

Sistemas Energéticos

3º ano 6º semestre

Aula 17



Aula 17- Balanço Térmico de Caldeiras Flamotubulares - Prática

Problema 17.1

Determinar o rendimento térmico, o consumo de combustível e o calor perdido de um gerador de vapor flamotubular que fornece vapor saturado, funcionando com combustível gasoso, com três passes de tubos. Com os seguintes dados restantes:

- Capacidade de trabalho 4500 kg/h
- Pressão de trabalho (pressão manométrica) 1,724 MPa
- Temperatura do ar pré aquecido 200 °C
- Temperatura do ar ambiente 30 °C
- Tipo de combustível GPL
- Coeficiente de excesso de ar $\alpha=1,10$

E com a seguinte composição do combustível:



Problema 17.1

Hidrogenio $H_2=5$

Monoxido De Carbono $CO=0$

Acido Sulfurico $H_2S=0$

Metano $CH_4=28$

Etano $C_2H_6=26$

Propano $C_3H_8=22$

Etileno $C_2H_4=7$

Butano $C_4H_{10}=0$

Pentano $C_5H_{12}=0$

Propileno $C_3H_6=5$

Ciclobutano $C_4H_8=7$

Dioxido De Carbono $CO_2=0$

Nitrogenio $N_2=0$

Oxigenio $O_2=0$

Cinzas=0

Humidade=0



Problema 17.1 (Resolução I)

Volume Teórico De Ar

$$V_{ar}^o = 0,0476 \left[0,5.CO + 0,5.H_2 + 1,5.H_2S + \sum \left(m + \frac{n}{4} \right) . C_m H_n - O_2 \right] \left[\frac{m^3 N}{m^3_{comb}} \right]$$

$$V_{ar}^o = 16,42 \left[\frac{m^3 N}{m^3_{comb}} \right]$$

Volume Real De Ar

$$V_{ar} = \alpha V_{ar}^o \left[\frac{m^3 N}{m^3_{comb}} \right]$$

$$V_{ar} = 14,271 \left[\frac{m^3 N}{m^3_{comb}} \right]$$



Problema 17.1 (Resolução II)

- **Volume Teórico Dos Gases Biatômicos**

$$V_{RO}^o = 0,79.V_{ar}^o + 0,01.N^t \left[\frac{m^3 N}{m_{comb}^3} \right]$$

$$V_{RO}^o = 12,97 \left[\frac{m^3 N}{m_{comb}^3} \right]$$

- **Volume Real Dos Gases Biatômicos**

$$V_{RO} = 0,79.V_{RO}^o + (\alpha - 1).0,79.V_{ar}^o \left[\frac{m^3 N}{m_{comb}^3} \right]$$

$$V_{RO} = 14,27 \left[\frac{m^3 N}{m_{comb}^3} \right]$$

- **Volume Teórico Dos Gases Triatómicos**

$$V_{RO2}^o = 0,01 \left[CO_2 + CO + H_2S + \sum m(C_m H_n) \right] \left[\frac{m^3 N}{m_{comb}^3} \right]$$

$$V_{RO2}^o = 2,030 \left[\frac{m^3 N}{m_{comb}^3} \right]$$



Problema 17.1 (Resolução III)

- **Volume Teórico Do Vapor De Agua**

$$V_{H_2O}^o = 0,01 \cdot \left\{ H_2S + H_2 + \sum \left[\left(\frac{n}{2} \right) C_m H_n \right] + 0,012 \cdot W^t \right\} + 0,0161 \cdot V_{ar}^o \left[\frac{m^3 N}{m^3_{comb}} \right]$$

$$V_{H_2O}^o = 3,104 \left[\frac{m^3 N}{m^3_{comb}} \right]$$

- **Volume Real Do Vapor De Água**

$$V_{H_2O} = V_{H_2O}^o + 0,0161 \cdot (\alpha - 1) \cdot V_{ar}^o \left[\frac{m^3 N}{m^3_{comb}} \right]$$

$$V_{H_2O} = 3,131 \left[\frac{m^3 N}{m^3_{comb}} \right]$$

- **Volume Do Oxigénio Excedente**

$$V_{O_2} = 0,21 \cdot (\alpha - 1) \cdot V_{ar}^o \left[\frac{m^3 N}{m^3_{comb}} \right]$$

$$V_{O_2} = 0,345 \left[\frac{m^3 N}{m^3_{comb}} \right]$$



Problema 17.1 (Resolução IV)

- **Volume Total Dos Gases De Escape**

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

$$V_g = 19,776 \left[\frac{m^3 N}{m^3_{comb}} \right]$$

- **Fracção Volúmica Dos Gases Triatómicos**

$$r_{RO_2} = \frac{V_{RO_2}}{V_g}$$

$$r_{RO_2} = 0,103$$

- **Fracção Volúmica Dos Gases Biatómicos**

$$r_{R_2} = \frac{V_{R_2}}{V_g}$$

$$r_{R_2} = 0,722$$



Problema 17.1 (Resolução V)

- **Fracção Volúmica Da Água**

$$r_{H_2O} = \frac{V_{H_2O}}{V_g}$$

$$r_{H_2O} = 0,158$$

- **Fracção Volúmica Do Oxigénio Excedente**

$$r_{O_2} = \frac{V_{O_2}}{V_g}$$

$$r_{O_2} = 0,017$$

- **Soma Das Fracções**

$$\sum r = r_{R_2} + r_{RO_2} + r_{H_2O} + r_{O_2}$$

$$\sum r = 1$$



Problema 17.1 (Resolução VI)

Poder Calorífico Inferior

$$Q_i^t = 108,3H_2 + 126,8CO + 234,6H_2S + 359,3CH_4 + 639,5C_2H_6 + 915,4C_3H_8 + 592,5C_2H_4 + 1190,2C_4H_{10} + 1465,4C_5H_{12} + 862,7C_3H_6 + 1138,7C_4H_8 \left[\frac{kJ}{m^3_{comb}} \right]$$

$$Q_i^t = 63799,60 \left[\frac{kJ}{m^3_{comb}} \right]$$

O calor disponível, calcula-se de:



$$Q_{disp} = Q_i + Q_{fis,ar} + Q_{fis,comb} \left[kJ/m^3_{comb} \right]$$

$$Q_{fis,ar} = I_{ar} \cdot V_{ar} \left[kJ/m^3_{comb} \right]$$

$$Q_{fis,ar} = 286,88 \cdot 16,422 = 4711,143 \left[kJ/m^3_{comb} \right]$$

10

$$Q_{disp} = 63799,6 + 4711,143 + \cancel{Q_{fis,comb}} = 68510,743 \left[kJ/kg \right]$$

q_2 - Perdas de calor com as cinzas

As perdas de calor com as cinzas calculam-se da seguinte relação:

$$q_2 = P_{cv} + P_{cf} \quad [\%]$$

P_{cv} – são as perdas associadas ao combustível nas cinzas volantes;

$$P_{cv} = \frac{A \cdot F_{cv} \cdot C_{cv} \cdot 33820 \cdot 100}{(1 - C_{cv}) \cdot Q_i}$$

$$P_{cv} = 0$$

P_{cf} – são as perdas associadas ao combustível nas cinzas de fundo.

$$P_{cf} = \frac{A \cdot F_{cf} \cdot C_{cf} \cdot 33820 \cdot 100}{(1 - C_{cf}) \cdot Q_i}$$

$$P_{cf} = 0$$

$$q_2 = P_{cv} + P_{cf} = 0 \quad [\%]$$



q₂ - Perdas de calor com as cinzas

- P_{cf} – são as perdas associadas ao combustível nas cinzas de fundo.

$$P_{cf} = \frac{A \cdot F_{cf} \cdot C_{cf} \cdot 33820 \cdot 100}{(1 - C_{cf}) \cdot Q_i}$$

Em que:

P_{cf} - são as perdas associadas ao combustível nas cinzas de fundo (%);

A – é a fracção em peso de inertes no combustível (com base na sua composição às condições de queima);

F_{cf} – é a fracção em peso das cinzas volantes em relação ao total de inertes do combustível;

C_{cf} – é a fracção em peso do combustível nas cinzas volantes;

Q_i – é o Poder Calorífico Inferior do combustível nas condições de queima (kJ/kg).



$$q_2 = P_{cv} + P_{cf} = 0 \quad [\%]$$

q_3 - Perdas com gases de efluentes (de escape)

$$q_3 = P_{gc} + P_{H_2O} \quad [\%]$$

$$P_{gc} = \frac{k_1 \cdot (T_g - T_a) \cdot [1 - (P_{cv} + P_{cf})/100]}{CO_2}$$

$$P_{gc} = \frac{k_1 \cdot (T_g - T_a) \cdot [1 - (0 + 0)/100]}{CO_2}$$

$$P_{gc} = \frac{k_1 \cdot (T_g - T_a)}{CO_2}$$

Combustível	Valor de k_1
Carvão betuminoso	0,66
Gasóleo	0,51
“Thick”, “Thin” e “burner” oleos	0,54
GPL (Propano)	0,45
Gás Natural	0,395

$k_1 = 0,45$



q_3 - Perdas com gases de efluentes (de escape)

$$\text{CO}_2 = \left(1 - \frac{\text{O}_2}{21}\right) \times \text{CO}_2\text{t}$$

Combustível	% de CO ₂ t nos gases secos
Bagaçõ	20,3
Madeira	19,9
“Thick”, “thin” e “burner” óleos	15,8
Gasóleo	15,5
GPL (Propano)	13,8
Gás Natural	12,1



q₃ - Perdas com gases de efluentes (de escape)

$$CO_2 = \left(1 - \frac{0,017 \cdot 100}{21}\right) \times 13,8 = 12,68$$

$$P_{gc} = \frac{k_1 \cdot (T_g - T_a)}{CO_2}$$

$$P_{gc} = \frac{0,45 \cdot (255 - 30)}{12,68} = 7,985 [\%]$$

- P_{H₂O} - perdas associadas à entalpia do vapor de água nos gases de combustão (%)

$$P_{H_2O} = \frac{(m_{H_2O} + 9H) \cdot [210 - 4,2 \cdot T_a + 2,1 \cdot T_g]}{Q_i}$$

$$P_{H_2O} = \frac{(0 + 9 \cdot 5) \cdot [210 - 4,2 \cdot 30 + 2,1 \cdot 255]}{63799,60} = 0,437$$

$$q_3 = P_{gc} + P_{H_2O} \quad [\%]$$

$$q_3 = 7,985 + 0,437 = 8,422 \quad [\%]$$



q_4 - Perdas de calor associadas à combustão incompleta mecânica

Tipo de Combustível	Perdas q_4 (%)
Combustível Sólido	3-5
Combustível Líquido	1
Combustível gasoso	2-3

- De acordo com a tabela o valor das perdas de calor associadas à combustão incompleta mecânica toma o valor $q_4 = 2 \%$



q_5 - Perdas de calor associadas à combustão incompleta química

As perdas relacionadas com o Monóxido de Carbono, de princípio devem-se anular, por quase sempre se tratar de uma combustão com excesso de ar. No entanto, se for estabelecida a percentagem deste gás na chaminé, as perdas correspondentes determinam-se da seguinte expressão:

$$P_{CO} = \frac{k_2 \cdot CO \cdot [1 - 0,01 \cdot (P_{cv} + P_{cf})]}{CO + CO_2}$$

$$P_{CO} = 0 \%$$



q_6 - Perdas de calor ao meio ambiente

- - Para caldeiras industriais flamotubulares compactas = 1,5 a 2,5%
- - Para caldeiras industriais aquatubulares = 2 a 3%
- - Para caldeiras de centrais térmicas = 0,4 a 1%.

Atendendo o facto de a caldeira ser flamotubular e os valores variarem de 1,5 a 2,5% toma-se o valor intermédio de 2%.

Deste modo $q_6 = 2 \%$



q_7 - Perdas associadas às purgas (I)

As perdas associadas as purgas são somente aplicáveis às caldeiras de vapor

$$q_7 = \frac{(T_p - T_{H_2O}) \cdot p \cdot (100 - EP)}{(T_p - T_{H_2O}) \cdot p + (100 - p) \cdot (660 - T_{H_2O})} \quad [\%]$$

$$q_7 = 0 \%$$

O rendimento térmico da caldeira calcula-se de:

$$\eta_v = 100 \frac{Q_1}{Q_{disp}} = 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6 + q_7)$$

$$\eta_v = 100 - (0 + 8,422 + 2 + 0 + 2 + 0) = 87,578 [\%]$$



q₇ - Perdas associadas às purgas (II)

- O consumo de combustível obtêm-se de:

$$\dot{B} = \frac{G_o (I_v - I_{aa})}{\eta_v \cdot Q_{disp}}$$

$$\dot{B} = \frac{4500(2793,8 - 874,9)}{0,876 \cdot 68509,93} = 143,91 \text{ m}^3/\text{h} \approx 0,039 \text{ m}^3 / \text{s}$$

