

# Sistemas Energéticos

**3º ano 6º semestre**

**Aula 15**



# ***Aula 15- Balanço Térmico de Geradores de Vapor Aquatubulares - Prática***

## ***Problema 15.1 (I)***

Determine o consumo de combustível e o rendimento de um gerador de vapor que produz 10000 kg/h de vapor, a temperatura de 400°C e pressão de 20 bar, sabendo que a água de alimentação entra no gerador saturada a temperatura de 120°C. A temperatura do gás de escape é de 155°C, a temperatura exterior de 30°C a do combustível 30°C, A caldeira tem grelha de cadeia de percurso directo e funciona com carvão mineral com o calor específico de 1,4 kJ/kgK, o ar é insuflado a temperatura de 220°C com o coeficiente de excesso de ar mínimo para este tipo de câmara.



## ***Problema 15.1 (II)***

O combustível tem a seguinte composição dada em massa de combustível: Carbono 54%, Hidrogénio 12%, Nitrogénio 5%, Oxigénio 22%, Enxofre 7%, e é um combustível com bastante percentagem de cinzas, com Cinzas a 40%, Humidade de 7% e o coeficiente pirotécnico é de 0,9. A fracção das cinzas retirada com a escória é a máxima possível para este tipo de fornalha e a entalpia da escória de 4 kJ/kg.





## 14.4 Método do Balanço Inverso

O **Método do Balanço Inverso**, consiste em determinar o rendimento bruto da caldeira pela soma das perdas de energia; produz um resultado mais preciso que o balanço directo, uma vez que a soma das perdas de energia constituem aproximadamente 10% do Calor Disponível  $Q_{disp}$  e todos estes itens podem ser medidos de maneira fiável. Este é o único método disponível para estimar o rendimento térmico da caldeira nova, durante o estágio do projecto. As perdas  $q_3, q_4, q_5$  e  $q_6$  são estimadas, calcula-se então a perda  $q_2$  e determina-se o rendimento por:

$$\eta_b = 100 \frac{Q_1}{Q_{disp}} = 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6) \quad (14.4)$$

Conhecido o rendimento pode-se determinar o consumo de combustível.

## Características das Fornalhas de queima em camada (Tabela 14.1)

Tipo de fornalha	Tipo de combustível	Coeficiente de excesso de ar	Perdas de calor		Tensões térmicas admissíveis		Fracção de cinzas arrastadas
			$\alpha_f$	$q_3$ %	$q_4$ %	$q_f$ (kW/m <sup>2</sup> )	
Com grelha fixa e alimentação manual	Lignite	1,6	2,0	6,0-8,0	800-930	230-400	0,20
	Carvão mineral	1,5-1,6	2,0	5,0-7,0	930-1050	230-400	0,15
	Antracite	1,6-1,7	1,0	8,0-10,0	1050	230-400	0,15
Com grelha fixa e alimentador pneumático	Lignite	1,4-1,5	0,5-1,0	5,0-8,0	930-1200	230-350	0,12
	Carvão mineral	1,4-1,5	0,5-1,0	4,0-7,0	930-1200	230-350	0,10
	Antracite	1,6-1,7	0,5-1,0	10,0-13,0	930-1200	230-350	0,10
Com grelha de cadeia de percurso directo	Lignite	1,3-1,4	3,0	4,0-5,5	1600	300-450	0,1-0,2
	Carvão mineral	1,3-1,4	1,5	3,0-6,0	1200	300-450	0,1-0,2
Com grelha de cadeia de percurso inverso	Lignite	1,3-1,4	0,5-1,0	3,0-7,0	1400-1700	300-450	0,1-0,2
	Carvão mineral	1,3-1,4	0,5-1,0	3,0-8,0	1400-1700	300-450	0,08-0,2
De cuba com cadeia	Turfa	1,3	1	2,0	1700-2200	300-400	



# Problema 15.1 (Resolução I)

1.A massa de trabalho do combustível calcula-se de:

$$C^t = C^d \cdot \frac{100 - (W^t + A^t)}{100} = 54 \cdot \frac{100 - (7 + 40)}{100} = 28,62\%$$

$$H^t = H^d \cdot \frac{100 - (W^t + A^t)}{100} = 12 \cdot \frac{100 - (7 + 40)}{100} = 6,36\%$$

$$N^t = N^d \cdot \frac{100 - (W^t + A^t)}{100} = 5 \cdot \frac{100 - (7 + 40)}{100} = 2,65\%$$

$$O^t = O^d \cdot \frac{100 - (W^t + A^t)}{100} = 22 \cdot \frac{100 - (7 + 40)}{100} = 11,66\%$$

$$S^t = S^d \cdot \frac{100 - (W^t + A^t)}{100} = 7 \cdot \frac{100 - (7 + 40)}{100} = 3,71\%$$

$$A^t = 40\%$$

$$W^t = 7,0\%$$



# Problema 15.1 (Resolução II)

2. O volume teórico do ar é dado por:

$$V^{\circ}_{ar} = 0,0889 \cdot (C^t + 0,375 \cdot S^t) + 0,265 \cdot H^t - 0,0333 \cdot O^t = 3,965 \left[ \frac{m^3}{kg} \right]$$

3. O volume teórico dos Gases Biatómicos calcula-se de:

$$V^{\circ}_{N_2} = 0,79 \cdot V^{\circ}_{ar} + 0,008 \cdot N^t = 3,154 \left[ \frac{m^3}{kg} \right]$$

4. O volume teórico de água obtém-se de:

$$V^{\circ}_{H_2O} = 0,1116 \cdot H^t + 0,0124 \cdot W^t + 0,0161 \cdot V^{\circ}_{ar} = 0,860 \left[ \frac{m^3}{kg} \right]$$

5. Volume os Gases Triatómicos:

$$V_{R_{O_2}} = 1,867 \cdot (C^t + 0,375 \cdot S^t) / 100 = 0,560 \left[ \frac{m^3}{kg} \right]$$





## Problema 15.1 (Resolução III)

6. O volume real dos Gases Biatómicos calcula-se de:

$$V_{R2} = V^{\circ}_{N_2} + (\alpha - 1) \cdot 0,79 \cdot V^{\circ}_{ar} = 4,093 \left[ \frac{m^3}{kg} \right]$$

7. O volume real de água obtém-se de:

$$V_{H_2O} = V^{\circ}_{H_2O} + 0,0161 \cdot (\alpha - 1) \cdot V^{\circ}_{ar} = 0,880 \left[ \frac{m^3}{kg} \right]$$

8. O volume dos Gases Triatómicos calcula-se de:

$$V_{R0_2} = 1,867 \cdot (C^t + 0,375 \cdot S^t) / 100 = 0,560 \left[ \frac{m^3}{kg} \right]$$

9. O volume do Oxigénio Excedente obtém-se de:

$$V_{0_2} = 0,21 \cdot (\alpha - 1) \cdot V^{\circ}_{ar} = 0,250 \left[ \frac{m^3}{kg} \right]$$



# Problema 15.1 (Resolução IV)

10. O volume dos Gases de Combustão calcula-se de:

$$V_g = V_{R_{O_2}} + V_{R_2} + V_{H_2O} + V_{O_2} = 5,783 \left[ \frac{m^3}{kg} \right]$$

11. As fracções dos gases obtêm-se de:

$$r_{R_{O_2}} = \frac{V_{R_{O_2}}}{V_g} = 0,097 \quad m^3/m^3$$

$$r_{H_2O} = \frac{V_{RH_2O}}{V_g} = 0,152 \quad m^3/m^3$$

$$r_{R_{O_2}} = \frac{V_{RN_2}}{V_g} = 0,708 \quad m^3/m^3$$

$$r_{O_2} = \frac{V_{O_2}}{V_g} = 0,043 \quad m^3/m^3$$

12. O Poder Calorífico Inferior calcula-se de:

$$Q_i^t = 4,187 \left[ 81C^t + 300H^t - 26(O^t - S^t) - 6(W^t + 9H^t) \right] = 15215,893 \quad [kJ/kg]$$



# Problema 15.1 (Resolução V)

13. O Calor disponível é dado por:

$$Q_{disp} = Q_i + Q_{fis,ar} + Q_{fis,comb} = 15215,89 + 1480,85 + 42 = 16738,74 \text{ [kJ/kg]}$$

14. Entalpia da combustão

$$I_q = \frac{Q_i}{V_g} = \frac{15215,89}{5,783} = 2631,115 \text{ kJ/m}^3$$

15. Entalpia do ar

$$I_{ar} = \frac{Q_{ar}}{V_g} = \frac{c_{par} t_{ar} V_{ar} \alpha}{V_g} = \frac{1,306 \cdot 220 \cdot 3,965 \cdot 1,3}{5,783} = 256,09 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3}$$

16. Entalpia do combustível

$$I_c = \frac{Q_c}{V_g} = \frac{c_{pcomb} t_{comb}}{V_g} = \frac{1,4 \cdot 30}{5,783_g} = 7,263 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3}$$

17. Entalpia dos gases de escape

$$I_g = I_q + I_a + I_c = 2894,11 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3} \right]$$



# Problema 15.1 (Resolução VI)

18. A entalpia dos gases também obtém-se de:

$$I_g = r_{RO_2} \cdot (C\theta)_{RO_2} + r_{N_2} \cdot (C\theta)_{N_2} + r_{H_2O} \cdot (C\theta)_{H_2O} + r_{O_2} \cdot (C\theta)_{O_2} = 2894,368 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3} \right]$$

19. A temperatura teórica dos gases é **1129,61 °C**

20. A temperatura real dos gases é:

$$t_a = \eta \cdot t_c$$

$$t_a = 0,9 \cdot 1129,61 = 1016,65 \text{ °C}$$

21. As perdas com gases efluentes ( $q_2$ )

$$q_2 = \frac{V_g c_{pg} (T_{wg} - T_{amb})}{Q_{disp}} \times 100 \text{ [%]}$$



# Problema 15.1 (Resolução VII)

$$c_{pg} = r_{RO_2} \cdot (c_p \theta)_{RO_2} + r_{N_2} \cdot (c_p \theta)_{N_2} + r_{H_2O} \cdot (c_p \theta)_{H_2O} + r_{O_2} \cdot (c_p \theta)_{O_2}$$

$$c_{pg} = 0,097 \cdot 1,784 + 0,708 \cdot 1,291 + 0,152 \cdot 1,513 + 0,043 \cdot 1,445 = 1,379 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3 \text{ } ^\circ\text{C}} \right]$$

$$q_2 = \frac{V_g c_{pg} (T_{wg} - T_{amb})}{Q_{disp}} \times 100 = \frac{5,783 \cdot 1,379 (155 - 30)}{16738,74} \times 100$$

$$= 5,955 \text{ [%]}$$

22. As perdas  $q_3$  e  $q_4$  retiram-se da Tabela 25.1 e a  $q_5$  do Gráfico 1

$$q_3 = 1,5$$

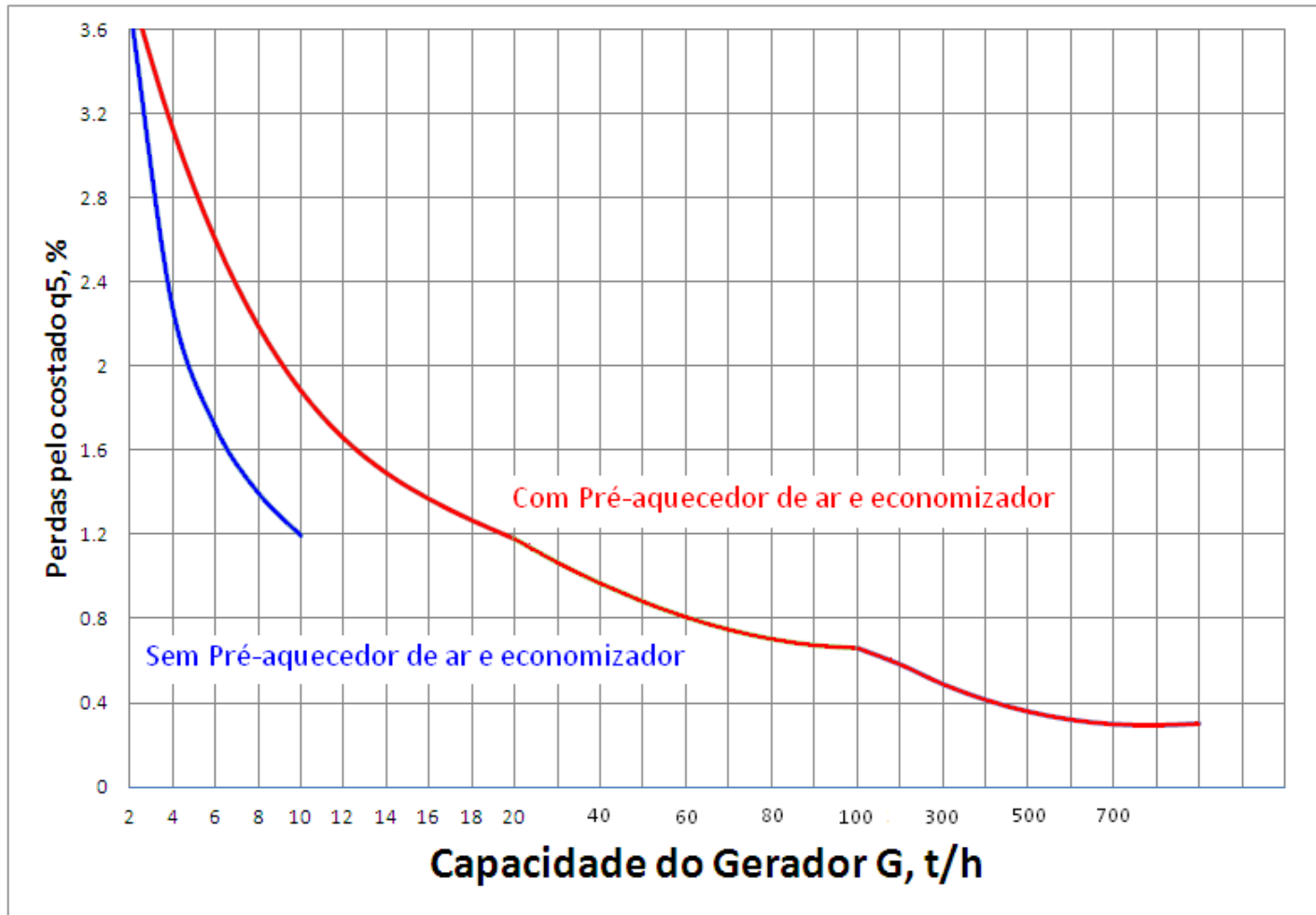
$$q_4 = 5$$

$$q_5 = 1,85$$





# Gráfico das Perdas pelo Costado ( $q_5$ )



# Problema 15.1 (Resolução VIII)

$$\text{Se: } A^r \geq 2,5 \times 10^{-3} Q_i$$

$$40 \geq 2,5 \times 10^{-3} \cdot 15215,89$$

$$40 \geq 38,04$$

23. As perdas devido a entalpia da escória calculam-se

$$q_6 = \frac{(100 - a_{vol}) A \cdot I_{esc}}{100 \cdot Q_{disp}} \times 100 = 0,77 \quad [\%]$$

$$= \frac{(100 - 0,2) 40 \cdot 4}{100 \cdot 16738,74} \times 100 = 0,95 \quad [\%]$$



# Problema 15.1 (Resolução IX)

24. O rendimento térmico do gerador será:

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

$$\eta_b = 100 - (5,955 + 1,5 + 5 + 1,85 + 0,953) = 84,742 \%$$

25. O consumo de combustível é dado por:

$$\dot{B} = \frac{\dot{G} \cdot [h_g - h_f]}{\eta_b \cdot Q_i}$$

$$\dot{B} = \frac{10000 \cdot [3248,7 - 505,0]}{0,847 \cdot 15215,89} = 2128,90 \text{ kg / h ou } 0,591 \text{ kg / s}$$







## Problema 15.2

Calcule a temperatura do ar aquecido que entra num gerador de vapor com rendimento térmico de 84,688 %, que queima carvão mineral numa fornalha de extracção de cinzas sólidas, para produzir 25 toneladas de vapor superaquecido por hora à pressão de 15 bar e à temperatura de 350°C, a partir de água saturada. Sabendo que a temperatura dos gases de escape é de 250 °C, o combustível entra no gerador a temperatura de 40°C e a sua composição é dada em massa seca com 60% de Carbono, 5% de Hidrogénio, 3% de Nitrogénio 24% de Oxigénio, 2% de Enxofre 6% de Cinzas e 10% de Humidade. O calor específico do combustível é de 1,4 kJ/kgK, a temperatura do meio ambiente em que se encontra o gerador é de 26°C e a massa específica do combustível é de 800 kg/m<sup>3</sup>. Que valor percentual da temperatura se perde desde a combustão até à exaustão?

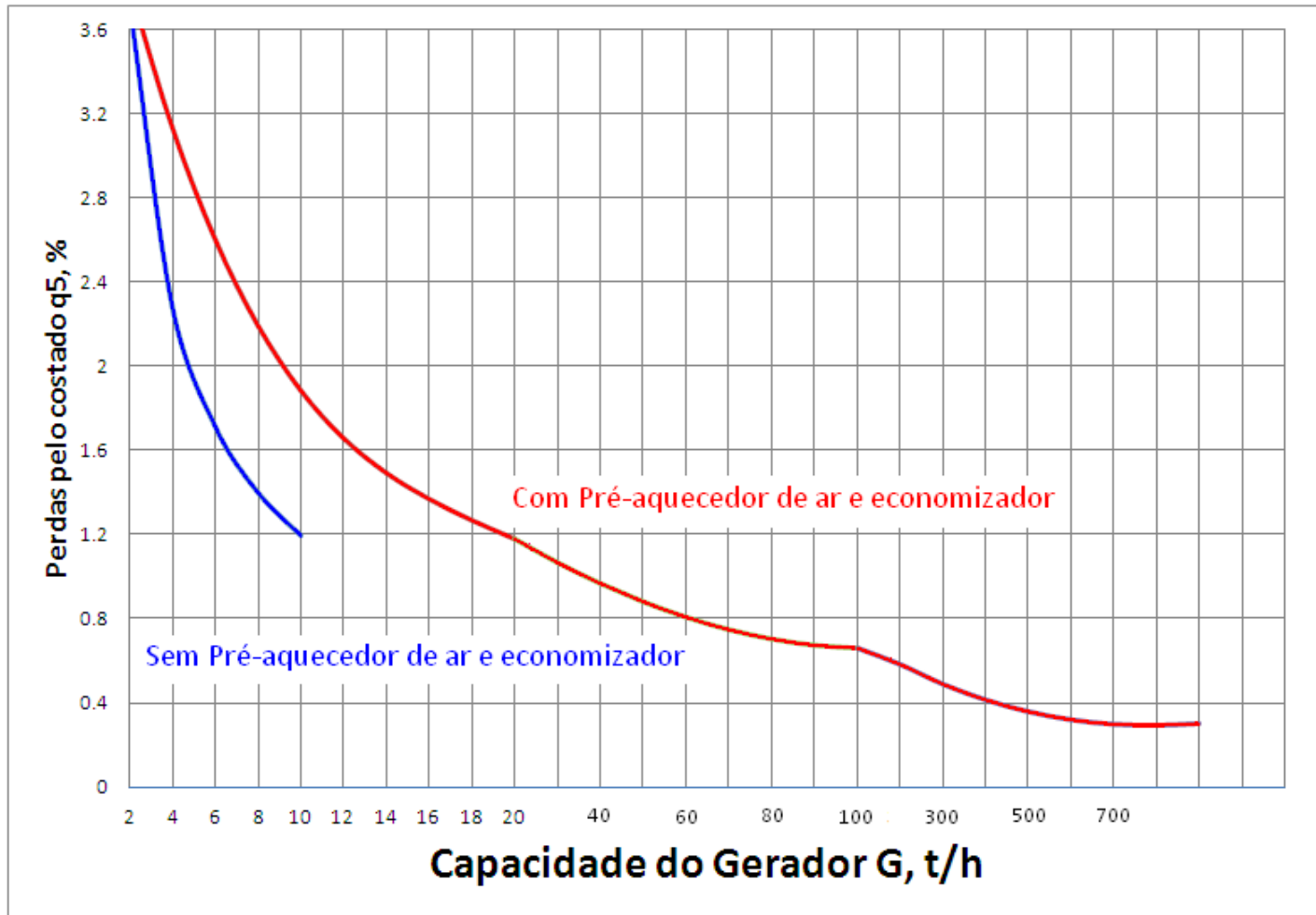
## Características das Fornalhas com extracção de cinzas sólidas (Tab. 14.3)

Combustível	Coeficiente de excesso de ar $\alpha_f$	Tensão térmica admissível $q_v$ kW/m <sup>3</sup> para capacidade de vapor G em t/h				Perdas de calor %				
		25	35	50	75	$q_3$	$q_4$ para capacidade			
							25	35	50	75
Lignite	1,2	250	210	190	10	0	5	3	2-3	1-5
Carvão mineral	1,2	280	250	210	190	0,5	3	1,5-2	1-2	0,5
Antracite	1,2	180	170	150	140	0	7	7	6	6
Turfa fresada	1,2	260	210	190	190	0,5	3	1,5-2	1-2	0,5





# Gráfico das Perdas pelo Costado ( $q_5$ )



# Problema 15.2 (Resolução I)

1.A massa de trabalho do combustível calcula-se de:

$$C^t = C^d \cdot \frac{100 - W^t}{100} = 54,0\%$$

$$H^t = H^d \cdot \frac{100 - W^t}{100} = 4,5\%$$

$$N^t = N^d \cdot \frac{100 - W^t}{100} = 2,7\%$$

$$O^t = O^d \cdot \frac{100 - W^t}{100} = 21,6\%$$

$$S^t = S^d \cdot \frac{100 - W^t}{100} = 1,8\%$$

$$A^t = A^d \cdot \frac{100 - W^t}{100} = 5,4\%$$

$$W^t = 10,0\%$$



# Problema 15.2 (Resolução II)

2. O volume teórico do ar é dado por:

$$V^{\circ}_{ar} = 0,0889 \cdot (C^t + 0,375 \cdot S^t) + 0,265 \cdot H^t - 0,0333 \cdot O^t = 5,334 \left[ \frac{m^3}{kg} \right]$$

3. O volume teórico dos Gases Biatómicos calcula-se de:

$$V^{\circ}_{N_2} = 0,79 \cdot V^{\circ}_{ar} + 0,008 \cdot N^t = 4,235 \left[ \frac{m^3}{kg} \right]$$

4. O volume teórico de água obtém-se de:

$$V^{\circ}_{H_2O} = 0,1116 \cdot H^t + 0,0124 \cdot W^t + 0,0161 \cdot V^{\circ}_{ar} = 0,712 \left[ \frac{m^3}{kg} \right]$$

5. Volume os Gases Triatómicos:

$$V_{R_{O_2}} = 1,867 \cdot (C^t + 0,375 \cdot S^t) / 100 = 1,021 \left[ \frac{m^3}{kg} \right]$$



# Problema 15.2 (Resolução III)

6. O volume real dos Gases Biatómicos calcula-se de:

$$V_{R2} = V^o_{N_2} + (\alpha - 1) \cdot 0,79 \cdot V^o_{ar} = 5,499 \left[ \frac{m^3}{kg} \right]$$

7. O volume real de água obtém-se de:

$$V_{H_2O} = V^o_{H_2O} + 0,0161 \cdot (\alpha - 1) \cdot V^o_{ar} = 0,738 \left[ \frac{m^3}{kg} \right]$$

8. O volume dos Gases Triatómicos calcula-se de:

$$V_{R0_2} = 1,867 \cdot (C^t + 0,375 \cdot S^t) / 100 = 1,021 \left[ \frac{m^3}{kg} \right]$$

9. O volume do Oxigénio Excedente obtém-se de:

$$V_{0_2} = 0,21 \cdot (\alpha - 1) \cdot V^o_{ar} = 0,336 \left[ \frac{m^3}{kg} \right]$$



# Problema 15.2 (Resolução IV)

10. O volume dos Gases de Combustão calcula-se de:

$$V_g = V_{R_{O_2}} + V_{R_2} + V_{H_2O} + V_{O_2} = 7,594 \left[ \frac{m^3}{kg} \right]$$

11. As fracções dos gases obtêm-se de:

$$r_{R_{O_2}} = \frac{V_{R_{O_2}}}{V_g} = 0,134 \quad m^3/m^3$$

$$r_{H_2O} = \frac{V_{RH_2O}}{V_g} = 0,097 \quad m^3/m^3$$

$$r_{R_{O_2}} = \frac{V_{RN_2}}{V_g} = 0,724 \quad m^3/m^3$$

$$r_{O_2} = \frac{V_{O_2}}{V_g} = 0,044 \quad m^3/m^3$$

12. O Poder Calorífico Inferior calcula-se de:

$$Q_i^t = 4,187 \left[ 81C^t + 300H^t - 26(O^t - S^t) - 6(W^t + 9H^t) \right] = 20542,259 \quad [kJ/kg]$$



# Problema 15.2 (Resolução V)

13. A Entalpia determinada pelo poder calorífico é:

$$I_g = \frac{Q^i}{V_g} = 2705,032 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3} \right]$$

14. A entalpia dos gases obtém-se de:

$$I_g = r_{RO_2} \cdot (C\theta)_{RO_2} + r_{N_2} \cdot (C\theta)_{N_2} + r_{H_2O} \cdot (C\theta)_{H_2O} + r_{O_2} \cdot (C\theta)_{O_2} = 2943,19 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3} \right]$$

15. A temperatura dos gases é **1870,51 °C**

As perdas de temperatura entre a combustão e a exaustão serão dadas por:

$$\frac{1870,51 - 250}{1870,51} \times 100 = 86,63\%$$





# Problema 15.2 (Resolução VI)

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

$$\eta_b = 100 - \left( 100 \frac{Q_2}{Q_{disp}} + q_3 + q_4 + q_5 + q_6 \right)$$

$$\eta_b = 100 - \left( 100 \frac{\dot{B} \cdot V_g \cdot c_{pg} (T_{wg} - T_{amb})}{Q_{disp}} + q_3 + q_4 + q_5 + q_6 \right)$$

$$\eta_b = 100 - \left( 100 \frac{\dot{B} \cdot V_g \cdot c_{pg} (T_{wg} - T_{amb})}{(Q_i + Q_{fis,ar} + Q_{fis,comb}) \cdot \dot{B}} + q_3 + q_4 + q_5 + q_6 \right)$$

$$\eta_b = 100 - \left( 100 \frac{V_g \cdot c_{pg} (T_{wg} - T_{amb})}{(Q_i + V_{ar} \cdot c_{p_{ar}} T_{ar} \cdot \alpha + c_{p_{comb}} \cdot T_{comb})} + q_3 + q_4 + q_5 + q_6 \right)$$



# Problema 15.2 (Resolução VII)

$$84,695 = 100 - \left( 100 \frac{7,594 \cdot 1,414(250 - 26)}{(20542,26 + 5,334 \cdot 1,3 \cdot T_{ar} \cdot 1,2 + 1,4 \cdot 120)} + 0,5 + 3 + 1,20 + 0 \right)$$

$$100 - 84,695 - 0,5 - 3 - 1,20 = \frac{225294,317}{(20598,26 + 8,415 \cdot T_{ar})}$$

$$T_{ar} = \left( \frac{225294,317}{10,14} - 20598,26 \right) / 8,415 \approx 200^\circ C$$

