

Sistemas Energéticos

3º ano 6º semestre

Aula 5



Aula 5: Poder calorífico, Entalpia da combustão e Temperatura Teórica de combustão - Prática

Problema 5.1

Determinar a temperatura de combustão de um combustível líquido que se queima num forno, tendo este a seguinte composição, dada em massa seca: Carbono 42%, Hidrogénio 16%, Nitrogénio 9%, Oxigénio 28%, Enxofre 5%, Cinzas 0%, Humidade 2% e com o excesso de ar de 40%.

O ar e o combustível são pré-aquecidos até 200 °C e 150 °C respectivamente. O calor específico do ar e do combustível são de 1.3 e 1.4 respectivamente.



Problema 5.1 – Solução (I)

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

$$C^t = C^d \frac{100 - W^t}{100} = 41,16\%$$

$$H^t = H^d \frac{100 - W^t}{100} = 15,68\%$$

$$N^t = N^d \frac{100 - W^t}{100} = 8,82\%$$

$$O^t = O^d \frac{100 - W^t}{100} = 27,44\%$$

$$S^t = S^d \frac{100 - W^t}{100} = 4,90\%$$

$$A^t = A^d \frac{100 - W^t}{100} = 0\%$$

$$W^t = 2,0\%$$



Problema 5.1 Solução (II)

2. O volume teórico do ar é dado por:

$$V_{ar}^0 = 0,0889(C^t + 0,375 \cdot S^t) + 0,269 \cdot H^t - 0,0336 \cdot O^t = 7,087 \left[\frac{m^3 N}{kg_{comb}} \right]$$

3. O volume teórico dos gases biatômicos calcula-se de:

$$V_{N_2}^0 = 0,79 \cdot V_{ar}^0 \cdot \alpha + 0,008 \cdot N^t = 5,669 \left[\frac{m^3 N}{kg_{comb}} \right]$$

Onde α é igual a 1.

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

$$V_{H_2O}^0 = 0,1116 \cdot H^t + 0,0124 \cdot W^t + 0,0161 \cdot V_{ar}^0 = 1,889 \left[\frac{m^3 N}{kg_{comb}} \right]$$



5. Volume teórico dos gases triatômicos:

$$V_{RO_2} = 1,867(C^t + 0,375 \cdot S^t) / 100 = 0,803 \left[\frac{m^3 N}{kg_{comb}} \right]$$

Problema 5.1 Solução (III)

6. O volume real dos gases biatômicos calcula-se de:

$$V_{R_2} = V_{N_2}^0 + (\alpha - 1) \cdot 0,79 \cdot V_{ar}^0 = 7,909 \left[\frac{m^3 N}{kg_{comb}} \right]$$


7. O volume real de água obtém-se de:

$$V_{H_2O} = V_{H_2O}^0 + 0,0161(\alpha - 1) \cdot V_{ar}^0 = 1,934 \left[\frac{m^3 N}{kg_{comb}} \right]$$

8. O volume real dos gases triatômicos calcula-se de:

$$V_{RO_2} = 1,867(C^t + 0,375 \cdot S^t) / 100 = 0,803 \left[\frac{m^3 N}{kg_{comb}} \right]$$

9. O volume do oxigénio excedente obtém-se de:


$$V_{O_2} = 0,21(\alpha - 1) \cdot V_{ar}^0 = 0,595 \left[\frac{m^3 N}{kg_{comb}} \right]$$

6 10. O volume dos gases de combustão calcula-se de:

$$V_g = V_{RO_2} + V_{R_2} + V_{H_2O} + V_{O_2} = 11,241 \left[\frac{m^3 N}{kg_{comb}} \right]$$

Problema 5.1 Solução (IV)

11. As fracções dos gases obtêm-se de:

Fracção dos gases
biatómicos

$$r_{RN_2} = \frac{V_{RN_2}}{V_g} = 0,704$$

Fracção de água

$$r_{RH_2O} = \frac{V_{RH_2O}}{V_g} = 0,172$$

Fracção dos gases
triatómicos

$$r_{RO_2} = \frac{V_{RO_2}}{V_g} = 0,071$$

7

Fracção de oxigénio

$$r_{O_2} = \frac{V_{O_2}}{V_g} = 0,053$$



Problema 5.1 Solução (V)

12. O Poder Calorífico Inferior calcula-se de:


$$Q_i^t = 4,187 \left[(81 \cdot C^t + 300H^t - 26(O^t - S^t) - 6(W^t + 9H^t)) \right] = 27605,73 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{comb}} \right]$$

13. A Entalpia total dos gases, devido ao pré-aquecimento do ar e do combustível determina-se de:


$$I_g = \frac{Q^i + T_{ar} \cdot c_{p_{ar}} \cdot \alpha \cdot V_{ar}^o + T_{comb} \cdot c_{p_{comb}}}{V_g} = 2704,6 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3} \right]$$

Onde:

A entalpia determinada pelo poder calorífico é:


$$I_{vg} = \frac{Q^i}{V_g} = 2455,731 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3} \right]$$

A entalpia determinada do aquecimento do ar é:


$$I_{ar} = \frac{T_{ar} \cdot c_{p_{ar}} \cdot \alpha \cdot V_{ar}^o}{V_g} = 230,188 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3} \right]$$

Problema 5.1 Solução (VI)

A entalpia determinada do aquecimento do combustível é:

$$I_g = \frac{T_{comb} \cdot c_{p_{comb}}}{V_g} = 18,681 \left[\frac{kJ}{m^3} \right]$$

14. A entalpia dos gases obtém-se de: ►

$$I_g = r_{RO_2} (C\theta)_{RO_2} + r_{N_2} (C\theta)_{N_2} + r_{H_2O} (C\theta)_{H_2O} + r_{O_2} (C\theta)_{O_2} = 2704,6 \left[\frac{kJ}{m^3} \right]$$

15. A temperatura dos gases é **1680,07 °C**





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

Appendix III. Enthalpy of 1 m³ of Air and Gases at Different Temperatures and Constant Pressure
101.3 kN/m² (760 mm Hg)

| Temperature | | CO ₂ | | N ₂ | | O ₂ | | H ₂ O | | Dry air | |
|-------------|------|-------------------|---------------------|-------------------|---------------------|-------------------|---------------------|-------------------|---------------------|-------------------|---------------------|
| K | °C | kJ/m ³ | kcal/m ³ | kJ/m ³ | kcal/m ³ | kJ/m ³ | kcal/m ³ | kJ/m ³ | kcal/m ³ | kJ/m ³ | kcal/m ³ |
| 373 | 100 | 172.00 | 41.08 | 130.13 | 31.08 | 131.93 | 31.51 | 150.18 | 35.87 | 130.51 | 31.17 |
| 473 | 200 | 361.57 | 86.38 | 260.60 | 62.24 | 267.38 | 63.86 | 303.47 | 72.48 | 261.94 | 62.56 |
| 573 | 300 | 564.24 | 134.76 | 392.41 | 93.72 | 407.48 | 97.32 | 461.36 | 110.19 | 395.42 | 94.44 |
| 673 | 400 | 777.44 | 185.68 | 526.89 | 125.84 | 551.85 | 131.80 | 623.69 | 148.96 | 532.08 | 127.08 |
| 773 | 500 | 1001.78 | 239.26 | 664.54 | 158.75 | 700.17 | 167.25 | 791.55 | 189.05 | 672.01 | 160.50 |
| 873 | 600 | 1236.76 | 295.38 | 805.06 | 192.30 | 851.64 | 203.40 | 964.68 | 230.40 | 814.96 | 194.64 |
| 973 | 700 | 1475.41 | 352.38 | 940.36 | 224.59 | 1005.24 | 240.24 | 1143.64 | 273.14 | 960.75 | 229.46 |
| 1073 | 800 | 1718.95 | 410.52 | 1094.65 | 261.44 | 1162.32 | 277.60 | 1328.11 | 317.20 | 1109.05 | 264.88 |
| 1173 | 900 | 1972.43 | 471.06 | 1243.55 | 297.00 | 1319.67 | 315.18 | 1517.87 | 362.52 | 1259.36 | 300.78 |
| 1273 | 1000 | 2225.75 | 531.80 | 1393.86 | 332.90 | 1480.11 | 353.50 | 1713.32 | 409.20 | 1411.86 | 337.20 |
| 1373 | 1100 | 2485.34 | 593.56 | 1546.74 | 369.27 | 1641.02 | 391.93 | 1913.67 | 457.05 | 1565.94 | 374.00 |
| 1473 | 1200 | 2745.44 | 655.92 | 1699.76 | 405.96 | 1802.76 | 430.56 | 2118.74 | 506.04 | 1721.36 | 411.12 |
| 1573 | 1300 | 3010.58 | 719.03 | 1857.74 | 443.69 | 1966.05 | 469.56 | 2328.01 | 556.01 | 1879.27 | 448.86 |
| 1673 | 1400 | 3276.75 | 782.60 | 2012.86 | 480.62 | 2129.93 | 508.70 | 2540.25 | 606.70 | 2036.87 | 486.50 |
| 1773 | 1500 | 3545.34 | 846.75 | 2170.55 | 518.40 | 2296.78 | 548.55 | 2758.79 | 658.80 | 2196.19 | 524.55 |
| 1873 | 1600 | 3815.86 | 911.36 | 2328.65 | 556.16 | 2463.97 | 588.48 | 2979.13 | 711.52 | 2356.68 | 562.88 |
| 1973 | 1700 | 4087.10 | 976.14 | 2486.28 | 593.81 | 2632.09 | 628.66 | 3203.05 | 765.00 | 2517.60 | 601.29 |
| 2073 | 1800 | 4360.67 | 1041.48 | 2646.74 | 632.16 | 2800.48 | 668.88 | 3429.90 | 819.18 | 2680.01 | 640.08 |
| 2173 | 1900 | 4634.76 | 1106.94 | 2808.22 | 670.70 | 2971.30 | 709.65 | 3657.85 | 873.62 | 2841.43 | 678.87 |
| 2273 | 2000 | 4910.51 | 1172.80 | 2970.25 | 709.40 | 3142.76 | 750.60 | 3889.72 | 929.00 | 3006.26 | 718.00 |
| 2373 | 2100 | 5186.81 | 1238.79 | 3131.96 | 748.02 | 3314.85 | 791.70 | 4121.79 | 984.69 | 3169.77 | 757.05 |
| 2473 | 2200 | 5464.20 | 1305.04 | 3295.84 | 787.16 | 3487.44 | 832.92 | 4358.83 | 1041.04 | 3338.21 | 797.28 |
| 2573 | 2300 | 5746.39 | 1371.72 | 3457.20 | 825.70 | 3662.33 | 874.69 | 4485.34 | 1097.79 | 3500.54 | 836.05 |
| 2673 | 2400 | 6023.25 | 1438.56 | 3620.58 | 864.72 | 3837.64 | 916.56 | 4724.37 | 1154.88 | 3665.80 | 875.52 |
| 2773 | 2500 | 6303.53 | 1505.50 | 3786.09 | 904.25 | 4014.29 | 958.75 | 5076.74 | 1212.50 | 3835.29 | 916.00 |



Problema 5.2

Determinar a temperatura de combustão de um combustível sólido que se queima num forno, tendo a seguinte composição, dada em massa seca: Carbono 44%, Hidrogénio 12%, Nitrogénio 8%, Oxigénio 23%, Enxofre 7%, Cinzas 6%, Humidade 2% e com o excesso de ar de 20%.



Problema 5.2 Solução (I)

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

$$C^t = C^d \frac{100 - W^t}{100} = 43,12\%$$

$$H^t = H^d \frac{100 - W^t}{100} = 11,76\%$$

$$N^t = N^d \frac{100 - W^t}{100} = 7,84\%$$

$$O^t = O^d \frac{100 - W^t}{100} = 22,54\%$$

$$S^t = S^d \frac{100 - W^t}{100} = 6,86\%$$

$$A^t = A^d \frac{100 - W^t}{100} = 5,88\%$$

$$W^t = 2,0\%$$



Problema 5.2 Solução (II)

2. O volume teórico do ar é dado por:

$$V_{ar}^0 = 0,0889(C^t + 0,375 \cdot S^t) + 0,269 \cdot H^t - 0,0336 \cdot O^t = 6,445 \left[\frac{m^3 N}{kg_{comb}} \right]$$

3. O volume teórico dos gases biatómicos calcula-se de:

$$V_{N_2}^0 = 0,79 \cdot V_{ar}^0 \cdot \alpha + 0,008 \cdot N^t = 5,154 \left[\frac{m^3 N}{kg_{comb}} \right]$$

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

$$V_{H_2O}^0 = 0,1116 \cdot H^t + 0,0124 \cdot W^t + 0,0161 \cdot V_{ar}^0 = 1,441 \left[\frac{m^3 N}{kg_{comb}} \right]$$

5. Volume teórico dos gases triatómicos:

13

$$V_{RO_2} = 1,867(C^t + 0,375 \cdot S^t) / 100 = 0,853 \left[\frac{m^3 N}{kg_{comb}} \right]$$

Problema 5.2 Solução (III)

6. O volume real dos gases biatômicos calcula-se de:

$$V_{R_2} = V_{N_2}^0 + (\alpha - 1) \cdot 0,79 \cdot V_{ar}^0 = 6,172 \left[\frac{m^3 N}{kg_{comb}} \right]$$


7. O volume real de água obtém-se de:

$$V_{H_2O} = V_{H_2O}^0 + 0,0161(\alpha - 1) \cdot V_{ar}^0 = 1,462 \left[\frac{m^3 N}{kg_{comb}} \right]$$

8. O volume real dos gases triatômicos calcula-se de:

$$V_{RO_2} = 1,867(C^t + 0,375 \cdot S^t) / 100 = 0,853 \left[\frac{m^3 N}{kg_{comb}} \right]$$

9. O volume do oxigénio excedente obtém-se de:


$$V_{O_2} = 0,21(\alpha - 1) \cdot V_{ar}^0 = 0,271 \left[\frac{m^3 N}{kg_{comb}} \right]$$

10. O volume dos gases de combustão calcula-se de:

$$V_g = V_{RO_2} + V_{R_2} + V_{H_2O} + V_{O_2} = 8,758 \left[\frac{m^3 N}{kg_{comb}} \right]$$

Problema 5.2 Solução (IV)

11. As fracções dos gases obtêm-se de:

Fracção dos gases
biatómicos

$$r_{RN_2} = \frac{V_{RN_2}}{V_g} = 0,704$$

Fracção de água

$$r_{RH_2O} = \frac{V_{RH_2O}}{V_g} = 0,167$$

Fracção dos gases
triatómicos

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

Fracção de oxigénio

$$r_{O_2} = \frac{V_{O_2}}{V_g} = 0,031$$



Problema 5.2 Solução (V)


12. O Poder Calorífico Inferior calcula-se de:

$$Q_i^t = 4,187 \left[(81 \cdot C^t + 300H^t - 26(O^t - S^t) - 6(W^t + 9H^t)) \right] = 24979,64 \left[\frac{kJ}{kg_{comb}} \right]$$

13. A Entalpia total dos gases, determina-se do poder calorífico, sendo de:

$$I_g = \frac{Q^i}{V_g} = 2857,82 \left[\frac{kJ}{m^3} \right]$$

14. A entalpia dos gases obtém-se de: ►


$$I_g = r_{RO_2} (C\theta)_{RO_2} + r_{N_2} (C\theta)_{N_2} + r_{H_2O} (C\theta)_{H_2O} + r_{O_2} (C\theta)_{O_2} = 2857,73 \left[\frac{kJ}{m^3} \right]$$

15. A temperatura dos gases é **1743,12 °C**



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


Appendix III. Enthalpy of 1 m³ of Air and Gases at Different Temperatures and Constant Pressure
101.3 kN/m² (760 mm Hg)

| Temperature | | CO ₂ | | N ₂ | | O ₂ | | H ₂ O | | Dry air | |
|-------------|------|-------------------|---------------------|-------------------|---------------------|-------------------|---------------------|-------------------|---------------------|-------------------|---------------------|
| K | °C | kJ/m ³ | kcal/m ³ | kJ/m ³ | kcal/m ³ | kJ/m ³ | kcal/m ³ | kJ/m ³ | kcal/m ³ | kJ/m ³ | kcal/m ³ |
| 373 | 100 | 172.00 | 41.08 | 130.13 | 31.08 | 131.93 | 31.51 | 150.18 | 35.87 | 130.51 | 31.17 |
| 473 | 200 | 361.57 | 86.38 | 260.60 | 62.24 | 267.38 | 63.86 | 303.47 | 72.48 | 261.94 | 62.56 |
| 573 | 300 | 564.24 | 134.76 | 392.41 | 93.72 | 407.48 | 97.32 | 461.36 | 110.19 | 395.42 | 94.44 |
| 673 | 400 | 777.44 | 185.68 | 526.89 | 125.84 | 551.85 | 131.80 | 623.69 | 148.96 | 532.08 | 127.08 |
| 773 | 500 | 1001.78 | 239.26 | 664.54 | 158.75 | 700.17 | 167.25 | 791.55 | 189.05 | 672.01 | 160.50 |
| 873 | 600 | 1236.76 | 295.38 | 805.06 | 192.30 | 851.64 | 203.40 | 964.68 | 230.40 | 814.96 | 194.64 |
| 973 | 700 | 1475.41 | 352.38 | 940.36 | 224.59 | 1005.24 | 240.24 | 1143.64 | 273.14 | 960.75 | 229.46 |
| 1073 | 800 | 1718.95 | 410.52 | 1094.65 | 261.44 | 1162.32 | 277.60 | 1328.11 | 317.20 | 1109.05 | 264.88 |
| 1173 | 900 | 1972.43 | 471.06 | 1243.55 | 297.00 | 1319.67 | 315.18 | 1517.87 | 362.52 | 1259.36 | 300.78 |
| 1273 | 1000 | 2225.75 | 531.80 | 1393.86 | 332.90 | 1480.11 | 353.50 | 1713.32 | 409.20 | 1411.86 | 337.20 |
| 1373 | 1100 | 2485.34 | 593.56 | 1546.74 | 369.27 | 1641.02 | 391.93 | 1913.67 | 457.05 | 1565.94 | 374.00 |
| 1473 | 1200 | 2745.44 | 655.92 | 1699.76 | 405.96 | 1802.76 | 430.56 | 2118.74 | 506.04 | 1721.36 | 411.12 |
| 1573 | 1300 | 3010.58 | 719.03 | 1857.74 | 443.69 | 1966.05 | 469.56 | 2328.01 | 556.01 | 1879.27 | 448.86 |
| 1673 | 1400 | 3276.75 | 782.60 | 2012.86 | 480.62 | 2129.93 | 508.70 | 2540.25 | 606.70 | 2036.87 | 486.50 |
| 1773 | 1500 | 3545.34 | 846.75 | 2170.55 | 518.40 | 2296.78 | 548.55 | 2758.19 | 658.80 | 2196.19 | 524.55 |
| 1873 | 1600 | 3815.86 | 911.36 | 2328.65 | 556.16 | 2463.97 | 588.48 | 2979.13 | 711.52 | 2356.68 | 562.88 |
| 1973 | 1700 | 4087.10 | 976.14 | 2486.28 | 593.81 | 2632.09 | 628.66 | 3203.05 | 765.00 | 2517.60 | 601.29 |
| 2073 | 1800 | 4360.67 | 1041.48 | 2646.74 | 632.16 | 2800.48 | 668.88 | 3429.90 | 819.18 | 2680.01 | 640.08 |
| 2173 | 1900 | 4634.76 | 1106.94 | 2808.22 | 670.70 | 2971.30 | 709.65 | 3657.85 | 873.62 | 2841.43 | 678.87 |
| 2273 | 2000 | 4910.51 | 1172.80 | 2970.25 | 709.40 | 3142.76 | 750.60 | 3889.72 | 929.00 | 3006.26 | 718.00 |
| 2373 | 2100 | 5186.81 | 1238.79 | 3131.96 | 748.02 | 3314.85 | 791.70 | 4121.79 | 984.69 | 3169.77 | 757.05 |
| 2473 | 2200 | 5464.20 | 1305.04 | 3295.84 | 787.16 | 3487.44 | 832.92 | 4358.83 | 1041.04 | 3338.21 | 797.28 |
| 2573 | 2300 | 5746.39 | 1371.72 | 3457.20 | 825.70 | 3662.33 | 874.69 | 4485.34 | 1097.79 | 3500.54 | 836.05 |
| 2673 | 2400 | 6023.25 | 1438.56 | 3620.58 | 864.72 | 3837.64 | 916.56 | 4724.37 | 1154.88 | 3665.80 | 875.52 |
| 2773 | 2500 | 6303.53 | 1505.50 | 3786.09 | 904.25 | 4014.29 | 958.75 | 5076.74 | 1212.50 | 3835.29 | 916.00 |



Problema 5.3

Determinar a temperatura de combustão de um combustível líquido que se queima num forno, tendo este a seguinte composição, dada em massa de combustível: Carbono 47%, Hidrogénio 12%, Nitrogénio 8%, Oxigénio 30%, Enxofre 3%, Cinzas 4%, Humidade 5% e com o excesso de ar de 35%.

 O ar é pré-aquecido até 100 °C, sendo o calor específico do ar e do combustível de 1.29 e 1.4 respectivamente.

Problema 5.3 Solução (I)

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

$$C^t = C^c \frac{100 - (A^t + W^t)}{100} = 42,77\%$$

$$H^t = H^c \frac{100 - (A^t + W^t)}{100} = 10,92\%$$

$$N^t = N^c \frac{100 - (A^t + W^t)}{100} = 7,28\%$$

$$O^t = O^c \frac{100 - (A^t + W^t)}{100} = 27,3\%$$

$$S^t = S^c \frac{100 - (A^t + W^t)}{100} = 2,73\%$$

$$A^t = 4,0\%$$

$$W^t = 5,0\%$$



Problema 5.3 Solução (II)


2. O volume teórico do ar é dado por:

$$V_{ar}^0 = 0,0889(C^t + 0,375 \cdot S^t) + 0,269 \cdot H^t - 0,0336 \cdot O^t = 5,892 \left[\frac{m^3 N}{kg_{comb}} \right]$$


3. O volume teórico dos gases biatómicos calcula-se de:

$$V_{N_2}^0 = 0,79 \cdot V_{ar}^0 \cdot \alpha + 0,008 \cdot N^t = 4,713 \left[\frac{m^3 N}{kg_{comb}} \right]$$

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


$$V_{H_2O}^0 = 0,1116 \cdot H^t + 0,0124 \cdot W^t + 0,0161 \cdot V_{ar}^0 = 1,376 \left[\frac{m^3 N}{kg_{comb}} \right]$$

5. Volume teórico dos gases triatómicos:


$$V_{RO_2} = 1,867(C^t + 0,375 \cdot S^t) / 100 = 0,818 \left[\frac{m^3 N}{kg_{comb}} \right]$$

Problema 5.3 Solução (III)

6. O volume real dos gases biatômicos calcula-se de:

$$V_{R_2} = V_{N_2}^0 + (\alpha - 1) \cdot 0,79 \cdot V_{ar}^0 = 6,34 \left[\frac{m^3 N}{kg_{comb}} \right]$$

7. O volume real de água obtém-se de:

$$V_{H_2O} = V_{H_2O}^0 + 0,0161(\alpha - 1) \cdot V_{ar}^0 = 1,4 \left[\frac{m^3 N}{kg_{comb}} \right]$$

8. O volume real dos gases triatômicos calcula-se de:

$$V_{RO_2} = 1,867(C^t + 0,375 \cdot S^t) / 100 = 0,818 \left[\frac{m^3 N}{kg_{comb}} \right]$$

9. O volume do oxigénio excedente obtém-se de:



$$V_{O_2} = 0,21(\alpha - 1) \cdot V_{ar}^0 = 0,43 \left[\frac{m^3 N}{kg_{comb}} \right]$$

10. O volume dos gases de combustão calcula-se de:

21

$$V_g = V_{RO_2} + V_{R_2} + V_{H_2O} + V_{O_2} = 9,001 \left[\frac{m^3 N}{kg_{comb}} \right]$$

Problema 5.3 Solução (IV)

11. As fracções dos gases obtêm-se de:

Fracção dos gases
biatómicos

$$r_{RN_2} = \frac{V_{RN_2}}{V_g} = 0,705$$

Fracção de água

$$r_{RH_2O} = \frac{V_{RH_2O}}{V_g} = 0,156$$

Fracção dos gases
triatómicos

$$r_{RO_2} = \frac{V_{RO_2}}{V_g} = 0,09$$



Fracção de oxigénio

$$r_{O_2} = \frac{V_{O_2}}{V_g} = 0,048$$

Problema 5.3 Solução (V)

12. O Poder Calorífico Inferior calcula-se de:


$$Q_i' = 4,187 \left[(81 \cdot C^t + 300H^t - 26(O^t - S^t) - 6(W^t + 9H^t)) \right] = 22952,59 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{comb}} \right]$$

13. A Entalpia total dos gases, devido ao pré-aquecimento do ar determina-se de:

$$I_g = \frac{Q^i + T_{ar} \cdot c_{par} \cdot \alpha \cdot V_{ar}^o}{V_g} = 2654,68 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3} \right]$$

Onde:

A entalpia determinada pelo poder calorífico é:


$$I_g = \frac{Q^i}{V_g} = 2540,14 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3} \right]$$

A entalpia determinada do aquecimento do ar é:

$$I_{ar} = \frac{T_{ar} \cdot c_{par} \cdot \alpha \cdot V_{ar}^o}{V_g} = 114,53 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3} \right]$$

Problema 5.3 Solução (VI)

14. A entalpia dos gases obtém-se de: ►

$$I_g = r_{RO_2} (C\theta)_{RO_2} + r_{N_2} (C\theta)_{N_2} + r_{H_2O} (C\theta)_{H_2O} + r_{O_2} (C\theta)_{O_2} = 2654,58 \left[\frac{kJ}{m^3} \right]$$

15. A temperatura dos gases é **1711,19 °C**





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

Appendix III. Enthalpy of 1 m³ of Air and Gases at Different Temperatures and Constant Pressure 101.3 kN/m² (760 mm Hg)

| Temperature | | CO ₂ | | N ₂ | | O ₂ | | H ₂ O | | Dry air | |
|-------------|------|-------------------|---------------------|-------------------|---------------------|-------------------|---------------------|-------------------|---------------------|-------------------|---------------------|
| K | °C | kJ/m ³ | kcal/m ³ | kJ/m ³ | kcal/m ³ | kJ/m ³ | kcal/m ³ | kJ/m ³ | kcal/m ³ | kJ/m ³ | kcal/m ³ |
| 373 | 100 | 172.00 | 41.08 | 130.13 | 31.08 | 131.93 | 31.51 | 150.18 | 35.87 | 130.51 | 31.17 |
| 473 | 200 | 361.57 | 86.38 | 260.60 | 62.24 | 267.38 | 63.86 | 303.47 | 72.48 | 261.94 | 62.56 |
| 573 | 300 | 564.24 | 134.76 | 392.41 | 93.72 | 407.48 | 97.32 | 461.36 | 110.19 | 395.42 | 94.44 |
| 673 | 400 | 777.44 | 185.68 | 526.89 | 125.84 | 551.85 | 131.80 | 623.69 | 148.96 | 532.08 | 127.08 |
| 773 | 500 | 1001.78 | 239.26 | 664.54 | 158.75 | 700.17 | 167.25 | 791.55 | 189.05 | 672.01 | 160.50 |
| 873 | 600 | 1236.76 | 295.38 | 805.06 | 192.30 | 851.64 | 203.40 | 964.68 | 230.40 | 814.96 | 194.64 |
| 973 | 700 | 1475.41 | 352.38 | 940.36 | 224.59 | 1005.24 | 240.24 | 1143.64 | 273.14 | 960.75 | 229.46 |
| 1073 | 800 | 1718.95 | 410.52 | 1094.65 | 261.44 | 1162.32 | 277.60 | 1328.11 | 317.20 | 1109.05 | 264.88 |
| 1173 | 900 | 1972.43 | 471.06 | 1243.55 | 297.00 | 1319.67 | 315.18 | 1517.87 | 362.52 | 1259.36 | 300.78 |
| 1273 | 1000 | 2225.75 | 531.80 | 1393.86 | 332.90 | 1480.11 | 353.50 | 1713.32 | 409.20 | 1411.86 | 337.20 |
| 1373 | 1100 | 2485.34 | 593.56 | 1546.74 | 369.27 | 1641.02 | 391.93 | 1913.67 | 457.05 | 1565.94 | 374.00 |
| 1473 | 1200 | 2745.44 | 655.92 | 1699.76 | 405.96 | 1802.76 | 430.56 | 2118.74 | 506.04 | 1721.36 | 411.12 |
| 1573 | 1300 | 3010.58 | 719.03 | 1857.74 | 443.69 | 1966.05 | 469.56 | 2328.07 | 556.01 | 1879.27 | 448.86 |
| 1673 | 1400 | 3276.75 | 782.60 | 2012.86 | 480.62 | 2129.93 | 508.70 | 2540.25 | 606.70 | 2036.87 | 486.50 |
| 1773 | 1500 | 3545.34 | 846.75 | 2170.55 | 518.40 | 2296.78 | 548.55 | 2758.79 | 658.80 | 2196.19 | 524.55 |
| 1873 | 1600 | 3815.86 | 911.36 | 2328.65 | 556.16 | 2463.97 | 588.48 | 2979.13 | 711.52 | 2356.68 | 562.88 |
| 1973 | 1700 | 4087.10 | 976.14 | 2486.28 | 593.81 | 2632.09 | 628.66 | 3203.05 | 765.00 | 2517.60 | 601.29 |
| 2073 | 1800 | 4360.67 | 1041.48 | 2646.74 | 632.16 | 2800.48 | 668.88 | 3429.90 | 819.18 | 2680.01 | 640.08 |
| 2173 | 1900 | 4634.76 | 1106.94 | 2808.22 | 670.70 | 2971.30 | 709.65 | 3657.85 | 873.62 | 2841.43 | 678.87 |
| 2273 | 2000 | 4910.51 | 1172.80 | 2970.25 | 709.40 | 3142.76 | 750.60 | 3889.72 | 929.00 | 3006.26 | 718.00 |
| 2373 | 2100 | 5186.81 | 1238.79 | 3131.96 | 748.02 | 3314.85 | 791.70 | 4121.79 | 984.69 | 3169.77 | 757.05 |
| 2473 | 2200 | 5464.20 | 1305.04 | 3295.84 | 787.16 | 3487.44 | 832.92 | 4358.83 | 1041.04 | 3338.21 | 797.28 |
| 2573 | 2300 | 5746.39 | 1371.72 | 3457.20 | 825.70 | 3662.33 | 874.69 | 4485.34 | 1097.79 | 3500.54 | 836.05 |
| 2673 | 2400 | 6023.25 | 1438.56 | 3620.58 | 864.72 | 3837.64 | 916.56 | 4724.37 | 1154.88 | 3665.80 | 875.52 |
| 2773 | 2500 | 6303.53 | 1505.50 | 3786.09 | 904.25 | 4014.29 | 958.75 | 5076.74 | 1212.50 | 3835.29 | 916.00 |



Entalpia (kJ/m³) de 1m³ de Gases a temperatura. dada e pressão de 1bar

| Temp. °C | CO ₂ | N ₂ | H ₂ O | O ₂ | Ar Seco | Cinzas |
|----------|-----------------|----------------|------------------|----------------|---------|---------|
| 100 | 172 | 130,13 | 150,18 | 131,98 | 130,51 | 81,00 |
| 200 | 361,67 | 260,6 | 303,47 | 267,38 | 261,94 | 169,80 |
| 300 | 564,24 | 392,41 | 461,36 | 407,48 | 395,42 | 264,00 |
| 400 | 777,44 | 526,89 | 623,69 | 551,85 | 532,08 | 360,00 |
| 500 | 1001,78 | 664,58 | 791,55 | 700,17 | 672,01 | 458,00 |
| 600 | 1236,77 | 805,06 | 964,68 | 851,64 | 814,96 | 560,00 |
| 700 | 1475,41 | 940,36 | 1143,6 | 1005,24 | 960,75 | 662,50 |
| 800 | 1718,96 | 1094,65 | 1328,1 | 1162,32 | 1109,05 | 768,00 |
| 900 | 1972,43 | 1243,55 | 1517,9 | 1319,67 | 1259,36 | 825,00 |
| 1000 | 2226,75 | 1393,86 | 1713,3 | 1480,11 | 1411,86 | 985,00 |
| 1100 | 2485,34 | 1546,14 | 1913,7 | 1641,02 | 1565,94 | 1092,00 |
| 1200 | 2746,44 | 1699,76 | 2118,8 | 1802,76 | 1721,36 | 1212,00 |
| 1300 | 3010,58 | 1857,74 | 2328 | 1966,05 | 1879,27 | 1360,00 |
| 1400 | 3276,75 | 2012,36 | 2540,3 | 2129,93 | 2036,87 | 1585,00 |
| 1500 | 3545,34 | 2170,55 | 2758,4 | 2296,78 | 2196,19 | 1758,00 |
| 1600 | 3815,86 | 2328,65 | 2979,1 | 2463,97 | 2356,68 | 1880,00 |
| 1700 | 4087,1 | 2486,28 | 3203,1 | 2632,09 | 2517,6 | 2065,00 |
| 1800 | 4360,67 | 2646,74 | 3429,9 | 2800,48 | 2680,01 | 2182,00 |
| 1900 | 4634,76 | 2808,22 | 3657,9 | 2971,3 | 2841,43 | 2385,00 |
| 2000 | 4910,51 | 2970,25 | 3889,7 | 3142,76 | 3006,26 | 2514,00 |
| 2100 | 5186,81 | 3131,96 | 4121,8 | 3314,85 | 3169,77 | 2640,00 |
| 2200 | 5464,2 | 3295,84 | 4358,8 | 3487,44 | 3338,21 | 2762,00 |
| 2300 | 5746,39 | 3457,2 | 4485,3 | 3662,33 | 3500,54 | - |
| 2400 | 6023,25 | 3620,58 | 4724,4 | 3837,64 | 3665,8 | - |
| 2500 | 6303,53 | 3786,09 | 5076,7 | 4014,29 | 3835,29 | - |

