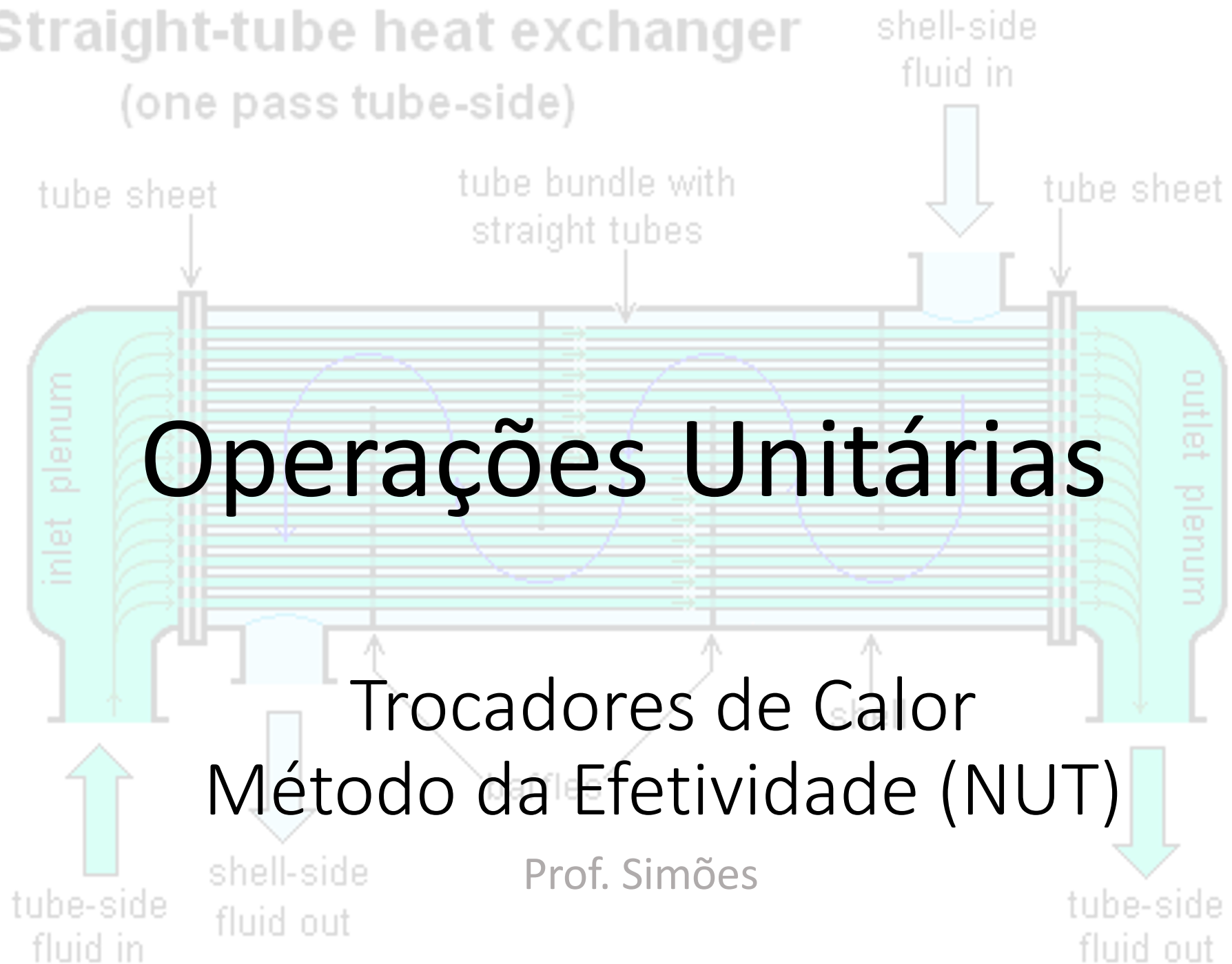


Straight-tube heat exchanger (one pass tube-side)



Operações Unitárias

Trocadores de Calor
Método da Efetividade (NUT)

Prof. Simões

Objetivos

- Aplicar o método da MLDT para um caso em que não temos as temperaturas de saída
- Identificar a dificuldade dessa utilização
- Entender quando usar o método da efetividade (NUT)
- Aplicar o método NUT para determinar as temperaturas de saída dos fluidos
- Aplicar o método NUT para determinar a área do trocador

Problema típico 1 – calcular temperaturas de saída

- Um trocador de calor tipo casco e tubo, com um passe no casco e quatro passes no tubo, tem **4,8 m² de área** de troca. O coeficiente global de troca de calor dessa unidade é estimado em **312 W/m²K**. O trocador foi projetado para uso com água e benzeno, mas pretende-se usá-lo agora para resfriar uma corrente de óleo ($c_p=2219$ J/kgK) a **122°C**, escoando a **5443 kg/h**, com água de esfriamento ($c_p=4187$ J/kgK), disponível a **13°C** e com uma vazão mássica igual a **2268 kg/h**. Nessa nova aplicação, determine as **temperaturas de saída** das duas correntes de fluido.

Problema típico 2 – calcular a área necessária

- Água ($c_p=4187 \text{ J/kgK}$) está disponível para ser usada a **$15,5^\circ\text{C}$** e vazão mássica de **$67,5 \text{ kg/min}$** . Sua temperatura deve chegar a **60°C** , trocando calor com óleo ($c_p=1184 \text{ J/kgK}$) que entra no trocador a **115°C** e deve sair a **$26,7^\circ\text{C}$** . O coeficiente global de transmissão de calor é **$280 \text{ W/m}^2\text{K}$** . Determine a **área de troca necessária**.

Para usar o método MLDT

1. Estimar a temperatura de saída da água T_2

$$\text{Supor } T_2 = 30^\circ\text{C}$$

2. Calcular o fluxo de calor estimado

$$\dot{q} = \dot{m}_{\text{água}} \cdot c_{p_{\text{água}}} \cdot (T_2 - T_1)$$

$$\dot{q} = 0,63 \cdot 4187 \cdot (30 - 13) = 4,48 \cdot 10^4 \text{ W}$$

3. Calcular a temperatura de saída do óleo t_2

$$\dot{q} = \dot{m}_{\text{óleo}} \cdot c_{p_{\text{óleo}}} \cdot (t_1 - t_2)$$

$$4,48 \cdot 10^4 = 1,54 \cdot 2219 \cdot (122 - t_2)$$

$$t_2 = 109^\circ\text{C}$$

Para usar o método MLDT

4. Calcular a MLDT

$$MLDT = \frac{\Delta T_{m\acute{a}x} - \Delta T_{m\acute{i}n}}{\ln \frac{\Delta T_{m\acute{a}x}}{\Delta T_{m\acute{i}n}}} = \frac{(122 - 13) - (109 - 30)}{\ln \frac{122 - 13}{109 - 30}} = 93,1^{\circ}\text{C}$$

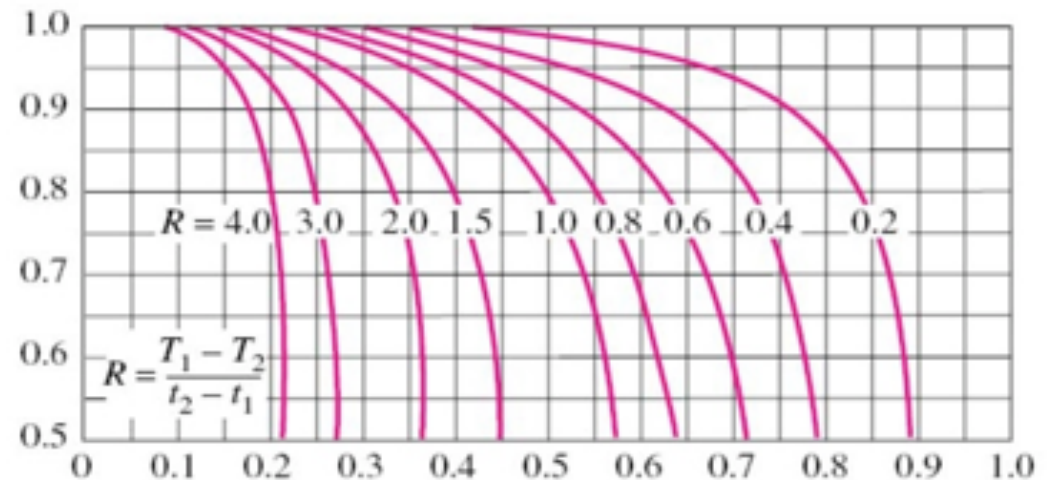
5. Corrigir MLDT

$$R = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1} = \frac{13 - 30}{109 - 122} = 1,30$$

$$P = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1} = \frac{109 - 122}{13 - 122} = 0,12$$

$$F = 0,999$$

$$MLDT_c = 93,1 \cdot 0,999 = 93,0^{\circ}\text{C}$$



Para usar o método MLDT

6. Calcular o novo $\dot{q}$

$$\dot{q} = U \cdot A \cdot MLDT \Rightarrow \dot{q} = 312 \cdot 4,8 \cdot 93 = 1,39 \cdot 10^5 \text{ W}$$

7. Calcular nova temperatura de saída da água T_2

$$\dot{q} = \dot{m}_{\text{água}} \cdot c_{p_{\text{água}}} \cdot (T_2 - T_1)$$

$$1,39 \cdot 10^5 = 0,63 \cdot 4187 \cdot (T_2 - 13) \Rightarrow T_2 = 65,7^\circ\text{C}$$

8. Calcular a nova temperatura de saída do óleo t_2

$$\dot{q} = \dot{m}_{\text{óleo}} \cdot c_{p_{\text{óleo}}} \cdot (t_1 - t_2)$$

$$1,39 \cdot 10^5 = 1,54 \cdot 2219 \cdot (122 - t_2) \Rightarrow t_2 = 81,3^\circ\text{C}$$

Para usar o método MLDT

9. Comparar novos valores com anteriores

Valores iniciais:

Temperatura de saída da água, $T_2 = 30^{\circ}\text{C}$

Temperatura de saída do óleo, $t_2 = 109^{\circ}\text{C}$

Valores valores calculados:

Temperatura de saída da água, $T_2 = 65,7^{\circ}\text{C}$

Temperatura de saída do óleo, $t_2 = 81,3^{\circ}\text{C}$

10. Inserir novos valores a partir do passo 2, e repetir cálculos até obter dois ciclos iguais, que nesse caso foram:

Temperatura de saída da água, $T_2 = 52^{\circ}\text{C}$

Temperatura de saída do óleo, $t_2 = 92^{\circ}\text{C}$

- Usando uma planilha nesse exemplo, foram necessárias 15 iterações

10

Utilização do método NUT

- Pelo método NUT não necessitamos saber as temperaturas de saída
- É aplicado, por exemplo, no remanejamento de um trocador para outra finalidade
- NUT é o acrônimo de Número de Unidades de Transferência
- É também chamado de Método da Efetividade do Trocador
- Para utilização do NUT, necessitamos inicialmente da **capacidade térmica** dos fluidos (ou pelo menos de um)
- Para encontrar a **efetividade**, e, com ela, a capacidade (ou área) do trocador, utilizamos dois fatores adimensionais
- Com eles, fazemos uso de gráficos ou fórmulas empíricas, ou software

Capacidade térmica

- A **capacidade térmica** C de um fluido no trocador indica quanto calor necessitamos para alterar sua temperatura:

$$\dot{q} = \dot{m} \cdot c \cdot \Delta T$$

$$\frac{\dot{q}}{\Delta T} = \dot{m} \cdot c \Rightarrow C = \dot{m} \cdot c$$

$$C = \dot{m} \cdot c$$

$$[C] = \frac{kg}{s} \cdot \frac{J}{kg^{\circ}C} = \frac{J}{s^{\circ}C} = \frac{W}{^{\circ}C} = \frac{W}{K}$$

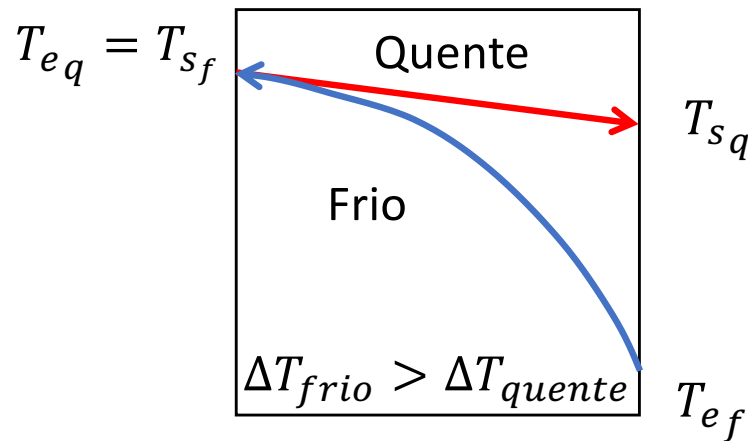
Fluxo de calor máximo no trocador $\dot{q}_{m\acute{a}x}$

- Se imaginarmos um trocador ideal, de correntes opostas e comprimento infinito, podemos supor que no final da troca a temperatura dos fluidos será a mesma:

$$C = \frac{\dot{q}}{\Delta T} \Rightarrow \dot{q} = C \cdot \Delta T$$

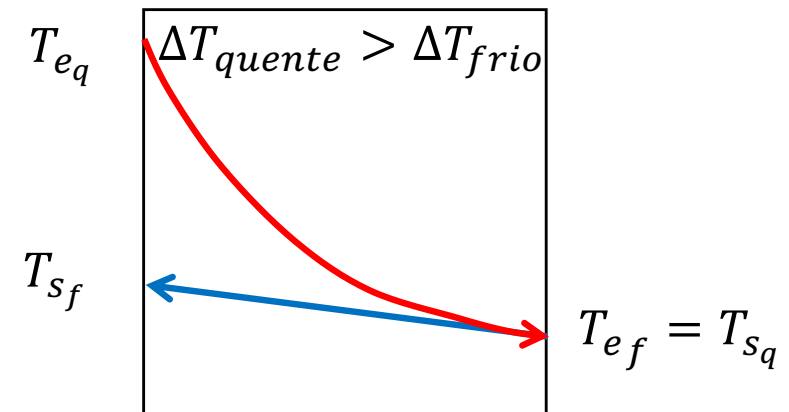
Para um mesmo valor de $\dot{q}$, um C menor corresponde a um ΔT maior

Caso $C_{quente} > C_{frio}$



$$\dot{q}_{m\acute{a}x} = C_f \cdot (T_{eq} - T_{ef})$$

Caso $C_{frio} > C_{quente}$



$$\dot{q}_{m\acute{a}x} = C_q \cdot (T_{eq} - T_{ef})$$

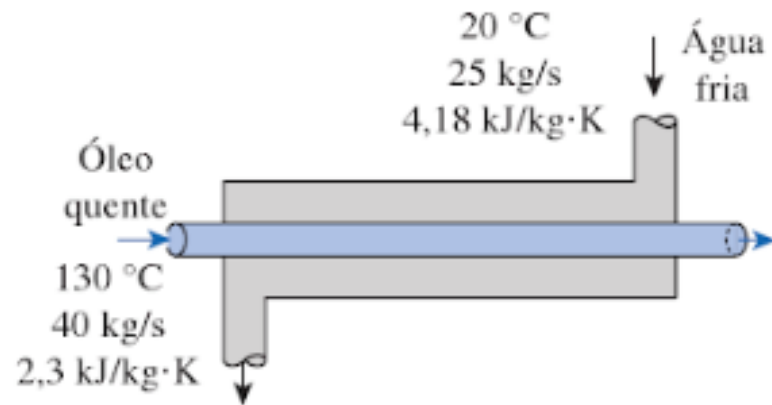
Fluxo de calor máximo no trocador

- Generalizando os dois casos anteriores, podemos afirmar que:

$$\dot{q}_{m\acute{a}x} = C_{m\acute{i}n} \cdot (T_{e_q} - T_{e_f})$$

Onde $C_{m\acute{i}n}$ é a menor capacidade de calor entre os dois fluidos (válida tanto para correntes paralelas como opostas)

- Exemplo: calcule o $\dot{q}_{m\acute{a}x}$ no seguinte cenário



$$C_{\acute{a}gua} = 25 \cdot 4,18 \cdot 10^3 = 1,05 \cdot 10^5 \frac{W}{K}$$

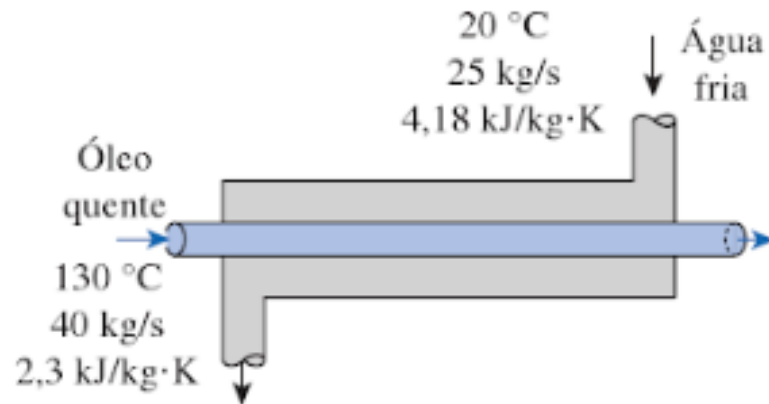
$$C_{\acute{o}leo} = 40 \cdot 2,30 \cdot 10^3 = 0,92 \cdot 10^5 \cdot \frac{W}{K}$$

O $C_{m\acute{i}n}$ é o do óleo

$$\dot{q}_{m\acute{a}x} = C_{m\acute{i}n} \cdot (T_{e_q} - T_{e_f}) = 0,92 \cdot 10^5 \cdot (130 - 20) \Rightarrow \dot{q}_{m\acute{a}x} = 1,01 \cdot 10^7 W$$

Fluxo de calor máximo no trocador

- Exemplo: calcule o $\dot{q}_{m\acute{a}x}$ no seguinte cenário



$$C_{\acute{a}gua} = 25 \cdot 4,18 \cdot 10^3 = 1,05 \cdot 10^5 \frac{W}{K}$$

$$C_{\acute{o}leo} = 40 \cdot 2,30 \cdot 10^3 = 0,92 \cdot 10^5 \cdot \frac{W}{K}$$

O $C_{m\acute{i}n}$ é o da água

$$\dot{q}_{m\acute{a}x} = C_{m\acute{i}n} \cdot (T_{e_q} - T_{e_f}) = 0,92 \cdot 10^5 \cdot (130 - 20) \Rightarrow \dot{q}_{m\acute{a}x} = 1,01 \cdot 10^7 W$$

Efetividade do trocador

- Entretanto, nos trocadores reais, as temperaturas finais não são iguais.
- Definimos assim a efetividade do trocador como:

$$\varepsilon = \frac{\dot{q}}{\dot{q}_{m\acute{a}x}}$$

Sendo $\dot{q}$ o fluxo de calor real no trocador

- Portanto:

$$\dot{q} = \varepsilon \cdot \dot{q}_{m\acute{a}x}$$

Essa fórmula fornece o fluxo de calor do trocador sem usar a MLDT, $\dot{q} = U \cdot A \cdot MLDT$, portanto, sem as temperaturas de saída

$$\dot{q} = \varepsilon \cdot C_{m\acute{i}n} \cdot (T_{e_q} - T_{e_f})$$

Mas como calcular a efetividade??



NUT – Número de Unidades de Transferência

- Para calcular a **efetividade** do trocador, utilizamos o NUT do trocador, que é definido por:

$$NUT = \frac{U \cdot A}{C_{mín}}$$

Observe que esses dados estarão disponíveis no caso proposto.

- O *NUT* indica o tamanho da transferência de calor do trocador, ou seja, o número de transferências iguais à capacidade térmica do fluido de menor capacidade térmica:

$$NUT = \frac{\text{Capacidade térmica do trocador}}{\text{Capacidade térmica do fluido de menor capacidade}}$$

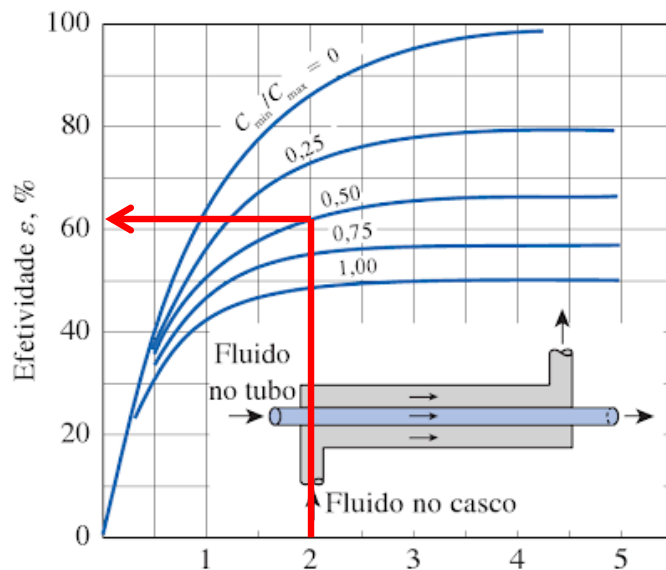
- Quanto maior o *NUT*, mais próximo o trocador está do seu limite termodinâmico

Efetividade do trocador

- Além do NUT, a efetividade do trocador depende também do fator z (C_r ou C^* em alguns livros):

$$z = \frac{C_{\min}}{C_{\max}}$$

- Tendo calculado o NUT e o z , encontramos a efetividade no gráfico respectivo ao trocador:

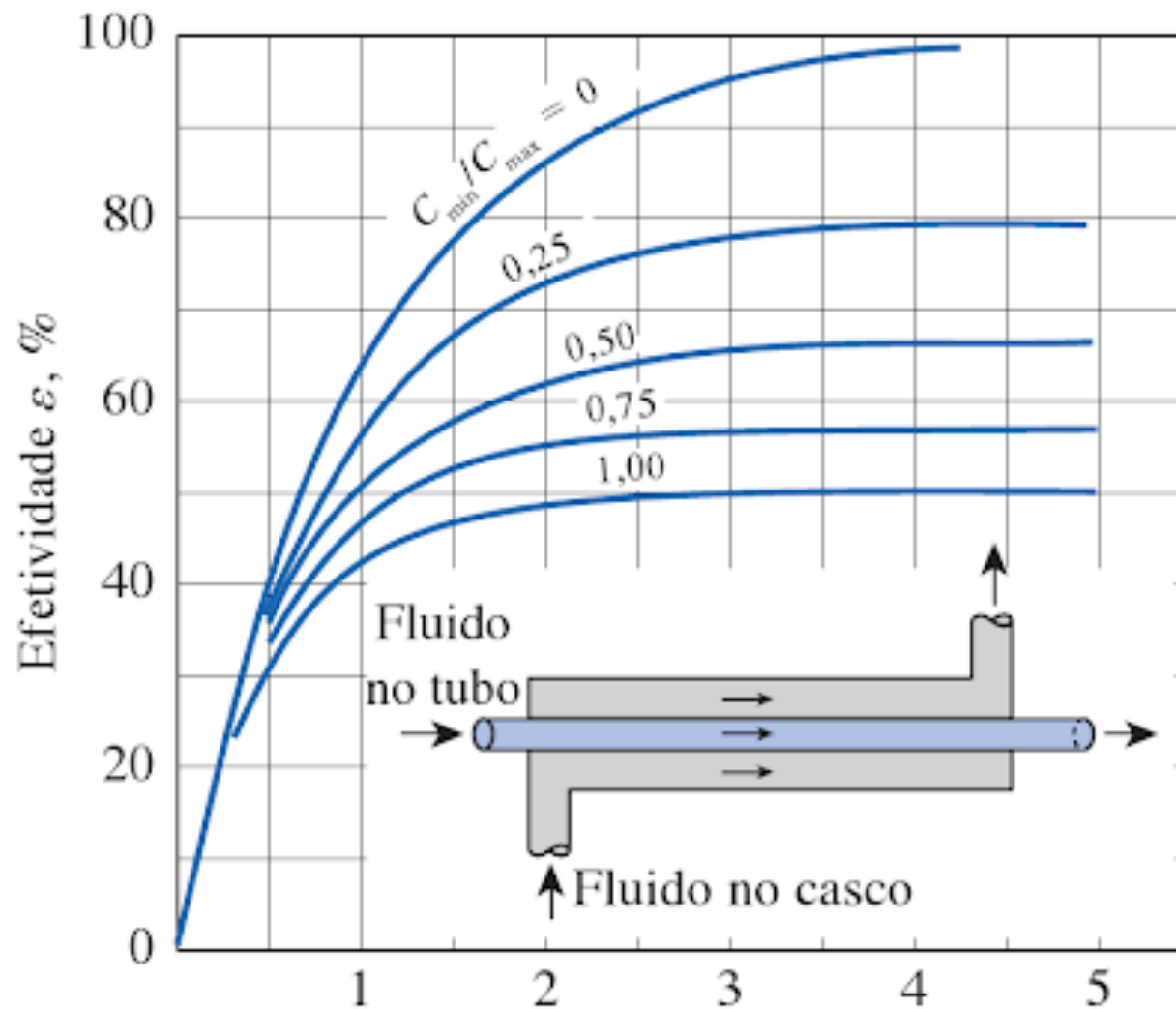


Por exemplo para tubo duplo, correntes paralelas, com $NUT = 2$ e $z = 0,50$, teremos:

$$\varepsilon = 63\% = 0,63$$

A seguir, os gráficos para os principais tipos de trocador.

Efetividade

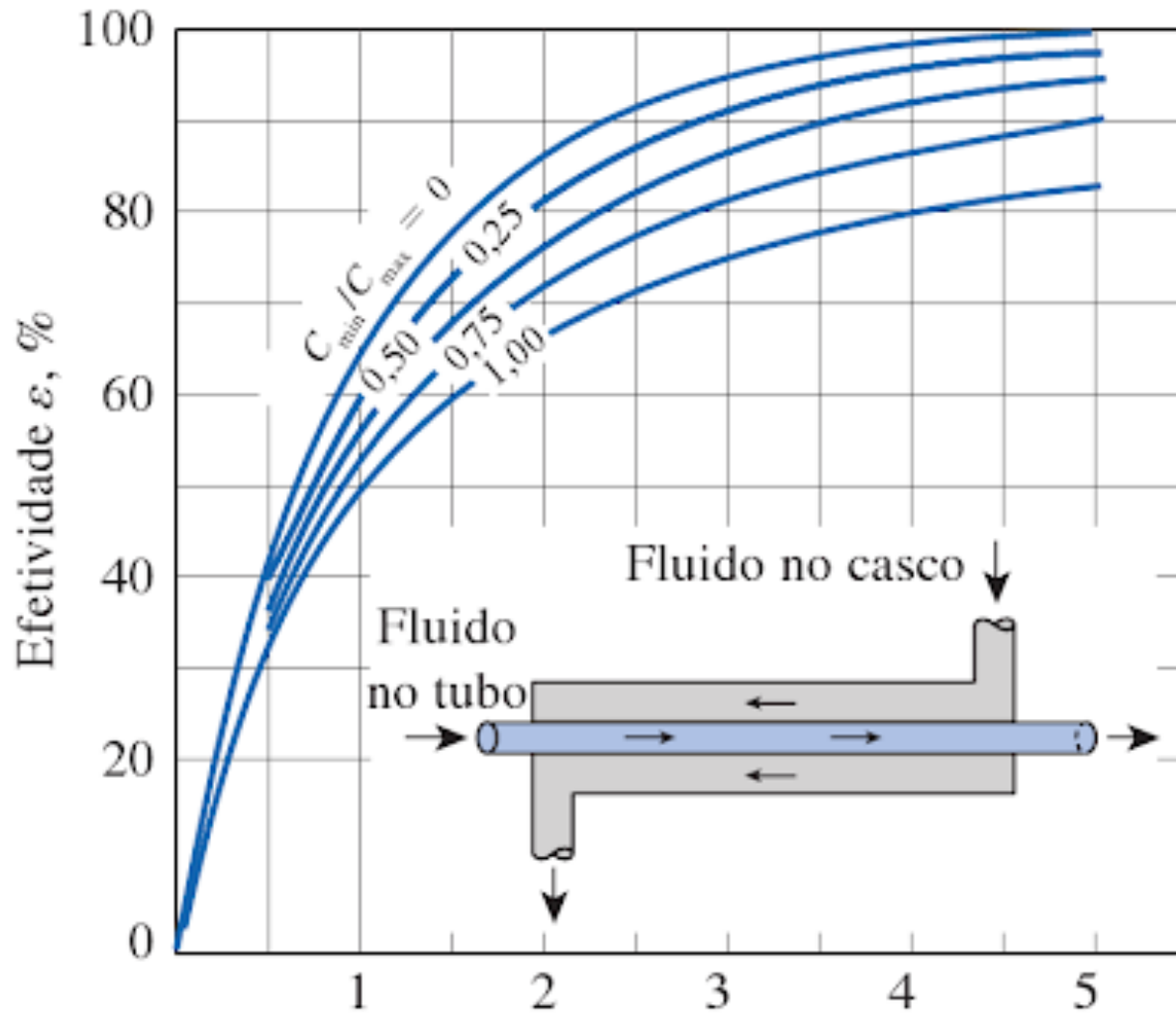


Para $C^* < 1$

$$\varepsilon = \frac{1 - e^{-NTU(1+C^*)}}{1 + C^*},$$

$$NTU = -\frac{\ln[1 - \varepsilon(1 + C^*)]}{1 + C^*}$$

Efetividade



Para $C^* < 1$

$$\varepsilon = \frac{1 - e^{-NTU(1-C^*)}}{1 - C^* e^{-NTU(1-C^*)}}$$

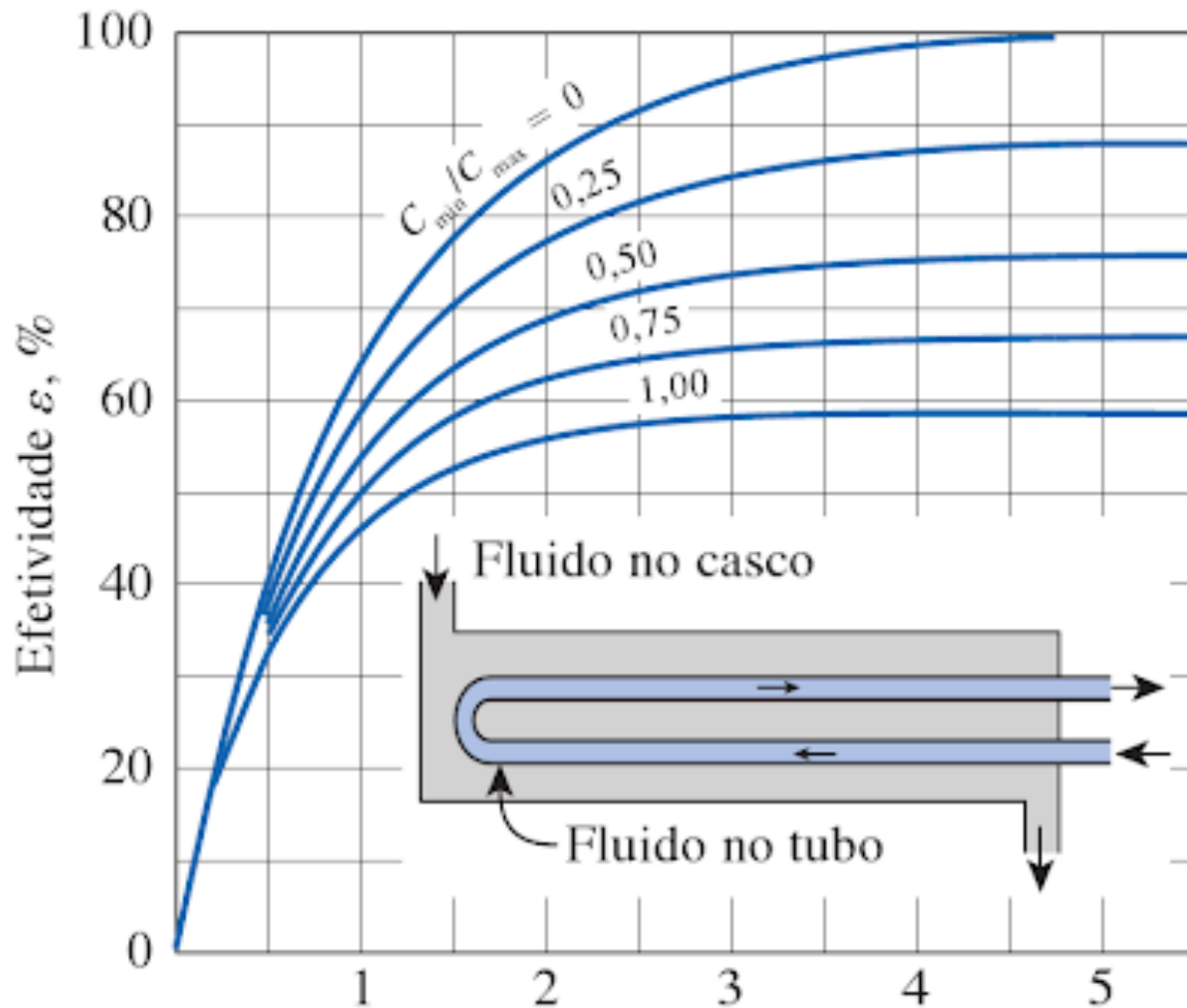
$$NTU = \frac{1}{1 - C^*} \ln \frac{1 - C^* \varepsilon}{1 - \varepsilon}$$

Para $C^* = 1$

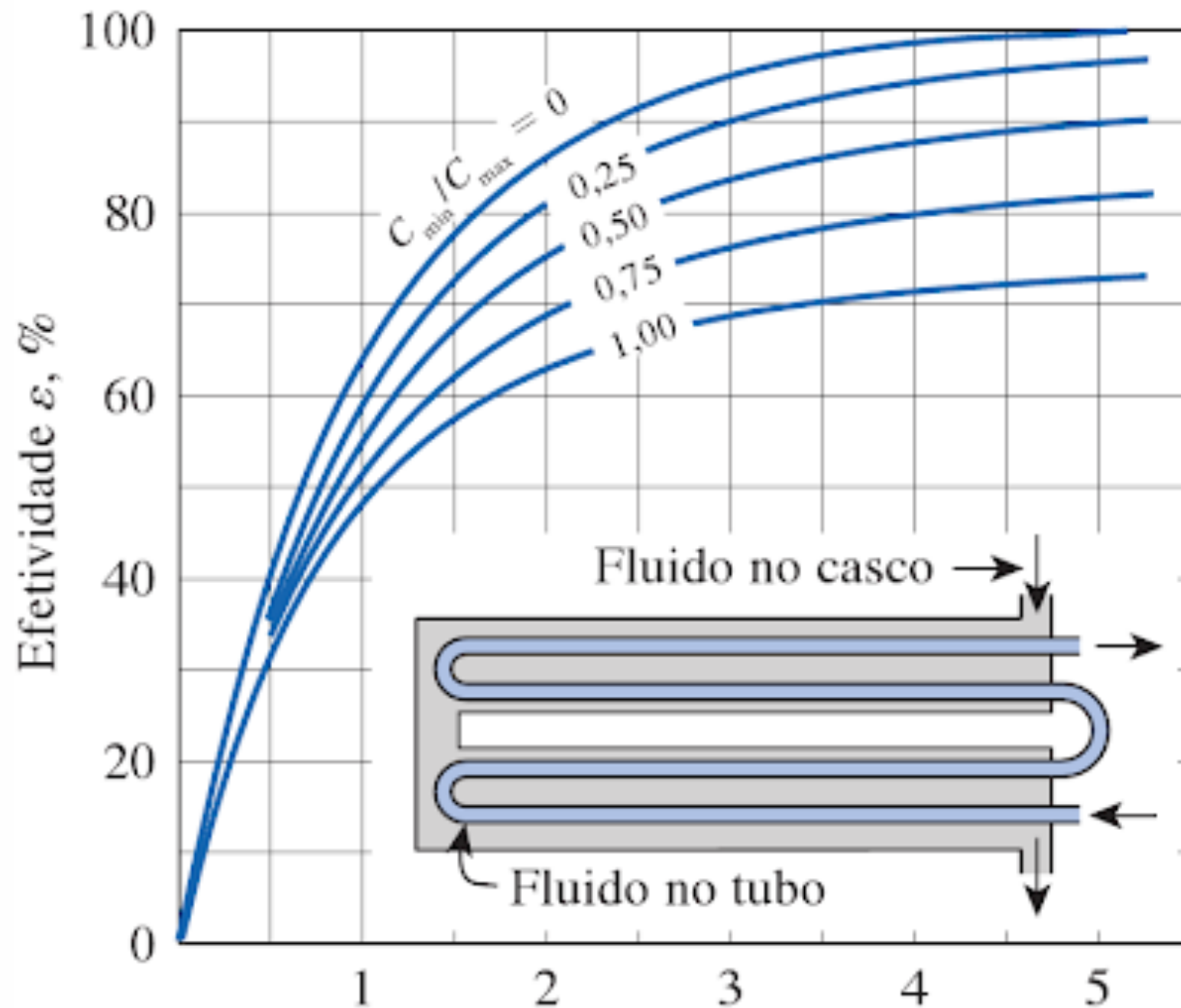
$$\varepsilon = \frac{NTU}{1 + NTU}$$

$$NTU = \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon}$$

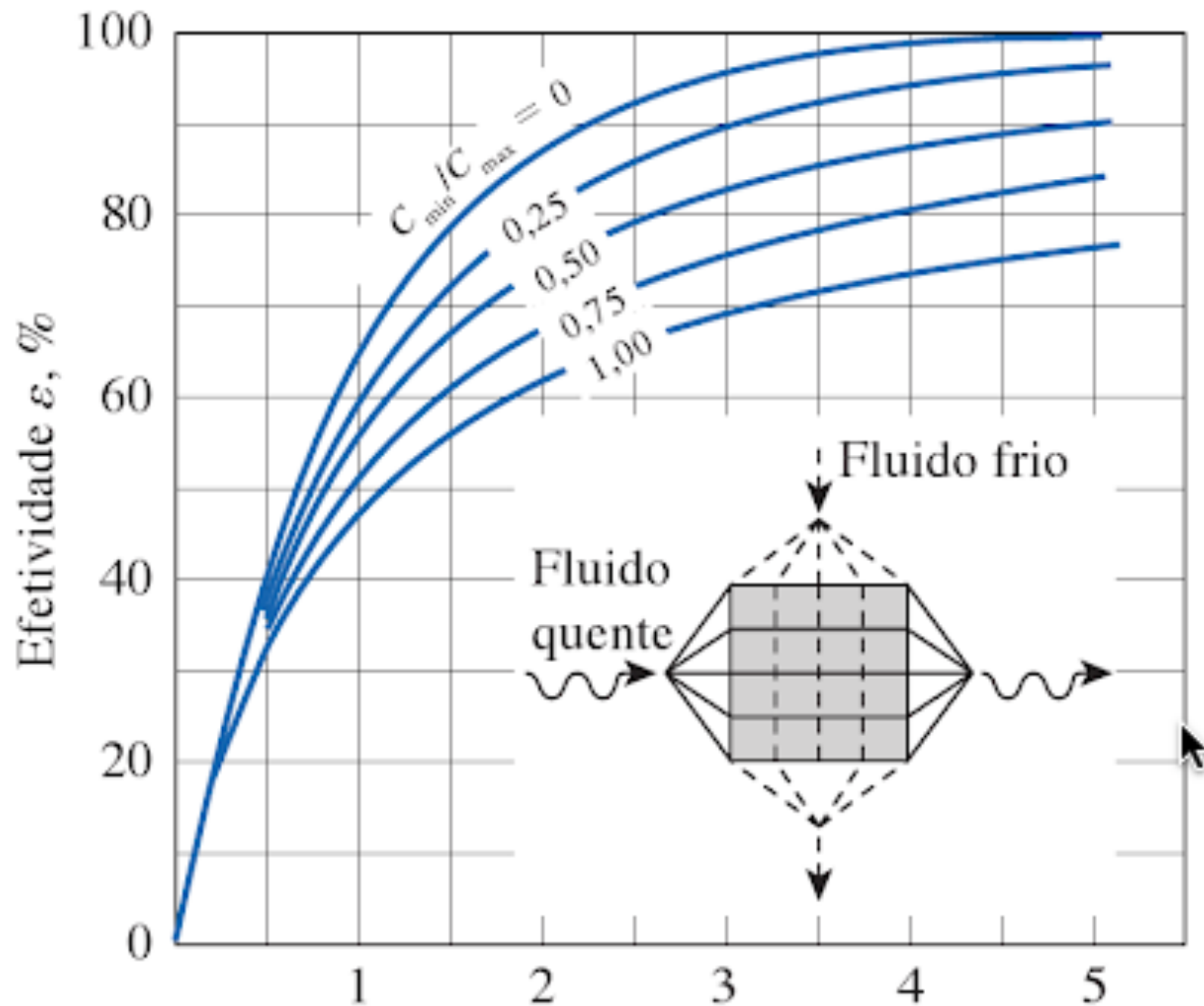
Efetividade



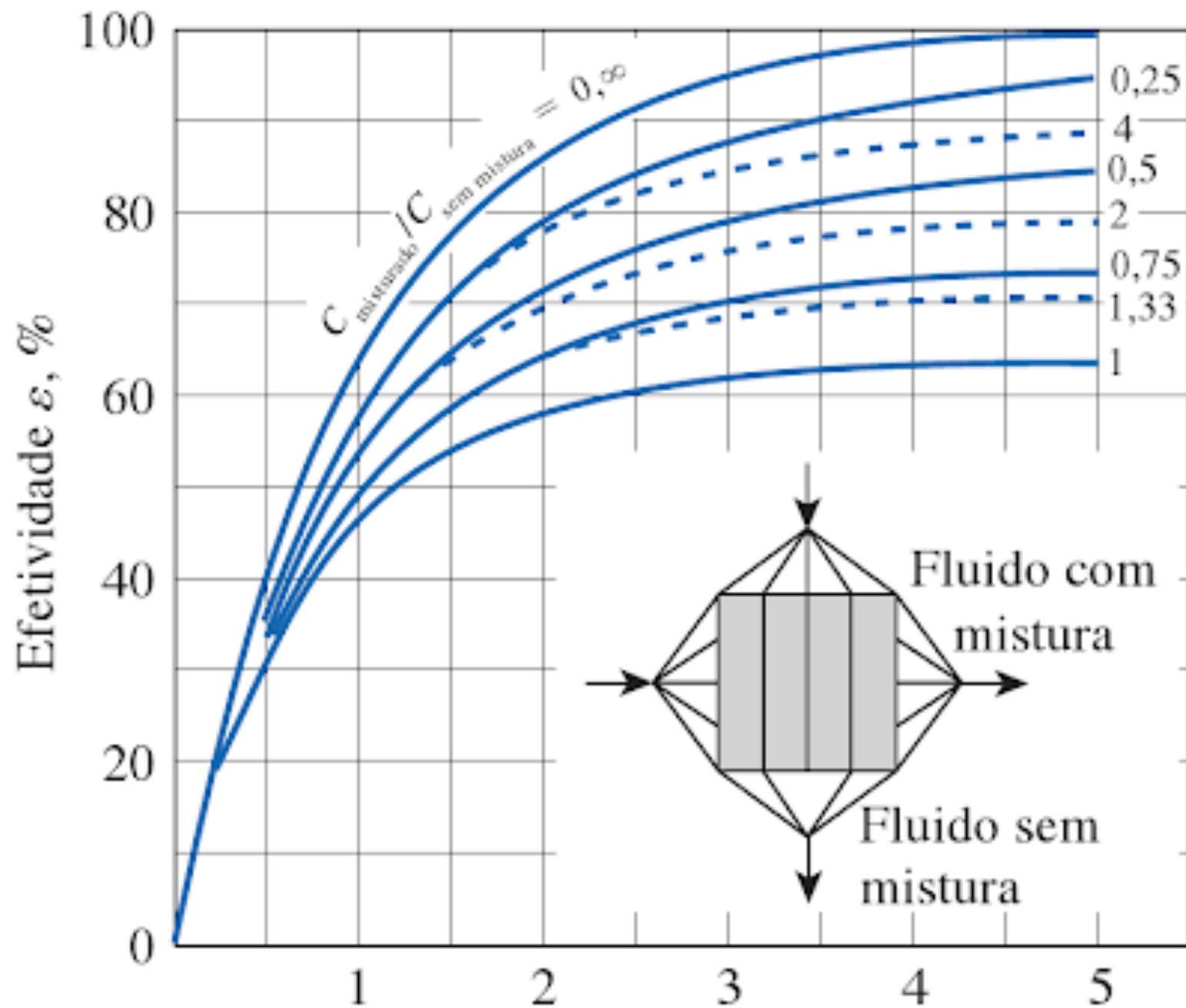
Efetividade



Efetividade



Efetividade



Efetividade em função do NUT - Fórmulas

Flow Arrangement	Relation	
Parallel flow	$\varepsilon = \frac{1 - \exp[-NTU(1 + C_r)]}{1 + C_r}$	(11.28a)
Counterflow	$\varepsilon = \frac{1 - \exp[-NTU(1 - C_r)]}{1 - C_r \exp[-NTU(1 - C_r)]}$	$(C_r < 1)$
	$\varepsilon = \frac{NTU}{1 + NTU}$	$(C_r = 1)$ (11.29a)
Shell-and-tube		
One shell pass (2, 4, . . . tube passes)	$\varepsilon_1 = 2 \left\{ 1 + C_r + (1 + C_r^2)^{1/2} \times \frac{1 + \exp[-(NTU)_1(1 + C_r^2)^{1/2}]}{1 - \exp[-(NTU)_1(1 + C_r^2)^{1/2}]} \right\}^{-1}$	(11.30a)
n shell passes ($2n, 4n, . . .$ tube passes)	$\varepsilon = \left[\left(\frac{1 - \varepsilon_1 C_r}{1 - \varepsilon_1} \right)^n - 1 \right] \left[\left(\frac{1 - \varepsilon_1 C_r}{1 - \varepsilon_1} \right)^n - C_r \right]^{-1}$	(11.31a)
Cross-flow (single pass)		
Both fluids unmixed	$\varepsilon = 1 - \exp \left[\left(\frac{1}{C_r} \right) (NTU)^{0.22} \{ \exp[-C_r(NTU)^{0.78}] - 1 \} \right]$	(11.32)
C_{max} (mixed), C_{min} (unmixed)	$\varepsilon = \left(\frac{1}{C_r} \right) (1 - \exp \{-C_r[1 - \exp(-NTU)]\})$	(11.33a)
C_{min} (mixed), C_{max} (unmixed)	$\varepsilon = 1 - \exp(-C_r^{-1} \{1 - \exp[-C_r(NTU)]\})$	(11.34a)
All exchangers ($C_r = 0$)	$\varepsilon = 1 - \exp(-NTU)$	(11.35a)

Fonte: Introduction to heat transfer. Bergman et al

NTU em função da efetividade

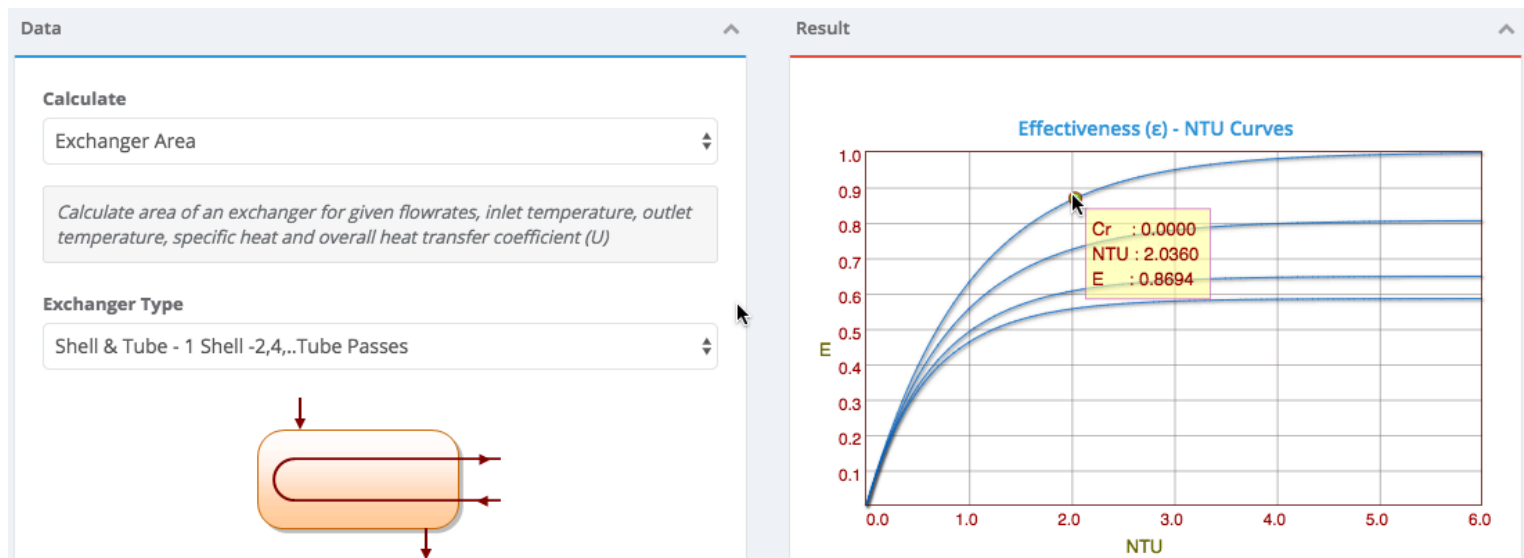
Flow Arrangement	Relation	
Parallel flow	$NTU = -\frac{\ln[1 - \varepsilon(1 + C_r)]}{1 + C_r}$	(11.28b)
Counterflow	$NTU = \frac{1}{C_r - 1} \ln\left(\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon C_r - 1}\right) \quad (C_r < 1)$	
	$NTU = \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} \quad (C_r = 1)$	(11.29b)
Shell-and-tube		
One shell pass (2, 4, . . . tube passes)	$(NTU)_1 = -(1 + C_r^2)^{-1/2} \ln\left(\frac{E - 1}{E + 1}\right)$	(11.30b)
	$E = \frac{2/\varepsilon_1 - (1 + C_r)}{(1 + C_r^2)^{1/2}}$	(11.30c)
n shell passes ($2n, 4n, . . .$ tube passes)	Use Equations 11.30b and 11.30c with $\varepsilon_1 = \frac{F - 1}{F - C_r} \quad F = \left(\frac{\varepsilon C_r - 1}{\varepsilon - 1}\right)^{1/n} \quad NTU = n(NTU)_1$	(11.31b, c, d)
Cross-flow (single pass)		
C_{max} (mixed), C_{min} (unmixed)	$NTU = -\ln\left[1 + \left(\frac{1}{C_r}\right) \ln(1 - \varepsilon C_r)\right]$	(11.33b)
C_{min} (mixed), C_{max} (unmixed)	$NTU = -\left(\frac{1}{C_r}\right) \ln[C_r \ln(1 - \varepsilon) + 1]$	(11.34b)
All exchangers ($C_r = 0$)	$NTU = -\ln(1 - \varepsilon)$	(11.35b)

Fonte: Introduction to heat transfer. Bergman et al

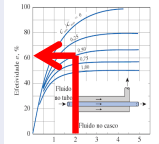
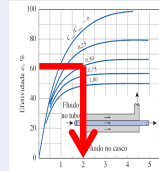
NTU e efetividade com planilhas e sites

	A	B
1		
2	Cálculo de trocadores com o método NUT	
3		
4	Cálculo da efetividade a partir do NUT	
5		
6	Valor do NUT - Coloque aqui o valor do NUT ->	0,567
7	Valor de $Z=C_{\min}/C_{\max}$ - Coloque aqui o valor de Z ->	0,815
8		
9	Trocador de tubo duplo	Efetividade
10	Correntes paralelas	0,354
11	Correntes opostas	0,374
12	Correntes opostas com Z=1	0,362
13	Trocador de correntes cruzadas	
14	Fluidos não misturados	0,357
15	Fluidos misturados	0,364
16	C _{máx} misturado, C _{mín} não misturado	0,365
17	C _{máx} não misturado, C _{mín} misturado	0,365
18	Trocador de casco e tubo	
19	Um passe no casco e número par de passes no tubo	0,364
20	Todos os trocadores com Z=0 (mudança de fase)	0,433

https://checalculator.com/solved/heat_exch_analysis.html



Utilização da efetividade (NUT) para cálculo de trocadores

Para calcular as T_s		Para calcular a área	
Dados: $A, U, T_{ef}, T_{eq}, \dot{m}_f$ e $\dot{m}_q$		Dados: $T_{ef}, T_{sf}, T_{eq}, T_{sq}, \dot{m}_f$ ou $\dot{m}_q$	
1. Calcular $C_{mín}$ e $C_{máx}$	$C = \dot{m} \cdot c$	1. Calcular o $\dot{m}$ ou que falta	$\dot{q} = \dot{m} \cdot c \cdot \Delta T$
2. Calcular z	$z = \frac{C_{mín}}{C_{máx}}$	2. Calcular $C_{mín}$ e $C_{máx}$	$C = \dot{m} \cdot c$
3. Calcular NUT	$NUT = \frac{U \cdot A}{C_{mín}}$	3. Calcular z	$z = \frac{C_{mín}}{C_{máx}}$
4 Determinar a efetividade e		4. Calcular o $\dot{q}_{máx}$	$\dot{q}_{máx} = C_{mín} \cdot (T_{eq} - T_{ef})$
5. Calcular a capacidade do trocador $\dot{q}$	$\dot{q} = \varepsilon \cdot C_{mín} \cdot (T_{eq} - T_{ef})$	5. Calcular a efetividade e	$\varepsilon = \frac{\dot{q}}{\dot{q}_{máx}}$
6. Calcular as T_s	$\dot{q} = \dot{m}_f \cdot c \cdot (T_{sf} - T_{ef})$ $\dot{q} = \dot{m}_q \cdot c \cdot (T_{eq} - T_{sq})$	6. Determinar o NUT	
		7. Calcular a área	$NUT = \frac{U \cdot A}{C_{mín}}$

Exemplo 1: determinação das temperaturas de saída

Um trocador de calor tipo casco e tubo, com um passe no casco e quatro passes no tubo, tem $4,8 \text{ m}^2$ de área de troca. O coeficiente global de troca de calor dessa unidade é estimado em $312 \text{ W/m}^2\text{K}$. O trocador foi projetado para uso com água e benzeno, mas pretende-se usá-lo agora para resfriar uma corrente de óleo ($c_p=2219 \text{ J/kgK}$) a 122°C , escoando a 5443 kg/h , com água de esfriamento ($c_p=4187 \text{ J/kgK}$), disponível a $12,8^\circ\text{C}$ e com uma vazão mássica igual a 2268 kg/h . Nessa nova aplicação, determine as **temperaturas de saída** das duas correntes de fluido.

Exemplo 2: determinação da área do trocador

Água ($c_p=4187 \text{ J/kgK}$) está disponível para ser usada a $15,5^\circ\text{C}$ e vazão mássica de $67,5 \text{ kg/min}$. Sua temperatura pode chegar no máximo a 60°C na saída do trocador (casco). Ela deve refrigerar óleo ($c_p=1884 \text{ J/kgK}$) que entra no trocador a 115°C e deve sair a $26,7^\circ\text{C}$ (tubo). O coeficiente global de transmissão de calor do trocador é $280 \text{ W/m}^2\text{K}$. Determine a **vazão do óleo** e a **área de troca necessária**.

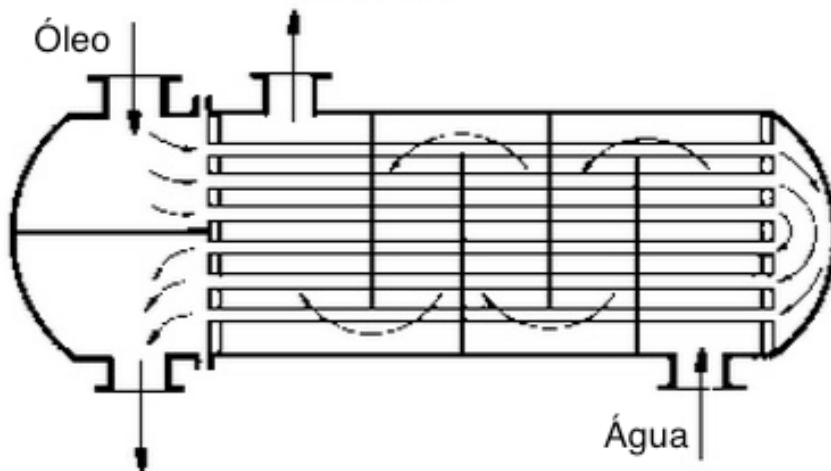
Exercício proposto 1

- Sua empresa possui um trocador com $9,2 \text{ m}^2$ de área é necessário verificar se ele servirá para trocar calor entre água ($c_p=4190 \text{ J/kgK}$) e óleo ($c_p=2160 \text{ J/kgK}$). O coeficiente global de transmissão de calor é de $200 \text{ W/m}^2\text{K}$. O óleo entrará no trocador a uma vazão mássica de 3650 kg/h e temperatura de 133°C , e, na saída, não pode ultrapassar 80°C . Há disponibilidade de água a 10°C , a uma vazão de 3150 kg/h , e ela não pode atingir o ponto de ebulição no trocador. Calcule as temperaturas de saída da água e do óleo para avaliar se o trocador atende a essas condições.

Resposta: $T_{\text{água}}=45^\circ\text{C}$; $T_{\text{óleo}}=74^\circ\text{C}$. Portanto, o trocador atende.

Exercício proposto 2

- O calor excedente no óleo ($c_p=1184 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$) de um processo será usado para aquecer um fluxo de água ($c_p=4187 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$). O óleo tem uma temperatura de 120°C e uma vazão mássica de 21100 kg/h . A água tem uma temperatura de entrada de 26°C e uma vazão mássica de 22200 kg/h , e deve ser aquecida até 45°C . O trocador tem um passe no casco, e dois no tubo. Determine a área de troca necessária, supondo um coeficiente global de $200 \text{ W/m}^2\text{K}$.



Resposta: 64 m^2

Objetivos

- Ao final dessa aula, você deve ser capaz de:
 - Aplicar o método da MLDT para um caso em que não temos as temperaturas de saída, por meio de cálculos iterativos
 - Identificar a dificuldade dessa utilização
 - Entender quando usar o método da efetividade (NUT)
 - Aplicar o método NUT para determinar as temperaturas de saída dos fluidos
 - Aplicar o método NUT para determinar a área do trocador quando não temos uma das vazões mássicas