\circ C} \right) \left(3.06 \times 10^{-4} \frac{kg}{ms} \right)}{0.677 \frac{J}{sm^2 \text{ } ^\circ C}} \right]^{\frac{1}{3}} \left[\frac{\left(963.7 \frac{kg}{m^3} \right)^2 \times (0.154 \text{ m})^3 \times (9.8 \text{ m/s}^2) \times \left(7.07 \times 10^{-4} \frac{1}{^\circ C} \right) \times 17.63 \text{ } ^\circ C}{\left(3.06 \times 10^{-4} \frac{kg}{ms} \right)^2} \right]^{0.33}$$

$$\frac{h_{ch} (0.154 \text{ m})}{0.677 \frac{J}{sm^2 \text{ } ^\circ C}} = 0.15 \times [1.9024]^{\frac{1}{3}} [4.42 \times 10^9]^{0.33}$$

$$h_{ch} = \frac{283.26 * 0.677 \frac{J}{sm^2 \text{ } ^\circ C}}{0.154 \text{ m}}$$

$$h_{ch} = 1245.23 \frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ C}$$

3.- Determinación del coeficiente global de transferencia de calor

$$\frac{1}{U_T} = \frac{1}{h_T} + \frac{r_{T,i}}{r_{T,o} k_T} (r_{T,o} - r_{T,i}) + \left(\frac{r_{T,i}}{r_{T,o}} \right)^2 \frac{1}{h_{ch}} + R_{f,o}$$

Remplazando:

$$\frac{1}{U_T} = \frac{1}{2424.62 \frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ C}} + \frac{0.29 \text{ m}}{0.2937 \text{ m} * 16.3 \frac{W}{m \text{ } ^\circ C}} (0.2937 \text{ m} - 0.29 \text{ m}) + \left(\frac{0.29 \text{ m}}{0.2937 \text{ m}} \right)^2 \frac{1}{1245.23 \frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ C}}$$

$$\frac{1}{U_T} = 4.12 \times 10^{-4} \frac{m^2 \text{ } ^\circ C}{W} + 2.24 \times 10^{-4} \frac{m^2 \text{ } ^\circ C}{W} + 7.83 \times 10^{-4} \frac{m^2 \text{ } ^\circ C}{W}$$

$$U_T = 704.74 \frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ C}$$

4.- Estimación del tiempo de calentamiento de 50L de agua desde 23°C hasta 90.5°C

$$t_c = \frac{m_p c_p}{U_c A_T} \ln \left[\frac{T_c - T_{pe}}{T_c - T_{ps}} \right] \text{ Ec. 6}$$

Elaborado por:

Docentes: John Ortiz, Camilo Agudelo Cuartas y Gelmy Ciro Gómez

Monitores: Jhon Jairo Revelo Erazo

4.1 Cambiando de unidades al volumen del tanque v_p

$$v_p = 51 \text{ L} \times \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}} = 0,051 \text{ m}^3 \text{ Ec. 7}$$

4.2 Determinando masa del líquido a procesar

$$m_p = 0,051 \text{ m}^3 \times \frac{984,66 \text{ kg}}{1 \text{ m}^3} = 50,22 \text{ kg} \text{ Ec. 8}$$

4.3 Calculando área del tanque

$$A_T = 2\pi r^2 = 2\pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 = 2\pi \left(\frac{0,58\text{m}}{2}\right)^2 = 0,53 \text{ m}^2 \text{ Ec. 9}$$

Remplazando ecuaciones 7, 8 y 9 en la ecuación 6:

$$t_c = \frac{(50,22\text{kg}) \left(4184 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}\right)}{\left(704.74 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}\right) (0,53 \text{ m}^2)} \left[\ln \left[\frac{(92 ^\circ\text{C} - 23 ^\circ\text{C})}{(92 ^\circ\text{C} - 90,5 ^\circ\text{C})} \right] \right]$$

$$t_c = 562.55 \text{ s} \times 3,828 = 2153.45 \text{ s} \times \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}}$$

$$t_c = 35,82 \text{ min}$$

Experimentalmente se encontró que para calentar 50 L de agua desde una temperatura de 23°C hasta 90.5°C se requiere un tiempo de tratamiento de 2610 s (43.5 min) (ver Gráfico 1).

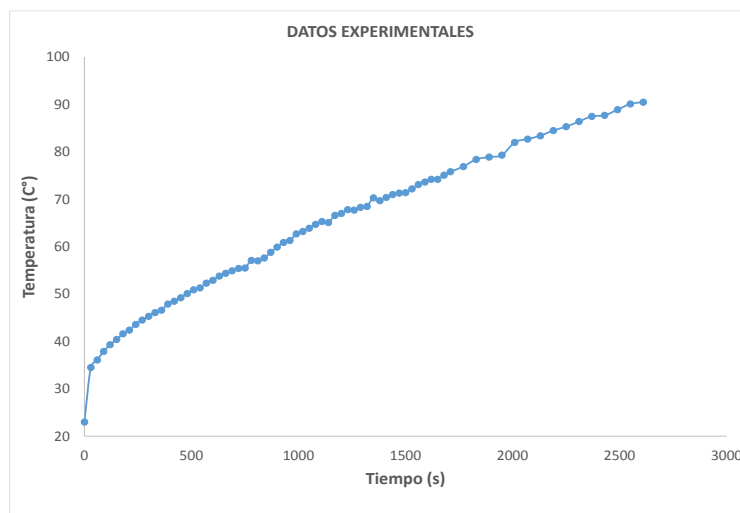


Gráfico 1. Datos experimentales del proceso de calentamiento de 50L de agua desde 23°C hasta 90.5°C.

Elaborado por:

Docentes: John Ortiz, Camilo Agudelo Cuartas y Gelmy Ciro Gómez

Monitores: Jhon Jairo Revelo Erazo

B. Estimar el tiempo necesario de enfriamiento de 50 L de agua desde una temperatura de 90.5°C hasta 28.8 °C.

1.- Determinación de h_T al interior del tanque para el producto que se está enfriando

Tipo de agitador $a = 0,36$ $b = 0,67$ $m = 0,18$

$$\frac{h_T D_T}{k} = a \left[\frac{D_A^2 \rho N}{\mu} \right]^b \left[\frac{c_p \mu}{k} \right]^{\frac{1}{3}} \left[\frac{\mu}{\mu_w} \right]^m \quad \text{Ec. 10}$$

Remplazando:

$$\frac{h_T(0,58\text{m})}{0,65 \frac{W}{m \cdot ^\circ C}} = 0,36 \left[\frac{(0,5\text{m})^2 \left(983,64 \frac{kg}{m^3} \right) (0,49\text{rps})}{4,53 \times 10^{-4} \frac{kg}{m \cdot s}} \right]^{0,67} \left[\frac{\left(4186 \frac{J}{kg \cdot ^\circ C} \right) \left(4,53 \times 10^{-4} \frac{kg}{m \cdot s} \right)}{0,65 \frac{J}{m \cdot s \cdot ^\circ C}} \right]^{\frac{1}{3}} [1]^{0,18}$$

$$\frac{h_T(0,58\text{m})}{0,65 \frac{W}{m \cdot ^\circ C}} = 0,36 (2,66 \times 10^5)^{0,67} \times (2,92)^{\frac{1}{3}} \times (1)^{0,18}$$

$$h_T = \frac{(2218,71) \left(0,65 \frac{W}{m \cdot ^\circ C} \right)}{(0,58\text{m})}$$

$$h_T = 2486,48 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

2.- Determinación de h_{ch} para la etapa de enfriamiento

$$Nu = \frac{h_{ch} D_{equ}}{k} = 0.15 \times \left[\frac{c_p \mu}{k} \right]^{\frac{1}{3}} \left[\frac{\rho^2 \times (D_{equ})^3 \times g \times \beta \times MLDT}{\mu^2} \right]^{0,33}$$

2.3 Cálculo de la temperatura media logarítmica

Elaborado por:

Docentes: John Ortiz, Camilo Agudelo Cuartas y Gelmy Ciro Gómez

Monitores: Jhon Jairo Revelo Erazo

$$MLDT = \left[\frac{(T_{ce} - T_{fs}) - (T_{cs} - T_{fe})}{\ln \left[\frac{(T_{ce} - T_{fs})}{(T_{cs} - T_{fe})} \right]} \right]$$

Remplazando:

$$MLDT = \left[\frac{(90,2^{\circ}C - 28^{\circ}C) - (28,8^{\circ}C - 23,2^{\circ}C)}{\ln \left(\frac{90,2^{\circ}C - 28^{\circ}C}{28,8^{\circ}C - 23,2^{\circ}C} \right)} \right] = 23,5^{\circ}C$$

2.4 Calculando diámetro equivalente D_{eq} de la chaqueta

$$D_{equ} = \frac{D_{ch}^2 - D_{T,o}^2}{D_{T,o}} = \frac{(0.66 \text{ m})^2 - (0.5874 \text{ m})^2}{0.5874 \text{ m}} = 0.154 \text{ m} \quad \text{Ec. 4}$$

$$Nu = \frac{h_{ch} D_{equ}}{k} = 0.15 \times \left[\frac{c_p \mu}{k} \right]^{1/3} \left[\frac{\rho^2 \times (D_{equ})^3 \times g \times \beta \times MLDT}{\mu^2} \right]^{0.33}$$

$$\frac{h_{ch} (0.154 \text{ m})}{0.613 \frac{J}{sm^2 \circ C}} = 0.15 \times \left[\frac{\left(4179 \frac{J}{kg \circ C} \right) \left(8.55 \times 10^{-4} \frac{kg}{ms} \right)}{0.613 \frac{J}{sm^2 \circ C}} \right]^{1/3} \left[\frac{\left(997.13 \frac{kg}{m^3} \right)^2 \times (0.154 \text{ m})^3 \times (9.8 \text{ m/s}^2) \times \left(2.76 \times 10^{-4} \frac{1}{\circ C} \right) \times 23.5^{\circ}C}{\left(8.55 \times 10^{-4} \frac{kg}{ms} \right)^2} \right]^{0.33}$$

$$\frac{h_{ch} (0.154 \text{ m})}{0.677 \frac{J}{sm^2 \circ C}} = 0.15 \times [5.83]^{1/3} [3.15 \times 10^8]^{0.33}$$

$$h_{ch} = \frac{172 * 0.613 \frac{J}{sm^2 \circ C}}{0.154 \text{ m}}$$

$$h_{ch} = 685 \frac{W}{m^2 \circ C}$$

Elaborado por:

Docentes: John Ortiz, Camilo Agudelo Cuartas y Gelmy Ciro Gómez

Monitores: Jhon Jairo Revelo Erazo

3.- Determinación del coeficiente global de transferencia de calor

$$\frac{1}{U_f} = \frac{1}{h_T} + \frac{r_{T,i}}{r_{T,o} k_T} (r_{T,o} - r_{T,i}) + \left(\frac{r_{T,i}}{r_{T,o}} \right)^2 \frac{1}{h_{ch}} + R_{f,o}$$

Remplazando:

$$\frac{1}{U_f} = \frac{1}{2486 \cdot 48 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}} + \frac{0.29 \text{ m}}{0.2937 \text{ m} \cdot 16 \cdot 3 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}} (0.2937 \text{ m} - 0.29 \text{ m}) + \left(\frac{0.29 \text{ m}}{0.2937 \text{ m}} \right)^2 \frac{1}{685 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}}$$

$$\frac{1}{U_f} = 4.02 \times 10^{-4} \frac{m^2 \cdot ^\circ C}{W} + 2.24 \times 10^{-4} \frac{m^2 \cdot ^\circ C}{W} + 1.42 \times 10^{-3} \frac{m^2 \cdot ^\circ C}{W}$$

$$U_f = 487.97 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

4.- Estimación del tiempo de enfriamiento de 50L de agua desde 90.2°C hasta 28.8°C

$$t_f = \frac{m_p c_p}{w_R C p_R} \times \left[\frac{K_2}{K_2 - 1} \right] \ln \left[\frac{T_{pe} - T_R}{T_{ps} - T_R} \right]; \text{ Dónde: } K_2 = e^{\left(\frac{U_f A_T}{w_R C p_R} \right)} \quad \text{Ec. 15}$$

4.1 Determinando flujo másico del refrigerante w_R

$$w_R = 1.44 \frac{m^3}{h} \times \frac{997.13 \text{ Kg}}{m^3} \times \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} = 0.40 \frac{\text{Kg}}{\text{s}} \quad \text{Ec. 16}$$

4.2 Encontrando K_2

$$K_2 = e^{\left(\frac{487.97 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \times 0.53 \text{ m}^2}{0.40 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 4179 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot ^\circ C}} \right)}$$

$$K_2 = 1.17$$

$$t_f = \frac{m_p c_p}{w_R C p_R} \times \left[\frac{K_2}{K_2 - 1} \right] \ln \left[\frac{T_{pe} - T_R}{T_{ps} - T_R} \right]$$

Elaborado por:

Docentes: John Ortiz, Camilo Agudelo Cuartas y Gelmy Ciro Gómez

Monitores: Jhon Jairo Revelo Erazo

$$t_f = \frac{(50,22kg) \left(4186 \frac{J}{kg \cdot ^\circ C}\right)}{\left(0,40 \frac{Kg}{s}\right) \left(4179 \frac{J}{kg \cdot ^\circ C}\right)} \times \left(\frac{1,17}{1,17 - 1}\right) \left[\ln \left[\frac{(90,2 ^\circ C - 23 ^\circ C)}{(28,8 ^\circ C - 23 ^\circ C)} \right] \right]$$

$$t_f = 125,76 s \times 6,88 \times 2,45 = 2119,81 s \times \frac{1 min}{60 s}$$

$$t_f = 35.33 min$$

Experimentalmente se encontró que para calentar 50 L de agua desde una temperatura de 90.5°C hasta 28.8°C se requiere un tiempo de tratamiento de 2160 s (36 min) (ver Gráfico 2).

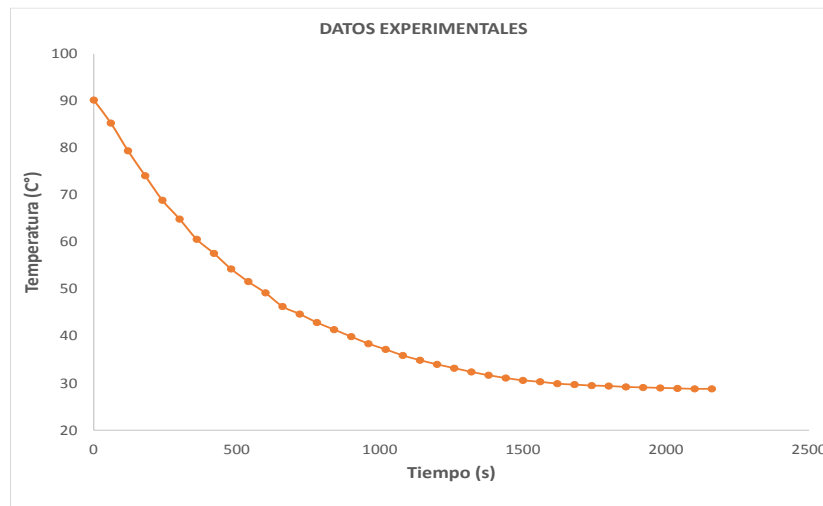


Gráfico 2. Datos experimentales del proceso de calentamiento de 50L de agua desde 90.5°C hasta 28.8°C.

BIBLIOGRAFÍA

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

Incropera, F. P., & DeWitt, D. P. (1999). *Fundamentos de transferencia de calor*. Pearson Educación.

Palacios Ponce, A. S. (2011). Evaluación y adecuación de un tanque con agitador y chaqueta de vapor de 0, 9 mc3 para la pasteurización de 880 kg. de pulpa de fruta. Tesis de grado para optar el Título de Magister en Ciencia Alimentaria. Facultad de Ingeniería en mecánica y Ciencias de la Producción. Escuela Superior Politécnica del Litoral. Tesis ONLINE: <http://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/bitstream/handle/123456789/30211/D-79581.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>

Pérez, J. D. A., & Córdoba, M. E. M. (2013). Determinación del coeficiente de película para fluidos pseudoplásticos calentados con serpentín en tanques agitados. *Journal of Tropical Engineering*, 22(1).

Elaborado por:

Docentes: John Ortiz, Camilo Agudelo Cuartas y Gelmy Ciro Gómez

Monitores: Jhon Jairo Revelo Erazo

Piñeras, Y., Rodríguez, E. 2009. Determinación del Coeficiente global de transferencia de calor en el procesamiento de un alimento fluido en un tanque agitado. En: Manual de Prácticas de Ingeniería de Alimentos: Propiedades, operaciones y bioprocesos. Fundación Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano.

Elaborado por:

Docentes: John Ortiz, Camilo Agudelo Cuartas y Gelmy Ciro Gómez

Monitores: Jhon Jairo Revelo Erazo