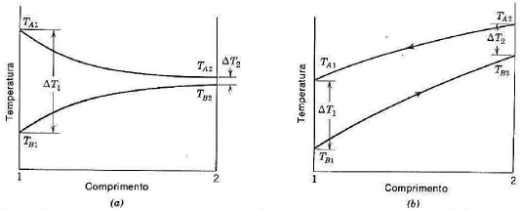
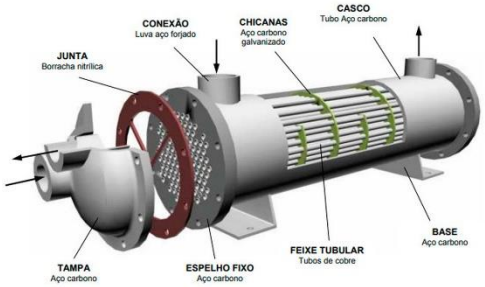
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Escola de Engenharia de Lorena – EEL

Operações Unitárias II





Profª. Drª. Simone Medeiros Sampaio

simonemedeiros@usp.br

Método da efetividade (NUT)

Método da efetividade - NUT

- NUT – Número de unidades de transmissão de calor;
- Usado quando o tipo e dimensionamento do TC são conhecidos, porém as temperaturas de saída dos fluidos não;
- T_f e q precisam ser determinados;
- A efetividade de um trocador de calor é definida como a razão entre a taxa de transferência de calor real e a taxa de transferência de calor máxima possível;

$$\varepsilon = \frac{q_{efetivo}}{q_{\max imo}}$$

$$\varepsilon = f(NUT; C_r)$$

Método da efetividade - NUT

- C... Taxa de capacidade calorífica;

$$C = \dot{m} * Cp \begin{cases} C_q = \dot{m}_q * Cp_q \\ C_f = \dot{m}_f * Cp_f \end{cases}$$

Para o fluido quente

Para o fluido frio

$$C_r = \frac{C_{\min}}{C_{\max}} \qquad (0 \le C_r \le 1)$$

- Análise comparativa de C;

$$q = C_f * (T_{f,s} - T_{f,e}) = C_q * (T_{q,e} - T_{q,s})$$

$$\Delta T_{\max} = T_{q,e} - T_{f,e}$$

- Transferência de calor máxima:

$$T_{f,s} = T_{q,e}$$ Ou:

$$T_{q,s} = T_{f,e}$$

Método da efetividade - NUT

$$q = C * \Delta T$$

$$q_{\max} = C_{\min} * (T_{q,e} - T_{f,e})$$

$$\varepsilon = \frac{q_{efetivo}}{q_{\max imo}}$$

$$q = \varepsilon * q_{\max}$$

$$q = \varepsilon * C_{\min} * (T_{q,e} - T_{f,e})$$

Se: $$q = \boxed{\dot{m}_q * Cp_q} * \Delta T_q = \boxed{\dot{m}_f * Cp_f} * \Delta T_f$$

$$\Delta T_q = \Delta T_f$$

Método da efetividade - NUT

Possibilidades:

$$C_f = C_{\min}$$

$$\varepsilon = \frac{q}{q_{\max imo}} = \frac{C_f * \left(T_{f,s} - T_{f,e}\right)}{C_{\min} * \left(T_{q,e} - T_{f,e}\right)}$$

$$C_q = C_{\min}$$

$$\varepsilon = \frac{q}{q_{\max imo}} = \frac{C_q * \left(T_{q,e} - T_{q,s}\right)}{C_{\min} * \left(T_{q,e} - T_{f,e}\right)}$$

Método da efetividade - NUT

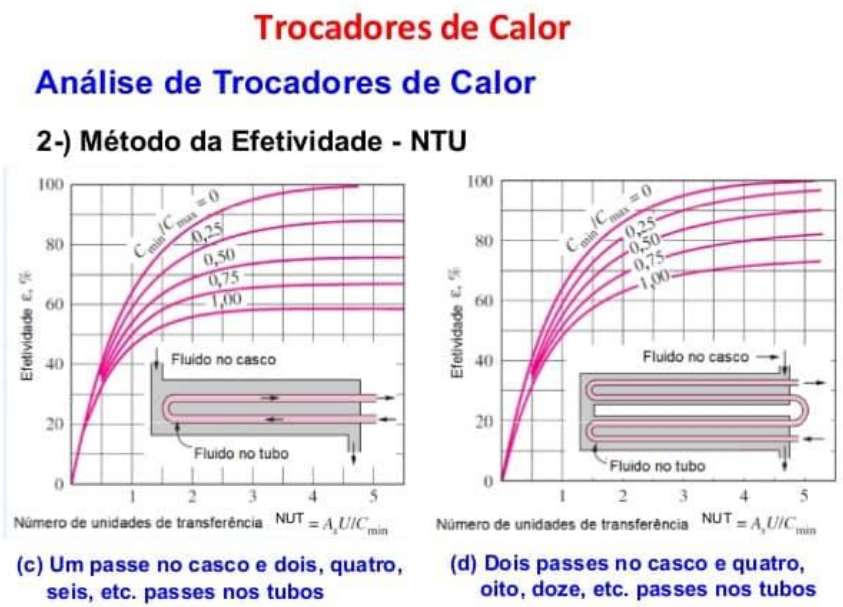
Relação de efetividade nos trocadores de calor:

$$\varepsilon = f(NUT; C_r)$$

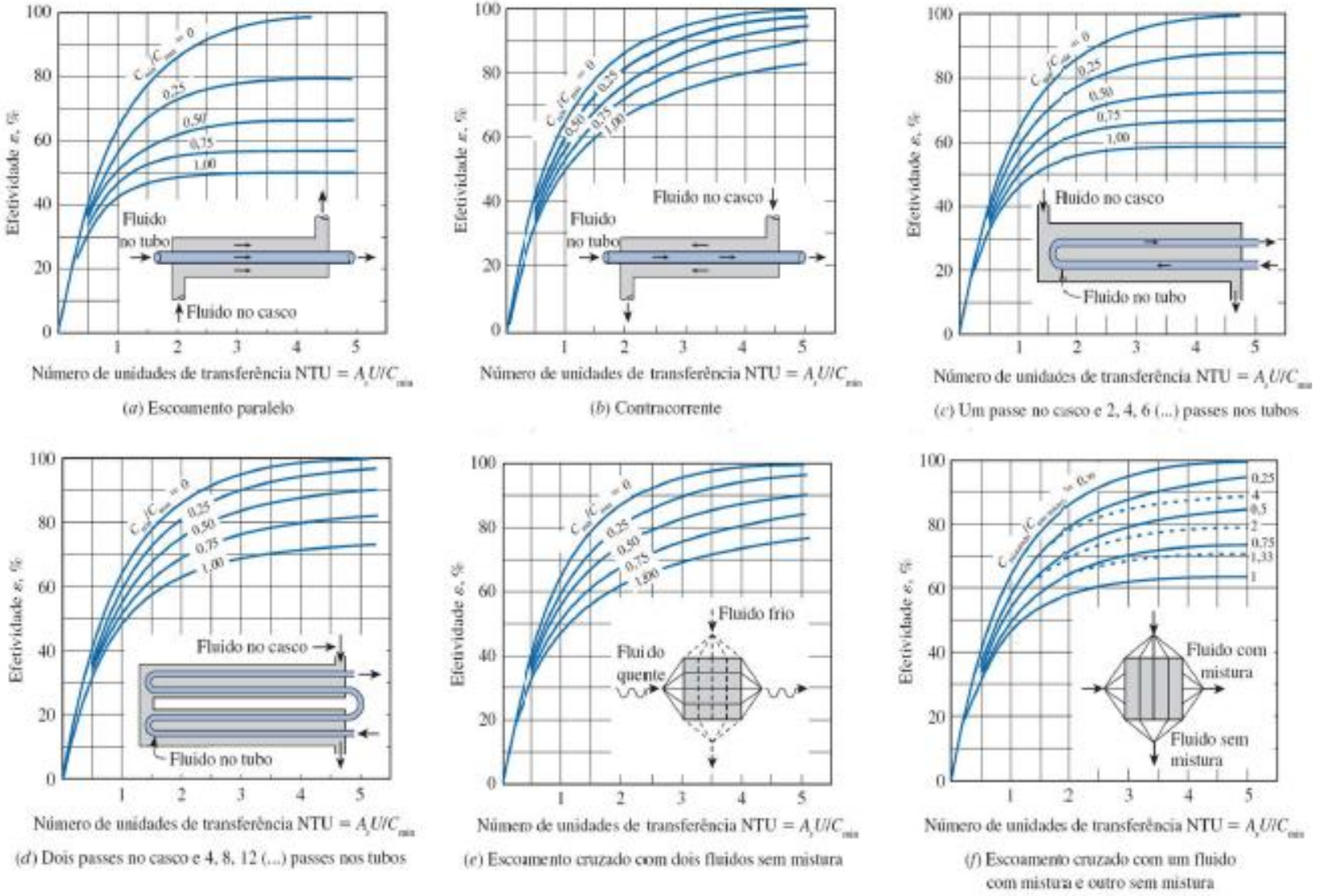
$$\boxed{NUT = \frac{U * A}{C_{\min}}}$$

- Maneiras de obter a relação $\varepsilon = f(NUT; C_r)$

1. Nas tabelas:



Método da efetividade - NUT



(a) Escoamento paralelo

(b) Contracorrente

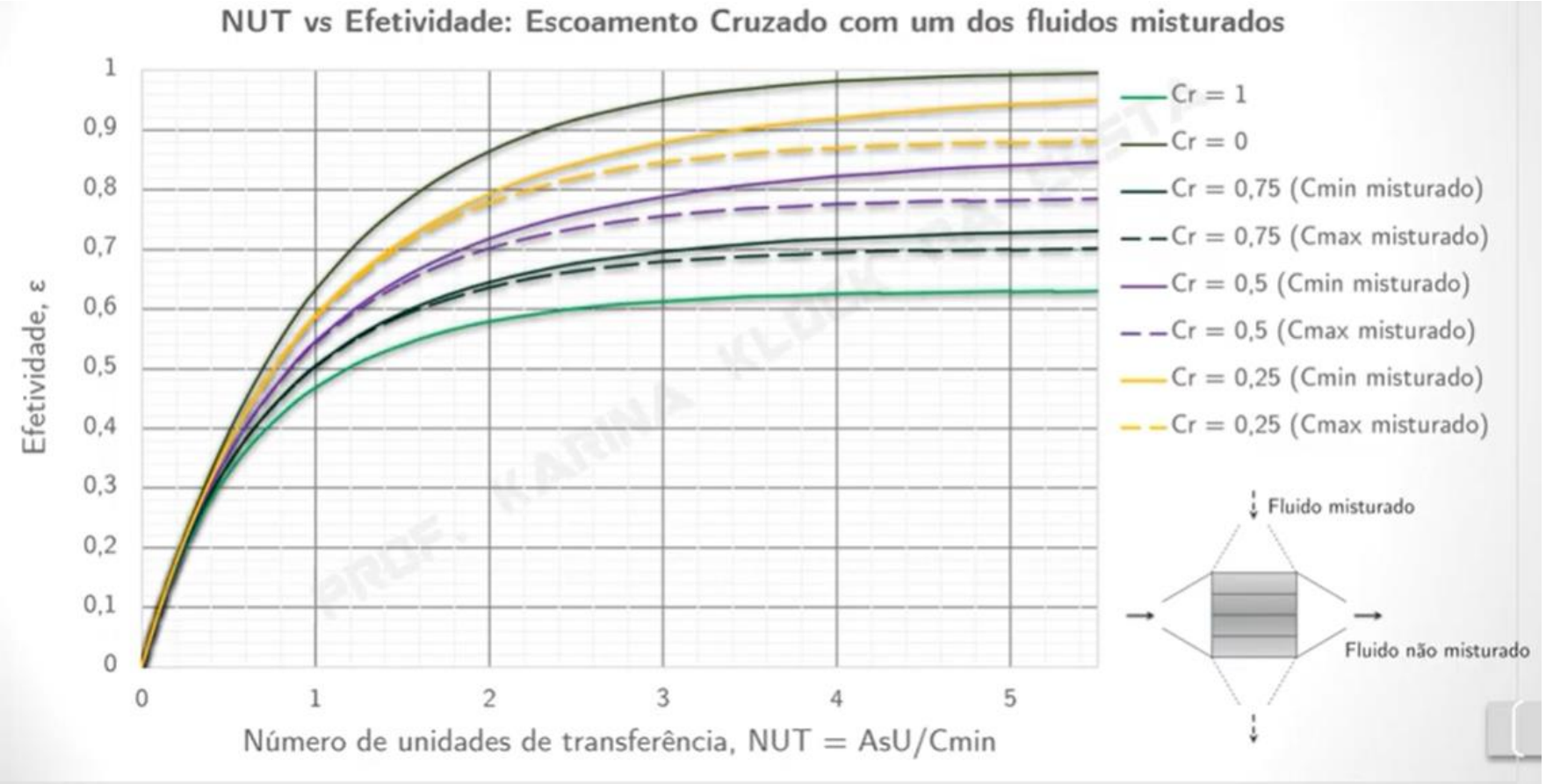
(c) Um passe no casco e 2, 4, 6 (...) passes nos tubos

(d) Dois passes no casco e 4, 8, 12 (...) passes nos tubos

(e) Escoamento cruzado com dois fluidos sem mistura

(f) Escoamento cruzado com um fluido com mistura e outro sem mistura

Método da efetividade - NUT



Método da efetividade - NUT

RELAÇÕES DA EFETIVIDADE PARA TROCADORES DE CALOR

Trocador tubular:

Correntes paralelas $\varepsilon = \dfrac{1 - e^{[-N.(1+C)]}}{1 + C}$

Contracorrente $\varepsilon = \dfrac{1 - e^{[-N.(1-C)]}}{1 - C.e^{[-N.(1-C)]}}$

Contracorrente, Cr = 1 $\varepsilon = \dfrac{N}{N + 1}$

Trocador de calor de casco e tubos:

1 passe no casco e 2, 4 ou 6 passses nos tubos:

$$\varepsilon = 2.\left\{1 + C + \left(1 + C^2\right)^{1/2}.\frac{1 + e\left[-N.\left(1 + C^2\right)^{1/2}\right]}{1 - e\left[N.\left(1 + C^2\right)^{1/2}\right]}\right\}^{-1}$$

Trocador com condensação/ebulição, Cr = 0 $\varepsilon = 1 - e^{-N}$

RELAÇÕES DE NUT (N) PARA TROCADORES DE CALOR

Trocador tubular:

Correntes paralelas $N = \dfrac{-\ln[1 - (1 + C).\varepsilon]}{1 + C}$

Contracorrente $N = \dfrac{1}{C - 1}.\ln\left(\dfrac{\varepsilon - 1}{C.\varepsilon - 1}\right)$

Contracorrente, Cr = 1 $N = \dfrac{\varepsilon}{1 - \varepsilon}$

Trocador de calor de casco e tubos:

1 passe no casco e 2, 4 ou 6 passses nos tubos:

$$N = -\left(1 + C^2\right)^{-1/2}.\ln\left[\frac{2/\varepsilon - 1 - C - \left(1 + C^2\right)^{1/2}}{2/\varepsilon - 1 - C + \left(1 + C^2\right)^{1/2}}\right]$$

Trocador com condensação/ebulição, Cr = 0 $N = -\ln(1 - \varepsilon)$

N = NUT e C = Cr

Método da efetividade - NUT

Variações:

- As temperaturas de entrada e saída dos fluidos são conhecidas:

  Determinação da área de superfície de troca térmica

- Avaliação do desempenho do trocador de calor:

  O número de unidades de transferência depende do coeficiente global de troca de calor e da área de troca térmica.

$$NUT = \frac{U * A}{C_{\min}}$$

  Determinação da taxa real de transferência de calor

Exemplo 1:

Um trocador de calor do tipo duplo tubo com escoamento dos fluidos em contracorrente e uma área de transferência de calor igual a 12,5 m^2, deve esfriar óleo (*Cp* = 2000 *J/kg °C*) utilizando água (*Cp* = 4170 *J/kg °C*). O óleo entra a 100 *°C* com vazão de 2 *kg/h* enquanto a água entra a 20 *°C*, com vazão de 0,48 *kg/s*. O coeficiente global de transferência de calor é *U* = 400 W/m^2 *°C*. Calcule as temperaturas de saída dos fluidos e a taxa de transferência de calor, *q*.

Solução:

- Para o fluido quente (óleo):

$$C_q = \dot{m}_q * Cp_q = 2 * 2000 = 4000 W/°C \longleftarrow C_{max}$$

- Para o fluido frio (água):

$$C_f = \dot{m}_f * Cp_f = 0{,}48 * 4170 - 2002 W/°C \longleftarrow C_{min}$$

- Cálculo de C_r:

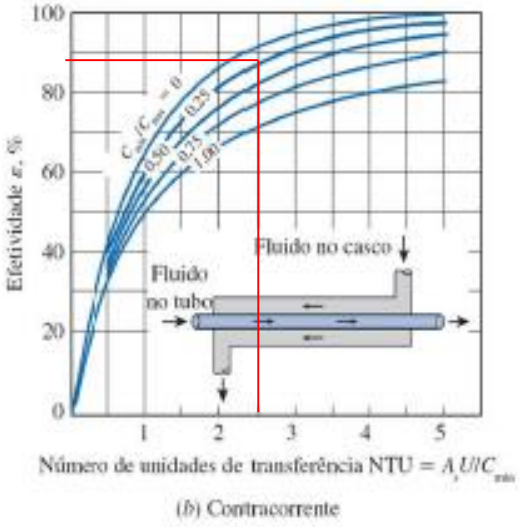
$$C_r = \frac{2002}{4000} = 0{,}5$$

Exemplo 1:

- Cálculo de NUT:

$$NUT = \frac{U * A}{C_{\min}} = \frac{400*12,5}{2002} = 2,5$$

- No gráfico:



- Cálculo das temperaturas de saída dos fluidos:

$$\varepsilon = 0,83 = \frac{q}{q_{\max imo}} = \frac{C_f * (T_{f,s} - T_{f,e})}{C_{\min} * (T_{q,e} - T_{f,e})}$$

$$\varepsilon = 0,83 = \frac{2002 * (T_{f,s} - 20)}{2002 * (100 - 20)}$$

$$T_{f,s} = 86,4°C$$

Exemplo 1:

- Cálculo de *q*:

$$q = C_q * \left(T_{q,e} - T_{q,s}\right) = 4000 * \left(100 - 66{,}7\right) = 133200W$$

$$q = C_f * \left(T_{f,s} - T_{f,e}\right) = 2002 * \left(86{,}4 - 20\right) = 133000W$$

Exemplo 2:

Um trocador de calor do tipo casco e tubos, com um passe no casco e quatro passes nos tubos, deve resfriar óleo a 1 *kg/s* (Cp = 2100 *J/kg °C)* de 90 até 40 °*C*, com água (*Cp* = 4180 *J/kg °C*) entrando a 19 °*C* a 1 *kg/s*. O coeficiente global de troca de calor é *U* = 400 *W/m*^{2} °*C*. Calcule a área de troca de calor necessária.

Solução:

- Para o fluido quente (óleo):

$$C_q = \dot{m}_q * Cp_q = 1 * 2100 = 2100 W/°C \longleftarrow C_{min}$$

- Para o fluido frio (água):

$$C_f = \dot{m}_f * Cp_f = 1 * 4180 = 4180 W/°C \longleftarrow C_{max}$$

- Cálculo de C_r:

$$C_r = \frac{2100}{4180} = 0{,}5$$

Exemplo 2:

- Cálculo de *q*:

- Para o fluido quente (óleo):

$$q = C_q * \left(T_{q,e} - T_{q,s}\right) = 2100 * \left(90 - 40\right)$$

$$q = 105000W$$

- Para o fluido frio (água):

$$q = C_f * \left(T_{f,s} - T_{f,e}\right)$$

$$105000 = 4180 * \left(T_{f,s} - 19\right)$$

$$T_{f,s} = 45{,}12°C$$

Exemplo 2:

- Cálculo de ε:
- Para o fluido frio (água):

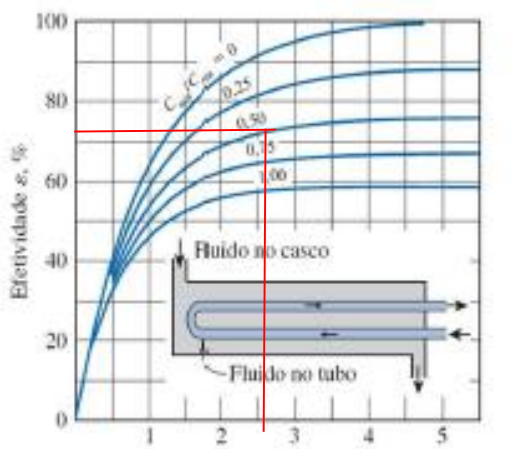
$$\varepsilon = \frac{C_f * (T_{f,s} - T_{f,e})}{C_{\min} * (T_{q,e} - T_{f,e})} = \frac{4180 * (45{,}12 - 19)}{2100 * (90 - 19)} = 0{,}73$$

$$NUT = 2{,}2$$

$$NUT = \frac{U * A}{C_{\min}}$$

$$A = \frac{NUT * C_{\min}}{U}$$

$$A = \frac{2{,}2 * 2100}{250} \Rightarrow A = 18{,}48 m^2$$



Número de unidades de transferência NTU = $A_s U/C_{min}$

(c) Um passe no casco e 2, 4, 6 (...) passes nos tubos