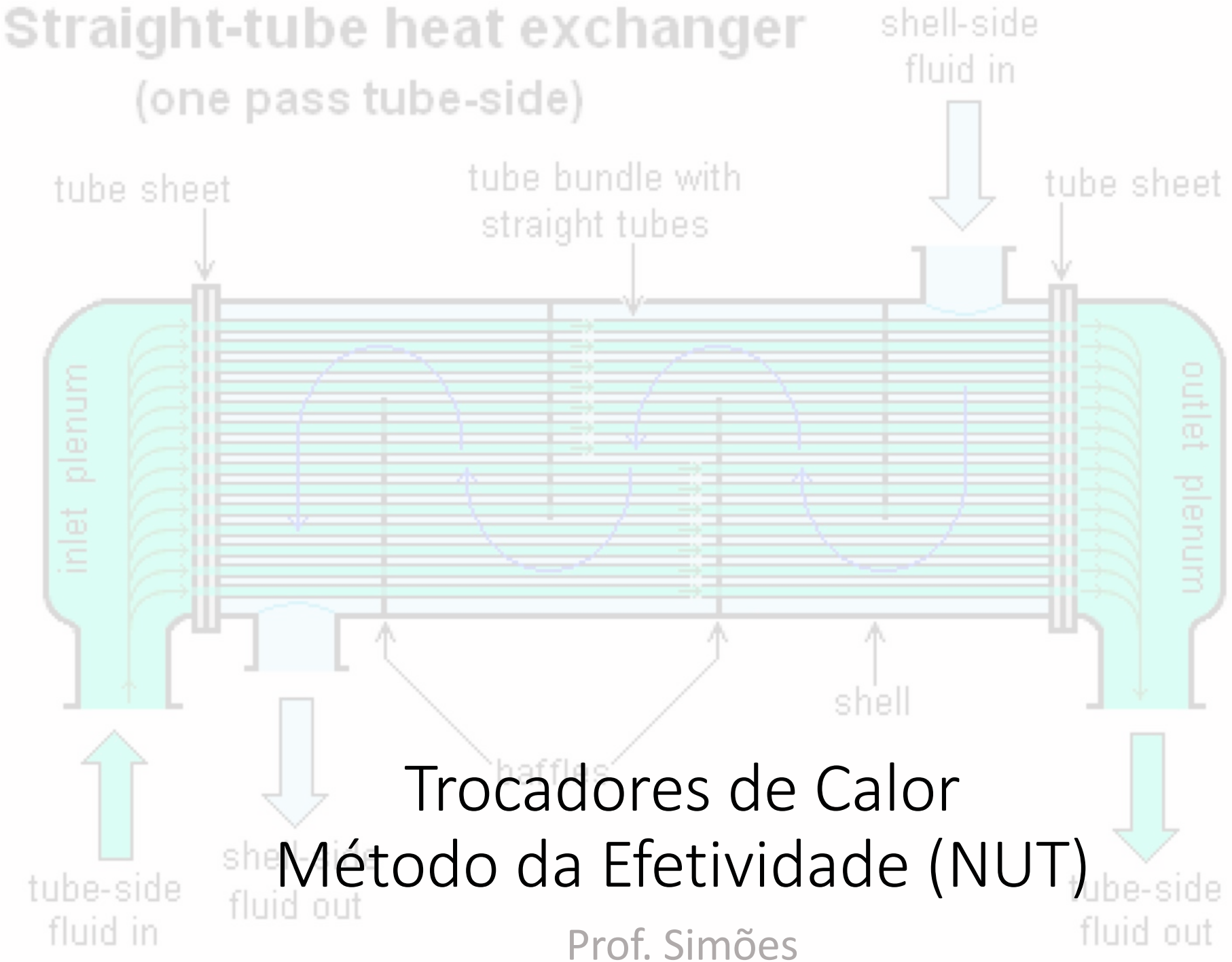


Trocadores de Calor
Método da Efetividade (NUT)

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
- 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 m^2 de área** de troca. O coeficiente global de troca de calor dessa unidade é estimado em **312 W/m^2K**. 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 **12,8°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 J/kgK) está disponível para ser usada a **15,5°C** e vazão mássica de **67,5 kg/min**. Sua temperatura deve chegar a **60°C**, trocando calor com óleo (c_p=1184 J/kgK) que entra no trocador a **115°C** e deve sair a **26,7°C**. O coeficiente global de transmissão de calor é **280 W/m²K**. Determine a **área de troca necessária**.

Se a MDLT fosse usada

- As equações seriam:
  - Corrente fria (água)

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

$$\dot{q} = \frac{2260}{3600} \cdot 4187 \cdot (t_2 - 12{,}8)$$

  - Corrente quente (óleo)

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

$$\dot{q} = \frac{5443}{3600} \cdot 2219 \cdot (122 - T_2)$$

  - Calor trocado

$$\dot{q} = U \cdot A \cdot MLDT$$

Fluxo de cálculo

1) Estimar t2
2) Calcular q
3) Calcular T2
4) Calcular MLDT
5) Corrigir MLDT (R, P)
6) Calcular novo q
7) Calcular t2 com novo q
8) Calcular T2 com novo q
9) Ir para passo 4)
10) Refazer ciclo até os valores se repetirem

Se MDLT fosse usado

- Usando Excel nesse exemplo, foram necessárias 15 iterações

	A	B	C	D	E	F	G	H	T	U
1	U (W/m2K)	312	água	m (dado), kg/s	0,63	Iteração	1	2	14	15
2	A (M2)	4,6		c (dado), J/kgL	4187					
3			entrada	t1 (dado), °C	12,8					
4			saída	t2 (estimada)	30	t2 ->	63	41	51	51
5										
6			q (1o cálculo)	Calculado (W)	4,54E+04					
7										
8			óleo	m (dado), kg/s	1,51					
9				c (dado), J/kgL	2219					
10			entrada	T1 (dado), °C	122					
11										
12			T2	Calculada (°C)	108	T2->	82	100	92	92
13										
14			MLDT		93	MLDT ->	51	82	70	70
15										
16			q	novo valor	1,33E+05	q->	7,37E+04	1,17E+05	1,00E+05	1,00E+05

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** de um corpo indica quanto calor necessitamos para alterar sua temperatura

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

- No caso dos trocadores, a capacidade térmica do fluxo será:

$$C = \dot{m} \cdot c \qquad [C] = \frac{kg}{s} \cdot \frac{J}{kg°C} = \frac{J}{s°C}$$

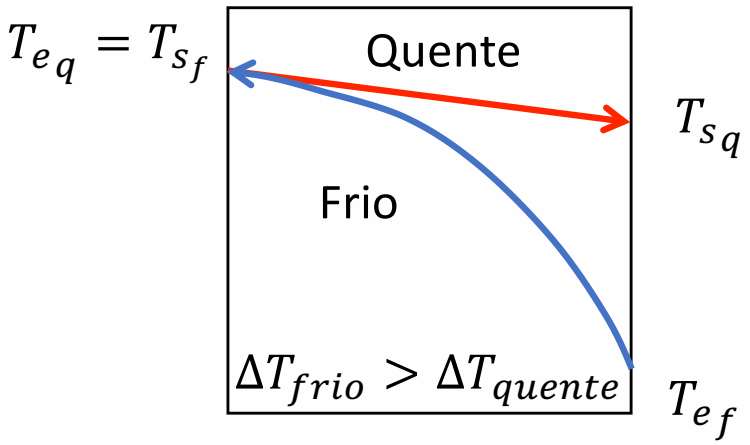
- O calor específico é uma propriedade da substância (ou do fluido); a capacidade térmica é uma propriedade do corpo (ou do fluxo do fluido)

Fluxo de calor máximo no trocador

- 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:

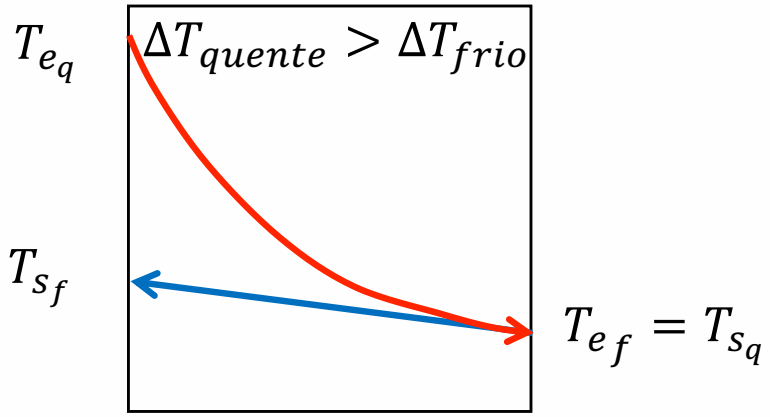
$$\dot{q} = C \cdot \Delta T$$

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



Caso $C_{frio} < C_{quente}$

$$\dot{q}_{máx} = C_f \cdot \left(T_{e_q} - T_{e_f}\right)$$



Caso $C_{quente} < C_{frio}$

$$\dot{q}_{máx} = C_q \cdot \left(T_{e_q} - T_{e_f}\right)$$

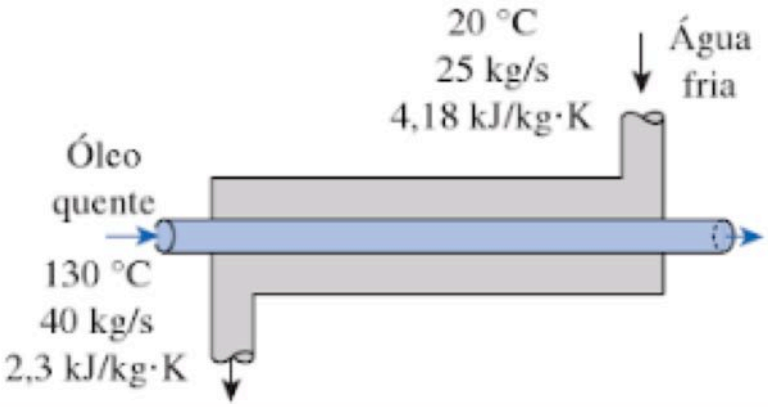
Fluxo de calor máximo no trocador

- Generalizando os dois casos anteriores, podemos afirmar que:

$$\dot{q}_{máx} = C_{mín} \cdot \left(T_{e_q} - T_{e_f}\right)$$

Onde $C_{mín}$ é a menor capacidade de calor entre os dois fluidos (válida para correntes paralelas e opostas)

- Exemplo: calcule o $\dot{q}_{máx}$ no seguinte cenário



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

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

O $C_{mín}$ é o da água

$$\dot{q}_{máx} = C_{mín} \cdot \left(T_{e_q} - T_{e_f}\right) = 0{,}92 \cdot 10^5 \cdot (130 - 20) \Rightarrow \dot{q}_{máx} = 1{,}01 \cdot 10^7 \ W$$

Efetividade do trocador

- Definimos assim a efetividade do trocador como:

$$\varepsilon = \frac{\dot{q}}{\dot{q}_{máx}}$$

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

- Portanto:

$$\dot{q} = \dot{q}_{máx} \cdot \varepsilon$$

$$\dot{q} = \varepsilon \cdot C_{mín} \cdot \left(T_{e_q} - T_{e_f}\right)$$

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

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:

$$NUT = \frac{U \cdot A}{C_{mín}}$$

- 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:

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

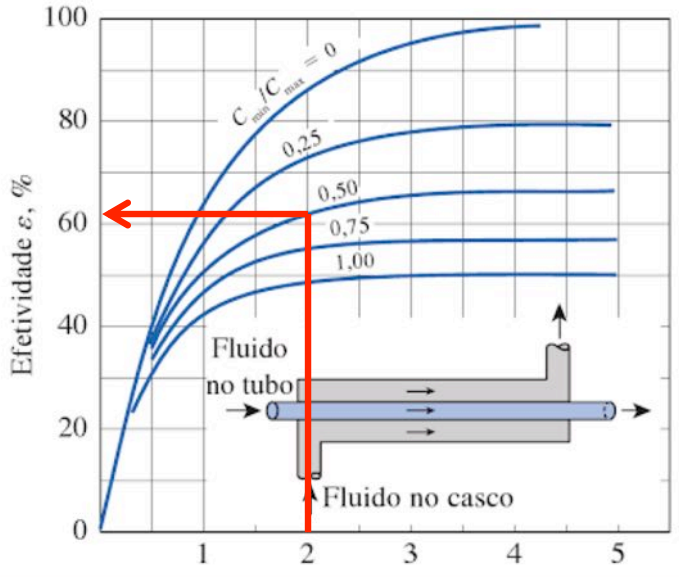
- Quanto maior o NUT, mais próximo o trocador está do seu limite termodinâmico

Efetividade do trocador

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

$$z = \frac{C_{mín}}{C_{máx}}$$

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

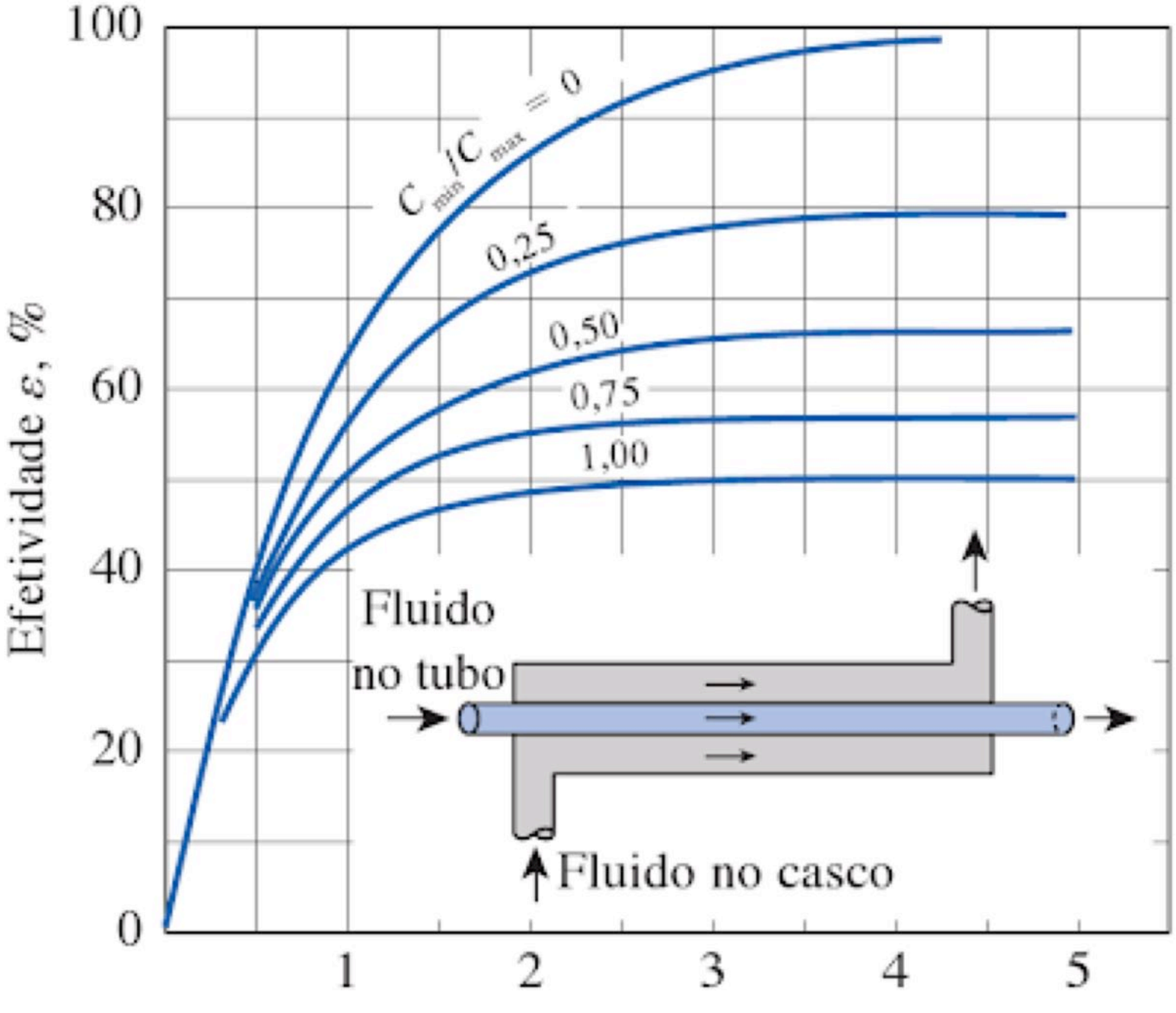


Por exemplo para tubo duplo, correntes paralelas, com $NUT = 2$ e $z = 0{,}50$, teremos:

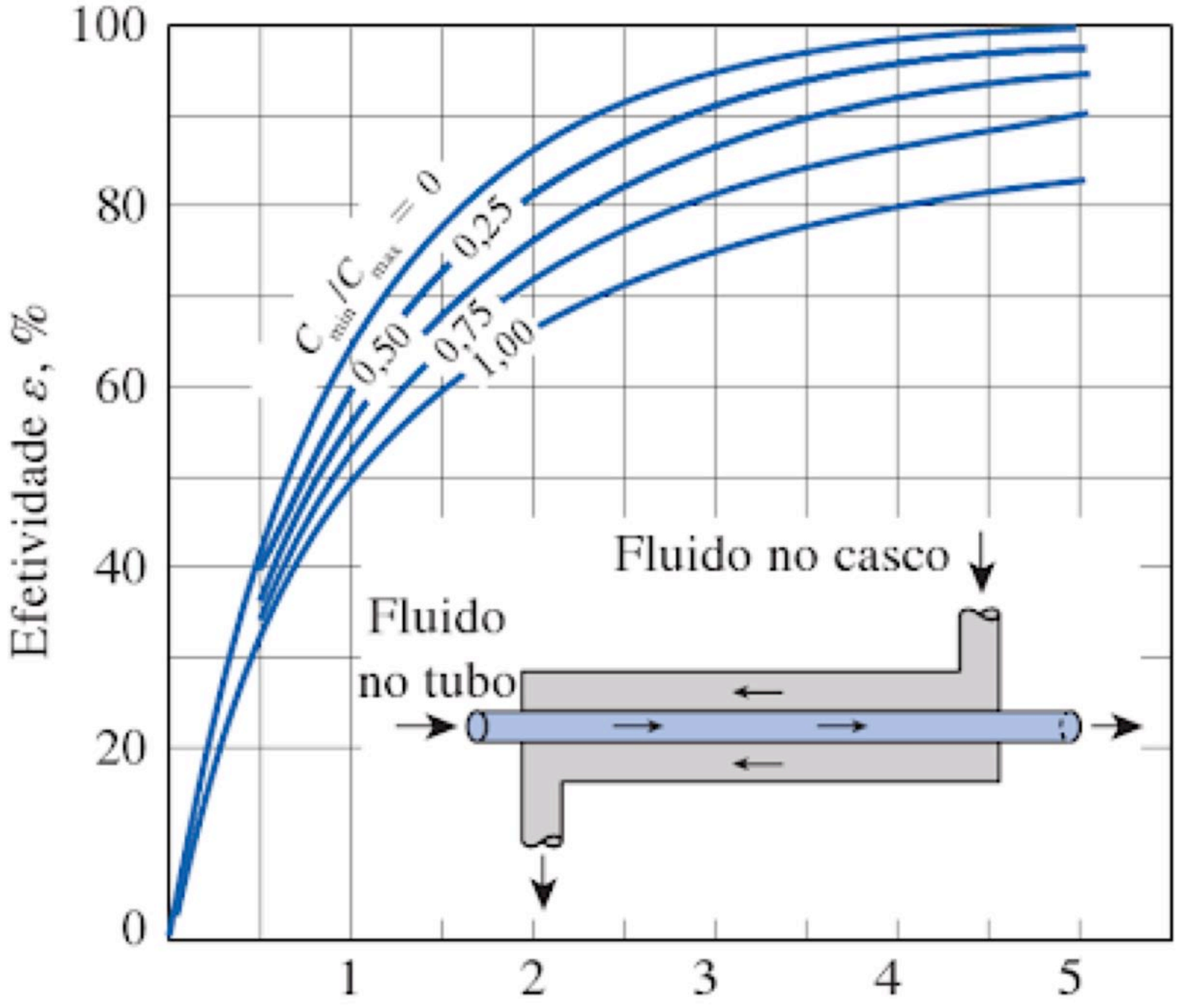
$$\varepsilon = 63\% = 0{,}63$$

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

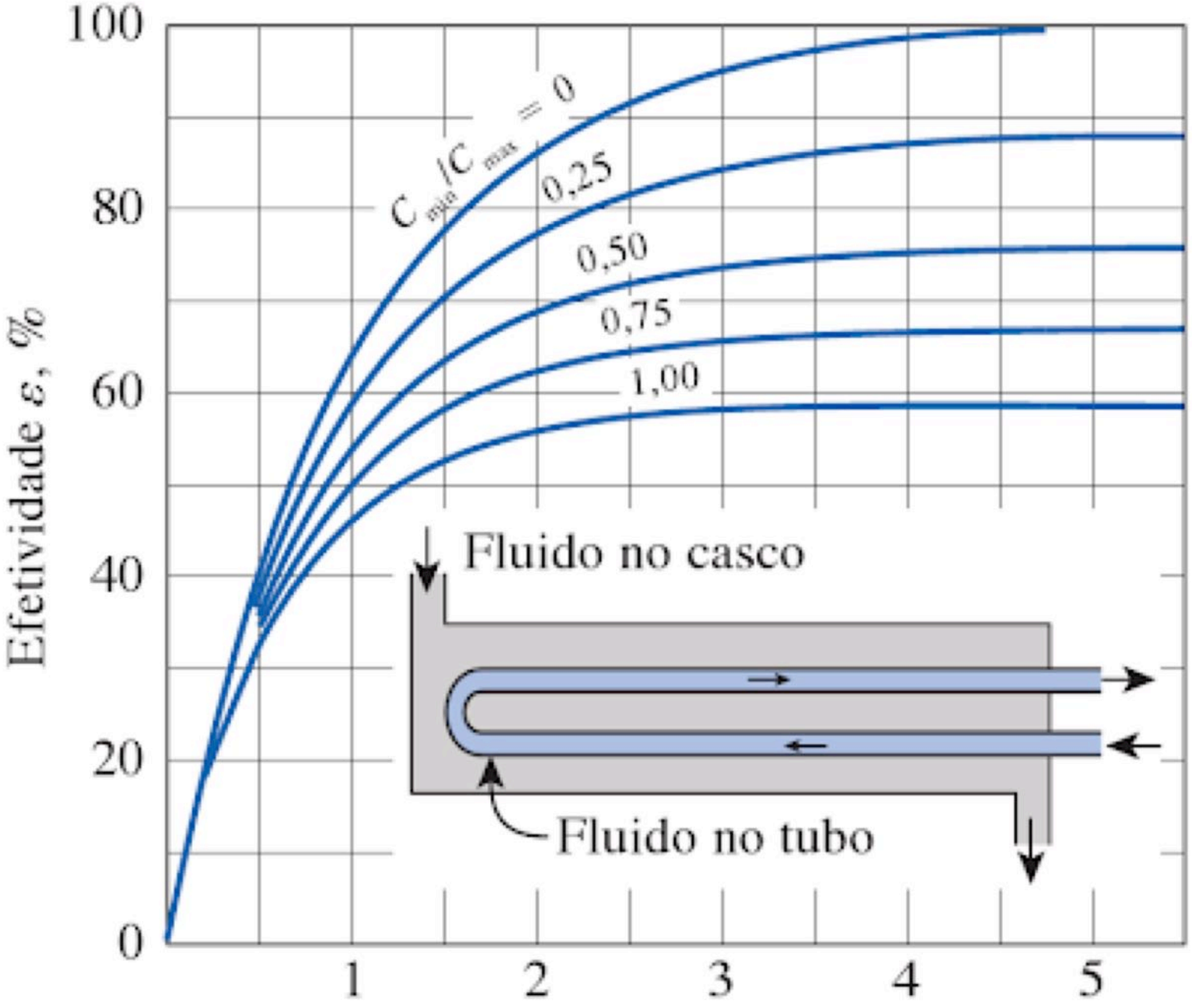
Efetividade



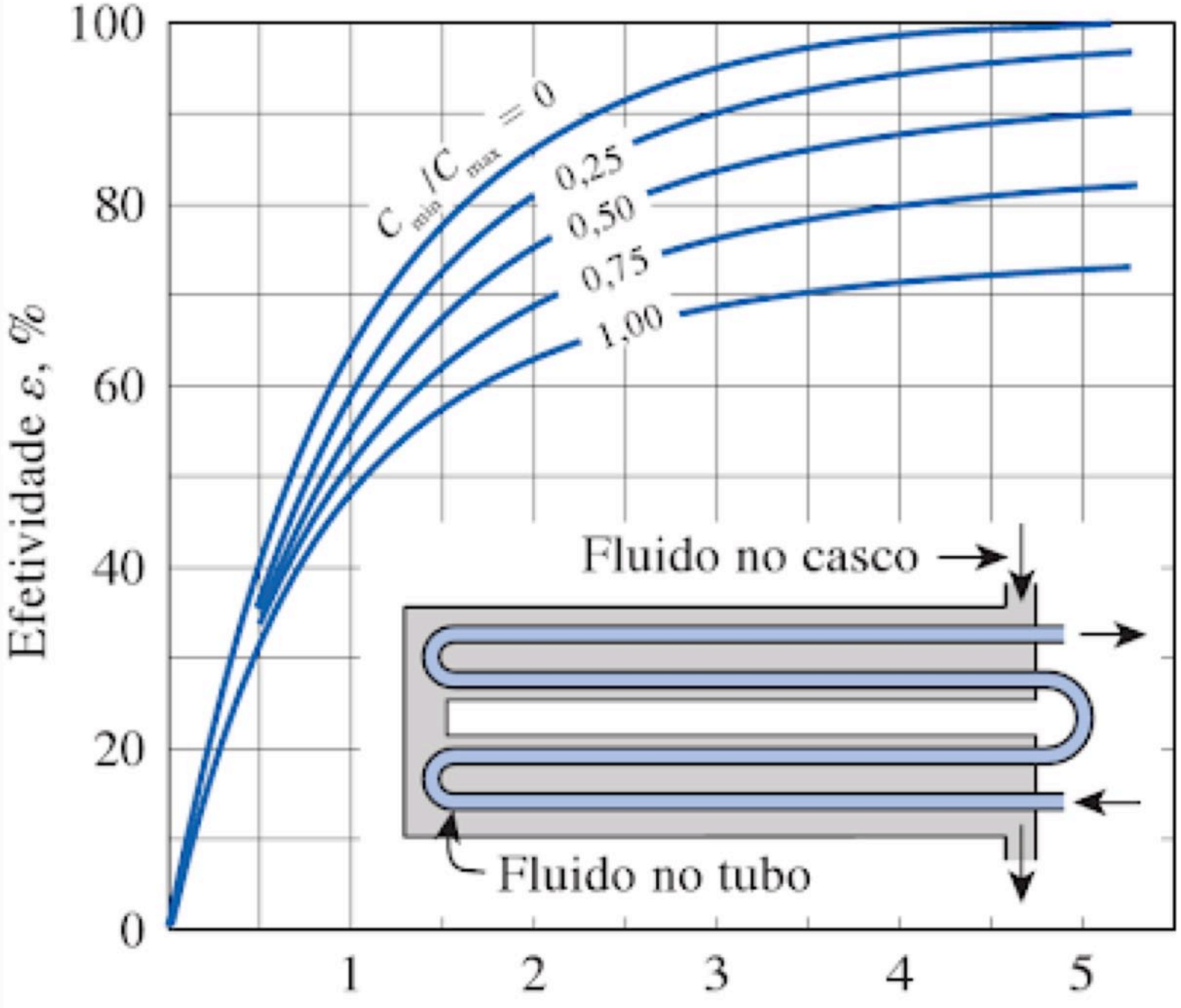
Efetividade



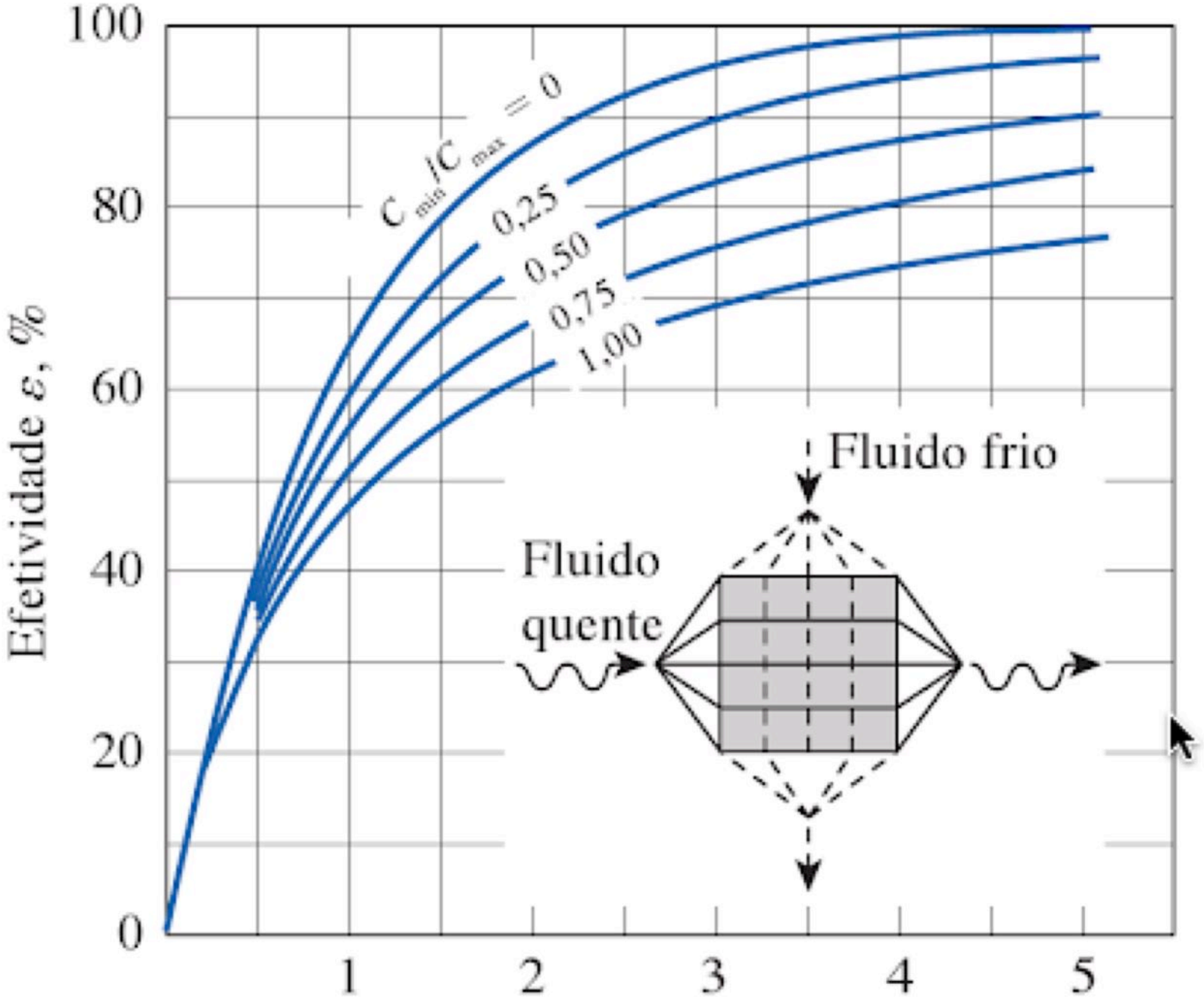
Efetividade



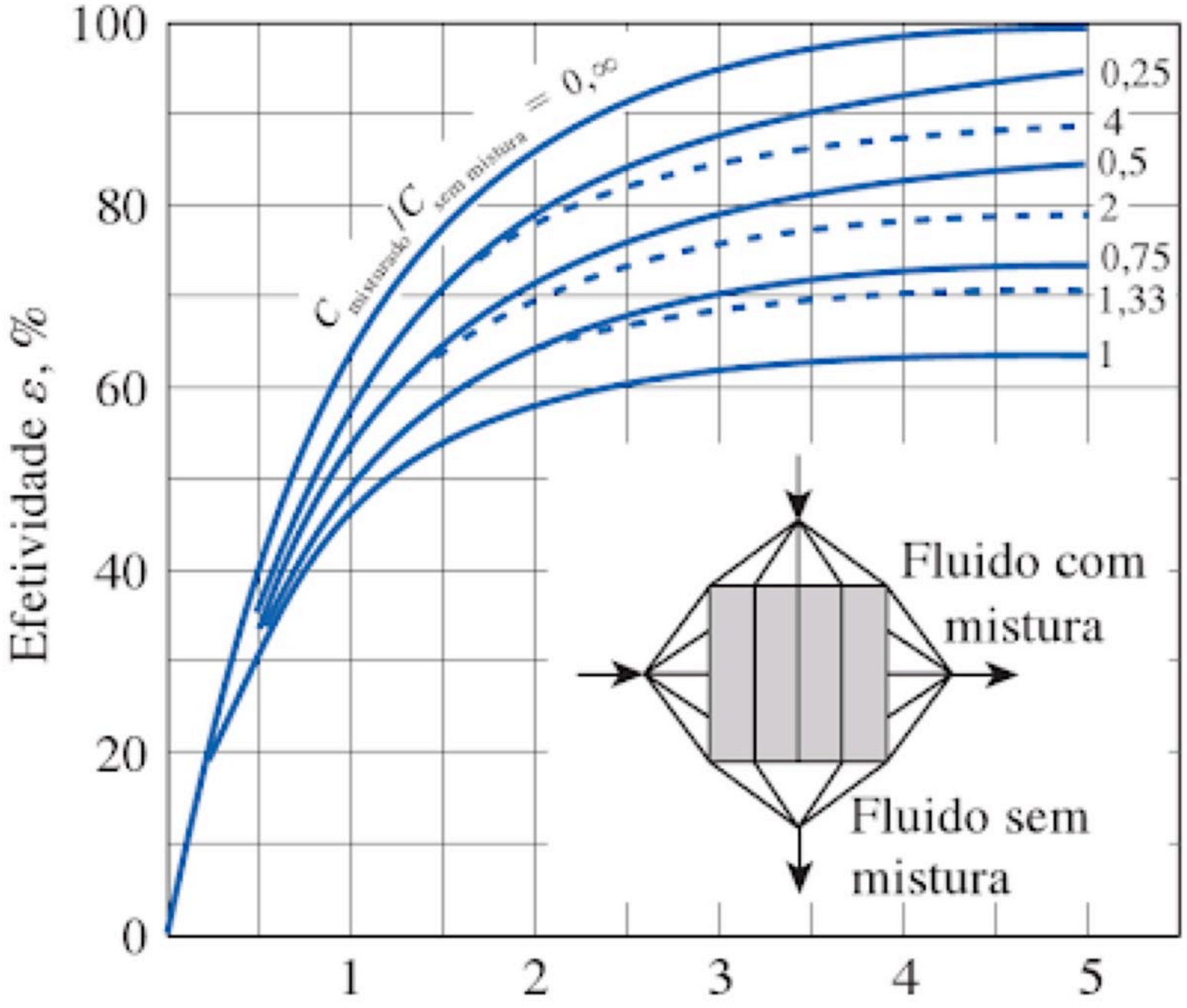
Efetividade



Efetividade



Efetividade



Efetividade em função do NUT - Fórmulas

Configuração do Escoamento	Relação	
Escoamento paralelo	$\varepsilon = \dfrac{1 - \exp[-\text{NTU}(1 + C_r)]}{1 + C_r}$	
Escoamento contracorrente	$\varepsilon = \dfrac{1 - \exp[-\text{NTU}(1 - C_r)]}{1 - C_r \exp[-\text{NTU}(1 - C_r)]}$	$(C_r < 1)$
	$\varepsilon = \dfrac{\text{NTU}}{1 + \text{NTU}}$	$(C_r = 1)$
Casco e tubos		
Um passe no casco (2, 4, … passes nos tubos)	$\varepsilon_1 = 2\left\{1 + C_r + (1 + C_r^2)^{1/2} \times \dfrac{1 + \exp[-(\text{NTU})_1(1 + C_r^2)^{1/2}]}{1 - \exp[-(\text{NTU})_1(1 + C_r^2)^{1/2}]}\right\}^{-1}$	
n passes no casco ($2n$, $4n$, … passes nos tubos)	$\varepsilon = \left[\left(\dfrac{1 - \varepsilon_1 C_r}{1 - \varepsilon_1}\right)^n - 1\right]\left[\left(\dfrac{1 - \varepsilon_1 C_r}{1 - \varepsilon_1}\right)^n - C_r\right]^{-1}$	
Escoamento cruzado (passe único)		
Dois fluidos não misturados	$\varepsilon = 1 - \exp\left[\left(\dfrac{1}{C_r}\right)(\text{NTU})^{0,22}\{\exp[-C_r(\text{NTU})^{0,78}] - 1\}\right]$	
$C_{máx}$ (misturado), $C_{mín}$ (não misturado)	$\varepsilon = \left(\dfrac{1}{C_r}\right)(1 - \exp\{-C_r[1 - \exp(-\text{NTU})]\})$	
$C_{mín}$ (misturado), $C_{máx}$ (não misturado)	$\varepsilon = 1 - \exp(-C_r^{-1}\{1 - \exp[-C_r(\text{NTU})]\})$	
Todos os trocadores ($C_r = 0$)	$\varepsilon = 1 - \exp(-\text{NTU})$	

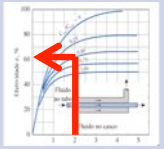
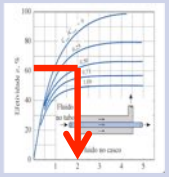
NTU em função da efetividade

Configuração do Escoamento	Relação
Escoamento paralelo	$\text{NTU} = -\dfrac{\ln[1 - \varepsilon(1 + C_r)]}{1 + C_r}$
Escoamento contracorrente	$\text{NTU} = \dfrac{1}{C_r - 1}\ln\left(\dfrac{\varepsilon - 1}{\varepsilon C_r - 1}\right)$ $(C_r < 1)$
	$\text{NTU} = \dfrac{\varepsilon}{1 - \varepsilon}$ $(C_r = 1)$
Casco e tubos	
Um passe no casco (2, 4, … passes nos tubos)	$(\text{NTU})_1 = -(1 + C_r^2)^{-1/2}\ln\left(\dfrac{E - 1}{E + 1}\right)$ $E = \dfrac{2/\varepsilon_1 - (1 + C_r)}{(1 + C_r^2)^{1/2}}$
n passes no casco ($2n$, $4n$, … passes nos tubos)	Use as Equações 11.30b e 11.30c com $\varepsilon_1 = \dfrac{F - 1}{F - C_r}$ $F = \left(\dfrac{\varepsilon C_r - 1}{\varepsilon - 1}\right)^{1/n}$ $\text{NTU} = n(\text{NTU})_1$
Escoamento cruzado (passe único)	
$C_{máx}$ (misturado), $C_{mín}$ (não misturado)	$\text{NTU} = -\ln\left[1 + \left(\dfrac{1}{C_r}\right)\ln(1 - \varepsilon C_r)\right]$
$C_{mín}$ (misturado), $C_{máx}$ (não misturado)	$\text{NTU} = -\left(\dfrac{1}{C_r}\right)\ln[C_r\ln(1 - \varepsilon) + 1]$
Todos os trocadores ($C_r = 0$)	$\text{NTU} = -\ln(1 - \varepsilon)$

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 $Z=C_{mín}/C_{máx}$ - 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	Cmáx misturado, Cmín não misturado	0,365
17	Cmáx não misturadok, Cmín misturado	0,365
18	**Trocador de casto 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://checalc.com/solved/heat_exch_analysis.html

Para calcular as T_s		Para calcular a área	
Dados: $A, U, T_{ef}, T_{eq}, \dot{m}_f$ e $\dot{m}q$		Dados: $T_{ef}, T_{sf}, T_{eq}, T_{eq}, \dot{m}_f$ ou $\dot{m}_q$	
1. Calcular $C_{mín}$ e $C_{máx}$	$C = \dot{m} \cdot c$	1. Calcular o $\dot{m}$ 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	$z = \frac{C_{mín}}{C_{máx}}$
3. Determinar a efetividade e		5. Calcular o $\dot{q}_{máx}$	$\dot{q}_{máx} = C_{mín} \cdot \left(T_{e_q} - T_{e_f}\right)$
4. Calcular $\dot{q}$	$\dot{q} = \varepsilon \cdot C_{mín} \cdot \left(T_{e_q} - T_{e_f}\right)$	5. Calcular a efetividade e	$\varepsilon = \frac{\dot{q}}{\dot{q}_{máx}}$
5. Calcular as T_s	$\dot{q} = \dot{m}_f \cdot c \cdot \left(\boldsymbol{T_{s_f}} - T_{e_f}\right)$ $\dot{q} = \dot{m}_q \cdot c \cdot \left(T_{e_q} - \boldsymbol{T_{s_q}}\right)$	6. Determinar o NUT	
		7. Calcular a área	$NUT = \frac{U \cdot \boldsymbol{A}}{C_{mín}}$

Exemplo 1

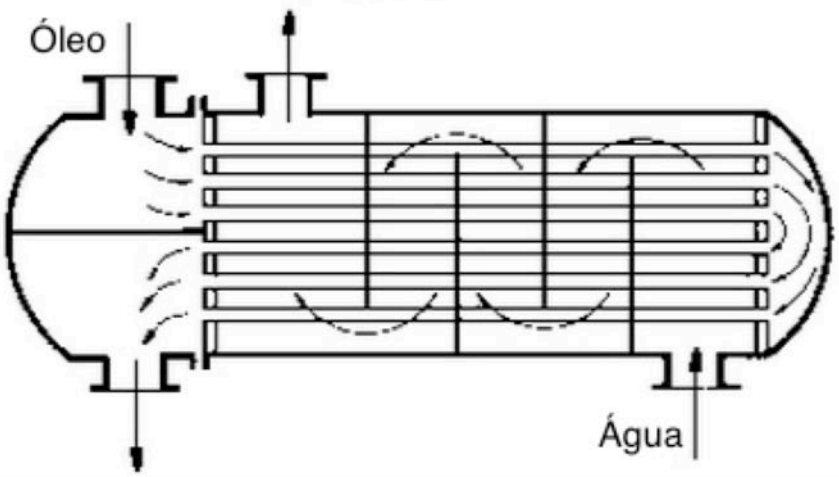
- Um trocador de calor tipo casco e tubo, com um passe no casco e quatro passes no tubo, tem 4,8 m^2 de área de troca. O coeficiente global de troca de calor dessa unidade é estimado em 312 W/m^2K. O trocador foi projetado para uso com água e benzeno, mas pretende-se usá-lo agora para resfriar uma corrente 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 12,8°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

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

Exercício

- O calor excedente no óleo (cp=1884 J/kgK) de um processo será usado para aquecer um fluxo de água (cp=4187 J/kgK). 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 W/m^2K.



Resposta: 64 m^2