

INGENIERÍA DE CALOR

INGENIERÍAS.

Dr. Omar Martínez Alvarez.



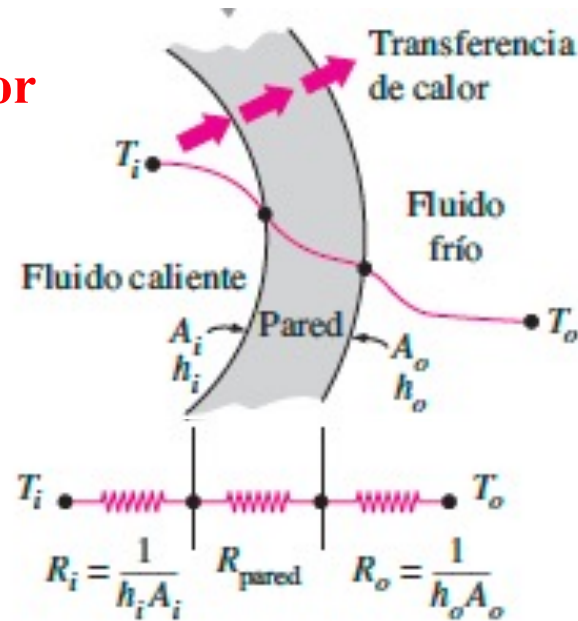
TEMARIO

Diseño de intercambiadores de calor de doble tubo

- *Diferencia de temperatura media logarítmica.*
- *Coeficiente total de transferencia de calor.*
- *Factores de incrustación.*
- *Caidas de presión permisibles.*
- *Métodos NUT.*



Diseño de intercambiadores de calor de doble tubo



$$A_i = \pi D_i L \text{ y } A_o = \pi D_o L$$

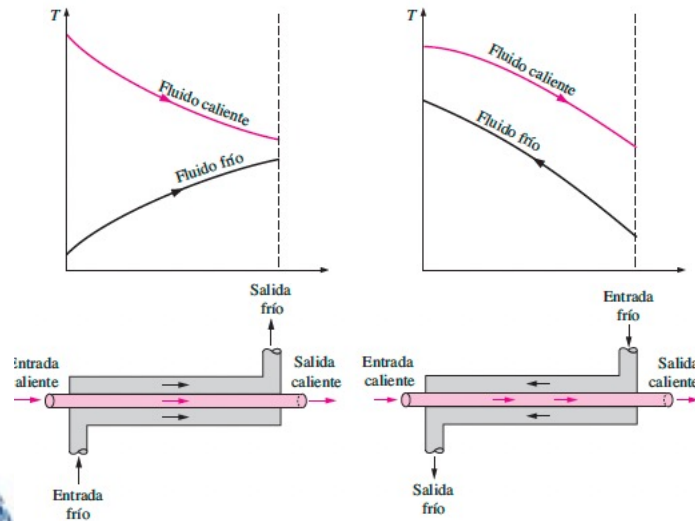
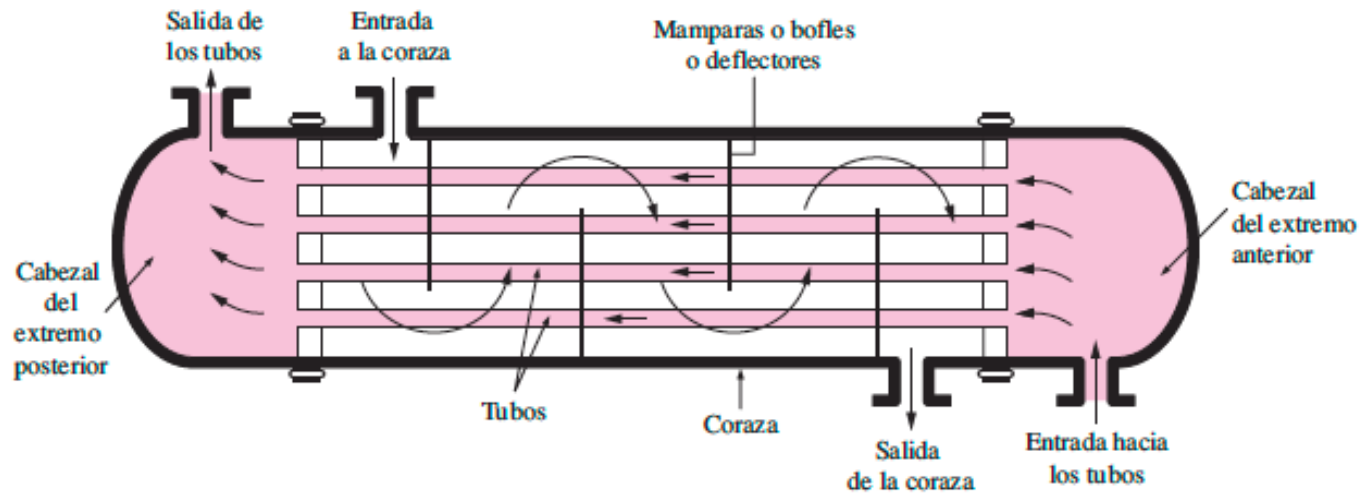
$$R_{pared} = \frac{\ln(D_o/D_i)}{2\pi kL}$$

$$R = R_{total} = R_i + R_{pared} + R_o = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{\ln(D_o/D_i)}{2\pi kL} + \frac{1}{h_o A_o}$$

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{R} = UA_s \Delta T = U_i A_i \Delta T = U_o A_o \Delta T$$

$$\frac{1}{UA_s} = \frac{1}{U_i A_i} = \frac{1}{U_o A_o} = R = \frac{1}{h_i A_i} + R_{pared} + \frac{1}{h_o A_o}$$





$$\frac{1}{UA_s} = \frac{1}{U_i A_i} = \frac{1}{U_o A_o} = R = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{R_{f,i}}{A_i} + \frac{\ln(D_o/D_i)}{2\pi k L} + \frac{R_{f,o}}{A_o} + \frac{1}{h_o A_o}$$

Ejemplos

Se va a enfriar aceite caliente en un intercambiador de calor de doble tubo, a contraflujo. El tubo interior de cobre tiene un diámetro de 2 cm y un espesor despreciable. El diámetro interior del tubo exterior (la coraza) es de 3 cm. Por el tubo fluye agua a razón de 0.5 kg/s y el aceite por espacio anular a razón de 0.8 kg/s. Tomando las temperaturas promedio del agua y del aceite como 45°C y 80°C, respectivamente, determine el coeficiente total de transferencia de calor de este intercambiador.

$$\frac{1}{UA_s} = \frac{1}{U_i A_i} = \frac{1}{U_o A_o} = R = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{R_{f,i}}{A_i} + \frac{\ln\left(\frac{D_o}{D_i}\right)}{2\pi k L} + \frac{R_{f,o}}{A_o} + \frac{1}{h_o A_o}$$

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_o}$$

$$V = \frac{m}{\rho A} = \frac{m}{\rho \left(\frac{1}{4}\pi D^2\right)} = \frac{(0.5 \frac{kg}{s})}{(990.1 \frac{kg}{m^3}) \left(\frac{1}{4}\pi (0.02m)^2\right)} = 1.61 m/s$$

$$Re = \frac{VD}{\nu} = \frac{(1.61m/s)(0.02 m)}{(0.602 \times 10^{-6} \frac{m^2}{s})} = 53\,490 \quad \text{Turbulento}$$

	ρ (kg/m ³)	K (W/m °C)	Pr	ν (m ² /s)
Agua a 45°C	990.1	0.637	3.91	0.602x10 ⁻⁶
Aceite 80°C	852	0.138	499.3	3.794 x 10 ⁻⁵



$$Nu = \frac{hD}{k} = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} = 0.023 (53\,490)^{0.8} (3.91)^{0.4} = 240.6$$

$$h = \frac{kNu}{D} = \frac{0.637 \frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ C}}{0.02 \text{ m}} * 240.6 = 7663 \frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ C}$$

Aceite

$$D_h = 0.01 \text{ m}$$

$$V = \frac{m}{\rho A c} = \frac{m}{\rho (\frac{1}{4} \pi (D_o^2 - D_i^2))} = \frac{(0.8 \frac{kg}{s})}{(852 \frac{kg}{m^3}) (\frac{1}{4} \pi (0.03^2 - 0.02^2 m^2))} = 2.39 \text{ m/s}$$

$$D_i/D_o = 0.667$$

$$Re = \frac{VD}{v} = \frac{(2.39 \text{ m/s})(0.01 \text{ m})}{(3.794 \times 10^{-5} \frac{m^2}{s})} = 630 \quad \text{Laminar}$$

$$h = \frac{kNu}{D_h} = \frac{0.138 \frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ C}}{0.01 \text{ m}} * 5.45 = 75.2 \frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ C}$$

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_o}$$

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_o}} = \frac{1}{\frac{1}{7663} + \frac{1}{75.2}} = 74.5 \frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ C}$$

TABLA 11-3

Número de Nusselt para flujo laminar completamente desarrollado en una corona circular con una de las superficies aislada y la otra isotérmica (Kays y Perkins, 1972).

D_i/D_o	Nu_i	Nu_o
0.00	—	3.66
0.05	17.46	4.06
0.10	11.56	4.11
0.25	7.37	4.23
0.50	5.74	4.43
1.00	4.86	4.86

$$y = y_a + (x - x_a) \frac{(y_b - y_a)}{(x_b - x_a)}$$

0.5	5.74
0.667	5.45
1.00	4.86



Se construye un intercambiador de calor de doble tubo (casco y tubo) con un tubo interior de acero inoxidable ($k = 15.1 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$), de diámetro interior $D_i = 1.5 \text{ cm}$ y diámetro exterior $D_o = 1.9 \text{ cm}$, y un casco exterior cuyo diámetro interior es de 3.2 cm . El coeficiente de transferencia de calor por convección es $h_i = 800 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, sobre la superficie interior del tubo, y $h_o = 1200 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, sobre la superficie exterior. Para un factor de incrustación de $R_{f,i} = 0.0004 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W}$, del lado del tubo, y $R_{f,o} = 0.0001 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W}$, del lado del casco, determine a) la resistencia térmica del intercambiador de calor por unidad de longitud, y b) los coeficientes de transferencia de calor totales U_i y U_o con base en las áreas superficiales interior y exterior del tubo, respectivamente.

$$\begin{aligned} A_i &= \pi D_i L = 0.0471 \text{ m}^2 \\ A_o &= \pi D_o L = 0.0597 \text{ m}^2 \end{aligned} \quad \frac{1}{UA_s} = \frac{1}{U_i A_i} = \frac{1}{U_o A_o} = R = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{R_{f,i}}{A_i} + \frac{\ln\left(\frac{D_o}{D_i}\right)}{2\pi k L} + \frac{R_{f,o}}{A_o} + \frac{1}{h_o A_o}$$

$$R = \frac{1}{h_i A_i} = \frac{1}{800 * 0.0471} = 0.02654 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

$$U_i = \frac{1}{R A_i} = \frac{1}{0.0532 * 0.0471}$$

$$R = \frac{R_{f,i}}{A_i} = \frac{0.0004}{0.0471} = 0.00849 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

$$= 399 \text{ W / m}^2\text{ } ^\circ\text{C}$$

$$R = \frac{\ln\left(\frac{D_o}{D_i}\right)}{2\pi k L} = \frac{\ln(0.019/0.015)}{2\pi(15.1 * 1)} = 0.0025 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

$$U_o = \frac{1}{R A_o} = \frac{1}{0.0532 * 0.0597}$$

$$R = \frac{R_{f,o}}{A_o} = \frac{0.0001}{0.0597} = 0.00168 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

$$= 315 \text{ W / m}^2\text{ } ^\circ\text{C}$$

$$R = \frac{1}{h_o A_o} = \frac{1}{1200 * 0.0597} = 0.01396 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

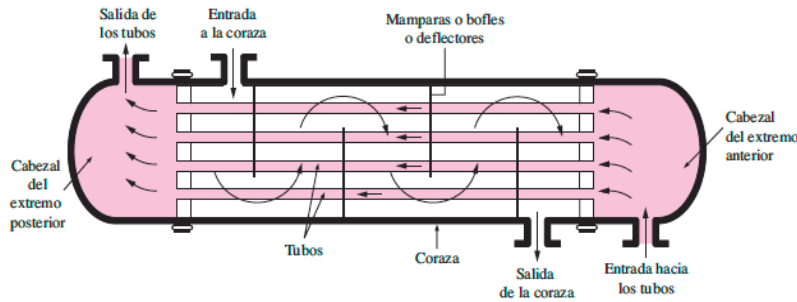
$$R_{total} = 0.0532 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$



Se va a enfriar aceite caliente en un intercambiador de calor de doble tubo, a contraflujo. El tubo interior de cobre tiene un diámetro de 4 cm y un espesor despreciable. El diámetro interior del tubo exterior (la coraza) es de 3 cm. Por el tubo fluye agua a razón de 0.6 kg/s y el aceite por espacio anular a razón de 0.9 kg/s. Tomando las temperaturas promedio del agua y del aceite como 55°C y 90°C, respectivamente, determine el coeficiente total de transferencia de calor de este intercambiador. (repita el procedimiento cambiando aceite por metanol a 70°C, que pudiera concluir al respecto)

Se construye un intercambiador de calor de doble tubo (casco y tubo) con un tubo interior de acero inoxidable ($k = 15.1 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$), de diámetro interior $D_i = 2.3 \text{ cm}$ y diámetro exterior $D_o = 2.9 \text{ cm}$, y un casco exterior cuyo diámetro interior es de 3.8 cm. El coeficiente de transferencia de calor por convección es $h_i = 1000 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, sobre la superficie interior del tubo, y $h_o = 1600 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, sobre la superficie exterior. Para un factor de incrustación de $R_{f,i} = 0.0005 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W}$, del lado del tubo, y $R_{f,o} = 0.0002 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W}$, del lado del casco, determine a) la resistencia térmica del intercambiador de calor por unidad de longitud, y b) los coeficientes de transferencia de calor totales U_i y U_o con base en las áreas superficiales interior y exterior del tubo, respectivamente.





intercambiadores de calor operan en largos períodos de tiempo (flujo estacionario)

Gasto de masa

Temperatura y velocidad

Poco cambio en el fluido

Energía cinética y potencial

Conducción axial en el tubo

Perfectamente aislado (fluido)

Primera ley de la termodinámica

Razón de capacidad calorífica

$$\dot{Q} = \dot{m}_c \underline{C_{pc}} (T_{c,sal} - T_{c,ent})$$

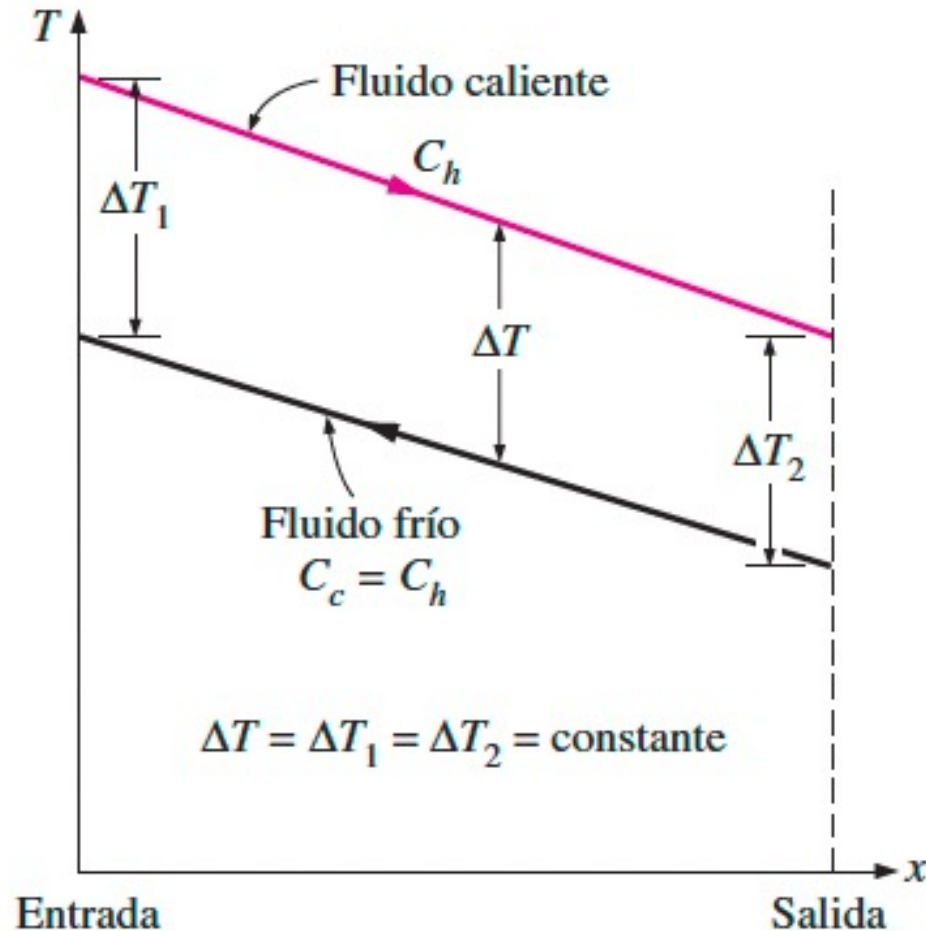
$$\dot{Q} = \dot{m}_h \underline{C_{ph}} (T_{h,ent} - T_{h,sal})$$



$$\dot{Q} = C_c (T_{c,sal} - T_{c,ent})$$

$$\dot{Q} = C_h (T_{h,ent} - T_{h,sal})$$

única ocasión en que la elevación de la temperatura de un fluido frío es igual a la caída de temperatura del fluido caliente es cuando las razones de capacidad calorífica de los dos fluidos son iguales



Condensadores y calderas

Cambio de fase

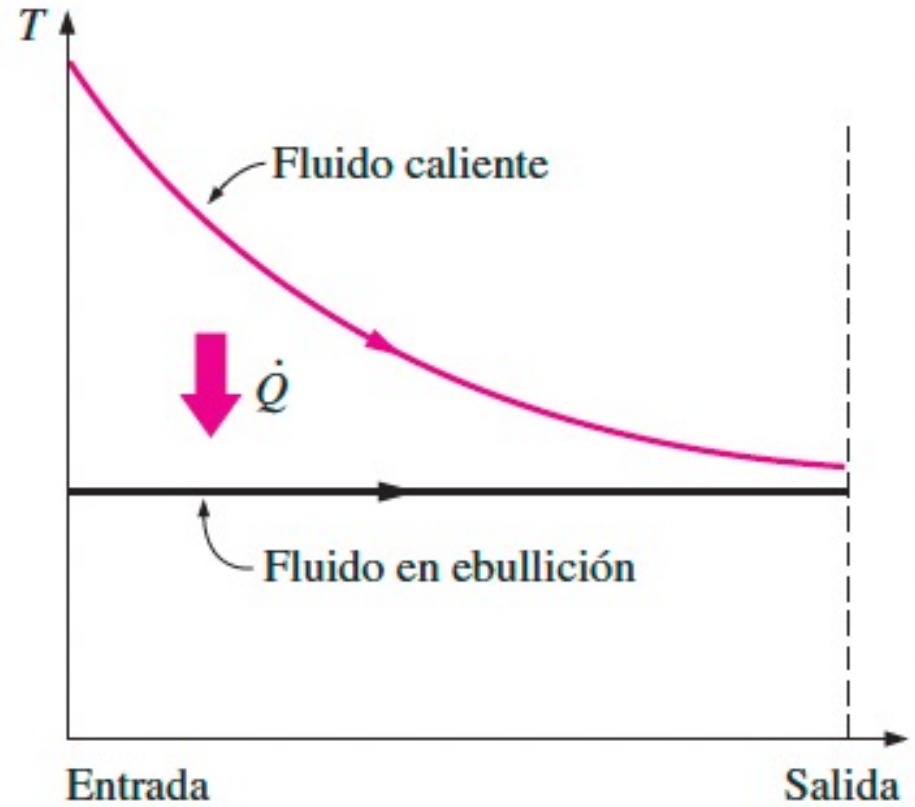
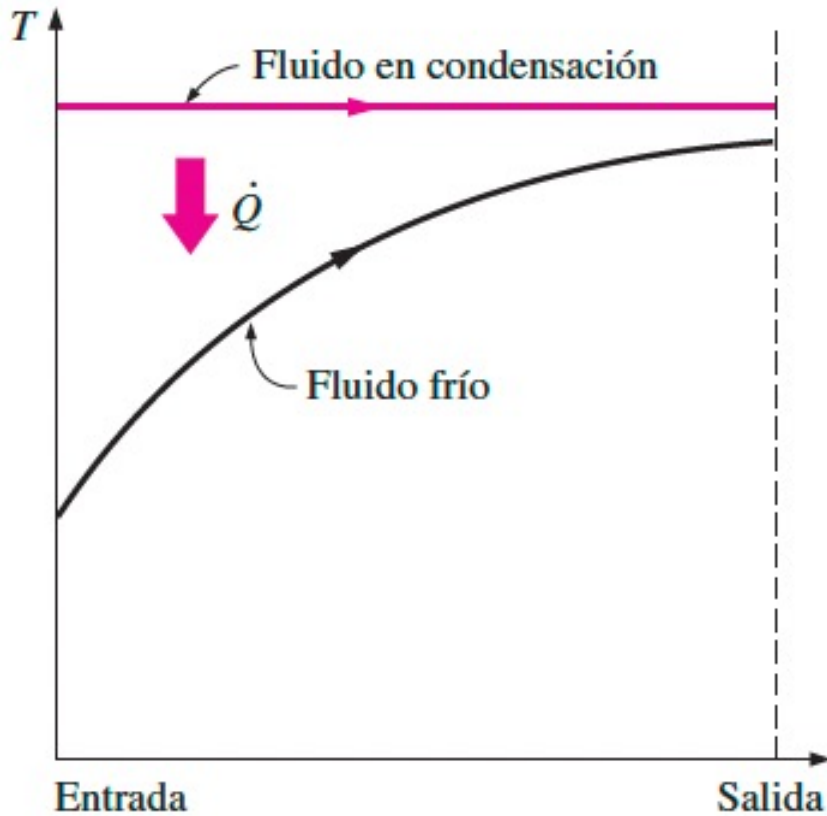
Entalpía_{evap} T y P esp.

$$\dot{Q} = \dot{m} h_{fg}$$

Rapidez evaporación ó condensación.



Infinito.



$$\dot{Q} = \dot{U} A_s \Delta T_m$$



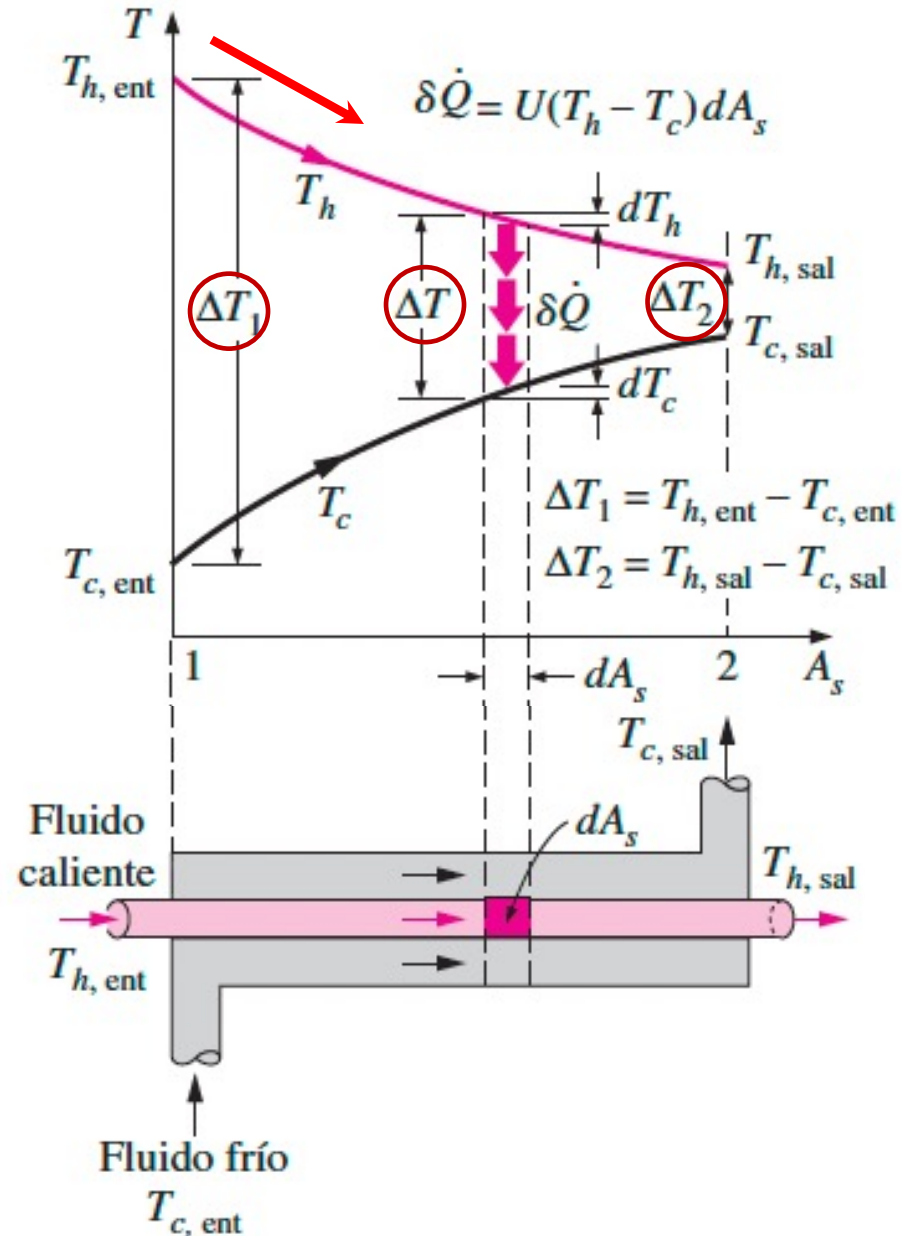
Diferencia de temperatura logarítmica .

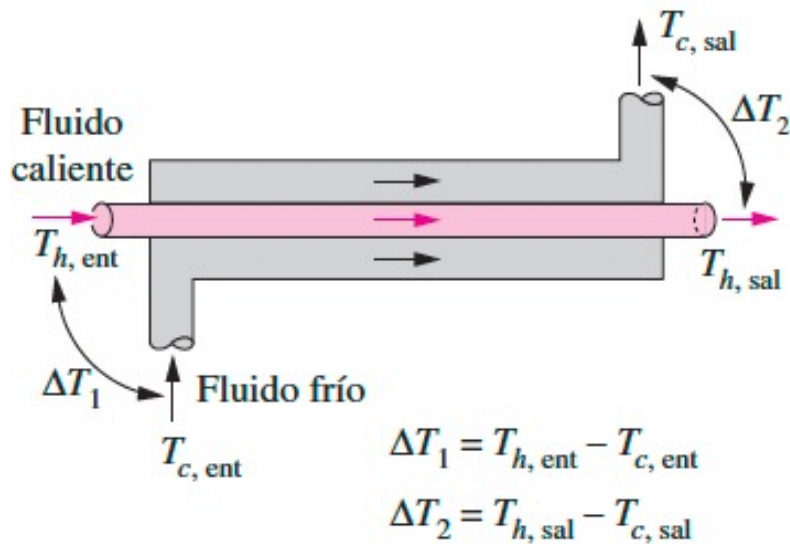
$$\delta \dot{Q} = -\dot{m}_h C_{ph} dT_h$$

$$\delta \dot{Q} = \dot{m}_c C_{pc} dT_c$$

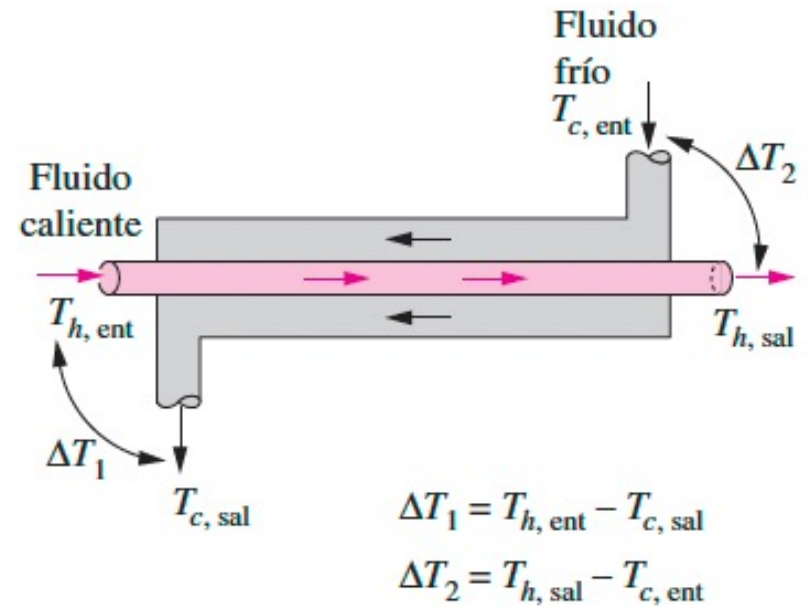
$$\dot{Q} = \dot{U} A_s \Delta T_m$$

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)}$$



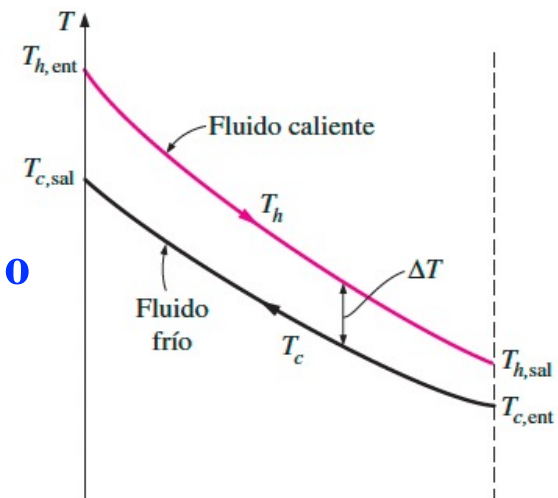


a) Intercambiadores de calor de flujo paralelo



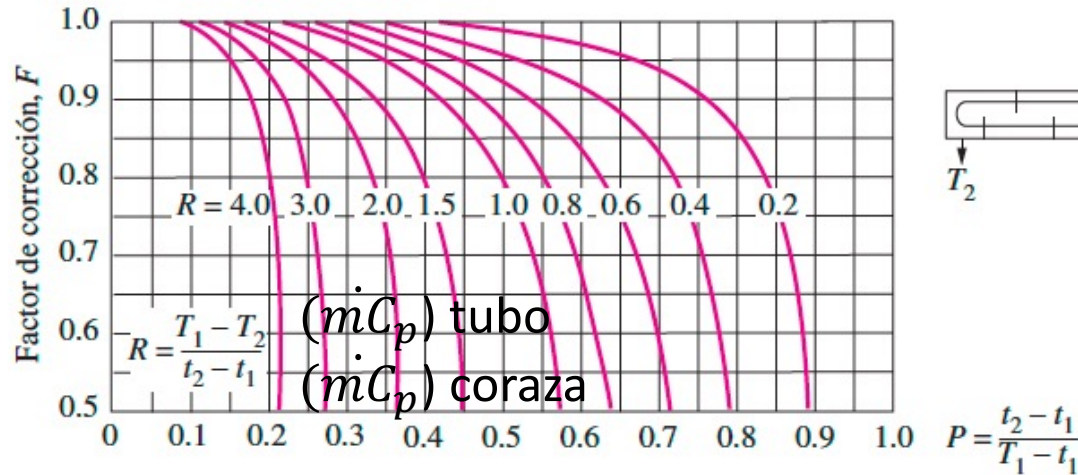
b) Intercambiadores de calor a contraflujo

Contraflujo

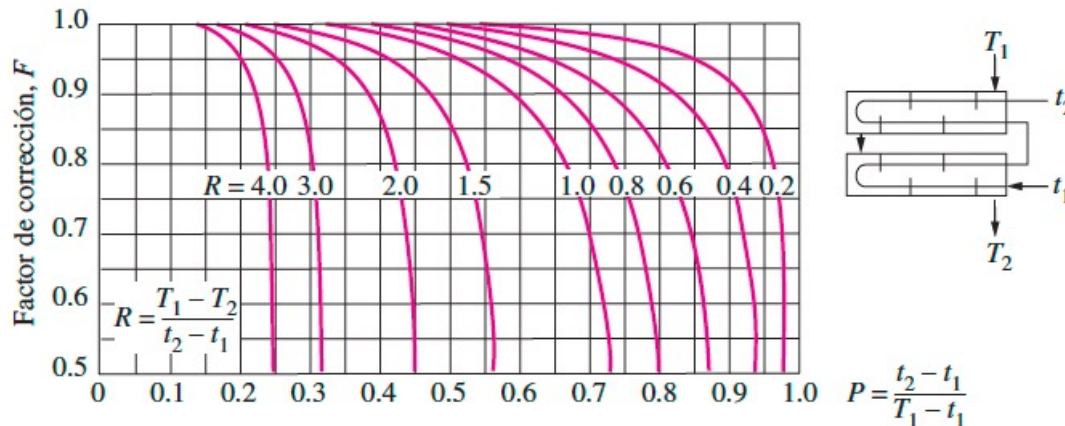


Factor de corrección

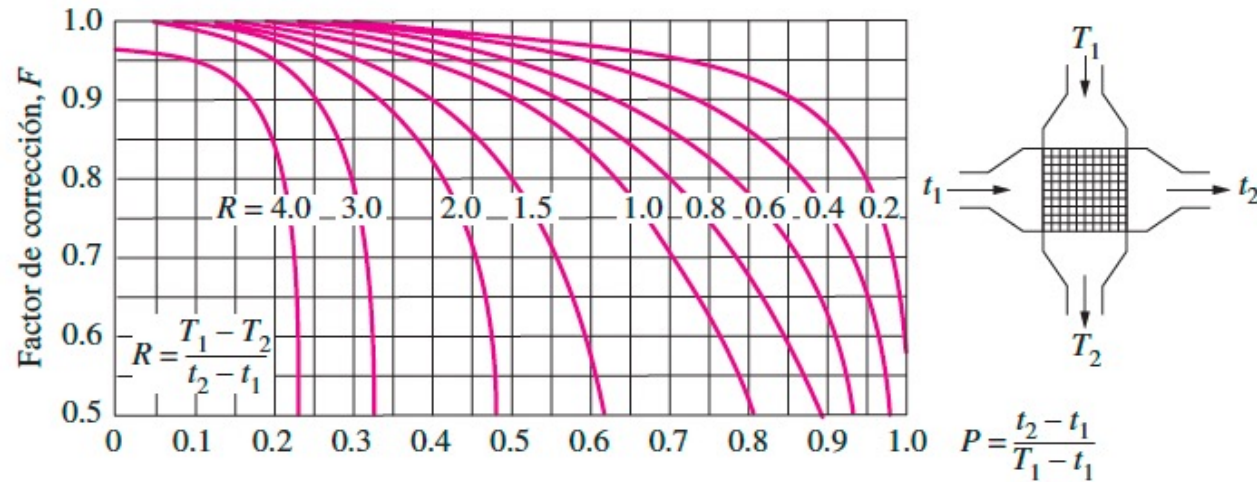
$$\Delta T_m = F \Delta T_{mCF} \quad F \leq 1$$



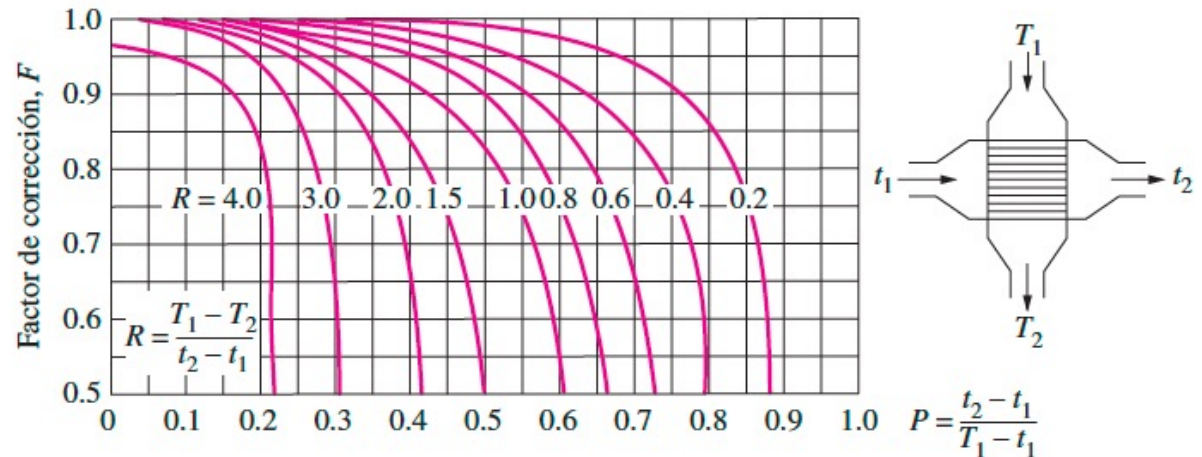
a) Un paso por la coraza y 2, 4, 6, etc. (cualquier múltiplo de 2) pasos por los tubos



b) Dos pasos por la coraza y 4, 8, 12, etc. (cualquier múltiplo de 4) pasos por los tubos



c) Flujo cruzado de un solo paso con los dos fluidos de flujo no *mezclado*



d) Flujo cruzado de un solo paso con uno de los fluidos de flujo *mezclado* y el otro no *mezclado*

Ejemplo

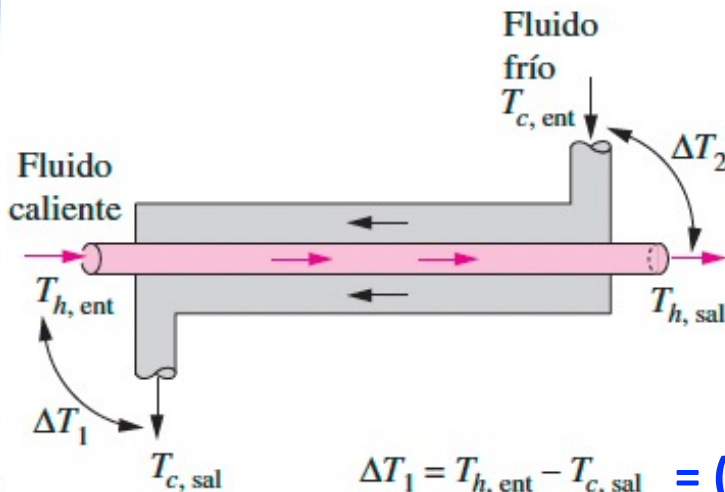
Se va a condensar vapor de agua de una planta generadora a una temperatura de 30°C, con agua de enfriamiento de un lago cercano, la cual entra en los tubos del condensador a 14°C y sale a 22°C. El área superficial de los tubos es de 45 m² y el coeficiente de transferencia de calor total es de 2100 W/m² °C. Determine el gasto de masa necesario de agua de enfriamiento y la razón de la condensación del vapor en el condensador..

$$C_p \text{ Agua } 18^\circ\text{C} = 4184 \text{ J/kg } ^\circ\text{C}$$

$$h_{fg} \text{ Agua } 30^\circ\text{C} = 2431 \text{ kJ/kg}$$

Contraflujo

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)} = \frac{8 - 16}{\ln(8/16)} = 11.5^\circ\text{C}$$



$$\dot{Q} = \dot{U} A_s \Delta T_m = (2100 * 45 * 11.5) = 1087 \text{ kW}$$

$$\Delta T_1 = T_{h, \text{ent}} - T_{c, \text{sal}} = (30 - 22)^\circ\text{C} = 8^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_2 = T_{h, \text{sal}} - T_{c, \text{ent}} = (30 - 14)^\circ\text{C} = 16^\circ\text{C}$$

b) Intercambiadores de calor a contraflujo

$$\dot{Q} = \dot{m} C_p (T_{sal} - T_{ent})$$

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}}{C_p (T_{sal} - T_{ent})} = \frac{1087 \text{ kJ/s}}{(4187 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}) (22 - 14)^\circ\text{C}}$$
$$= 32.5 \text{ kg/s}$$

$$\dot{Q} = \dot{m} h_{fg}$$

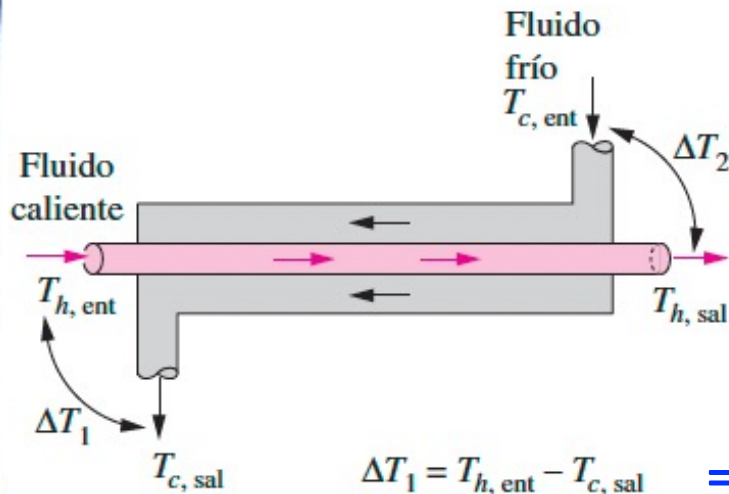
$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}}{h_{fg}} = \frac{1087 \text{ kJ/s}}{2431 \text{ kJ/kg}} = 0.45 \text{ kg/s}$$



Se va a calentar agua en un intercambiador de tubo doble a contraflujo, desde 20 °C hasta 80 °C, a razón de 1.2 kg/s. El calentamiento se va a realizar por medio de agua geotérmica de la que se dispone a 160 °C con un gasto de masa de 2 kg/s. El tubo interior es de pared delgada y tiene un diámetro de 1.5 cm. Si el coeficiente de transferencia de calor total del intercambiador es de 640 W/m² °C, determine la longitud requerida de ese intercambiador para lograr el calentamiento deseado.

$$C_p \text{ Agua } 20^{\circ}\text{C} = 4.184 \text{ kJ/kg }^{\circ}\text{C} \quad C_p \text{ Agua } 160^{\circ}\text{C} = 4.31 \text{ kJ/kg }^{\circ}\text{C}$$

Contraflujo



$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)} = \frac{80 - 105}{\ln(80/105)} = 91.9^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta T_1 = T_{h, \text{ent}} - T_{c, \text{sal}} = (160 - 80)^{\circ}\text{C} = 80^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta T_2 = T_{h, \text{sal}} - T_{c, \text{ent}} = (125 - 20)^{\circ}\text{C} = 105^{\circ}\text{C}$$

b) Intercambiadores de calor a contraflujo

$$\dot{Q} = \dot{m} C_p (T_{sal} - T_{ent}) = 1.2 * 4.18 * (80 - 20)$$

$$= \mathbf{301 \text{ kW}}$$

$$T_{sal} = T_{ent} - \frac{\dot{Q}}{\dot{m}C_p} = \frac{301 \text{ kW}}{(2 \text{ kg/s}) \left(4.31 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \text{ } ^\circ\text{C}}\right)} = \mathbf{125 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

$$\dot{Q} = \dot{U} A_s \Delta T_m$$

$$A_{sal} = \frac{\dot{Q}}{U \Delta T_m} = \frac{301000 \text{ W}}{(640 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}})(91.9 \text{ } ^\circ\text{C})} = \mathbf{5.12 \text{ m}^2}$$

$$A_s = \pi D L \quad L = \frac{A_s}{\pi D} = \frac{5.12 \text{ m}^2}{\pi (0.015 \text{ m})} = \mathbf{109 \text{ m}}$$



Se va a condensar vapor de agua de una planta generadora a una temperatura de 60°C , con agua de enfriamiento de un lago cercano, la cual entra en los tubos del condensador a 30°C y sale a 40°C . El área superficial de los tubos es de 65 m^2 y el coeficiente de transferencia de calor total es de $3200\text{ W/m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Determine el gasto de masa necesario de agua de enfriamiento y la razón de la condensación del vapor en el condensador..

Se va a calentar agua en un intercambiador de tubo doble a contraflujo, desde $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, a razón de 1.5 kg/s . El calentamiento se va a realizar por medio de agua geotérmica de la que se dispone a $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ con un gasto de masa de 2.4 kg/s . El tubo interior es de pared delgada y tiene un diámetro de 1.3 cm . Si el coeficiente de transferencia de calor total del intercambiador es de $660\text{ W/m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$, determine la longitud requerida de ese intercambiador para lograr el calentamiento deseado.



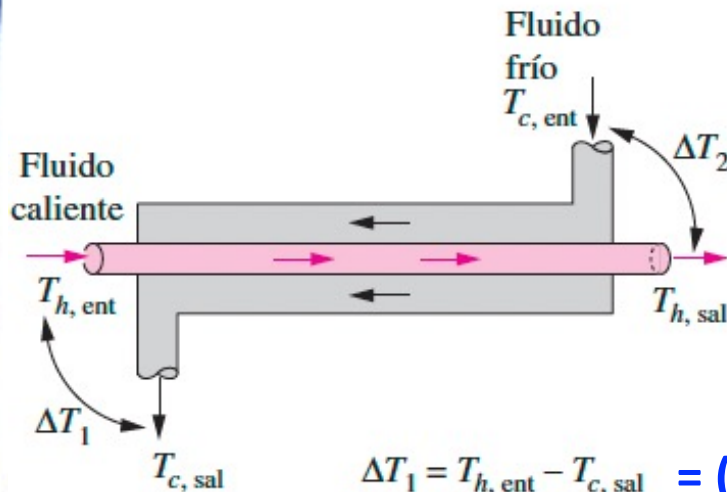
Se va a condensar vapor de agua de una planta generadora a una temperatura de 60°C, con agua de enfriamiento de un lago cercano, la cual entra en los tubos del condensador a 30°C y sale a 40°C. El área superficial de los tubos es de 65 m² y el coeficiente de transferencia de calor total es de 3200 W/m² °C. Determine el gasto de masa necesario de agua de enfriamiento y la razón de la condensación del vapor en el condensador..

$$C_p \text{ Agua } 35^\circ\text{C} = 4178 \text{ J/kg } ^\circ\text{C}$$

$$h_{fg} \text{ Agua } 60^\circ\text{C} = 2359 \text{ kJ/kg}$$

Contraflujo

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)} = \frac{20 - 30}{\ln(20/30)} = 24.66 ^\circ\text{C}$$



$$\dot{Q} = \dot{U} A_s \Delta T_m = (3200 * 65 * 24.66) = 5129.91 \text{ kW}$$

$$\Delta T_1 = T_{h, \text{ent}} - T_{c, \text{sal}} = (60 - 40) ^\circ\text{C} = 20^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_2 = T_{h, \text{sal}} - T_{c, \text{ent}} = (60 - 30) ^\circ\text{C} = 30^\circ\text{C}$$

b) Intercambiadores de calor a contraflujo

$$\dot{Q} = \dot{m} C_p (T_{sal} - T_{ent})$$

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}}{C_p (T_{sal} - T_{ent})} = \frac{5129.91 \text{ kJ/s}}{(4.178 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}) (40 - 30)^\circ\text{C}}$$
$$= \mathbf{122.78 \text{ kg/s}}$$

$$\dot{Q} = \dot{m} h_{fg}$$

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}}{h_{fg}} = \frac{5129.91 \text{ kJ/s}}{2359 \text{ kJ/kg}} = \mathbf{2.17 \text{ kg/s}}$$



Se va a calentar agua en un intercambiador de tubo doble a contraflujo, desde 30 °C hasta 100 °C, a razón de 1.5 kg/s. El calentamiento se va a realizar por medio de agua geotérmica de la que se dispone a 180 °C con un gasto de masa de 2.4 kg/s. El tubo interior es de pared delgada y tiene un diámetro de 1.3 cm. Si el coeficiente de transferencia de calor total del intercambiador es de 660 W/m² °C, determine la longitud requerida de ese intercambiador para lograr el calentamiento deseado.

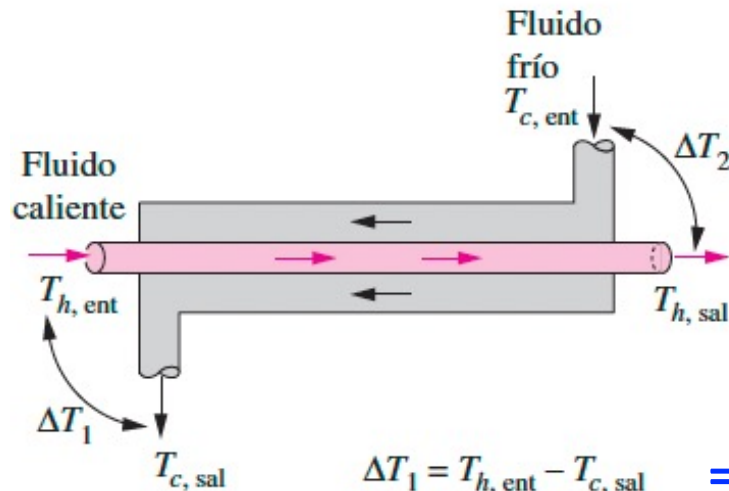
$$C_p \text{ Agua } 30^{\circ}\text{C} = 4.178 \text{ kJ/kg }^{\circ}\text{C} \quad C_p \text{ Agua } 180^{\circ}\text{C} = 4.41 \text{ kJ/kg }^{\circ}\text{C}$$

$$\dot{Q} = \dot{m} C_p (T_{sal} - T_{ent}) = 1.5 * 4.178 * (100 - 30) \\ = 438.69 \text{ kW}$$

$$T_{sal} = T_{ent} - \frac{\dot{Q}}{\dot{m}C_p} = \frac{438.69 \text{ kW}}{(2.4 \text{ kg/s}) \left(4.41 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} ^{\circ}\text{C} \right)} = 138.55 ^{\circ}\text{C}$$



Contraflujo



$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)} = \frac{80 - 108.55}{\ln(80 / 108.55)} = 93.55 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_1 = T_{h, \text{ent}} - T_{c, \text{sal}} = (180 - 100) \text{ } ^\circ\text{C} = 80^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_2 = T_{h, \text{sal}} - T_{c, \text{ent}} = (138.55 - 30) \text{ } ^\circ\text{C} = 108.55^\circ\text{C}$$

b) Intercambiadores de calor a contraflujo

$$\dot{Q} = \dot{U} A_s \Delta T_m$$

$$A_{sal} = \frac{\dot{Q}}{U \Delta T_m} = \frac{438690 \text{ W}}{(660 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}})(93.55 \text{ } ^\circ\text{C})} = 7.10 \text{ m}^2$$

$$A_s = \pi D L \quad L = \frac{A_s}{\pi D} = \frac{7.10 \text{ m}^2}{\pi (0.013 \text{ m})} = 173.96 \text{ m}$$



DISEÑO Y SIMULACIÓN

