

Sistemas Energéticos

3º ano 6º semestre

Aula 4

Aula 4: Poder calorífico, Entalpia da combustão e Temperatura Teórica de combustão



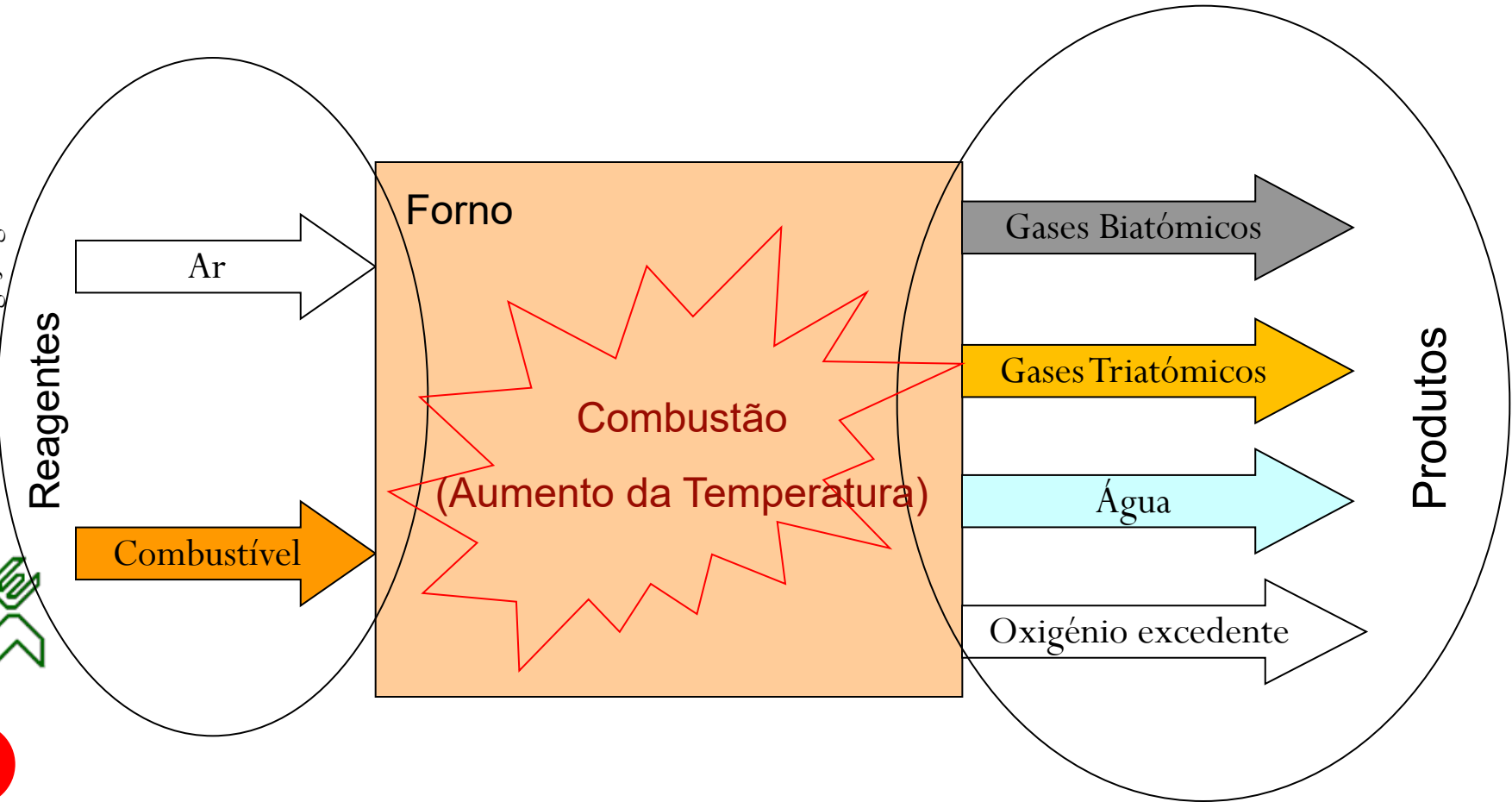
Tópicos

- *Poder calorífico*
- *Relação entre o Poder Calorífico em Massas Diferentes*
- *Fracções volúmicas*
- *Cálculo da Entalpia do ar e dos Produtos de Combustão*
- *Temperatura da Combustão*
- *Marcha do cálculo*





4 - Combustão





4.1 - Poder calorífico

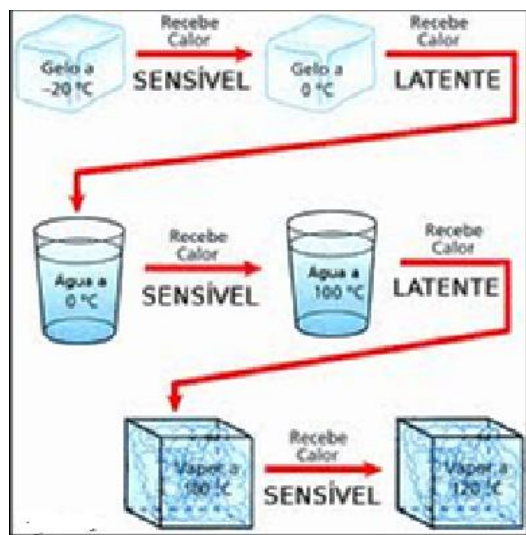
- Os combustíveis libertam calor durante a sua queima. O calor libertado está intimamente ligado à sua composição.
- A quantidade de calor libertada durante a combustão de uma unidade de um combustível é chamada poder calorífico do combustível e designa-se por Q e tem a dimensão kJ/kg , kJ/m^3 ou $\text{kJ/kg} - \text{mole}$.
- Em engenharia distinguem-se o poder calorífico superior e inferior.



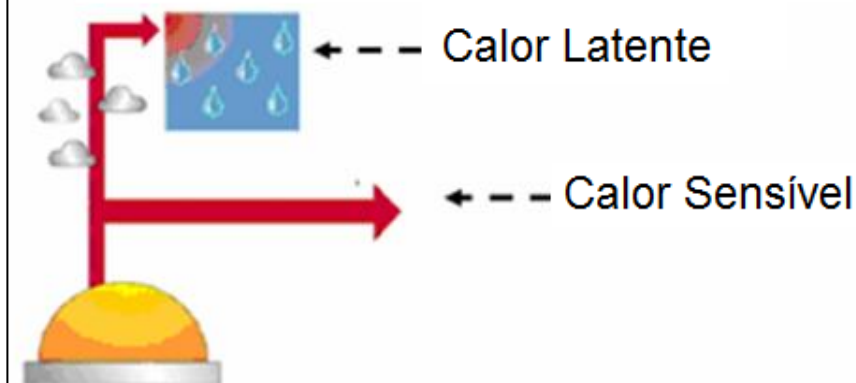
4.1 - Poder calorífico

- **Poder calorífico inferior:** é a quantidade de calor libertada pela combustão completa de uma unidade em volume ou massa de um combustível, quando queimado completamente a uma certa temperatura, permanecendo os produtos de combustão em fase gasosa (sem condensação do vapor de água).
- **Poder calorífico superior:** é a quantidade de calor libertada pela combustão completa de uma unidade em volume ou massa de um combustível, quando queimado completamente a uma determinada temperatura, levando-se os produtos da combustão, por resfriamento, à temperatura da mistura inicial (o vapor de água é condensado e o calor recuperado).

4.1 - Poder calorífico



$$\text{PCS} = \text{Calor Latente} + \text{Calor Sensível}$$



4.1 - Poder calorífico

A diferença entre o poder calorífico superior e inferior por quilograma de água é dada por:

$$Q_s - Q_i = 2677,09 - 160,70 = 2516,39 \text{ kJ/kg}_{\text{comb}} \quad (4.1)$$

Como os produtos de combustão contêm uma mistura de combustíveis (W_1) e a água formada com a queima de hidrogénio ($W_2 = H_2O/H_2 = 18/2H = 9H$), a diferença entre o poder calorífico superior e inferior por quilograma de combustível é dada por:



$$Q_s - Q_i = 2516,39(W_1 + W_2) = 2516,39(W_1 + 9H) \text{ kJ/kg}_{\text{comb}} \quad (4.2)$$

Ou se W_1 e H forem dados em percentagem

$$Q_s - Q_i = 25,1639(W_1 + 9H) \text{ kJ/kg}_{\text{comb}} \quad (4.3)$$

4.1 - Poder calorífico

O poder calorífico de combustíveis sólidos e líquidos é geralmente determinado na base da análise elementar pela formula empírica de Mendeleev

$$Q_s = 4,187 \left[81C^t + 300H^t - 26(O^t - S^t) \right] \quad \text{kJ/kg}_{\text{comb}} \quad (4.4)$$

Ou para o poder calorífico inferior

$$Q_i = 4,187 \left[81C^t + 300H^t - 26(O^t - S^t) - 6(W^t + 9H^t) \right] \quad \text{kJ/kg}_{\text{comb}} \quad (4.5)$$



O poder calorífico superior do carvão é por vezes determinado pela fórmula de Dulong

$$Q_s = 4,187 \left[80,8C^t + 344,6 \left(H^t - \frac{O^t}{8} \right) - 22,5S^t \right] \quad \text{kJ/kg}_{\text{comb}} \quad (4.6)$$

4.1 - Poder calorífico

Para combustíveis gasosos o poder calorífico calcula-se de:

$$\begin{aligned}
 Q_i = & 108,3 \cdot H_2 + 126,8 \cdot CO + 234,6 \cdot H_2S + 359,3 \cdot CH_4 \\
 & + 639,5 \cdot C_2H_6 + 915,4 \cdot C_3H_8 + 592,5 \cdot C_2H_4 + 1190,2 \cdot C_4H_{10} \\
 & + 1465,4 \cdot C_5H_{12} + 862,7 \cdot C_3H_6 + 1138,7 \cdot C_4H_8 \quad \left[\text{kJ/m}^3_{comb} \right]
 \end{aligned}
 \tag{4.7}$$



4.2 -Relação entre o Poder Calorífico em Massas Diferentes

Para se calcular o poder calorífico inferior do combustível da massa de trabalho a partir da massa seca utiliza-se a seguinte expressão:

$$Q_i = Q_i^s \frac{100 - W^t}{100} - 0,025 \cdot W^t \text{ kJ/kg}_{\text{comb}} \quad (4.8)$$

Para se calcular o poder calorífico inferior do combustível da massa de trabalho a partir da massa do combustível utiliza-se a seguinte expressão:

$$Q_i = Q_i^c \frac{100 - (A^t + W^t)}{100} - 0,025 \cdot W^t \text{ MJ/kg}_{\text{comb}} \quad (4.9)$$



4.3 - Fracções volúmicas

Volume dos Gases de Combustão [$\text{m}^3\text{N}/\text{kg}_{\text{comb}}$]

$$V_g = V_{R0_2} + V_{R_2} + V_{H_2O} + (\alpha - 1)V_{ar}^o \cdot 0,21 \quad (4.10)$$

A fracção Volúmica real dos Gases Triatómicos Secos nos Gases de Combustão é dada por:

$$r_{R0_2} = \frac{V_{R0_2}}{V_g} \quad (4.11)$$

A fracção Volúmica real dos Gases Biatómicos Secos nos Gases de Combustão é dada por:

$$r_{R_2} = \frac{V_{R_2}}{V_g} \quad (4.12)$$



12

A fracção Volúmica real da Água nos Gases de Combustão é dada por:

$$r_{H_2O} = \frac{V_{H_2O}}{V_g} \quad (4.13)$$

4.4 -Cálculo da Entalpia do ar e dos Produtos de Combustão

A fracção Volúmica real do Oxigénio excedente nos Gases de Combustão é dada por:

$$r_{O_2} = \frac{V_{O_2}}{V_g} \quad (4.14)$$

A entalpia teórica do ar e dos produtos de combustão calcula-se usando as seguintes expressões [kJ/m³] :

$$I_g = r_{RO_2} \cdot (C\theta)_{RO_2} + r_{N_2} \cdot (C\theta)_{N_2} + r_{H_2O} \cdot (C\theta)_{H_2O} + r_{O_2} \cdot (C\theta)_{O_2} \quad (4.15)$$



Onde:

$(C\theta)_{ar}$ - entalpia específica do ar

$(C\theta)_{RO_2}$ - entalpia específica dos gases triatómicos

$(C\theta)_{N_2}$ - entalpia específica do nitrogénio

$(C\theta)_{H_2O}$ - entalpia específica do vapor de água

$(C\theta)_{O_2}$ - entalpia específica do oxigénio

4.5 -Cálculo da Entalpia dos Produtos de Combustão

Valor Reduzido de Cinzas nos Produtos de Combustão [g/MWs]

$$A^{red} = 10 \cdot A^t \cdot a_{arr} / Q_i^r \quad (4.16)$$

Se $A^{red} > 4$, no cálculo dos produtos de combustão deve-se levar em consideração a entalpia de cinzas

$$I_{cinz} = 0,001 \cdot A^t a_{arr} (C\theta)_{cinz} \quad (4.17)$$

Entalpia dos Produtos de Combustão [Kj/m³]

$$I_{pc} = I_g + I_{cinz} \quad (4.18)$$



A entalpia dos produtos de combustão será calculada para a faixa de temperatura de 800 – 2200 °C, sendo esta, a recomendada para as fornalhas

4.6 - Temperatura da Combustão

- A temperatura da combustão é entendida como a temperatura que os produtos de combustão adquirem do calor envolvido na combustão. Existe diferença entre a temperatura teórica e calorimétrica da queima.
- A temperatura teórica de queima é determinada tendo em conta a dissociação nos produtos de combustão, isto é:

$$T_t = (Q_w - q_{dis}) / V_{pc} c_{v,p} \quad (4.19)$$



Onde:

Q_w^t é o poder calorífico do combustível kJ/m³ ou kJ/kg

q_{dis} é o calor despendido na dissociação kJ

V_{pc} é o volume dos produtos de combustão por unidade de combustível m³

c_v é o calor específico dos volumes de combustão kJ/(m³·K)

4.6 - Temperatura da Combustão

A temperatura calorimétrica é calculada assumindo que todo o calor envolvido é gasto em elevar a temperatura dos produtos de combustão, sem trocas de calor com o ambiente.

$$T_t = Q_w^t / V_{pc} \cdot c \quad (4.20)$$

Onde:

Q_w^t - é o poder calorífico do combustível kJ/m³ ou kJ/kg



V_{cp} o volume dos produtos de combustão por unidade de combustível m³

C - é o calor específico dos volumes de combustão kJ/(m³·K)

4.6 - Temperatura da Combustão

Com o pré-aquecimento de ar ou de combustível, a temperatura calorimétrica pode se calcular da fórmula:

$$T_t = \frac{(Q_w^t + Q_{ph})}{V_{pc} \cdot c} \quad (4.21)$$

Onde:

Q_w^t é o poder calorífico do combustível kJ/m³ ou kJ/kg

Q_{ph} é o calor usado para o aquecimento do ar ou do combustível

V_{cp} é o volume dos produtos de combustão por unidade de combustível m³

c é o calor específico dos gases de combustão kJ/(m³·K)



4.6 - Temperatura da Combustão

Outro método de cálculo da temperatura dos produtos é usar a entalpia específica que é o produto entre o calor específico e a temperatura.

$$I_{pc} = c_{v,p} \cdot T_t \quad \text{kJ/m}^3 \quad (4.22)$$

Combinando as Equações 4.19 e 4.21, obtém-se:

$$Q_w^t = I_{pc} \cdot V_{cp} \quad \text{kJ} \quad (4.23)$$

 A quantidade de calor transferido na combustão por unidade de combustível é o produto da entalpia pelo volume dos produtos de combustão, que também se pode escrever:

$$I_{pc} = \frac{Q_w^t}{V_g} \left[\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3} \text{ ou } \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right] \quad (4.24)$$

4.6 - Temperatura da Combustão

Para o caso de aquecimento do ar a entalpia do ar (I_{ar}) calcula-se da seguinte fórmula:

$$I_{ar} = \frac{T_{ar} \cdot c_{par} \cdot \alpha \cdot V_{ar}^o}{V_g} \quad (4.25)$$

Para o caso de aquecimento do combustível a Entalpia do combustível (I_{comb}) calcula-se da seguinte fórmula

$$I_{comb} = \frac{T_{comb} \cdot c_{pcomb}}{V_g} \quad (4.26)$$

Onde:

T_{ar} – é a temperatura a que o ar é aquecido

C_{par} – é o calor específico do ar

α – ó o coeficiente de excesso de ar

V_{ar} – volume teórico do ar

T_{comb} – temperatura a que o combustível é aquecido

C_{pcomb} - calor específico do combustível

V_{ar} – volume dos gases de escape



4.6 - Temperatura da Combustão

Combinando as Expressões 4.15 e 4.24

$$I_{pc} = I_g + I_{cinz} = \frac{Q_w}{V_g} \quad (4.27)$$

O procedimento agora consiste em atribuir temperaturas aos produtos de combustão, retirar as entalpias das tabelas e substituir na expressão até que a parte esquerda da equação se iguale a direita, aí retira-se a temperatura teórica de combustão.



20

$$r_{RO_2} \cdot (C\theta)_{RO_2} + r_{N_2} \cdot (C\theta)_{N_2} + r_{H_2O} \cdot (C\theta)_{H_2O} + r_{O_2} \cdot (C\theta)_{O_2} + I_{cinz} \approx \frac{Q_w}{V_{cp}} \quad (4.28)$$

4.6 - Temperatura da Combustão

Considerando que o ar é pré-aquecido a Expressão 4.27 torna-se

$$I_{pc} = I_g + I_{cinz} = \frac{Q_w + T_{ar} \cdot c_{par} \cdot \alpha \cdot V_{ar}^o}{V_g} \quad (4.29)$$

Considerando que o combustível é pré-aquecido a Expressão 4.27 torna-se

$$I_{pc} = I_g + I_{cinz} = \frac{Q_w + T_{comb} \cdot c_{pcomb}}{V_g} \quad (4.30)$$



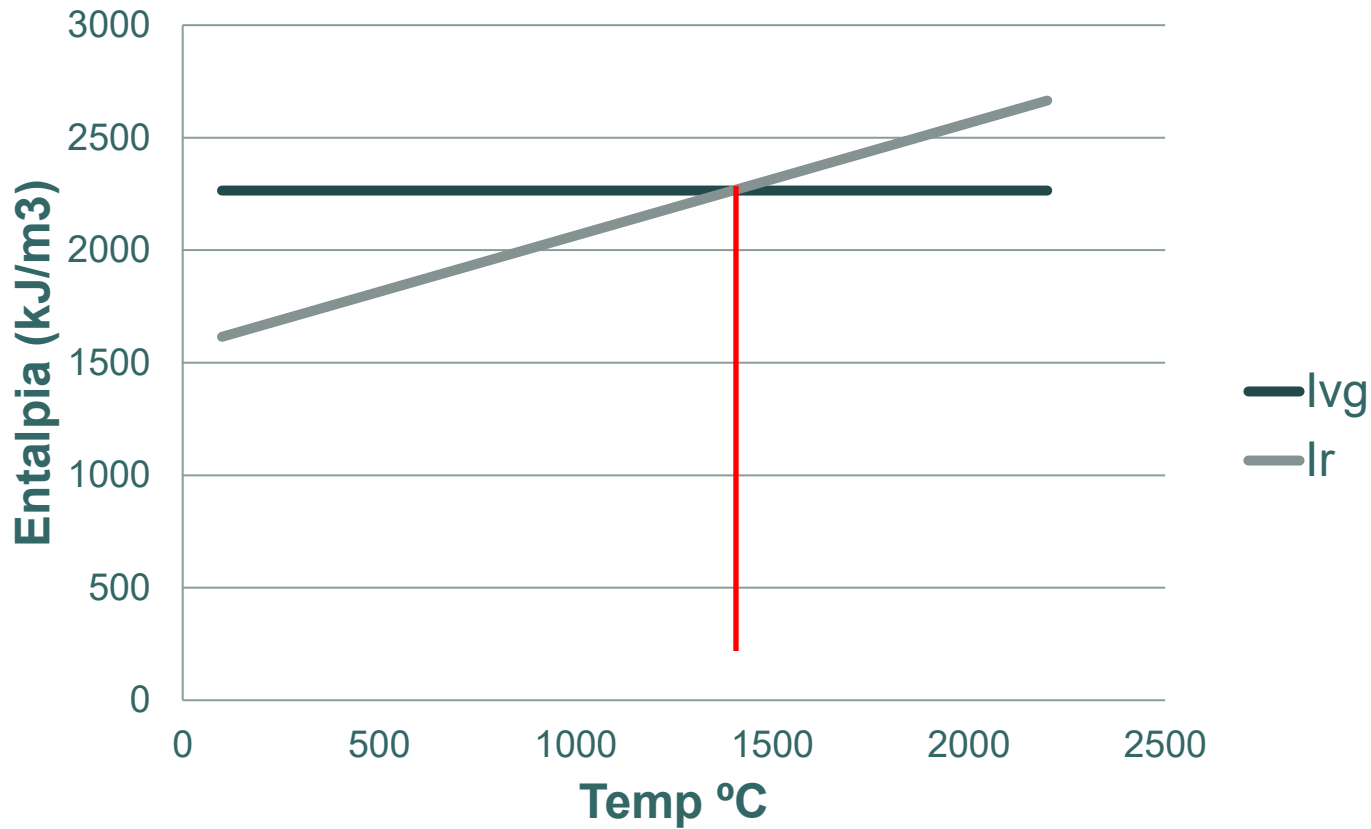
Considerando que o combustível e o ar são pré-aquecidos a Expressão 4.27 torna-se

21

$$I_{pc} = I_g + I_{cinz} = \frac{Q_w + T_{ar} \cdot c_{par} \cdot \alpha \cdot V_{ar}^o + T_{comb} \cdot c_{pcomb}}{V_g} \quad (4.31)$$



4.6 - Temperatura da Combustão





4.6 - Temperatura da Combustão

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

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		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	664.38	158.75	700.17	167.25	791.53	189.05	672.01	160.50
873	600	1236.76	295.38	805.06	192.30	851.04	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	1715.95	410.52	1094.65	261.44	1162.32	277.60	1328.11	317.20	1109.05	264.88
1173	900	1971.43	471.06	1243.55	297.00	1319.67	315.18	1517.87	362.52	1259.36	300.78
1273	1000	2226.75	531.80	1393.86	332.90	1480.11	353.50	1713.32	409.20	1411.86	337.20
1373	1100	2485.34	593.56	1546.14	369.27	1641.02	391.93	1913.67	457.05	1565.94	374.00
1473	1200	2746.44	655.92	1699.76	405.96	1802.76	430.56	2118.78	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	2012.36	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	2758.39	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



4.6 Temperatura da Combustão

Sub Cálculo_Tc()

' Cálculo_Tc Macro

' Macro recorded 30-09-2006 by Jorge Olivio Penicela Nhambiu

'

' Keyboard Shortcut: Ctrl+Shift+C

Dim x1,y1,z1

x1 = Range("E42").Value

z1 = 1000

y1 = Range("E48").Value

Do

z1 = z1 + 0.01

Range("e43").Value = z1

y1 = Range("e48").Value

Loop Until Abs(x1 - y1) < 0.1

End Sub

4.7- Marcha do cálculo (I)

1. Calcula-se a massa de trabalho do combustível;
2. Calcula-se o volume teórico do ar;
3. Calcula-se o volume teórico dos Gases Biatómicos;
4. Calcula-se o volume teórico de água;
5. Calcula-se o volume dos Gases Triatómicos;
6. Calcula-se o volume real dos Gases Biatómicos;
7. Calcula-se o volume real de água;
8. Calcula-se o volume dos Gases Triatómicos;





4.7 -Marcha do cálculo (II)

9. Calcula-se o volume do Oxigénio excedente;
10. Calcula-se o volume dos Gases de Combustão;
11. Calcula-se as fracções dos gases;
12. Calcula-se o Poder Calorífico Inferior ;
13. Calcula-se a entalpia determinada pelo poder calorífico ;
14. Calcula-se a entalpia dos gases de combustão;
15. Através de cálculo iterativo obtém-se a temperatura teórica de combustão.



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	-