

## Operações Unitárias II – Lista de Exercícios 1

Profa. Dra. Milena Martelli Tosi

1. Vapor d'água condensado sobre a superfície externa de um tubo circular de parede fina, com diâmetro interno igual a 50 mm e comprimento igual a 6 m, mantém uma temperatura na superfície externa uniforme de 100°C. Água escoou através do tubo a uma vazão de 0,25 kg/s e suas temperaturas na entrada e saída do tubo são 15 e 57°C, respectivamente. Qual é o coeficiente convectivo médio associado ao escoamento da água. [Respostas:  $h = 755,6 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ ].

2. Um trocador de calor de tubo duplo é construído com tubo interno de cobre ( $k = 380 \text{ W/m.K}$ ) que possui diâmetro de 1,2 cm e espessura 0,2 cm. Já o tubo externo (casco) é de aço inoxidável ( $k = 14,2 \text{ W/m.K}$ ) e possui diâmetros interno de 3 cm e externo de 3,5 cm. O coeficiente convectivo entre o fluido e a parede interna do tubo de cobre foi determinado experimentalmente com valor de  $700 \text{ W/m}^2.\text{K}$  e o coeficiente convectivo entre o fluido e a superfície externa do tubo de cobre apresentou o valor de  $1.400 \text{ W/m}^2.\text{K}$ . Para um fator de incrustação interno de  $0,0005 \text{ m}^2.\text{°C/W}$  e externo  $0,0002 \text{ m}^2.\text{°C/W}$ , determine: [Respostas:  $R = 0,0837 \text{ °C/W}$ ;  $U_i = 317 \text{ W/m}^2.\text{°C}$  e  $U_e = 238 \text{ W/m}^2.\text{°C}$ ]

- a. A resistência térmica total por unidade de comprimento.
- b. O coeficiente global de troca térmica com base nas áreas interna e externa do tubo.

## Operações Unitárias II – Lista de Exercícios 1

Profa. Dra. Milena Martelli Tosi

3. Água flui, em escoamento turbulento completamente desenvolvido, à temperatura média de 110 °C e com velocidade de 3,5 m/s em um tubo de aço inoxidável de 5 metros de comprimento. O diâmetro interno do tubo é de 1,0 cm com espessura de 0,2 cm. O coeficiente de transferência de calor na superfície externa do tubo é de 8.400 W/m<sup>2</sup>.K, determine o coeficiente global de troca térmica com base na superfície interna do tubo.

[Resposta:  $U_i = 4.136,5 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ ]

4. Repita o exercício anterior supondo um fator de incrustação de 0,0005 m<sup>2</sup>.°C/W sobre a superfície interna do tubo e obtenha o coeficiente global de troca térmica sujo com base na área interna. [Resposta:  $U_{sujo} = 1.340 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ ]

5. Um trocador de calor de tubo duplo possui um tubo interno com diâmetro de 1,0 cm e um tubo externo com diâmetro de 2,5 cm e é utilizado para condensar fluido refrigerante de um sistema de refrigeração através da troca térmica com água a 20°C. O refrigerante flui no tubo com coeficiente convectivo de 5.000 W/m<sup>2</sup>.K. A água flui em regime turbulento completamente desenvolvido a uma velocidade de 201,7 m/s. Determine o coeficiente global de troca térmica desse trocador de calor.

[Resposta:  $U = 2.057 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ ]

6. Com base nos dados do exercício anterior suponha uma camada incrustada de calcário ( $k = 1,3 \text{ W/m.K}$ ) na superfície externa do tubo interno gerando uma resistência por incrustação de 0,041 °C/W e determine: [Respostas:  $e = 2 \text{ mm}$ ;  $U_{sujo} = 545,4 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ ]

- a. A espessura do calcário incrustado.
- b. O coeficiente global de troca térmica ( $U_{sujo}$ ).

7. Demonstre por que o potencial térmico médio em trocadores de calor é estimado pela Média Logarítmica da Diferença de Temperatura (MLDT).

8. Considere um trocador de calor de tubo duplo, de água para água, cuja disposição do fluxo não se conhece. As medidas de temperatura indicam que a água fria entra a 20 °C e sai a 50 °C enquanto que a água quente entra a 80 °C e sai a 45 °C. O trocador em questão possui fluxo em paralelo ou em contracorrente? Explique.

## Operações Unitárias II – Lista de Exercícios 1

Profa. Dra. Milena Martelli Tosi

9. Suco de uva é pasteurizado a 98 °C com vazão de 8000 L/h e deve ser resfriado a 20 °C para que seja envasado, para isso utiliza-se água a 5 °C com vazão de 20000 L/h.

Determine: [Respostas:  $T_{sf} = 34$  °C;  $\Delta T_{ML} = 33,8$  °C]

- a. A temperatura da água na saída do trocador.
- b. A média logarítmica das diferenças de temperatura.

**DADOS: Utilizar propriedades termofísicas do suco como solução de sacarose 20%.**

10. Um trocador de calor é utilizado para resfriar água de 90 °C para 60 °C usando ar com temperatura de entrada de 30 °C. Considerando que as vazões mássicas de água e ar são 42.000 Kg/h e 180.000 Kg/h, respectivamente, determine a média logarítmica das diferenças de temperatura para arranjos em paralelo e em contracorrente.

[Respostas:  $\Delta T_{ML} = 13,89$  °C;  $\Delta T_{ML} = 30,42$  °C]

11. Um trocador de calor de tubo duplo com escoamento paralelo é utilizado para aquecer água fria com água quente. A água quente ( $C_p = 4,25$  KJ/Kg.K) entra no tubo a 85 °C, a uma taxa de 1,4 Kg/s, e o deixa a 50 °C. O trocador de calor possui aproveitamento térmico de 97%, coeficiente global de troca térmica de 1.150 W/m<sup>2</sup>.K e área de 4 m<sup>2</sup>, determine a média logarítmica das diferenças de temperatura para esse trocador. [Resposta:  $\Delta T_{ML} = 43,9$  °C]

12. Demonstre quais médias das áreas devem ser utilizadas em coordenadas planas, cilíndricas e esféricas.

13. Um trocador de calor contracorrente de tubo duplo deve aquecer água de 20°C a 80°C a uma taxa de 1,2 kg/s. O aquecimento é obtido por água disponível a 160°C com vazão mássica de 2 kg/s. O tubo interno tem uma parede fina e diâmetro de 1,5 cm. Considerando que o coeficiente global de transferência de calor do trocador é 640 W/m<sup>2</sup>.°C, determine a área de troca térmica necessária e o comprimento do trocador de calor necessário para alcançar o aquecimento desejado. [Respostas:  $A = 5,14$  m<sup>2</sup>;  $L = 109$  m]

## Operações Unitárias II – Lista de Exercícios 1

Profa. Dra. Milena Martelli Tosi

14. Um trocador de calor bitubular (tubos concêntricos) com configuração em contracorrente é utilizado para resfriar suco de laranja. A vazão da água de resfriamento através da região anular ( $D_e = 45\text{ mm}$ ) é  $0,1\text{ kg/s}$ , enquanto a vazão de suco através do tubo interno ( $D_i = 25\text{ mm}$ ) é de  $0,2\text{ kg/s}$ . O suco e a água entram a temperaturas de  $100$  e  $30\text{ }^\circ\text{C}$ , respectivamente. Qual deve ser o comprimento do trocador se a temperatura de saída da água deve ser de  $60\text{ }^\circ\text{C}$ ? Desconsiderar resistência térmica por condução e por incrustação. [Resposta:  $L = 7,3\text{ m}$ ].

**DADOS: Utilizar propriedades termofísicas do suco como solução de sacarose 20%.**

### Algumas tabelas úteis

#### Propriedades termofísicas para solução de sacarose em diferentes concentrações

Densidade ( $\text{kg/m}^3$ )

T( $^\circ\text{C}$ )	20%	30%	40%	50%	60%
10	1077,8	1123,4	1173,0	1227,2	1286,7
20	1076,4	1121,9	1171,4	1225,4	1284,7
30	1074,4	1119,8	1169,2	1223,1	1282,3
40	1071,7	1117,0	1166,4	1220,2	1279,3
50	1068,3	1113,6	1162,9	1216,8	1275,9
60	1064,2	1109,5	1158,8	1212,7	1271,9
70	1059,4	1104,7	1154,1	1208,1	1267,5
80	1053,8	1099,3	1148,8	1203,0	1262,5
90	1047,6	1093,1	1142,8	1197,2	1257,0
100	1040,6	1086,3	1136,2	1190,8	1251,0

Calor específico ( $\text{kJ/kg.K}$ )

T( $^\circ\text{C}$ )	20%	30%	40%	50%	60%
10	3,654	3,393	3,133	2,872	2,611
20	3,658	3,399	3,140	2,881	2,622
30	3,663	3,406	3,148	2,890	2,633
40	3,669	3,412	3,156	2,900	2,643
50	3,675	3,419	3,164	2,909	2,653
60	3,681	3,427	3,172	2,918	2,663
70	3,689	3,435	3,181	2,927	2,673
80	3,697	3,443	3,189	2,936	2,682
90	3,705	3,452	3,198	2,945	2,691
100	3,715	3,461	3,207	2,954	2,700

**Operações Unitárias II – Lista de Exercícios 1**  
 Profa. Dra. Milena Martelli Tosi

Conductividade térmica (W/m.K)					
T(°C)	20%	30%	40%	50%	60%
10	0,538	0,509	0,478	0,445	0,408
20	0,553	0,524	0,493	0,459	0,422
30	0,567	0,538	0,506	0,472	0,435
40	0,579	0,550	0,519	0,484	0,447
50	0,591	0,562	0,530	0,496	0,458
60	0,601	0,572	0,540	0,506	0,467
70	0,610	0,581	0,549	0,514	0,476
80	0,618	0,589	0,557	0,522	0,484
90	0,624	0,595	0,564	0,529	0,491
100	0,629	0,601	0,569	0,535	0,497

**Correlações de Nusselt para diferentes condições de processo**

TABELA 8.4 Resumo das correlações de convecção para escoamento em um tubo circular<sup>1,2,3,4</sup>

CORRELAÇÃO	CONDIÇÕES
$f = 64/Re_D$	(8.19) Laminar, plenamente desenvolvido
$Nu_D = 4,36$	(8.53) Laminar, plenamente desenvolvido, $q_w''$ uniforme, $Pr \geq 0,6$
$Nu_D = 3,66$	(8.55) Laminar, plenamente desenvolvido, $T_w$ uniforme, $Pr \geq 0,6$
$\overline{Nu}_D = 3,66 + \frac{0,0668(D/L)Re_D Pr}{1 + 0,04[(D/L)Re_D Pr]^{1/3}}$	(8.56) Laminar, comprimento térmico de entrada ( $Pr \geq 1$ ou um comprimento inicial não-aquecido), $T_w$ uniforme
ou $\overline{Nu}_D = 1,86 \left( \frac{Re_D Pr}{L/D} \right)^{1/3} \left( \frac{\mu}{\mu_s} \right)^{0,14}$	(8.57) Laminar, comprimento de entrada combinado $\{ [Re_D Pr (L/D)]^{1/3} (\mu/\mu_s)^{0,14} \} \geq 2$ , $T_w$ uniforme, $0,48 < Pr < 16.700$ , $0,0044 < (\mu/\mu_s) < 9,75$
$f = 0,316 Re_D^{-1/4}$	(8.20a) <sup>c</sup> Turbulento, plenamente desenvolvido, $Re_D \leq 2 \times 10^4$
$f = 0,184 Re_D^{-1/5}$	(8.20b) <sup>c</sup> Turbulento, plenamente desenvolvido, $Re_D \geq 2 \times 10^4$
ou $f = (0,790 \ln Re_D - 1,64)^{-2}$	(8.21) <sup>c</sup> Turbulento, plenamente desenvolvido, $3000 \leq Re_D \leq 5 \times 10^6$
$Nu_D = 0,023 Re_D^{4/5} Pr^n$	(8.60) <sup>d</sup> Turbulento, plenamente desenvolvido, $0,6 \leq Pr \leq 160$ , $Re_D \geq 10.000$ , $(L/D) \geq 10$ , $n = 0,4$ para $T_w > T_m$ e $n = 0,3$ para $T_w < T_m$
ou $Nu_D = 0,027 Re_D^{4/5} Pr^{1/3} \left( \frac{\mu}{\mu_s} \right)^{0,14}$	(8.61) <sup>d</sup> Turbulento, plenamente desenvolvido, $0,7 \leq Pr \leq 16.700$ , $Re_D \geq 10.000$ , $(L/D) \geq 10$
ou $Nu_D = \frac{(f/8)(Re_D - 1000)Pr}{1 + 12,7(f/8)^{1/2}(Pr^{2/3} - 1)}$	(8.63) <sup>d</sup> Turbulento, plenamente desenvolvido, $0,5 < Pr < 2000$ , $3000 \leq Re_D \leq 5 \times 10^6$ , $(L/D) \geq 10$
$Nu_D = 4,82 + 0,0185(Re_D Pr)^{0,827}$	(8.65) Metais líquidos, turbulento, plenamente desenvolvido, $q_w''$ uniforme, $3,6 \times 10^3 < Re_D < 9,05 \times 10^3$ , $10^2 < Pe_D < 10^4$
$Nu_D = 5,0 + 0,025(Re_D Pr)^{0,8}$	(8.66) Metais líquidos, turbulento, plenamente desenvolvido, $T_w$ uniforme, $Pe_D > 100$