

Ejemplo detallado: Intercambiador de Coraza y Tubos (métodos LMTD y NTU) con propiedades calculadas por CoolProp

Preparado para estudiantes de Transferencia de Calor

27 de octubre de 2025

Resumen del problema

Se analiza un intercambiador de *coraza y tubos* (shell-and-tube) con las siguientes condiciones de diseño (ejemplo didáctico):

- Fluido caliente (shell): agua caliente, $\dot{m}_s = 1,200 \text{ kg/s}$, $T_{s,\text{in}} = 120,0^\circ\text{C}$ (sobrepresión permitida), $T_{s,\text{out,deseada}} = 80,00^\circ\text{C}$.
- Fluido frío (tubos): agua, $\dot{m}_t = 2,000 \text{ kg/s}$, $T_{t,\text{in}} = 20,00^\circ\text{C}$, $T_{t,\text{out}}$ desconocida.
- Geometría de referencia: 1 fila de tubos: diámetro de tubo $d_o = 19,05 \text{ mm}$ (3/4"), espesor de pared $t = 1,240 \text{ mm}$, diámetro interno del haz de tubos efectivo (diámetro de coraza) $D_{\text{shell}} = 0,3500 \text{ m}$, longitud activa de tubo $L_{\text{tube}} = 3,000 \text{ m}$, número de tubos $N_t = 50$.
- Material del tubo: cobre o acero inoxidable (a efectos del ejemplo usaremos $k_{\text{tube}} = 16,00 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ para acero inoxidable).
- Resistencia por ensuciamiento: $R_{f,s} = R_{f,t} = 0,000 \text{ } 100 \text{ } 0 \text{ m}^2\text{K/W}$ (valor ejemplo pequeño).

Objetivos

1. Calcular el área necesaria y verificar si con la geometría propuesta se alcanza la temperatura objetivo del fluido caliente usando el método LMTD. Para LMTD se utilizará un *factor de corrección* F y se permite que el usuario lo modifique; se propone $F = 0,85$ para geometrías de una pasada de coraza / dos pasadas de tubos como valor inicial de referencia (tabla típica).
2. Repetir el diseño y la predicción usando la eficacia-NTU (no requiere F) y comparar resultados.
3. Calcular los coeficientes de convección en tubo y coraza usando correlaciones: Dittus-Boelter para el lado tubo (flujo interno turbulento) y una correlación tipo Kern simplificada para el lado coraza (para propósitos docentes).

Modelo físico y correlaciones

Propiedades

Las propiedades termofísicas se calculan con CoolProp en las temperaturas de película:

$$T_{\text{film},t} = \frac{T_{t,\text{in}} + T_{t,\text{out,est}}}{2}, \quad T_{\text{film},s} = \frac{T_{s,\text{in}} + T_{s,\text{out,est}}}{2}.$$

Tubo (lado de tubos)

Velocidad media en tubo (suponiendo un solo pase por tubo):

$$u_t = \frac{\dot{m}_t}{\rho_t N_t A_{i,t}}, \quad A_{i,t} = \frac{\pi d_i^2}{4}$$

donde $d_i = d_o - 2t$. Números adimensionales:

$$\begin{aligned} \text{Re}_t &= \frac{\rho_t u_t d_i}{\mu_t}, \quad \text{Pr}_t = \frac{c_{p,t} \mu_t}{k_t}, \\ \text{Nu}_t &= 0,023 \text{Re}_t^{0,8} \text{Pr}_t^n \quad (\text{Dittus-Boelter}), \quad n = 0,4 \text{ si el fluido se enfría,} \\ h_t &= \frac{\text{Nu}_t k_t}{d_i}. \end{aligned}$$

Coraza (lado shell) - correlación estilo Kern (simplificada)

Se define un *diámetro hidráulico* aproximado del paso de coraza $D_{h,s} \approx D_{shell} - N_t d_o / \pi$ y un área de paso aproximada $A_{s,flow} \approx \pi D_{shell}^2 / 4 - N_t \pi d_o^2 / 4$ (resta del área ocupada por tubos). Con esto:

$$\begin{aligned} u_s &\approx \frac{\dot{m}_s}{\rho_s A_{s,flow}}, \quad \text{Re}_s = \frac{\rho_s u_s D_{h,s}}{\mu_s}, \quad \text{Pr}_s = \frac{c_{p,s} \mu_s}{k_s}, \\ \text{Nu}_s &\approx 0,36 \text{Re}_s^{0,55} \text{Pr}_s^{0,33} \quad (\text{Kern-type, rango típico}), \\ h_s &= \frac{\text{Nu}_s k_s}{D_{h,s}}. \end{aligned}$$

Nota: la correlación shell-side real (Bell-Delaware, etc.) es más compleja; la usada aquí es adecuada para ejemplos y aprendizaje.

Coefficiente global de transferencia de calor

Tomando como base el área externa del tubo $A_o = \pi d_o L_{tube} N_t$:

$$\frac{1}{U_o} = \frac{1}{h_o} + \frac{d_o}{d_i} \frac{\ln(d_o/d_i)}{2k_{tube}} + \frac{d_o}{d_i} \frac{1}{h_i} + R_{f,s} + R_{f,t} \frac{d_o}{d_i}.$$

(Se han adaptado factores geométricos para pasar entre áreas internas/externas; el estudiante debe verificar unidades y convenciones.)

LMTD con factor de corrección

Para configuración multi-pase se emplea LMTD corregida:

$$\Delta T_{lm,cor} = F \Delta T_{lm,ideal}$$

con $\Delta T_{lm,ideal}$ calculada entre extremos (como en contracorriente) y F tomado desde tablas o estimado (ej. $F \approx 0,85$ para 1-shell-pass / 2-tube-pass).

Eficacia – NTU

Se calcula

$$\text{NTU} = \frac{UA}{C_{\min}}, \quad C_r = \frac{C_{\min}}{C_{\max}},$$

y para la configuración *shell-and-tube* (con pases que aproximan contracorriente) podemos usar la expresión de contracorriente como aproximación:

$$\varepsilon \approx \frac{1 - \exp[-\text{NTU}(1 - C_r)]}{1 - C_r \exp[-\text{NTU}(1 - C_r)]}.$$

Procedimiento numérico (resumen)

1. Estimar temperaturas de película y obtener propiedades con CoolProp.
2. Calcular h_t (tubo) y h_s (coraza) por las correlaciones anteriores.
3. Calcular U y el área disponible A_o ; si A_o es insuficiente, aumentar N_t o L_{tube} .
4. LMTD: calcular ΔT_{lm} , usar F y obtener $\dot{Q} = UAF\Delta T_{lm}$; de \dot{Q} deducir $T_{s,out}$ y $T_{t,out}$ por balance energético.
5. NTU: con A calcular NTU, eficacia y \dot{Q} , comparar temperaturas de salida.

Limitaciones y comentarios

Este ejemplo prioriza claridad pedagógica. Para diseños industriales reales se recomiendan métodos más precisos para el lado shell (Bell–Delaware), considerar distribución de pases, pérdidas por soportes, efectos de baffle, y verificación con curvas $F(R, P)$ específicas.

Código Python (adjunto)

Se entrega un script `shell_tube_lmt_d_n_tube_coolprop.py` que implementa los descritos usando CoolProp. El script permite calcular L_{tube} y F .

Referencias

- Kays, W.M., & London, A.L., *Compact Heat Exchangers*. 2nd Ed.
- Kern, D.Q., *Process Heat Transfer*.
- Incropera et al., *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*.