

Instalações Térmicas

3º ano 6º semestre

Aula 22

Aula 22: Dispositivos de recuperação de calor-Prática



Tópicos

- *Trocadores de Calor de Multipasses e de Fluxo Cruzado (uso do factor de correcção)*
- *Permutadores*
- *Balanço de Calor Real*



Problema 22.1

Calcular o consumo de combustível para um forno com as seguintes características:

Temperatura final do metal	1250	°C
Temperatura inicial do metal	20	°C
Temperatura dos gases de escape	800	°C
Temperatura exterior	25	°C
Calor específico do metal	0,68	kJ/kgK
Produtividade do forno	50000	kg/h
Temperatura do combustível	120	°C
Densidade do Combustível	1,3	kg/m ³
Calor específico dos gases	1,4	kJ/m ³ K
Calor específico do ar	1,298	kJ/m ³ K
Temperatura do ar	140	°C
Excesso de ar	30%	



Problema 22.1



Coeficiente Pirométrico	0.7	
Calor das reacções exotérmicas	1	%
Perdas pelas reacções exotérmicas	5650	kJ/kg
Calor específico da escória	6500	kJ/kgK
Temperatura da escória	200	°C
Proporção não queimada	0.01	
Coeficiente perdas	0.02	
Área do Teto	90	m ²
Espessura do teto	0.3	m
Coeficiente de convecção do com o ambiente h	19.8	W/(m ² ·°C)
Área da Parede	77.4	m ²
Temp média do tijolo	550	°C
Espessura da camada de tijolo	0.345	m
Temperatura média da deodolomite	150	°C
Espessura da camada de deodolomite	0.115	m

Problema 22.1



Coeficiente de convecção do com o ambiente <i>h</i>	19.8	W/(m ² ·°C)
Espessura da Parede	0.460	m
Constante de Boltzman	5.768	W/(m ² ·K ⁴)
Altura da porta	0.450	m
Largura da porta	1.2	m
Tempo de abertura da porta	30	minutos
Massa do recipiente	0	kg/h
Calor específico do recipiente	0	kJ/kgK
Temperatura do recipiente	0	°C
Coeficiente de perdas com a água	0.1	
Volume do revestimento	0	m ³
Densidade do revestimento	0	kg/m ³
Calor específico do revestimento	0	kJ/kgK
Temperatura do revestimento	0	°C
Coeficiente das perdas não contabilizadas	0.2	
Velocidade do Gás	3.5	m/s
Velocidade do Ar	6	m/s

Problema 22.1

O forno utiliza um combustível gasoso com a seguinte composição em percentagem apresentada na tabela.

Para o mesmo forno, determinar o número de tubos do recuperador, sabendo que este é de tubos lisos com comprimento de 880 mm. A velocidade do gás é de 3.5 m/s e a do ar de 6 m/s.

H ₂	18
CO	10
H ₂ S	5
CH ₄	5
C ₂ H ₆	7
C ₃ H ₈	5
C ₂ H ₄	7,5
C ₄ H ₁₀	2
C ₅ H ₁₂	2
C ₃ H ₆	6
C ₄ H ₈	9
CO ₂	6,49
N ₂	17
Oxigénio	0
Cinzas	0
Humidade	0,01



Problema 22.1 – resolução

O volume de ar teórico calcula-se de:

$$V_{ar}^o = 0,0476 \left[0,5CO + 0,5H_2 + 1,5H_2S + \sum \left(m + \frac{n}{4} \right) C_m H_n - O_2 \right]$$

$$V_{ar}^o = 10,163 \frac{m^3}{m_{comb}^3}$$

O volume teórico dos gases Biatómicos

$$V_{RO}^o = 0,79 \cdot V_{ar}^o + 0,01 \cdot N_2$$

$$V_{RO}^o = 8,198 \frac{m^3}{m_{comb}^3}$$



O volume teórico de vapor de água

$$V_{H_2O}^o = 0,01 \cdot \left\{ H_2S + H_2 + \sum \left[\left(\frac{n}{2} \right) C_m H_n \right] + 0,0124 \cdot W \right\} + 0,0161 V_{ar}^o$$

$$V_{H_2O}^o = 1,814 \frac{m^3}{m_{comb}^3}$$

Problema 22.1 -resolução (continuação)

Volume dos Gases Biatômicos

$$V_{RO} = V^{\circ}_{N_2} + (\alpha - 1) \cdot V^{\circ}_{ar} \cdot 0,79$$

$$V_{RO} = 10,607 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^3_{\text{comb}}}$$

Volume Real dos Gases Triatómicos

$$V_{R0_2} = 0,01 \cdot [CO_2 + CO + H_2S + \sum mC_m H_m]$$

$$V_{R0_2} = 1,425 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^3_{\text{comb}}}$$



Volume Real do Vapor de Água

$$V_{H_2O} = V^{\circ}_{H_2O} + 0,0161 \cdot (\alpha - 1) \cdot V^{\circ}_{ar}$$

$$V_{H_2O} = 1,863 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^3_{\text{comb}}}$$

Problema 22.1 -resolução (continuação)

Volume do Oxigénio excedente

$$V_{O_2} = 0,21 \cdot (\alpha - 1) \cdot V_{ar}^o$$

$$V_{O_2} = 0,640 \frac{\text{m}^3}{\text{m}_{\text{comb}}^3}$$

Volume dos Gases de Combustão

$$V_g = V_{RO_2} + V_{RO} + V_{H_2O} + V_{O_2}$$

$$V_g = 14,535 \frac{\text{m}^3}{\text{m}_{\text{comb}}^3}$$



Problema 22.1 -resolução (continuação)

Fracção Volúmica dos Gases Produtos de Combustão

$$r_{RO_2} = \frac{V_{RO_2}}{V_g} = 0,098$$

$$r_{RO} = \frac{V_{R_2}}{V_g} = 0,730$$

$$r_{H_2O} = \frac{V_{RH_2O}}{V_g} = 0,128$$

$$r_{O_2} = \frac{V_{RO_2}}{V_g} = 0,044$$



O Poder Calorífico do combustível gasoso calcula-se de:

11

$$Q^i = 108,3H_2 + 126,8CO + 234,6H_2S + 359,3CH_4 + 639,5C_2H_6 + 915,4C_3H_8 + \\ + 592,5C_2H_4 + 1190,2C_4H_{10} + 1465,4C_5H_{12} + 862,7C_3H_6 + 1138,7C_4H_8 + 126,4O_2$$

$$Q^i = 40419,85 \text{ kJ/m}^3$$

Problema 22.1 -resolução (continuação)


Entalpia da combustão

$$I_q = \frac{Q_i}{V_g} = 2780,89 \text{ kJ/m}^3$$

Entalpia do ar

$$I_{ar} = \frac{Q_{ar}}{V_g} = \frac{c_{p_{ar}} t_{ar} V_{ar} \alpha}{V_g} = 165,22 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3}$$

Entalpia do combustível


$$I_c = \frac{Q_c}{V_g} = \frac{c_{p_{comb}} t_{comb}}{V_g} = 11,558 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3}$$

Entalpia dos gases de escape

12

$$I_g = I_q + I_a + I_c = 2957,67 \text{ kJ/m}^3$$

Problema 22.1 -resolução (continuação)

Calcula-se a temperatura comparando:

$$\frac{(Q_i + Q_a + Q_c)}{V_{cp}} = r_{RO_2} (C\theta)_{RO_2} + r_{N_2} (C\theta)_{N_2} + r_{H_2O} (C\theta)_{H_2O} + r_{O_2} (C\theta)_{O_2}$$

Onde:

Q_a é o calor usado para o aquecimento do ar

Q_c é o calor usado para o aquecimento do combustível

Q_i é o poder calorífico inferior do combustível



Problema 22.1 -resolução (continuação)

Obtém-se:

$$t_c = 1813,15 \text{ } ^\circ\text{C}$$

A temperatura real do forno obtém-se de:

$$t_a = \eta \cdot t_c$$

$$t_a = 1269,2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Onde:



t_a - é a temperatura real do forno;

η é o coeficiente pirométrico que varia de 0,65 - 0,80 e que

depende do projecto do forno. (usou-se 0,7)

Balanço de Calor e Consumo de Combustível

1. Calor químico da combustão

$$Q_q = BQ_i^t = B \cdot 40419,85 \quad [\text{kJ/h}]$$

Onde:

B é o caudal do combustível, em kg/h ou m³/h;

Q_i^t é o poder calorífico inferior do combustível em massa de trabalho dado em kJ/kg ou kJ/m³.

2. Calor físico do ar pré-aquecido

$$Q_a = \dot{B} c_a t_a \alpha V_{ar}^o = \dot{B} \cdot 2401,53 \quad [\text{kJ/h}]$$

Onde:

t_a é a temperatura do ar de pré-aquecimento em °C

C_a é o calor específico do ar dos 0°C até t_a kJ/(m³°C)

α é o coeficiente de excesso de ar

V_{ar}^o é a quantidade teórica de ar requerida para queimar uma unidade de combustível em m³/kg ou m³/m³.



Balanço de Calor e Consumo de Combustível

3. Calor físico do combustível pré-aquecido

$$Q_c = \dot{B}c_f t_f = \dot{B} \cdot 168 \quad [\text{kJ/h}]$$

Onde:

c_f é o calor específico do combustível em °C ate t_f em $\text{kJ}(\text{m}^3\text{°C})$

t_f é a temperatura de pré-aquecimento de combustível em °C.

O calor útil será a soma dos três calores calculados (calor químico da combustão + calor físico do ar pré-aquecido + calor físico do combustível pré-aquecido)

$$Q_{util} = Q_q + Q_a + Q_c$$

$$Q_{util} = B \cdot 42989,377 \text{ kJ/h}$$



Balanço de Calor e Consumo de Combustível

4. O calor das reacções exotérmicas

Este item do balanço de calor engloba todas as reacções químicas dando um efeito térmico positivo, excepto as reacções de combustão do combustível. Nos fornos de aquecimento de metal o calor libertado pela sua oxidação é também tomado em conta. Um quilograma de metal liberta 5652 kJ de calor por causa do qual:

$$Q_{ex} = 5650 \cdot P \cdot a \quad [\text{kJ/h}]$$

$$Q_{ex} = 2825000 \quad [\text{kJ/h}]$$

Onde:

P é a produtividade do forno em kg/h

a são perdas por oxidação do metal em kg/kg do metal.(usou-se 1%)



Balanço de Calor e Consumo de Combustível

I. O calor requerido para o aquecimento e fusão do material

Com material frio a ser carregado no forno

$$Q_{us} = G c_m t_{m.f} \quad [\text{kJ/h}]$$

Com material pré-aquecido a ser carregado no forno

$$Q_{ust} = G (c_m t_{m.f} - c_m t_{m.in}) = 41820000 \quad [\text{kJ/h}]$$

Onde:

G é o fluxo mássico do material em kg/h

$t_{m.f}$ é a temperatura final do material a aquecer em °C

$t_{m.in}$ é a temperatura inicial do material em °C

c_{mf} é o calor específico médio do metal no intervalo de temperaturas de 0°C a $t_{m.f}$ em kJ/kg

c_m é o calor específico médio do metal no intervalo de temperaturas de 0°C até $t_{m.in}$ em kJ/kg

nos fornos de fusão de metal o calor latente de fusão do material também dever ser considerado



Balanço de Calor e Consumo de Combustível

II. Calor perdido com a escória

$$Q_{sl2} = G_{sl} c_{sl} t_{sl} \quad [\text{kJ/h}]$$

Onde

G_{sl} é a massa da escória em kg

t_{sl} é a temperatura da escória em °C

c_{sl} é o calor específico da escória em kJ/kg°C.

Para combustível gasoso, o calor perdido com a escória é igual a zero.



III. O calor Q_3 é típico dos fornos destinados à fusão do material, geralmente apenas inclui o calor perdido na decomposição de argilas.

Balanço de Calor e Consumo de Combustível

IV. Calor perdido com os gases de escape

$$Q_4 = Bv_{wg}c_{wg}t_{wg} \quad [\text{kJ/h}]$$

$$Q_4 = B \cdot 17073,843 \quad [\text{kJ/h}]$$

Onde:

t_{wg} é a temperatura dos gases de escape a saída do forno em °C

c_{wg} é o calor específico dos gases em kJ/(m³°C).

Uma certa quantidade de gases sai do forno através da boca do forno, fendas etc. por esta razão v_{wg} deve ser usado somente condicionalmente como a quantidade total de gases produzidos na combustão de uma unidade massa ou volume de combustível.



Balanço de Calor e Consumo de Combustível

V. Calor químico devido à combustão incompleta de combustível

Numa combustão com chama virtualmente não há perda de calor devido à combustão incompleta. Numa combustão com chama usualmente os gases da combustão tem 0,5 a 3 por cento de gases não queimados, (CO e H₂). Assume-se que 0.5% de H₂ diminuem em 1% CO. O valor do calor de uma mistura dessas é de 12 142kJ/m³. Definindo por **a** a proporção de CO não queimado, o calor perdido fica:

$$Q_5 = Bv_{wg} a \cdot 12142 \quad [\text{kJ/h}]$$

$$Q_5 = B \cdot 1764,820 \quad [\text{kJ/h}]$$

ou

$$Q_5 = Bv_{wg} a \cdot 2900 \quad [\text{kcal/h}]$$

Onde v_{wg} é a quantidade dos gases de escape a saída do forno em m³/m³. (usou-se a=0,01)



Balanço de Calor e Consumo de Combustível

VI. Calor da combustão mecânica incompleta

Este item engloba muitas perdas de combustível. Por exemplo as perdas mecânicas na combustão de combustível sólido normalmente variam de 3 a 5% logo:

$$Q_6 = (0,03 - 0,05) BQ_i^t \quad [\text{kJ/h}]$$

Com combustível gasoso devido ao escapamento do gás

$$Q_6 = (0,02 - 0,03) BQ_i^t \quad [\text{kJ/h}]$$

$$Q_6 = \dot{B} \cdot 808,397 \quad [\text{kJ/h}]$$

Com combustível líquido normalmente é perdido cerca de 1% do combustível .

$$Q_6 = 0,01 BQ_i^t \quad [\text{kJ/h}]$$



Balanço de Calor e Consumo de Combustível

VII. Calor perdido por condução através do revestimento

O calor perdido através do tecto, paredes e parte da soleira do forno é calculado pela equação :

$$Q_{l7} = \frac{t_l - t_a}{l_1 / k_1 + l_2 / k_2 + 1 / \alpha} \quad [\text{kJ/h}]$$

Onde:

t_l é a temperatura da superfície interna do forro em °C;

t_a é a temperatura ambiente em °C;

l_1 e l_2 são as espessuras do forro de material refractário e do isolamento

em m;

k_1 e k_2 são as condutividades do forro de material refractário e do isolamento em W/(m°C).

Balanço de Calor e Consumo de Combustível

VII.1 Calor Perdido pelo Teto

Área do Teto	90	m ²
Temperatura exterior	25	°C
Temperatura média	647,837	°C
Espessura do teto	0,345	m
k Tijolo	1,1148	W/(m°C)
k Tijolo (horas)	4,0124	kJ/(m.h°C)
h ambiente	19,8	W/(m ² °C)
h ambiente (horas)	71,28	kJ/(m ² h°C)



$$Q_{l7} = \frac{t_l - t_a}{l_1 / k_1 + 1/h} \quad [\text{kJ/h}]$$

$$Q_{l7} = 1119782,947 \quad [\text{kJ/h}]$$

Balanço de Calor e Consumo de Combustível

VII.2 Calor Perdido pelas Paredes

Área da Parede	77,4	m ²
Temperatura média	550	°C
Espessura	0,345	m
k Tijolo	1,052	W/(m°C)
k Tijolo (horas)	3,78	kJ/(m.h°C)
Temperatura no interface	150	°C
Espessura	0,115	m
k deodolomite	0,16295	W/(m°C)
k deodolomite (horas)	0,5866	kJ/(mh°C)
h ambiente	19,8	W/(m ² °C)
h ambiente (horas)	71,28	kJ/(m ² h°C)



$$Q_{l7} = \frac{t_l - t_a}{l_1/k_1 + s_2/k_2 + 1/\alpha} \quad [\text{kJ/h}]$$

$$Q_{l7} = 319872,33 \quad [\text{kJ/h}]$$

Balanço de Calor e Consumo de Combustível


VII.2 Calor Perdido pelas Paredes

O coeficiente de condutibilidade térmica em função da temperatura para o tijolo refractário e para a deodolomit calcula-se de:

$$k_t = 0,7 + 0,00064 \cdot t \quad \left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$$

$$k_d = 0,128 + 0,000233 \cdot t \quad \left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$$

Portanto, as condutividades térmicas do tijolo e da deodolomit serão:


$$k_t = 0,7 + 0,00064 \cdot 550 = 1,052 \quad \left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$$

$$k_d = 0,128 + 0,000233 \cdot 150 = 0,16295 \quad \left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$$

Balanço de Calor e Consumo de Combustível

VII.2 Calor Perdido pelas Paredes

Convertendo as unidades para (kJ/m.h °C) teremos:

$$k_t = 1,052 \frac{1/1000}{1/3600} = 3,7872 \quad \left[\frac{\text{kJ}}{\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ \text{C}} \right]$$

$$k_d = 0,16295 \frac{1/1000}{1/3600} = 0,5866 \quad \left[\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right]$$



Balanço de Calor e Consumo de Combustível

VIII. Calor perdido por radiação quando as portas do forno são abertas

$$Q_8 = C_o (T/100)^4 F \Phi \varphi \quad [\text{kJ/h}]$$

Onde:

C_o é a emissividade do corpo negro, 5,768W/(m²K⁴) ou 4,96 kcal/(m²K⁴)

T é a temperatura média no forno em K

F é a área da porta quando aberta em m²

Φ é o coeficiente de difragmentação, (pode ser consultado na Tabela) φ é o tempo, (fracção de hora) em que a porta é mantida aberta



Valores do coeficiente de diafragmação

Tabela 10.1

Largura da porta ⁽¹⁾ mm	Altura da porta em mm				Largura da porta ⁽²⁾ mm	Altura da Porta em mm			
	250	450	600	700		250	450	600	700
300	0,70	0,73	0,76	0,78	600	0,49	0,53	0,56	0,58
600	0,78	0,8	0,82	0,84	900	0,52	0,57	0,60	0,62
900	0,79	0,83	0,85	0,87	1200	0,55	0,69	0,63	0,65
1200	0,81	0,85	0,87	0,89	1500	0,56	0,61	0,64	0,67
1500	0,82	0,86	0,89	0,91					

1 Espessura da parede 230 mm

2 Espessura da parede 460 mm



Balanço de Calor e Consumo de Combustível

VIII. Calor perdido por radiação quando as portas do forno são abertas

Temp gases	1269,2	°C
Co	5,768	W/(m²K⁴)
Co (horas)	20,7648	kJ/(m²h°K⁴)
Altura	0,45	m
Largura	1,2	m
área	0,54	m²
Cof de Diafragma	0,69	
Tempo	30	minutos



$$Q_8 = C_o (T/100)^4 F \Phi \varphi \quad [\text{kJ/h}]$$

$$Q_8 = 219154,795 \quad [\text{kJ/h}]$$

Balanço de Calor e Consumo de Combustível

IX. Calor perdido durante o aquecimento do recipiente

Com recipientes frios a [273 K (0°C)] a quantidade de calor requerida para aquecer o forno é:

$$Q_9 = G_c c_c t_c \quad [\text{kJ/h}]$$

Onde

G_c é a massa do recipiente em kg/h

c_c calor específico médio do do recipiente no intervalo de temperaturas de 0 a t_c em kJ/(kg°C)

Se o recipiente estiver quente deve-se apenas considerar o calor adicional gasto.

Balanço de Calor e Consumo de Combustível

X. Calor perdido com a água de arrefecimento do forno

As perdas de calor devido ao arrefecimento do forno, são determinadas por meio de processos experimentais. Essas perdas usualmente estão entre os 10 a 15% do calor total fornecido

$$Q_{H_2O} = \dot{B} \cdot 0,1 \cdot (Q_q + Q_a + Q_c) \text{ kJ/h}$$

$$Q_{H_2O} = \dot{B} \cdot 4298,938 \text{ kJ/h}$$



Utilizou-se o valor mínimo, 10%

Balanço de Calor e Consumo de Combustível

XI. Perdas de calor acumulado no revestimento

$$Q_{ac11} = V_1 \rho_1 c_1 t_1 \quad [\text{kJ/período}] \quad (10.44)$$

Onde:

V_1 é o volume do revestimento em m^3

ρ_1 é a densidade do revestimento em kg/m^3

c_1 é o calor específico do revestimento em $\text{kJ}/(\text{kg}^\circ\text{C})$

t_1 é a temperatura média de aquecimento do revestimento

Nos fornos de carruagens o calor acumulado pelos forros inferiores de materiais refractários das carruagens deve também ser considerado. Nos fornos periódicos para além da parte de calor acumulada no revestimento uma parte é perdida por condução através das paredes. As perdas de calor por acumulação no revestimento são determinadas para uma operação periódica do forno na qual a temperatura varia com o tempo. O balanço de calor para estes fornos é calculado para todo o ciclo de operação em vez de para uma hora.



Balanço de Calor e Consumo de Combustível

XII. Perdas de calor não contabilizáveis

$$Q_{12} = 0,2 \cdot (Q_5 + Q_6 + Q_7 + Q_8 + Q_9 + Q_{10} + Q_{11}) \quad [\text{kJ/h}]$$

$$Q_{12} = 0,2 \cdot \left(\begin{array}{l} B \cdot 1764,820 + \dot{B} \cdot 808,397 + 1439655,277 \\ + 219154,795 + 0 + B \cdot 4298,938 + 0 \end{array} \right) \quad [\text{kJ/h}]$$

$$Q_{12} = \dot{B} \cdot 1374,431 + 331762,014 \quad [\text{kJ/h}]$$

Somando separadamente os itens de entrada e de saída os dois somatórios devem ser $Q_{in} = Q_{out}$. Isto dá uma equação com uma incógnita que é o consumo de combustível **B**. Conhecido **B** todos os itens do balanço de calor podem ser calculados.

Quando se analisa os balanços térmicos de um forno, a tabela de balanços térmicos pode ser útil para identificar qual das variáveis de saída é excessivamente alta e também para identificar do mau funcionamento do forno.



Balanço de Calor e Consumo de Combustível

Consumo de combustível

Prof. Doutor Eng.º Jorge Nhamitani

Instalações Térmicas

$$\dot{B} \cdot Q_i + B \cdot Q_a + B \cdot Q_c + Q_{ex} = f(Q_{VII} + Q_{IX}) + Q_I + Q_{II} + Q_{III} + B \cdot Q_{IV} + B \cdot Q_V + B \cdot Q_{VI} + Q_{VII} + Q_{VIII} + Q_{IX} + B \cdot Q_X + Q_{XI} + B \cdot Q_{XII}$$

$$\dot{B} \cdot Q_i + B \cdot Q_a + B \cdot Q_c - B \cdot Q_{IV} - B \cdot Q_V - B \cdot Q_{VI} - B \cdot Q_X - B \cdot Q_{XII} = f(Q_{VII} + Q_{IX}) + Q_I + Q_{II} + Q_{III} + Q_{VII} + Q_{VIII} + Q_{IX} + Q_{XI} - Q_{ex}$$

$$\dot{B} \cdot (Q_i + Q_a + Q_c - Q_{IV} - Q_V - Q_{VI} - Q_X - Q_{XII}) = f(Q_{VII} + Q_{IX}) + Q_I + Q_{II} + Q_{III} + Q_{VII} + Q_{VIII} + Q_{IX} + Q_{XI} - Q_{ex}$$

$$\dot{B} = \frac{f(Q_{VII} + Q_{IX}) + Q_I + Q_{II} + Q_{III} + Q_{VII} + Q_{VIII} + Q_{IX} + Q_{XI} - Q_{ex}}{(Q_i + Q_a + Q_c - Q_{IV} - Q_V - Q_{VI} - Q_X - Q_{XII})}$$

$$\dot{B} = \frac{0,2(1119782,94 + 319872,33 + 219154,79 + 0 + 0) + 42820000 + 0 + 0 + 1119782,94 + 319872,33 + 219154,79 - 28250000}{40419,85 + 2401,53 + 168 - 17073,84 - 1764,82 - 4298,94 - 1374,43 - 808,39}$$

$$\dot{B} = 2319,638 \text{ m}^3 / h$$

$$\dot{B} = 0,644 \text{ m}^3 / s$$



Problema 22.1 -resolução (continuação)

O calor específico à pressão constante para os gases à temperatura de entrada no termopermutador calcula-se de:

$$c_{p(g)} = c_{p(RO_2)} \left(t_g^{in} \right) \cdot r_{(RO_2)} + c_{p(RO)} \left(t_g^{in} \right) \cdot r_{(RO)} + \\ c_{p(O_2)} \left(t_g^{in} \right) \cdot r_{(O_2)} + c_{p(H_2O)} \left(t_g^{in} \right) \cdot r_{(H_2O)}$$

$$c_{p(g)} = 0,213(800) \cdot 0,098 + 1,027(800) \cdot 0,730 + \\ 0,063(800) \cdot 0,044 + 0,218(800) \cdot 0,128 = 1,522 \quad [\text{kJ/m}^3\text{C}]$$



Problema 22.1 -resolução (continuação)

O calor específico à pressão constante para os gases à temperatura estimada de saída do termopermutador calcula-se de:

$$C_{p(g)} = C_{p(RO_2)} \left(t_{g(estimada)}^{out} \right) \cdot r_{(RO_2)} + C_{p(RO)} \left(t_{g(estimada)}^{out} \right) \cdot r_{(RO)} + \\ C_{p(O_2)} \left(t_{g(estimada)}^{out} \right) \cdot r_{(O_2)} + C_{p(H_2O)} \left(t_{g(estimada)}^{out} \right) \cdot r_{(H_2O)}$$

$$C_{p(g)} = 0,206(660) \cdot 0,0298 + 1,010(660) \cdot 0,730 + \\ 0,062(660) \cdot 0,044 + 0,213(660) \cdot 0,128 = 1,491 \quad [kJ/m^3 \text{ } ^\circ\text{C}]$$



Problema 22.1 -resolução (continuação)

Da fórmula de balanço calcula-se a temperatura de saída dos gases de escape:

$$t_{g(calc)}^{out} = \frac{c_{pg}^{in} t_g^{in}}{c_{pg}^{out}} - \frac{V_{ar}^o \alpha (c_{par}^{out} t_{ar}^{out} - c_{par}^{in} t_{ar}^{in})}{0,9 \cdot V_g \cdot c_{pg}^{out}} \quad [^{\circ}\text{C}]$$

$$t_{g(calc)}^{out} = \frac{1,522 \cdot 800}{660} - \frac{10,163 \cdot 1,3 (1,298 \cdot 140 - 1,287 \cdot 25)}{0,9 \cdot 14,535 \cdot 1,491} = 715,3 \quad [^{\circ}\text{C}]$$



Problema 22.1 -resolução (continuação)

Calcula-se o erro entre a temperatura calculada e a assumida que não deve superar os 10%, se esta superar então a partir da temperatura calculada, calcula-se novamente o calor específico dos gases de escape à saída.

$$\varepsilon = \frac{t_{g(\text{estimada})}^{\text{out}} - t_{g(\text{calc})}^{\text{out}}}{t_{g(\text{estimada})}^{\text{out}}} \times 100 \quad [\%]$$

$$\varepsilon = \frac{|660 - 715,3|}{660} \times 100 \quad [\%] = 8,38\%$$



Problema 22.1 -resolução (continuação)

Calcula-se o fluxo de calor que se transfere

$$Q = \dot{B} \cdot \alpha \cdot V_{ar}^o \left(c_{p_{ar}}^{out} t_{ar}^{out} - c_{p_{ar}}^{in} t_{ar}^{in} \right) \quad \left[\frac{\text{kJ}}{\text{h}} \right]$$

$$Q = 2319,638 \cdot 1,30 \cdot 10,163 (1,296 \cdot 140 - 1,287 \cdot 25) = 4584430 \quad \left[\frac{\text{kJ}}{\text{h}} \right]$$

A temperatura média logarítmica calcula-se de :

$$\Delta T_{ln} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)} = 675,15 \text{ } ^\circ\text{C}$$



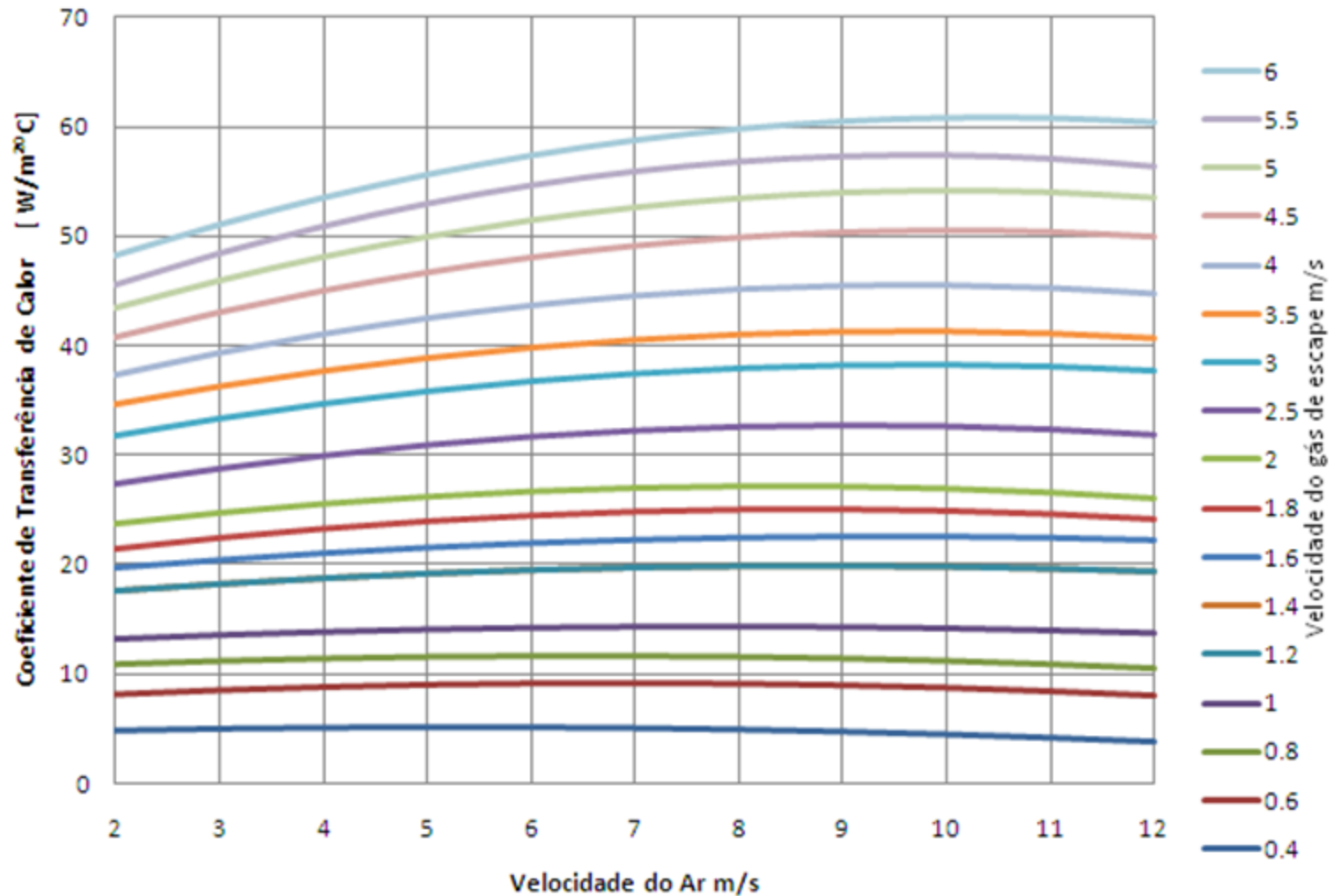
Onde:

ΔT_1 - é a diferença entre as temperaturas de entrada do gás e do ar no trocador

ΔT_2 - é a diferença entre as temperaturas de saída do gás e do ar no trocador

Problema 22.1 -resolução (continuação)

Ábaco para a determinação do U



Problema 22.1 -resolução (continuação)



A área total necessária para a transferência de calor, tendo em conta o calor transferido, o coeficiente de condutibilidade térmica determinado do ábaco e a temperatura média logarítmica determina-se de:

$$A = \frac{Q \cdot 1000}{U \cdot \Delta T_{\ln} \cdot 3600 \cdot F} \quad [\text{m}^2]$$

$$A = \frac{4584430 \cdot 1000}{39.86 \cdot 675,15 \cdot 3600 \cdot 1} = 47,31 \quad [\text{m}^2]$$

Problema 22.1 -resolução (continuação)

Calcula-se a o número de tubos, tendo em conta o tipo de tubo que se pretende montar no recuperador (ver Tabelas 21.3,21.4 e 21.5).

$$n_{tubos} = \frac{A}{A_{tubo}}$$

$$n_{tubos} = \frac{47,31}{0,250} = 189,24 \approx 190$$



Tabela 21.4 características dos tubos com passo entre alhetas 28 mm

Características	Tipo do Recuperador			
	28			
Comprimento do tubo (mm)	880	1135	1385	1640
Secção limpa, m ²	0,008	0,008	0,008	0,008
Secção da passagem dos gases, m ²	0,070	0,092	0,114	0,136
Área da superfície exposta ao ar, m ²	0,83	1,12	1,41	1,70
Área da superfície exposta aos gases de escape, m ²	0,95	1,26	1,60	1,90
Área projectada para o aquecimento, m ²	0,250	0,330	0,425	0,500
Peso do tubo, kg	41	52	63	80

