

Sistemas Energéticos

3º ano 6º semestre

Aula 3

3 - Teoria da Combustão. Lei de Lavoisier - Prática



1. Conversão entre massas

Massa seca → Massa de trabalho

$$X_t = X_d \left(\frac{100 - W}{100} \right)$$

Onde

- (X_d) = percentagem na massa seca
- (X_t) = percentagem na massa de trabalho
- (W) = humidade (%)

Massa de combustível → Massa de trabalho

$$X_t = X_c \left(\frac{100 - W - A}{100} \right)$$

Onde

- (A) = cinzas
- (W) = humidade



2. Coeficiente de excesso de ar

$$\alpha = 1 + \frac{EA}{100}$$

Onde

EA = excesso de ar (%)

3. Volume teórico do ar

Para combustíveis sólidos e líquidos

$$V_{ar}^0 = 0,0889(C + 0,375S) + 0,265H - 0,0333O \text{ (m}^3\text{N/kg}_{\text{combustível}}\text{)}$$



4. Volume teórico dos gases biatômicos

$$V_{N_2}^0 = 0,79V_{ar}^0 + 0,008N \text{ (m}^3\text{N/kg}_{\text{combustível}}\text{)}$$

5. Volume teórico de vapor de água

$$V_{H_2O}^0 = 0,111H + 0,0124W + 0,0161V_{ar}^0 \text{ (m}^3\text{N/kg}_{\text{combustível}}\text{)}$$



6. Volume teórico dos gases triatômicos

5

$$V_{RO_2} = 0,01866(C + 0,375S) \text{ (m}^3\text{N/kg}_{\text{combustível}}\text{)}$$

7. Volume real dos gases biatômicos

Pode usar-se qualquer uma das formas.

Forma 1

$$V_{N_2} = V_{N_2}^0 + 0,79(\alpha - 1)V_{ar}^0 \text{ (m}^3\text{N/kg}_{\text{combustível}}\text{)}$$

Forma 2

$$V_{N_2} = 0,79\alpha V_{ar}^0 + 0,008N \text{ (m}^3\text{N/kg}_{\text{combustível}}\text{)}$$

8. Volume real de vapor de água

Forma 1



$$V_{H_2O} = V_{H_2O}^0 + 0,0161(\alpha - 1)V_{ar}^0 \text{ (m}^3\text{N/kg}_{\text{combustível}}\text{)}$$

6

Forma 2

$$V_{H_2O} = 0,111H + 0,0124W + 0,0161\alpha V_{ar}^0 \text{ (m}^3\text{N/kg}_{\text{combustível}}\text{)}$$

9. Volume real dos gases triatômicos

Na combustão completa

$$V_{RO_2} = V_{RO_2}^0 \text{ (m}^3\text{N/kg}_{\text{combustível}}\text{)}$$

10. Volume de CO₂

$$V_{CO_2} = 0,01866C \text{ (m}^3\text{N/kg}_{\text{combustível}}\text{)}$$



11. Volume de SO₂

$$V_{SO_2} = 0,00699S \text{ (m}^3\text{N/kg}_{\text{combustível}}\text{)}$$

12. Volume do oxigénio excedente

$$V_{O_2} = 0,21(\alpha - 1)V_{ar}^0 \text{ (m}^3\text{N/kg}_{\text{combustível}}\text{)}$$

13. Volume total dos gases de combustão

Gases húmidos

$$V_g = V_{RO_2} + V_{N_2} + V_{H_2O} + V_{O_2} \text{ (m}^3\text{N/kg}_{\text{combustível}}\text{)}$$



Gases secos

$$V_{g,seco} = V_{RO_2} + V_{N_2} + V_{O_2} \text{ (m}^3\text{N/kg}_{\text{combustível}}\text{)}$$

Sequência de resolução (algoritmo)

1. Converter a composição para **massa de trabalho**.
2. Calcular o **coeficiente de excesso de ar α**
3. Determinar o **volume teórico do ar**.
4. Calcular o **volume teórico dos gases biatômicos**.
5. Calcular o **volume teórico do vapor de água**.
6. Calcular o **volume teórico dos gases triatômicos**.
7. Determinar o **volume real dos gases biatômicos**.
8. Determinar o **volume real do vapor de água**.
9. Calcular o **volume do oxigénio excedente**.
10. Calcular o **volume total dos gases de combustão**.



Problema 3.1 (I)

Um combustível sólido utilizado numa caldeira apresenta a seguinte composição, dada em **massa seca**:

- Carbono = **51 %**
- Hidrogénio = **8 %**
- Nitrogénio = **3 %**
- Oxigénio = **31 %**
- Enxofre = **2 %**
- Cinzas = **5 %**
- Humidade = **6 %**

Sabendo que a combustão decorre com **25 % de excesso de ar**, determinar:

- A massa de trabalho do combustível;
- O volume teórico do ar;
- O volume teórico dos gases biatómicos;
- O volume teórico de vapor de água;
- O volume teórico dos gases triatómicos;
- O volume real dos gases biatómicos;
- O volume real de vapor de água;
- O volume do oxigénio excedente;
- O volume total dos gases de combustão.



Problema 3.1 (II)

Grandeza	Resultado
Massa de trabalho do carbono, C^t	47,94%
Massa de trabalho do hidrogénio, H^t	7,52%
Massa de trabalho do nitrogénio, N^t	2,82%
Massa de trabalho do oxigénio, O^t	29,14%
Massa de trabalho do enxofre, S^t	1,88%
Massa de trabalho das cinzas, A^t	4,70%
Humidade, W^t	6,00%
Coeficiente de excesso de ar, α	1,25
Volume teórico do ar, V^0_{ar}	5,347 Nm ³ /kg
Volume teórico dos gases biatómicos, $V^0_{N_2}$	4,247 Nm ³ /kg
Volume teórico de vapor de água, $V^0_{H_2O}$	0,995 Nm ³ /kg
Volume dos gases triatómicos, V_{RO_2}	0,908 Nm ³ /kg
Volume real dos gases biatómicos, V_{N_2}	5,303 Nm ³ /kg
Volume real de vapor de água, V_{H_2O}	1,017 Nm ³ /kg
Volume do oxigénio excedente, V_{O_2}	0,281 Nm ³ /kg
Volume dos gases secos	6,492 Nm ³ /kg
Volume total dos gases de combustão	7,509 Nm ³ /kg



Problema 3.2 (I)

Num forno industrial queima-se um combustível líquido cuja composição, dada em **massa de combustível**, é:

- Carbono = 84 %
- Hidrogénio = 11 %
- Nitrogénio = 1 %
- Oxigénio = 2 %
- Enxofre = 2 %
- Cinzas = 0 %
- Humidade = 1 %
- O processo opera com **15 % de excesso de ar**.

Determinar:

- A massa de trabalho do combustível;
- O volume teórico do ar;
- O volume teórico dos gases biatómicos;
- O volume teórico de vapor de água;
- O volume teórico dos gases triatómicos;
- O volume real dos gases biatómicos;
- O volume real de vapor de água;
- O volume do oxigénio excedente;
- O volume total dos gases de combustão.



Problema 3.2 (II)

Grandeza	Resultado
Carbono na massa de trabalho, C^t	83,16%
Hidrogénio na massa de trabalho, H^t	10,89%
Nitrogénio na massa de trabalho, N^t	0,99%
Oxigénio na massa de trabalho, O^t	1,98%
Enxofre na massa de trabalho, S^t	1,98%
Cinzas, A^t	0,00%
Humidade, W^t	1,00%
Coeficiente de excesso de ar, α	1,15
Volume teórico do ar, V^0_{ar}	10,279 Nm ³ /kg
Volume teórico dos gases biatómicos, $V^0_{N_2}$	8,128 Nm ³ /kg
Volume teórico de vapor de água, $V^0_{H_2O}$	1,387 Nm ³ /kg
Volume dos gases triatómicos, V_{RO_2}	1,566 Nm ³ /kg
Volume real dos gases biatómicos, V_{N_2}	9,346 Nm ³ /kg
Volume real de vapor de água, V_{H_2O}	1,412 Nm ³ /kg
Volume do oxigénio excedente, V_{O_2}	0,324 Nm ³ /kg
Volume dos gases secos	11,236 Nm ³ /kg
Volume total dos gases de combustão	12,648 Nm ³ /kg



Problema 3.3 (I)

Uma central térmica utiliza biomassa cuja composição, dada em **massa seca**, é:

- Carbono = 48 %
- Hidrogénio = 7 %
- Nitrogénio = 2 %
- Oxigénio = 37 %
- Enxofre = 1 %
- Cinzas = 5 %
- Humidade = 12 %

Sabendo que a combustão é realizada com **40 % de excesso de ar**, determinar:

- A massa de trabalho do combustível;
- O volume teórico do ar;
- O volume teórico dos gases biatómicos;
- O volume teórico de vapor de água;
- O volume teórico dos gases triatómicos;
- O volume real dos gases biatómicos;
- O volume real de vapor de água;
- O volume do oxigénio excedente;
- O volume total dos gases de combustão.



Problema 3.3 (II)

Grandeza	Resultado
Carbono na massa de trabalho, C^t	42,24%
Hidrogénio na massa de trabalho, H^t	6,16%
Nitrogénio na massa de trabalho, N^t	1,76%
Oxigénio na massa de trabalho, O^t	32,56%
Enxofre na massa de trabalho, S^t	0,88%
Cinzas, A^t	4,40%
Humidade, W^t	12,00%
Coeficiente de excesso de ar, α	1,40
Volume teórico do ar, V^0_{ar}	4,333 Nm ³ /kg
Volume teórico dos gases biatómicos, $V^0_{N_2}$	3,437 Nm ³ /kg
Volume teórico de vapor de água, $V^0_{H_2O}$	0,902 Nm ³ /kg
Volume dos gases triatómicos, V_{RO_2}	0,794 Nm ³ /kg
Volume real dos gases biatómicos, V_{N_2}	4,806 Nm ³ /kg
Volume real de vapor de água, V_{H_2O}	0,930 Nm ³ /kg
Volume do oxigénio excedente, V_{O_2}	0,364 Nm ³ /kg
Volume dos gases secos	5,964 Nm ³ /kg
Volume total dos gases de combustão	6,894 Nm ³ /kg



Problema 3.4 (I)

Considere um combustível sólido utilizado numa fornalha industrial com a seguinte composição, dada em **massa de combustível**:

- Carbono = **55 %**
- Hidrogénio = **6 %**
- Nitrogénio = **2 %**
- Oxigénio = **24 %**
- Enxofre = **3 %**
- Cinzas = **10 %**
- Humidade = **8 %**
- A combustão ocorre com **30 % de excesso de ar**.

Determinar:

- A massa de trabalho do combustível;
- O volume teórico do ar;
- O volume teórico dos gases biatómicos;
- O volume teórico de vapor de água;
- O volume teórico dos gases triatómicos;
- O volume real dos gases biatómicos;
- O volume real de vapor de água;
- O volume do oxigénio excedente;
- O volume total dos gases de combustão.



Problema 3.4 (II)

Grandeza	Resultado
Carbono na massa de trabalho, C^t	50,60%
Hidrogénio na massa de trabalho, H^t	5,52%
Nitrogénio na massa de trabalho, N^t	1,84%
Oxigénio na massa de trabalho, O^t	22,08%
Enxofre na massa de trabalho, S^t	2,76%
Cinzas, A^t	9,20%
Humidade, W^t	8,00%
Coeficiente de excesso de ar, α	1,30
Volume teórico do ar, V^0_{ar}	5,318 Nm ³ /kg
Volume teórico dos gases biatómicos, $V^0_{N_2}$	4,216 Nm ³ /kg
Volume teórico de vapor de água, $V^0_{H_2O}$	0,798 Nm ³ /kg
Volume dos gases triatómicos, V_{RO_2}	0,964 Nm ³ /kg
Volume real dos gases biatómicos, V_{N_2}	5,476 Nm ³ /kg
Volume real de vapor de água, V_{H_2O}	0,824 Nm ³ /kg
Volume do oxigénio excedente, V_{O_2}	0,335 Nm ³ /kg
Volume dos gases secos	6,775 Nm ³ /kg
Volume total dos gases de combustão	7,599 Nm ³ /kg

