

Sistemas Energéticos

3º ano 6º semestre

Aula 4

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



Tópicos

- *Energia química dos combustíveis;*
- *Poder calorífico;*
- *PCS e PCI;*
- *Calor sensível e calor latente;*
- *Entalpia da combustão;*
- *Temperatura teórica de combustão.*



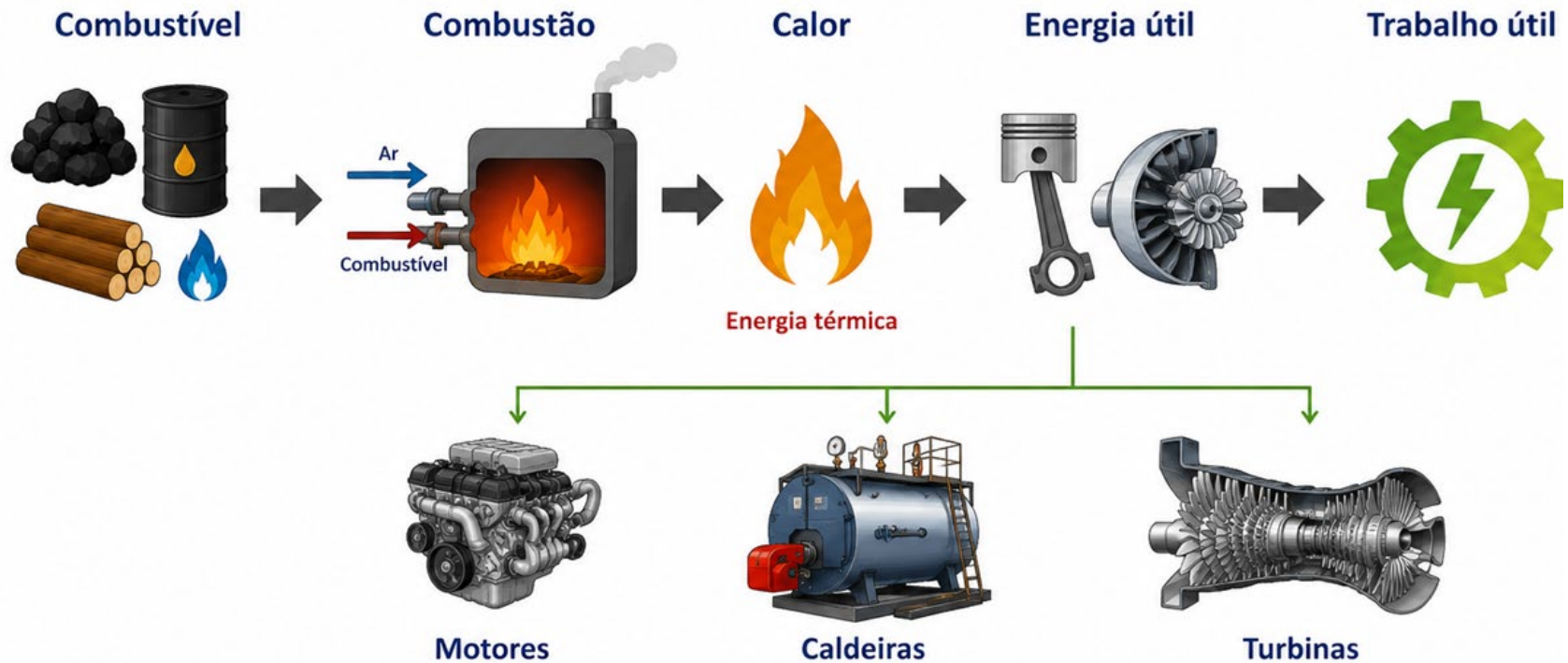


1. Objectivos da Aula

No final desta aula o estudante deverá ser capaz de:

- Definir o poder calorífico de um combustível.
- Distinguir entre Poder Calorífico Superior (PCS) e Poder Calorífico Inferior (PCI).
- Compreender os conceitos de calor sensível e calor latente.
- Determinar a entalpia dos reagentes e dos produtos de combustão.
- Calcular a temperatura teórica de combustão.

1.1 Porque estudar o poder calorífico?



- A **combustão** converte energia química em energia térmica.



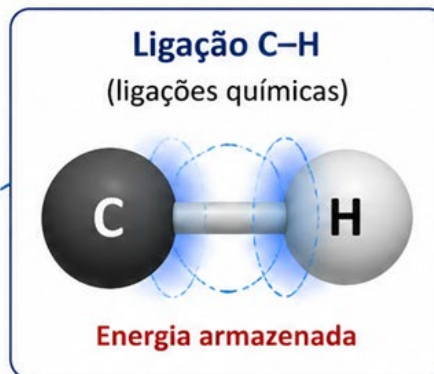
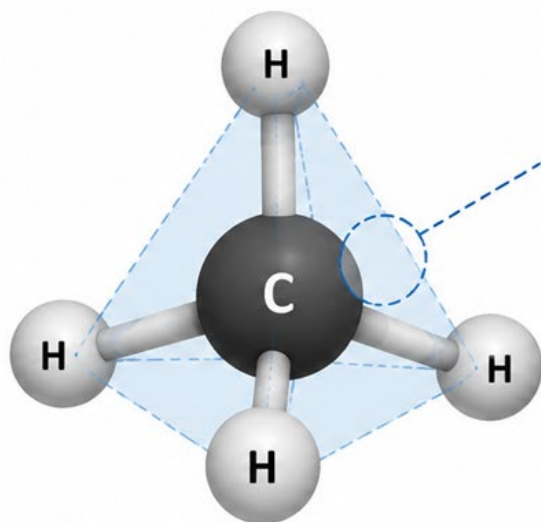
- A **quantidade de energia libertada** depende da composição química do combustível.



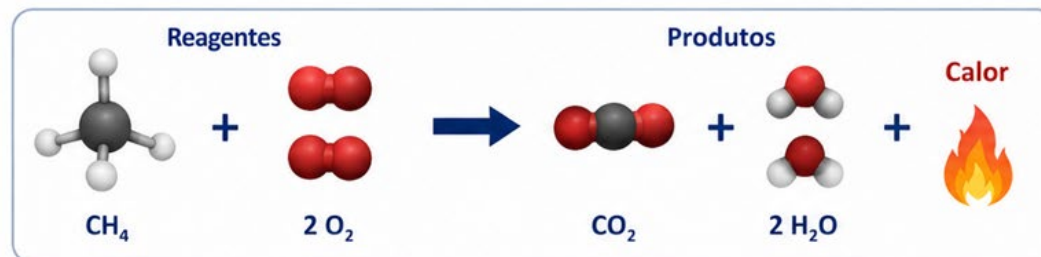
- **Conhecer o poder calorífico** permite dimensionar corretamente motores, caldeiras e turbinas.

1.2 Onde está armazenada a energia do combustível?

Exemplo: Metano (CH_4)

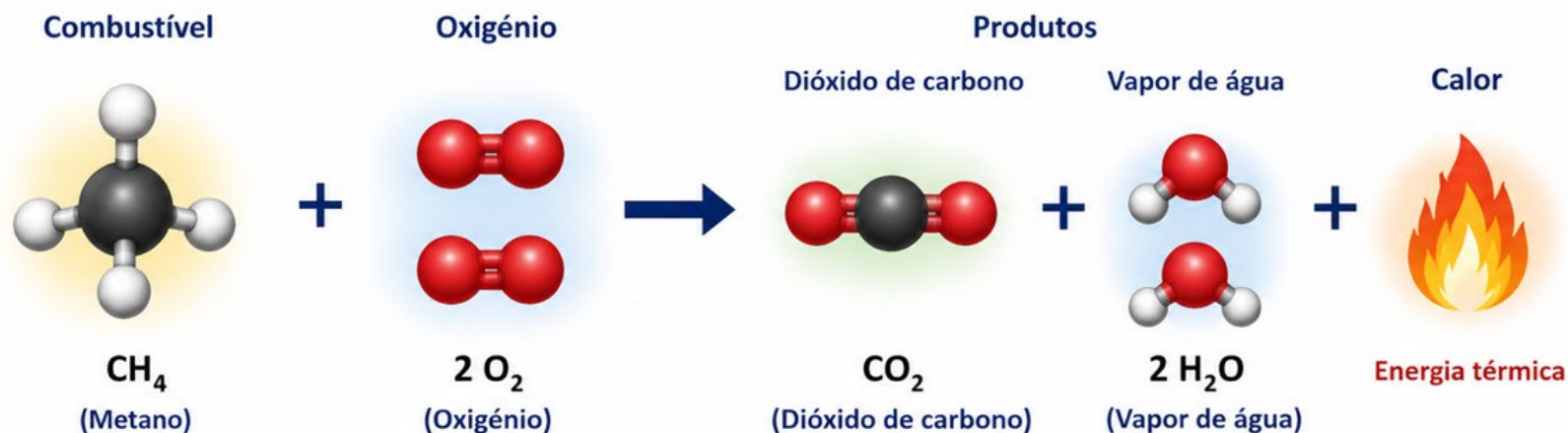


- A **energia química** do combustível está armazenada nas **ligações químicas** que unem os átomos.
- Durante a **combustão**, estas ligações são **quebradas**.
- Formam-se **novas ligações** mais estáveis nos produtos (CO_2 e H_2O).
- A **diferença de energia** entre reagentes e produtos é libertada sob a forma de **calor**.



Mensagem chave: A combustão é uma transformação de **energia química** em **energia térmica**.

1.3 O que acontece durante a combustão



Durante a combustão:

- O combustível reage com o oxigénio do ar.
- As ligações químicas dos reagentes são **quebradas**.
- Formam-se novas ligações **mais estáveis** nos produtos.
- A diferença de energia é libertada sob a forma de **calor**.

- Reação global para o metano:



- Esta análise será usada ao longo de toda a aula.



Mensagem importante: Esta transformação de **energia química** em **energia térmica** é a base do estudo do **poder calorífico**, da **entalpia** e da **temperatura de combustão**.

2. Poder calorífico (I)

O **poder calorífico** representa a quantidade de energia libertada durante a combustão completa de uma unidade de combustível.

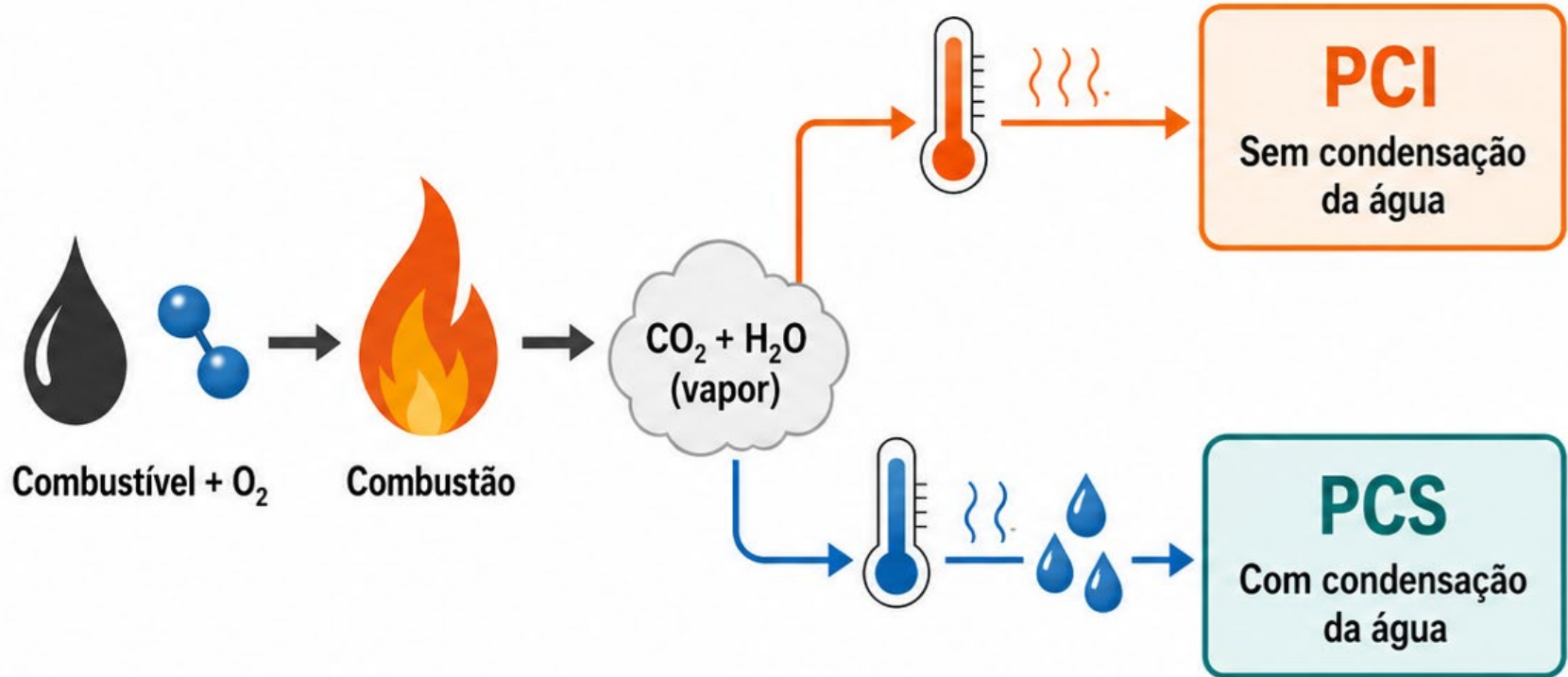
Pode ser expresso em:

- kJ/kg
- MJ/kg
- kJ/m^3
- MJ/Nm^3
- kJ/kmol

É uma das propriedades energéticas mais importantes dos combustíveis.



2. Poder calorífico (II)



$$PCS = PCI + \text{calor latente de condensação}$$

2.1 Poder Calorífico Inferior (PCI)

É a energia libertada durante a combustão completa quando a água formada permanece sob a forma de vapor.

Neste caso:

- não ocorre condensação;
- o calor latente não é recuperado.

É o valor normalmente utilizado no dimensionamento de caldeira e motores de combustão interna.



2.2 Poder Calorífico Superior (PCS)

É a energia libertada quando os produtos de combustão são arrefecidos até à temperatura inicial.

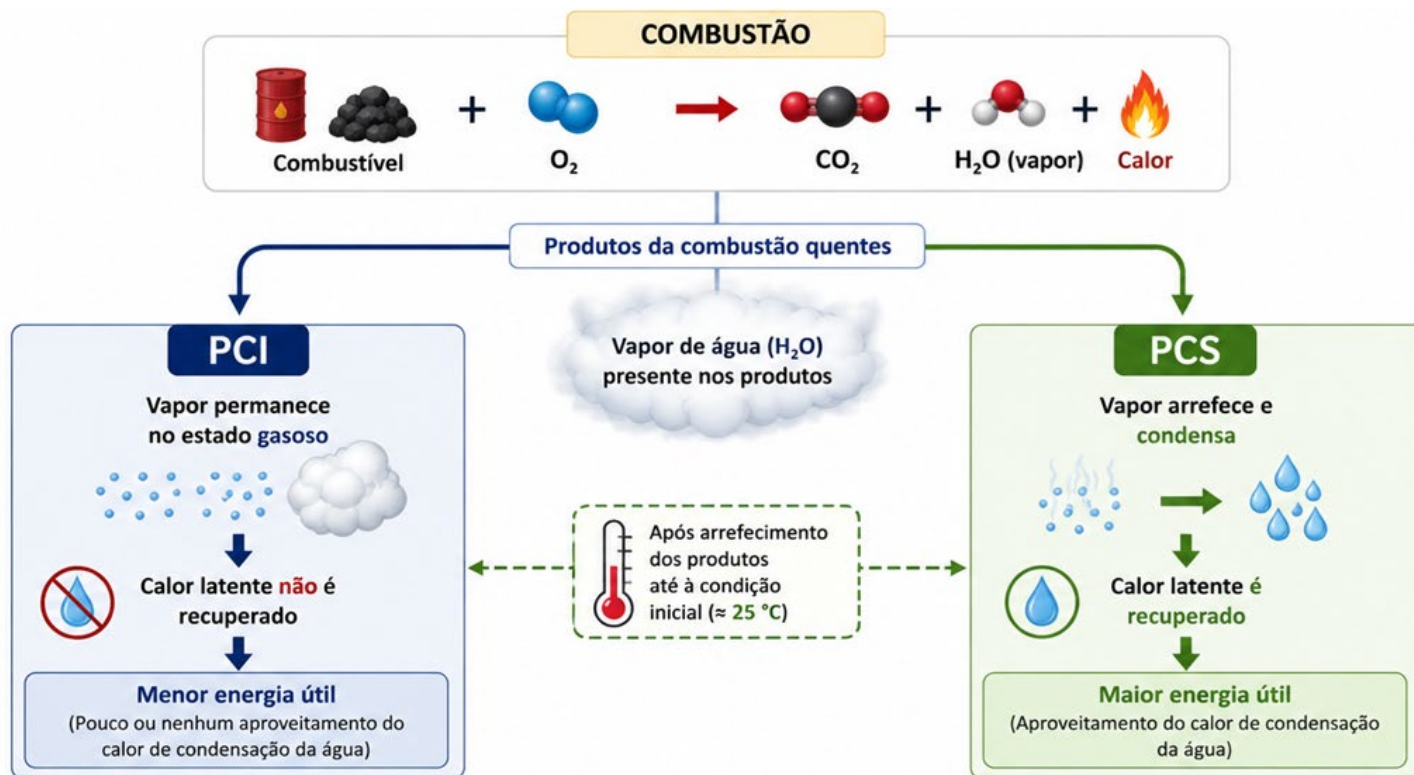
Neste caso:

- o vapor de água condensa;
- o calor latente é recuperado.

É utilizado sobretudo em caldeiras de condensação.



2.3 Comparação entre o Poder Calorífico Inferior (PCI) e o Poder Calorífico Superior (PCS)



Mensagens principais

- A **única diferença** entre o PCI e o PCS é o tratamento dado ao **vapor de água** formado durante a combustão.
- No **PCI**, o vapor permanece no **estado gasoso** e o calor latente de condensação **não é recuperado**.
- No **PCS**, o vapor condensa e o **calor latente é recuperado**, aumentando a **energia útil** disponível.

Observação: Sempre que existir formação de vapor de água: **PCS > PCI**

⇒ Quanto maior for o teor de **hidrogénio** do combustível, maior será a diferença entre o **PCS** e o **PCI**.

2.3.1 Caldeira de Condensação

Recuperam o **calor latente** libertado durante a condensação do vapor de água presente nos gases de combustão.

Os gases de combustão são arrefecidos abaixo da **temperatura de orvalho** ($\approx 55\text{ °C}$ para o gás natural).

O vapor de água condensa no permutador de calor, libertando energia adicional para o sistema.

O calor recuperado é transferido para a água de aquecimento, aumentando o rendimento térmico.

Os gases de escape saem a temperaturas significativamente inferiores às das caldeiras convencionais.

Proporcionam **menor consumo de combustível**, menores emissões de CO_2 e maior eficiência energética.

- **Observação**

O rendimento das caldeiras de condensação pode ser superior a **100% quando referido ao PCI**, porque recuperam o calor latente da água, que não é considerado no Poder Calorífico Inferior. Quando o rendimento é calculado em relação ao **PCS**, será sempre inferior a 100%.



2.3.1 Caldeira de Condensação

O que são?

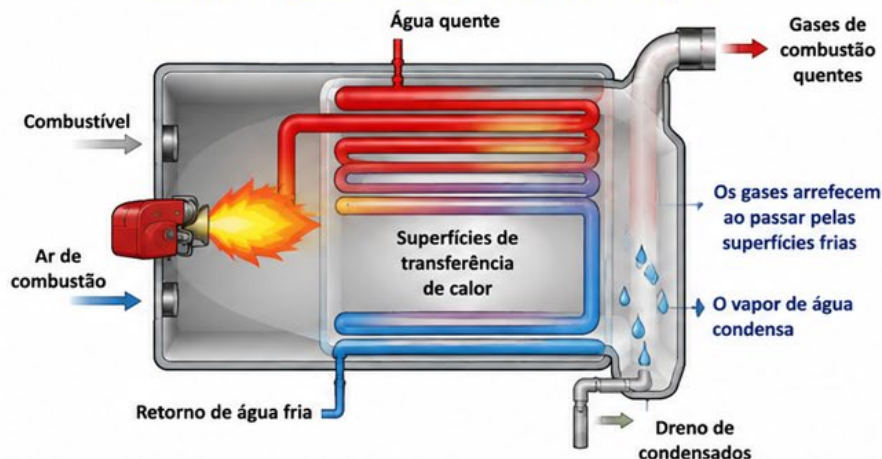
São caldeiras que **recuperam o calor latente** de condensação do vapor de água contido nos gases de combustão.

Por isso, apresentam **rendimento superior** ao das caldeiras convencionais.



A diferença está na recuperação do **calor latente** da água.

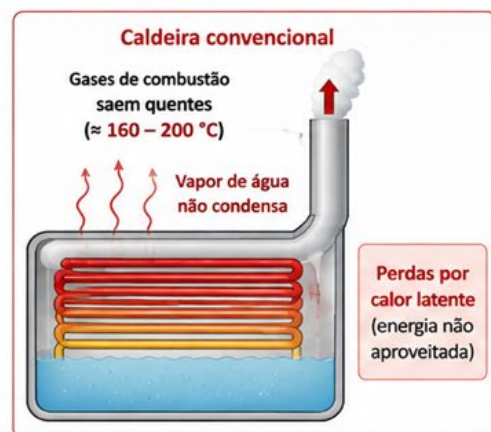
Esquema de uma caldeira de condensação



O que acontece?

- Os gases de combustão, ricos em vapor de água, arrefecem abaixo do **ponto de orvalho** ($\approx 55^\circ\text{C}$).
- O vapor condensa-se nas superfícies frias da caldeira.
- O calor latente libertado na condensação é transferido para a água do sistema.
- Os condensados são recolhidos e drenados.

Comparação: caldeira convencional vs caldeira de condensação



Principais vantagens

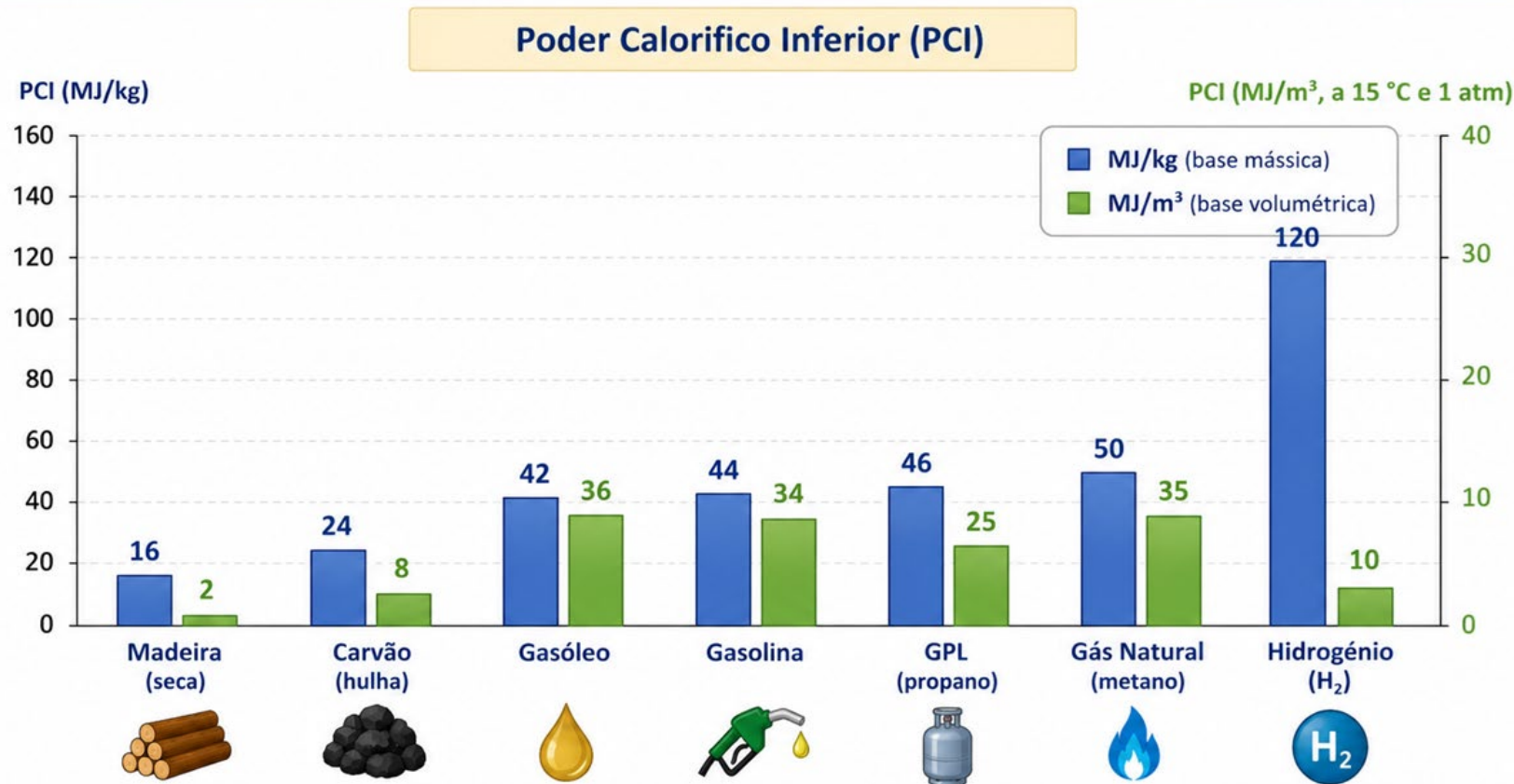
- ✓ Maior rendimento (até 10–15% superior).
- ✓ Menor consumo de combustível.
- ✓ Menores emissões de CO_2 e poluentes.
- ✓ Temperatura mais baixa dos gases de evacuação.
- ✓ Maior eficiência energética global.

Rendimento típico (PCI)

Caldeira convencional **80 – 90 %** Caldeira de condensação **95 – 107 %**



2.4 Comparação do Poder Calorífico de Diferentes Combustíveis



- O hidrogénio apresenta o maior PCI por unidade de massa.
- Porém, **por unidade de volume**, o gás natural possui elevado conteúdo energético.
- A escolha do combustível depende da **aplicação, disponibilidade, custo** e requisitos ambientais.

2.5 Calor latente

O **calor latente** é a energia absorvida ou libertada por uma substância durante uma **mudança de estado físico**, sem alteração da sua temperatura.

- Por exemplo:

na vaporização, a água absorve calor para passar de líquido a vapor;

na condensação, o vapor de água liberta essa mesma energia ao passar para líquido.

- Calcula-se por:

$$Q_L = mh \quad (4.1)$$

Onde:

- Q_L — calor latente;
- m — massa da substância;
- h — entalpia.

Na combustão, o vapor de água presente nos gases contém calor latente. Quando esse vapor condensa, o calor é recuperado e incluído no **Poder Calorífico Superior (PCS)**. No **Poder Calorífico Inferior (PCI)**, o vapor não condensa e esse calor não é recuperado.



2. 6 Calor Sensível

O **calor sensível** é a energia absorvida ou libertada por uma substância que provoca uma **variação da sua temperatura**, sem mudança de estado físico.

Calcula-se por:

$$Q_S = m c_p (T_f - T_i) \quad (4.2)$$

Onde:

- Q_S — calor sensível;
- m — massa da substância;
- c_p — calor específico a pressão constante;
- T_i e T_f — temperaturas inicial e final.

Exemplo: aquecer água líquida de 20 °C para 80 °C envolve calor sensível, porque a temperatura aumenta, mas a água continua no estado líquido.

A diferença essencial é:

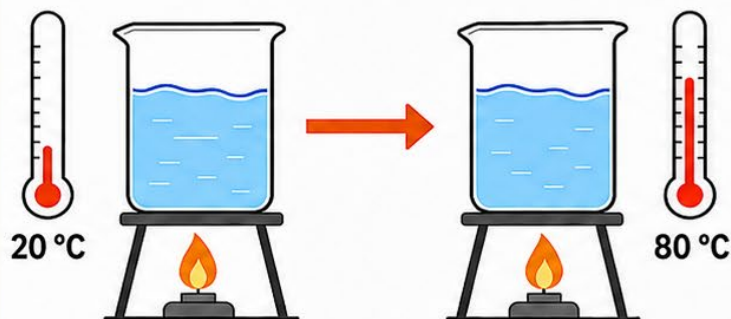
calor sensível: altera a temperatura, sem alterar o estado físico;

calor latente: altera o estado físico, sem alterar a temperatura durante a mudança de fase.



2.7 Calor sensível e calor latente

CALOR SENSÍVEL



A temperatura varia



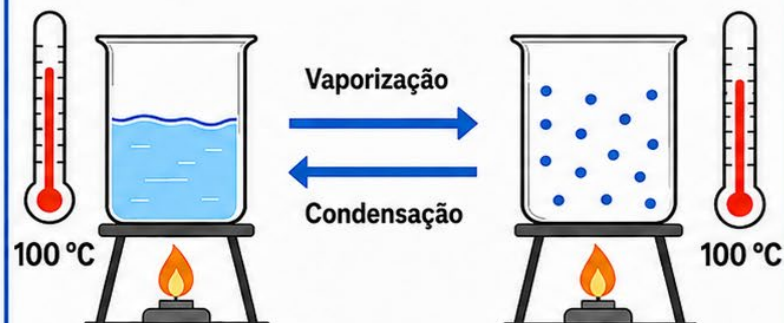
O estado físico mantém-se



A entalpia varia

$$Q_s = m \cdot c_p \cdot \Delta T$$

CALOR LATENTE



O estado físico muda



A temperatura permanece constante



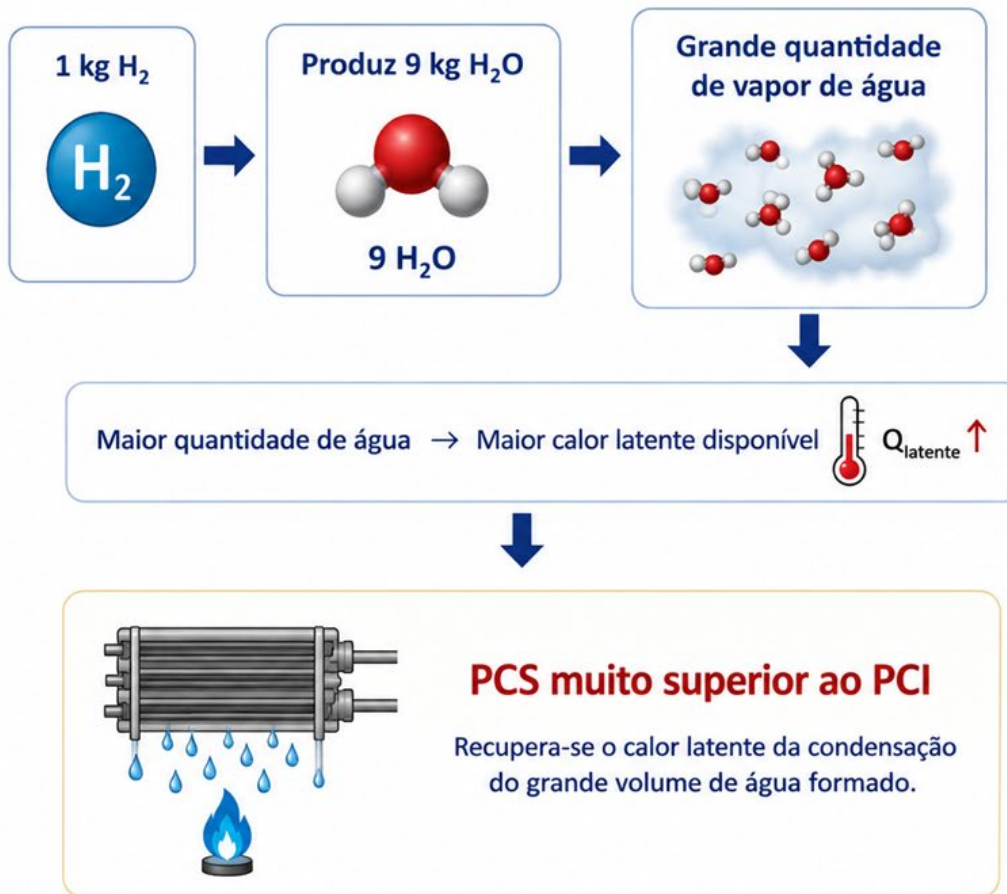
A entalpia varia

$$Q_l = m \cdot L = m \cdot \Delta h_{\text{fase}}$$

Para uma substância pura, a pressão constante

Sensível: $\Delta T \neq 0$, mesma fase | **Latente:** $\Delta T = 0$, $\Delta h \neq 0$, mudança de fase

2.8 Porque o hidrogénio aumenta o PCS?



Porquê?

- O hidrogénio, ao combustionar, produz **apenas vapor de água**.
- 1 kg de hidrogénio forma aproximadamente **9 kg de água**.
- Quanto maior for a **quantidade de água formada**, maior será o **calor latente** disponível para ser recuperado.
- Por isso, combustíveis ricos em **hidrogénio** apresentam uma diferença muito maior entre o **PCS** e o **PCI**.



Mensagem chave:

Mais hidrogénio →
Mais água formada →
PCS muito maior que o **PCI**.

2.9 Estimativa do Poder Calorífico

Nem sempre é possível determinar experimentalmente o poder calorífico de um combustível.

Nestes casos, pode ser estimado através da sua **composição química**, utilizando correlações empíricas desenvolvidas a partir de resultados experimentais.

- Baseia-se na análise elementar do combustível.
- Considera os teores de carbono, hidrogénio, oxigénio, enxofre e humidade.
- Permite estimar o PCS e o PCI com boa precisão.
- Muito utilizada na engenharia térmica.

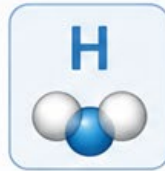


2.9 Estimativa do Poder Calorífico

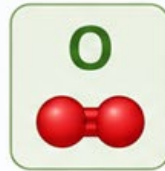
1. Análise Elementar do Combustível



Carbono



Hidrogénio



Oxigénio



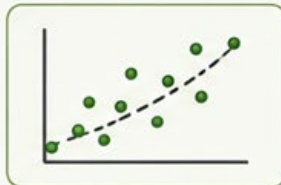
Enxofre



Humidade



2. Fórmulas Empíricas (Correlações)



Baseadas em
resultados experimentais



Correlações empíricas
(Mendeleev, Dulong, etc.)



Estimativa com
boa precisão



3. Poder Calorífico Estimado



PCS ou PCI
(MJ/kg ou MJ/m³)



Características do método

- ✓ Baseia-se na composição química do combustível.
- ✓ Utiliza os teores de C, H, O, S e humidade.
- ✓ Permite estimar o PCS e o PCI com boa precisão.
- ✓ Método simples, rápido e de baixo custo.
- ✓ Muito utilizado na engenharia térmica e em estudos energéticos.

2.9 Estimativa do Poder Calorífico

A diferença entre o Poder Calorífico Superior e o Poder Calorífico Inferior depende essencialmente da quantidade de água presente nos produtos da combustão.

$$Q_s^t - Q_i^t = 2677,09 - 160,70 = 2516,39 \text{ kJ/kg}_{\text{comb}} \quad (4.3)$$

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:

$$Q_s^t - Q_i^t = 2516,39(W_1 + W_2) = 2516,39(W_1 + 9H) \text{ kJ/kg}_{\text{comb}} \quad (4.4)$$

Ou se W_1 e H forem dados em percentagem

$$Q_s^t - Q_i^t = 25,1639(W_1 + 9H) \text{ kJ/kg}_{\text{comb}} \quad (4.5)$$

2.9 Estimativa do Poder Calorífico

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

$$Q_s^t = 4,187 \left[81C^t + 300H^t - 26(O^t - S^t) \right] \quad \text{kJ/kg}_{\text{comb}} \quad (4.6)$$

Ou para o poder calorífico inferior


$$Q_i^t = 4,187 \left[81C^t + 300H^t - 26(O^t - S^t) - 6(W^t + 9H^t) \right] \quad \text{kJ/kg}_{\text{comb}} \quad (4.7)$$

2.9 Estimativa do Poder Calorífico

A fórmula de Dulong é uma das expressões empíricas mais utilizadas para estimar o Poder Calorífico Superior dos combustíveis sólidos.

- Baseia-se na composição química.
- Considera principalmente o carbono, o hidrogénio e o enxofre.
- Continua a ser utilizada em cálculos preliminares.

$$Q_s^t = 4,187 \left[80,8C^t + 344,6 \left(H^t - \frac{O^t}{8} \right) - 22,5S^t \right] \quad \text{kJ/kg}_{\text{comb}} \quad (4.8)$$





2.10 Poder Calorífico de Combustíveis Gasosos

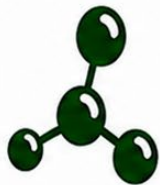


Cálculo a partir da composição volumétrica

Poder calorífico inferior

(4.9)

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



Entrada

Composição
volumétrica da mistura



Resultado

Poder calorífico
inferior, Q_i^t .



Unidade

kJ/m^3 de
combustível

2.11 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:

$$Q_i^t = Q_i^s \frac{100 - W^t}{100} - 0,025 \cdot W^t \text{ kJ/kg}_{\text{comb}} \quad (4.10)$$

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

$$Q_i^t = Q_i^c \frac{100 - (A^t + W^t)}{100} - 0,025 \cdot W^t \text{ MJ/kg}_{\text{comb}} \quad (4.11)$$



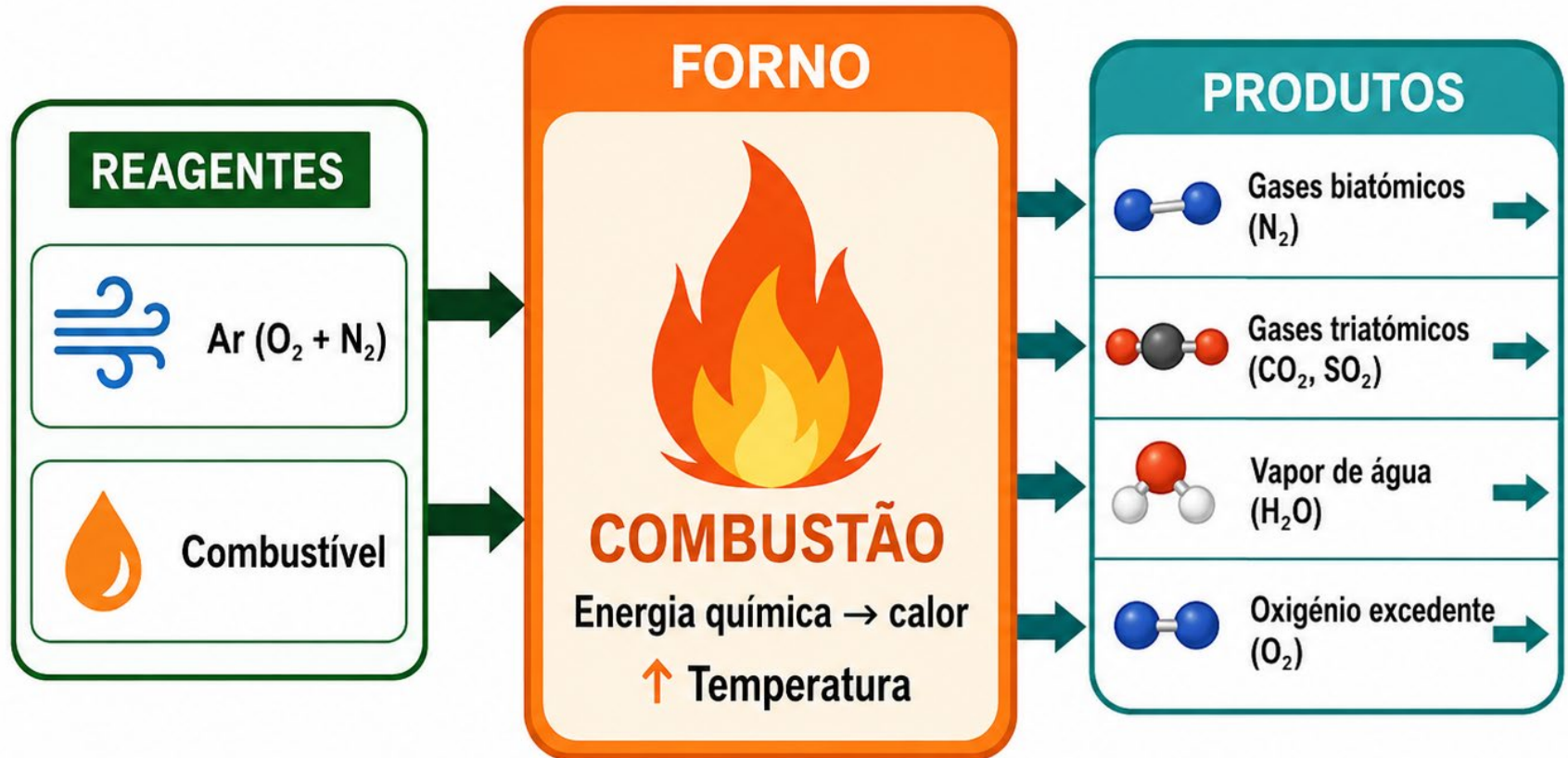
3. Combustão (I)

A combustão resulta da reacção entre o **combustível** e o **oxigénio presente no ar**.

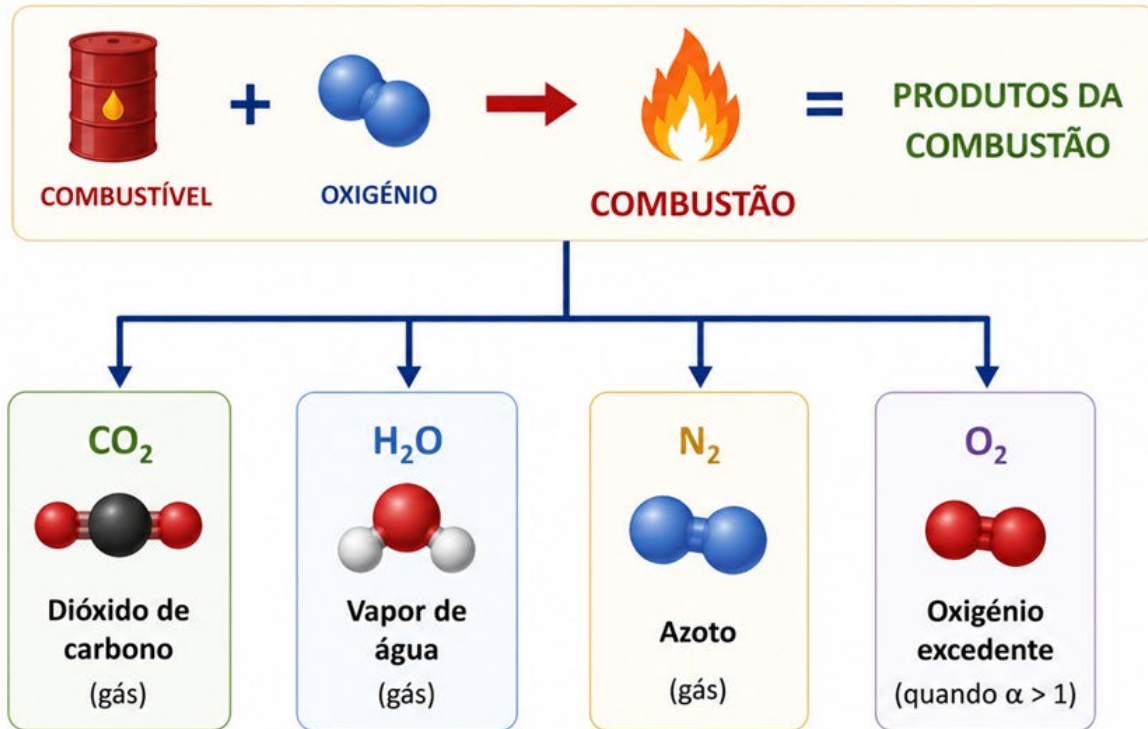
- Na fornalha, a energia química do combustível é convertida em **energia térmica**, elevando a temperatura.
- Os principais produtos são **CO₂**, **vapor de água** e **N₂** proveniente do ar.
- Combustíveis com enxofre podem também originar **SO₂**.
- Quando se fornece ar em excesso, permanece **oxigénio residual (O₂)** nos gases de combustão.
- O calor produzido pode ser aproveitado em caldeiras, fornos, motores e outros sistemas térmicos.



3. Combustão (II)



3.1 O que são produtos de Combustão?



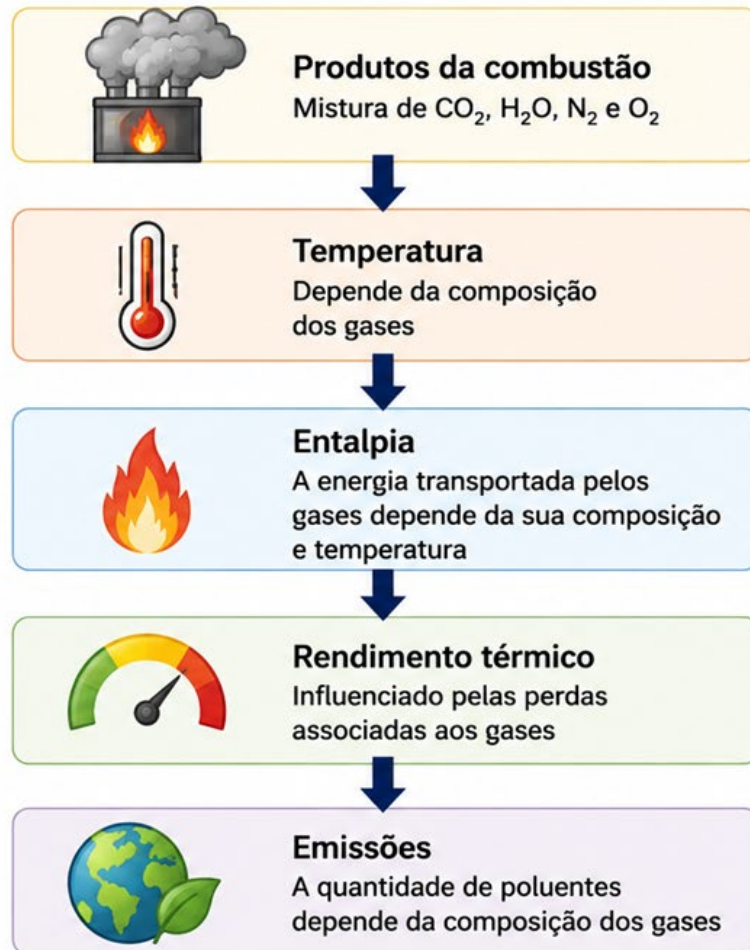
Após a combustão, os reagentes transformam-se numa **mistura de gases** denominada **produtos da combustão**.

Esta mistura é constituída principalmente por:

- dióxido de carbono (CO₂);
- vapor de água (H₂O);
- azoto (N₂);
- oxigénio excedente (quando $\alpha > 1$).



3.2 Porquê estudar a composição dos gases?



Conhecer a composição dos gases permite:

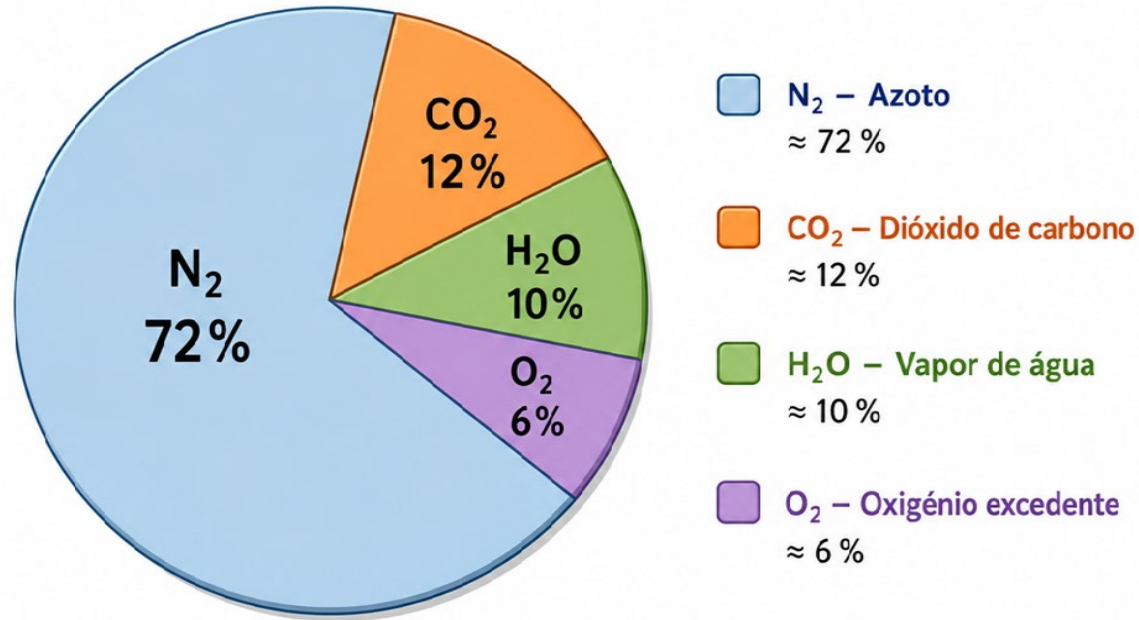
- ✓ **Calcular a temperatura da chama** e dos gases de combustão.
- ✓ **Determinar a energia transportada** pelos gases (entalpia).
- ✓ **Avaliar o rendimento térmico** e as perdas do sistema.
- ✓ **Estimar as emissões atmosféricas** de poluentes (CO₂, NO_x, etc.).



Mensagem importante

A composição dos gases é fundamental para o cálculo da entalpia, do rendimento e do impacto ambiental da combustão.

3.3 Composição típica dos gases de combustão



Mensagem importante

O azoto constitui normalmente a **maior parte dos gases** de combustão, porque acompanha o oxigénio no ar atmosférico e praticamente **não participa na reação**.



3.4 Fracções volúmicas

O volume dos gases de combustão depende da composição do combustível e da quantidade de ar usada $[m^3N/kg_{comb}]$

$$V_g = V_{R_{O_2}} + V_{R_2} + V_{H_2O} + (\alpha - 1)V_{ar}^o \cdot 0,21 \quad (4.12)$$

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

$$r_{R_{O_2}} = \frac{V_{R_{O_2}}}{V_g} \quad (4.13)$$

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

$$r_{R_2} = \frac{V_{R_2}}{V_g} \quad (4.14)$$

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

$$r_{H_2O} = \frac{V_{H_2O}}{V_g} \quad (4.15)$$



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

$$r_{O_2} = \frac{V_{O_2}}{V_g} \quad (4.16)$$

3.5 Influencia do excesso de ar

	$\alpha = 1$ Ar estequiométrico	$\alpha = 1,3$ Excesso de ar moderado	$\alpha = 2$ Excesso de ar elevado
 Dióxido de carbono (CO ₂)	Máximo 	Menor 	Muito menor 
 Oxigénio residual (O ₂)	≈ 0 % 	Aumenta 	Aumenta muito 
 Volume total dos gases	Mínimo 	Aumenta 	Aumenta muito 
 Temperatura da combustão	Máxima 	Diminui 	Diminui muito 
 Perdas pela chaminé	Mínimas 	Aumentam 	Aumentam muito 



Mensagem importante:

À medida que aumenta o excesso de ar (α):

- aumenta o **oxigénio residual**;
- aumenta o **volume** dos gases;
- diminui a **temperatura** da combustão;
- aumentam as **perdas pela chaminé**.

Mais ar não significa maior rendimento!
Existe um excesso de ar ótimo.

3.6 Cálculo da Entalpia do ar e dos Produtos de Combustão

A entalpia teórica do ar e dos produtos de combustão representa a energia transportada pelos gases devido à sua temperatura e calcula-se usando as seguintes expressões [kJ/m³] :

$$I_g = r_{RO_2} \cdot (C\theta)_{RO_2} + r_{N_2} \cdot (C\theta)_{N_2} + r_{H_2O} \cdot (C\theta)_{H_2O} + r_{O_2} \cdot (C\theta)_{O_2} \quad (4.17)$$

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

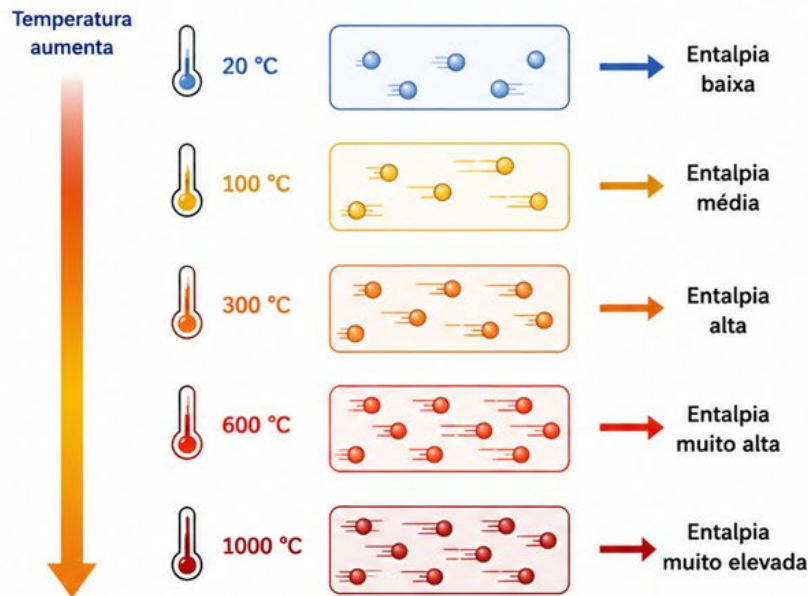
$(C\theta)_{H_2O}$ - entalpia específica do vapor de água

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



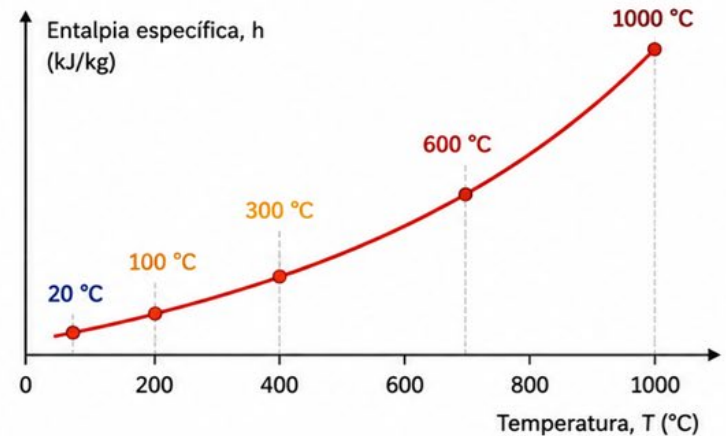
3.6.1 Conceito físico da entalpia

A **entalpia** representa a **energia transportada** pelos gases devido à sua **temperatura**.



Quanto maior a temperatura dos gases, maior é a **energia** que eles transportam (**entalpia**).

Entalpia dos gases em função da temperatura



Mensagens importantes

- ✓ A entalpia é uma propriedade dos gases.
- ✓ Depende da composição química e da temperatura.
- ✓ Cada componente possui a sua própria entalpia específica.
- ✓ A entalpia é utilizada no **balanço energético** da combustão para determinar a **energia disponível** e a **temperatura teórica da chama**.



Em resumo:

T ↑



Energia transportada ↑



Entalpia ↑

3.6.2 Cálculo da Entalpia dos Produtos de Combustão

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

$$A^{red} = 10 \cdot A^t \cdot a_{arr} / Q_i^r \quad (4.18)$$

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

$$I_{cinz} = 0,001 \cdot A^t a_{arr} (C\theta)_{cinz} \quad (4.19)$$

Entalpia dos Produtos de Combustão [Kj/m³]

$$I_{pc} = I_g + I_{cinz} \quad (4.20)$$



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

3.7 Temperatura da Combustão (I)

- 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:

$$T_t = \left(Q_w^t - q_{dis} \right) / V_{pc} c_{v,p} \quad (4.21)$$



Onde:

Q_w^t é o poder calorífico do combustível kJ/m^3 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 m^3

c_v é o calor específico dos volumes de combustão $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$

3.7 Temperatura da Combustão (II)

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.

$$T_t = Q_w^t / V_{pc} \cdot c \quad (4.22)$$

Onde:

Q_w^t - é o poder calorífico do combustível kJ/m^3 ou kJ/kg

V_{cp} o volume dos produtos de combustão por unidade de combustível m^3

C - é o calor específico dos volumes de combustão $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$



3.7 Temperatura da Combustão (III)

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

$$T_t = \frac{(Q_w^t + Q_{ph})}{V_{pc} \cdot c} \quad (4.23)$$

Onde:

Q_w^t é o poder calorífico do combustível kJ/m^3 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 m^3

c é o calor específico dos gases de combustão $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$



3.7 Temperatura da Combustão (IV)

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

$$I_{pc} = c_{v,p} \cdot T_t \quad \text{kJ/m}^3 \quad (4.24)$$

Combinando as Equações 4.19 e 4.21, obtém-se:

$$Q_w^t = I_{pc} \cdot V_{cp} \quad \text{kJ} \quad (4.25)$$



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:

$$I_{pc} = \frac{Q_w^t}{V_g} \left[\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3} \text{ ou } \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right] \quad (4.26)$$

3.7 Temperatura da Combustão (V)

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

$$I_{ar} = \frac{T_{ar} \cdot c_{par} \cdot \alpha \cdot V_{ar}^o}{V_g} \quad (4.27)$$

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

$$I_{comb} = \frac{T_{comb} \cdot c_{pcomb}}{V_g} \quad (4.28)$$

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



3.7 Temperatura da Combustão (VI)

Combinando as Expressões 4.17 e 4.26

$$I_{pc} = I_g + I_{cinz} = \frac{Q_w^t}{V_g} \quad (4.29)$$

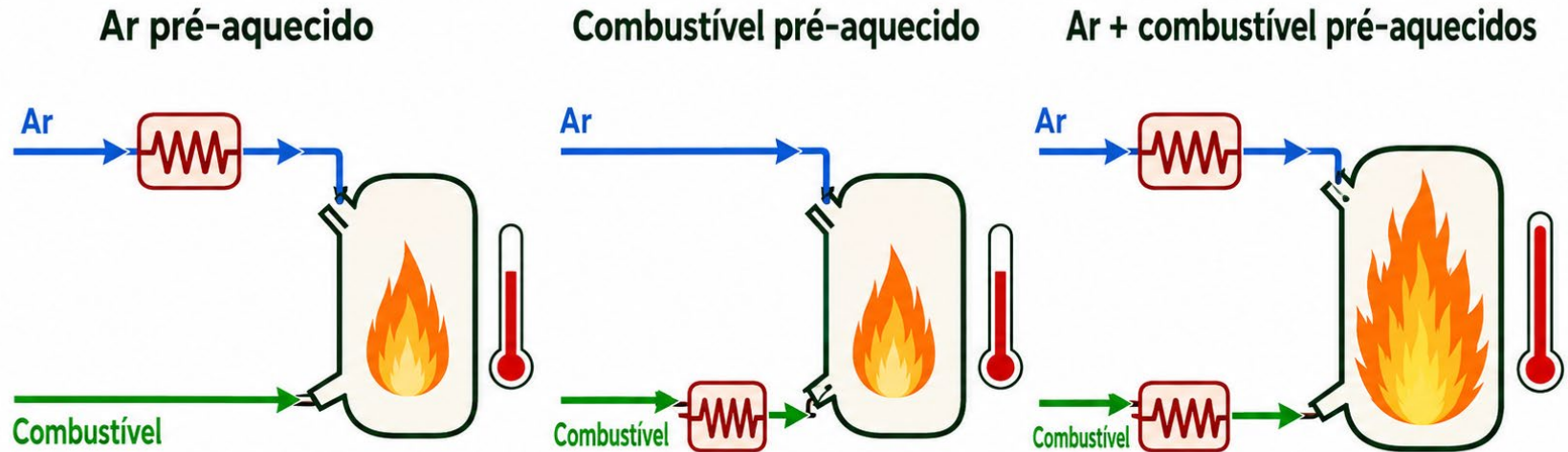
O procedimento agora consiste em atribuir temperaturas aos produtos de combustão, retirar as entalpias das tabelas e substituir na expressão até que a parte esquerda da equação se iguale a direita, aí retira-se a temperatura teórica de combustão.



42

$$r_{RO_2} \cdot (C\theta)_{RO_2} + r_{N_2} \cdot (C\theta)_{N_2} + r_{H_2O} \cdot (C\theta)_{H_2O} + r_{O_2} \cdot (C\theta)_{O_2} + I_{cinz} \approx \frac{Q_w^t}{V_{cp}} \quad (4.30)$$

3.7 Temperatura da Combustão (VII)



Energia química + calor sensível → maior temperatura de combustão



3.7 Temperatura da Combustão (VIII)

Considerando que o ar é pré-aquecido a Expressão 4.29 torna-se

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

Considerando que o combustível é pré-aquecido a Expressão 4.29 torna-se

$$I_{pc} = I_g + I_{cinz} = \frac{Q_w^t + T_{comb} \cdot c_{p_{comb}}}{V_g} \quad (4.32)$$



Considerando que o combustível e o ar são pré-aquecidos a Expressão 4.29 torna-se

44

$$I_{pc} = I_g + I_{cinz} = \frac{Q_w^t + T_{ar} \cdot c_{p_{ar}} \cdot \alpha \cdot V_{ar}^o + T_{comb} \cdot c_{p_{comb}}}{V_g} \quad (4.33)$$

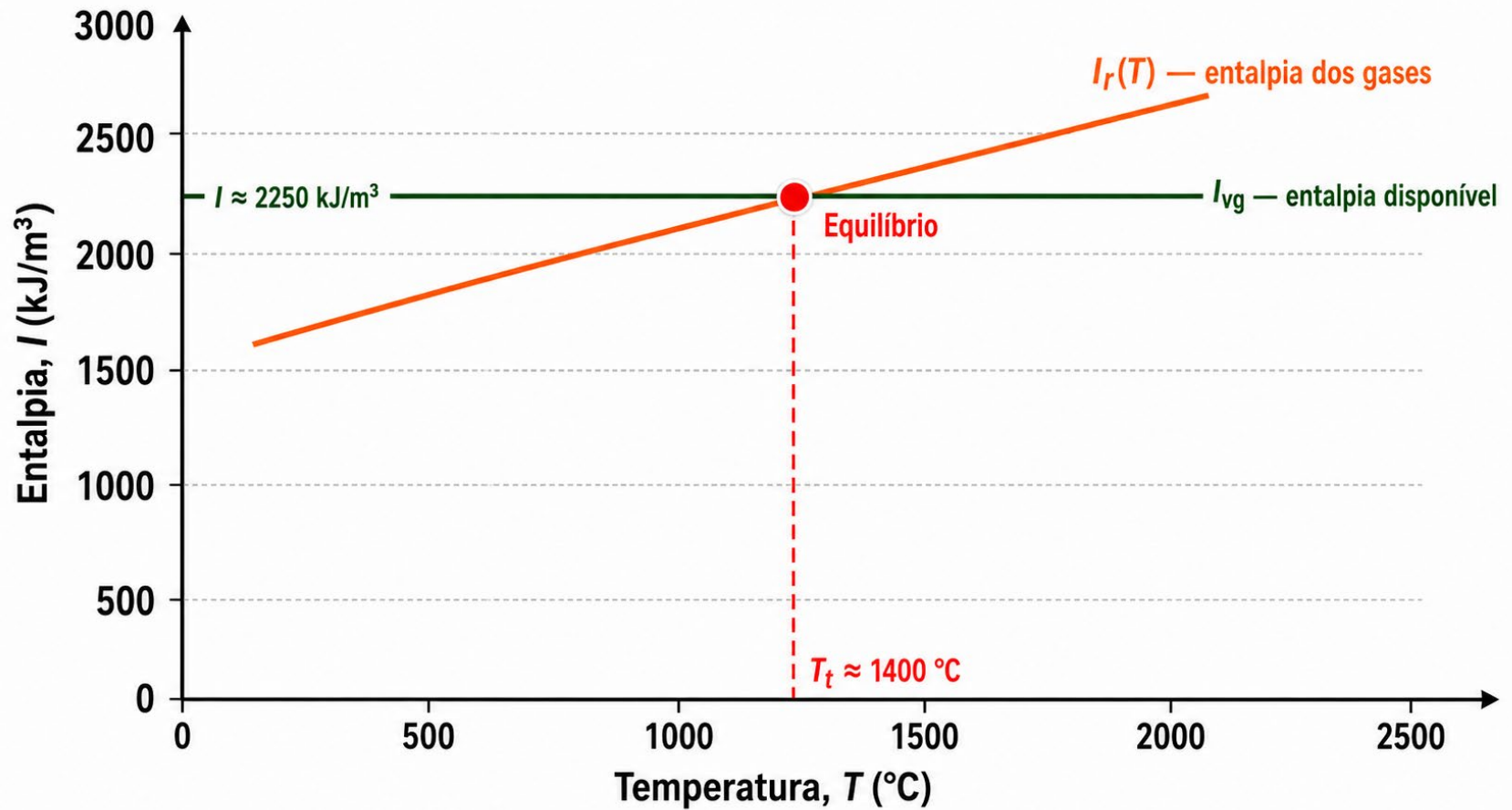
3.7.1 Influência dos Principais Parâmetros na Temperatura Teórica de Combustão

Parâmetro	Efeito na temperatura	Justificação
Poder calorífico (PCI ou PCS)	↑ Aumenta	Maior energia libertada durante a combustão.
Excesso de ar (α)	↓ Diminui	O excesso de ar absorve parte da energia libertada, reduzindo a temperatura dos produtos.
Humidade do combustível	↓ Diminui	Parte da energia é consumida para aquecer e vaporizar a água presente no combustível.
Temperatura inicial do ar e do combustível	↑ Aumenta	O pré-aquecimento fornece energia adicional aos reagentes antes da combustão.
Dissociação química	↓ Diminui	Parte da energia é utilizada para quebrar ligações químicas dos produtos da combustão.
Perdas de calor para o exterior	↓ Diminui	Nem toda a energia libertada permanece disponível para aquecer os gases.





3.7.2 Estimativa da Temperatura da Combustão





3.7.2 Estimativa da 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 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	664.58	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	964.63	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	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

3.7.3 Marcha do cálculo da Temperatura de Combustão (I)



Dados: composição do combustível e excesso de ar (λ)

1 CONDIÇÕES TEÓRICAS



1. Massa de trabalho



2. Volume teórico de ar



3. Gases biatômicos teóricos



4. Água teórica



5. Gases triatômicos

2 CONDIÇÕES REAIS



6. Gases biatômicos reais



7. Água real



8. Gases triatômicos reais



9. Oxigénio excedente



10. Gases de combustão

3 COMPOSIÇÃO E ENERGIA



11. Fracções dos gases



12. Poder Calorífico Inferior



13. Entalpia determinada pelo PCI



14. Entalpia dos gases

4 ITERAÇÃO DA TEMPERATURA



15. Admitir temperatura T



Calcular entalpia dos gases



Balanco satisfeito?

Sim



Temperatura teórica de combustão

Não



Actualizar T



3.7.3 Marcha do cálculo da Temperatura de Combustão (II)

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



3.7.3 Marcha do cálculo da Temperatura de Combustão (III)

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 Biatômicos;
4. Calcula-se o volume teórico de água;
5. Calcula-se o volume dos Gases Triatômicos;
6. Calcula-se o volume real dos Gases Biatômicos;
7. Calcula-se o volume real de água;
8. Calcula-se o volume dos Gases Triatômicos;



3.7.3 Marcha do cálculo da Temperatura de Combustão (IV)

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	-