



# TEMA 1: FUNDAMENTOS QUÍMICOS DE LA COMBUSTIÓN

## MATERIALES DE ESTUDIO

Blanca M<sup>a</sup> Caballero Iglesias  
Maite de Blas Martín

Escuela de Ingeniería de Bilbao  
Ingeniería Química y del Medio Ambiente

# FUNDAMENTOS QUÍMICOS DE LA COMBUSTIÓN

---

## 1.1. Introducción

## 1.2. Elementos de la combustión

### 1.2.1. Combustibles

### 1.2.2. Comburente

## 1.3. Estequiometría de las reacciones de combustión

## 1.4. Tipos de reacciones de combustión

### 1.4.1. Combustión teórica/neutra

### 1.4.2. Combustión oxidante/completa

### 1.4.3. Combustión incompleta/reductora

### 1.4.4. Combustión imperfecta/mixta

# INTRODUCCIÓN

**ENERGÍA** → capacidad para realizar un trabajo

**ENERGÍA** → recurso natural, incluyendo su tecnología para extraerla, transformarla y darle uso industrial o económico

**ENERGÍA TÉRMICA** → energía liberada en forma de calor, que puede transformarse en energía eléctrica o mecánica

Tabla 1.1. Unidades de energía habituales

Unidad	Símbolo	Factor de conversión (J)
Kilojulio	kJ	$10^3$
Megajulio	MJ	$10^6$
Caloría	cal	4,184
Kilocaloría	kcal	4184
Megacaloría	Mcal	$4184 \cdot 10^3$
Kilovatio-hora	kWh	$3,6 \cdot 10^6$

# ELEMENTOS DE LA COMBUSTIÓN

**COMBUSTIBLE** → sustancia capaz de arder, oxidándose, y cuya energía se libera principalmente en forma de **CALOR**

**COMBURENTE** → medio en el que el combustible se oxida (*generalmente oxígeno del aire*)

**COMBUSTIÓN** → reacción de oxidación entre el combustible (compuesto fundamentalmente por C, H o combinaciones) y el oxígeno del comburente (generalmente aire)

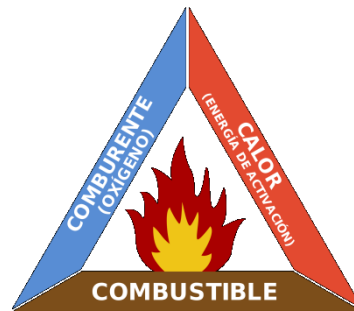


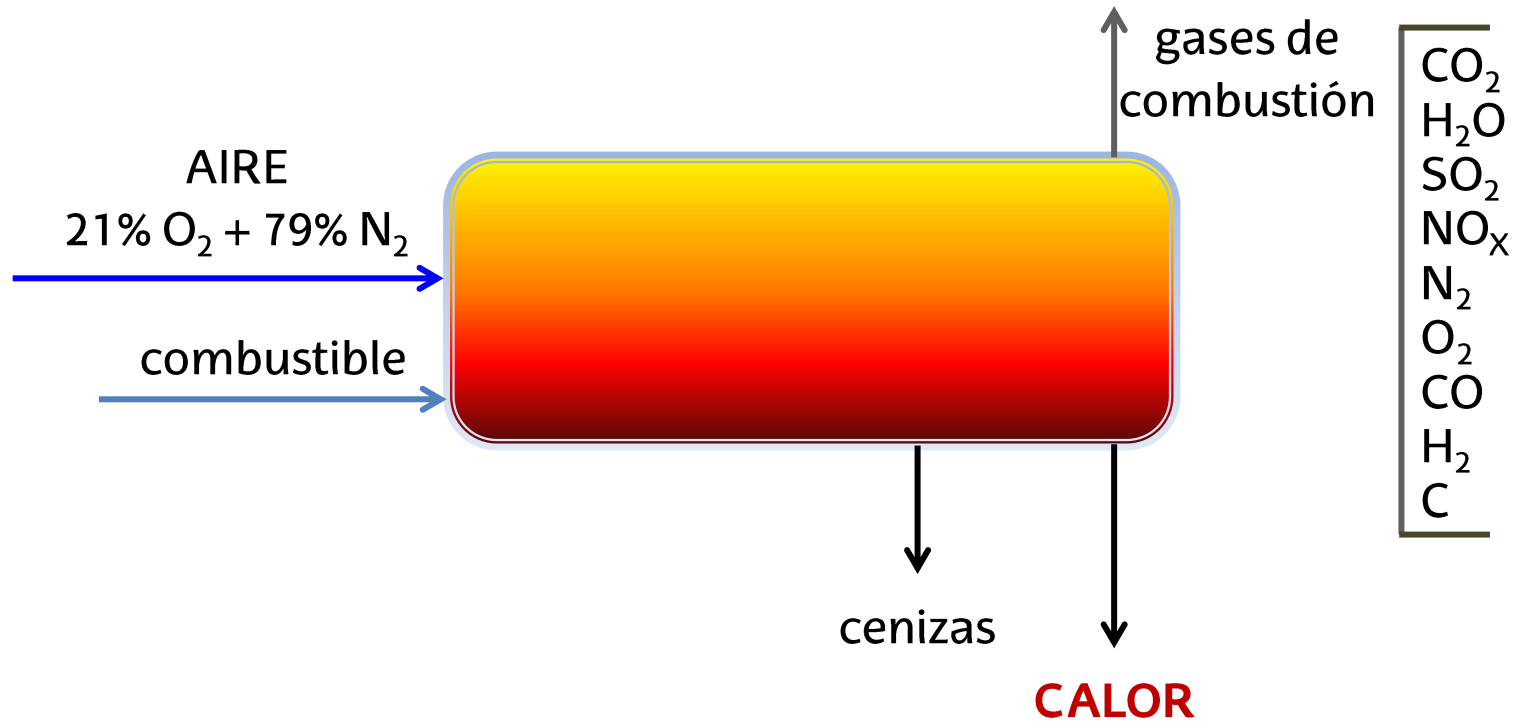
Figura 1.1. Proceso de combustión. Fotografía publicada en [Wikimedia Commons](#) bajo dominio público [1]

## PRODUCTOS

**GASES DE COMBUSTIÓN** → productos gaseosos resultantes de la combustión

**CENIZAS** → elementos sólidos no “combustibles” (inorgánicos) que permanecen en la cámara de combustión y no generan energía

# ELEMENTOS DE LA COMBUSTIÓN



# ELEMENTOS DE LA COMBUSTIÓN

## COMBUSTIBLES.- CLASIFICACIÓN

### ✓ **ORIGEN**

- **Fósiles** → proceden de la fermentación de restos vegetales y seres vivos: carbón, derivados del petróleo, gas natural...
- **No fósiles** el resto de combustibles: biomasa, eólica...



Figura 1.2. Combustible fósil: carbón. Imagen propia



Figura 1.3. Combustible no fósil: biomasa. Imagen propia

### ✓ **GRADO DE PREPARACIÓN**

- **Naturales** → se utilizan como aparecen en su origen (previamente sólo se efectúan tratamientos mecánicos o físicos): carbón, petróleo, gas natural...
- **Elaborados (manufacturados)** → antes de utilizarse se someten a procesos de transformación: gas de gasógeno, coke..

# ELEMENTOS DE LA COMBUSTIÓN

## COMBUSTIBLES.- CLASIFICACIÓN

### ✓ESTADO DE AGREGACIÓN

- **Sólidos** → se encuentran en tal estado en la naturaleza o una vez transformados: madera, carbón...
- **Líquidos** → líquidos que puedan ser usados como combustibles y vertidos y bombeados: fuel, gasolina...
- **Gaseosos** → se encuentran en estado gaseoso: gas natural, gas de alto horno, gas ciudad...

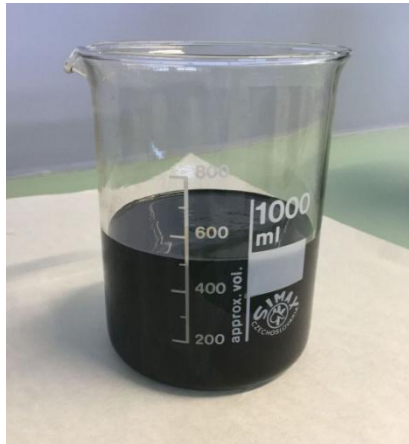


Figura 1.4. Fuel de petróleo. Imagen propia



Figura 1.5. Gas natural. Fotografía tomada por Jumani Solar publicada en Flickr bajo dominio público [\[2\]](#)

# ELEMENTOS DE LA COMBUSTIÓN

## COMBUSTIBLES.- COMPOSICIÓN

- Esencialmente **C + H** en forma libre/combinada en forma de hidrocarburos ( $C_nH_m$ )
- **S** en pequeño porcentaje
- **O** inicialmente fijado al C e H, o en estado libre (mezclas aire-propano)
- Inertes: **humedad, cenizas,  $CO_2$  y  $N_2$**

H  
U  
M  
E  
D  
A  
D

• Humedad superficial, libre o de inhibición: agua superficial retenida en la superficie del combustible (*humedad que pierde el combustible cuando se seca al aire a temperatura ambiente del laboratorio*); depende de las condiciones atmosféricas

• Humedad inherente, higroscópica o específica: agua retenida en los poros del combustible en equilibrio con la humedad del ambiente (*humedad que contiene un combustible una vez alcanzado el equilibrio a 30°C y 96-97% de humedad relativa*); constante para un combustible

• Humedad total: humedad libre/superficial + humedad inherente/higroscópica



# ELEMENTOS DE LA COMBUSTIÓN

## COMBUSTIBLES.- COMPOSICIÓN

### Combustibles sólidos. Carbón

→ "roca sedimentaria combustible"

#### COMPOSICIÓN:

matriz de materias orgánicas, variable según grado de evolución y origen

+

materias minerales

cantidad de C, H, S, N, O, humedad y cenizas en porcentaje de masa referida a 1 kg de combustible → % EN PESO (MASA)

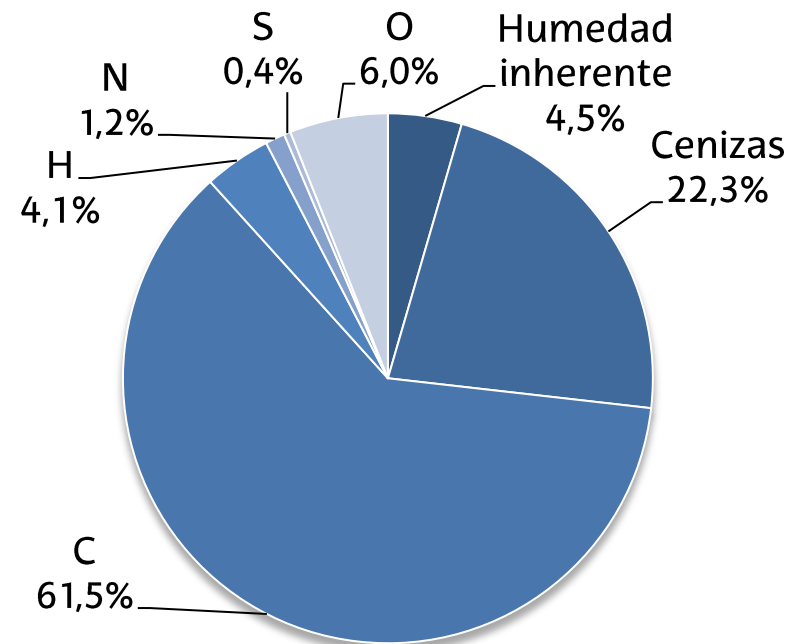


Figura 1.6. Composición (% en peso) de la hulla Encasur, Ciudad Real. Imagen elaborada a partir de análisis propio

# ELEMENTOS DE LA COMBUSTIÓN

## COMBUSTIBLES.- COMPOSICIÓN

Combustibles líquidos. Derivados del petróleo (gasolina gasóleo, fuelóleo...)

→ "mezcla de moléculas que contienen básicamente C e H"

### COMPOSICIÓN:

C, H, S (en baja proporción) + O (pequeña proporción) + N (pequeña proporción) + V, Na, Ni ... (ppm) + humedad (procedente del exterior)

cantidad de C, H, S, N, O, humedad y cenizas (sedimentos) en porcentaje de masa referida a 1 kg o 1 m<sup>3</sup> de combustible → % EN PESO (MASA) mediante su fórmula molecular

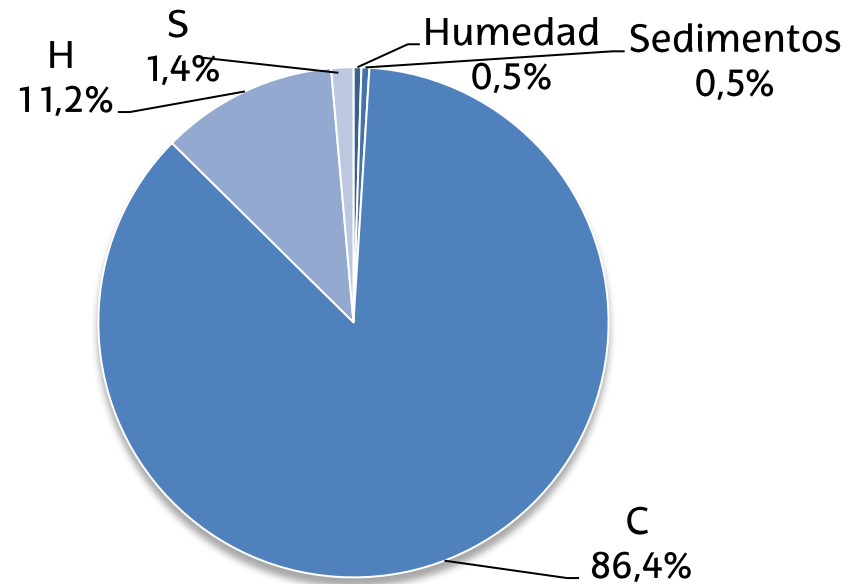
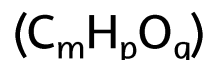


Figura 1.7. Composición (% en peso) de un fuel. Imagen elaborada a partir de análisis propio

# ELEMENTOS DE LA COMBUSTIÓN

## COMBUSTIBLES.- COMPOSICIÓN

### Combustibles gaseosos. Gas natural, gases manufacturados

#### COMPOSICION:

H<sub>2</sub> + CO + hidrocarburos saturados (CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>, C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>) + hidrocarburos no saturados (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>4</sub>H<sub>8</sub>) + otros hidrocarburos (C<sub>n</sub>H<sub>m</sub>) + O (a veces en pequeña proporción) + CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> (a veces en pequeña proporción)

el porcentaje en volumen de cada componente referido a 1 m<sup>3</sup>N de combustible → % *EN VOLUMEN*

mediante su fórmula molecular (C<sub>n</sub>H<sub>m</sub>)

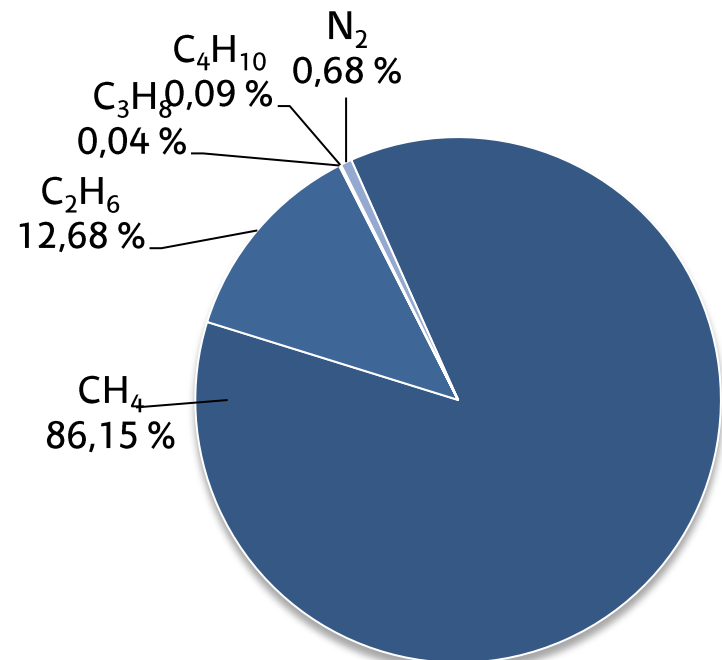


Figura 1.8. Composición (% en volumen) del gas natural. Imagen propia elaborada a partir de datos de ENAGAS. (Pulgar Díaz A. y Olay Lorenzo, M.R., 2008)

# ELEMENTOS DE LA COMBUSTIÓN

## COMBUSTIBLES.- CARACTERÍSTICAS DE LOS COMBUSTIBLES

**PODER CALORÍFICO** → cantidad de calor generado al quemar (combustión completa) una unidad de masa del combustible (kcal/kg, kcal/m<sup>3</sup>, kcal/mol, kcal/L, kJ/kg, kJ/m<sup>3</sup>, kJ/mol, kJ/L y unidades derivadas)

**Poder Calorífico Superior (PCS):** cantidad de calor desprendido en la combustión completa de una unidad de masa o de volumen de combustible, cuando se incluye el calor de condensación del agua que se desprende en la combustión

**Poder Calorífico Inferior (PCI):** cantidad de calor desprendido en la combustión completa de una unidad de masa o de volumen de combustible, cuando el vapor de agua originado en la combustión no condensa

# ELEMENTOS DE LA COMBUSTIÓN

## COMBUSTIBLES.- CARACTERÍSTICAS DE LOS COMBUSTIBLES

**TEMPERATURA (PUNTO) DE INFLAMACIÓN (*flash point*)** → temperatura del combustible a la que se inflaman por primera vez los vapores emitidos al ponerse en contacto con una llama/Temperatura mínima de calentamiento del combustible para que se inicie la reacción de combustión

**TEMPERATURA (PUNTO) DE IGNICIÓN** → temperatura del combustible, superior a la temperatura de inflamación, a la que se produce la combustión de los vapores emitidos, al menos 5 s, al ponerse en contacto con una llama/Temperatura necesaria para que la llama originada por la combustión sea duradera y persistente, mientras quede combustible

\* Para que tenga lugar la **combustión** es necesario alcanzar la **temperatura de ignición**

$(T_{\text{ignición}} \geq T_{\text{inflamación}} + 20-60 \text{ }^{\circ}\text{C})$

# ELEMENTOS DE LA COMBUSTIÓN

## COMBURENTE (oxígeno del aire)

Tabla 1.2- Datos del aire seco (Adaptado de NASA [4])

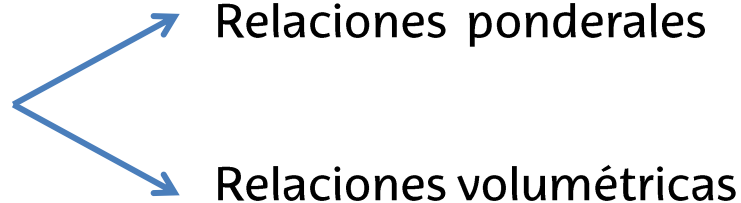
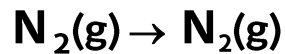
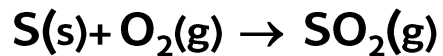
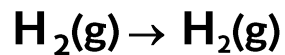
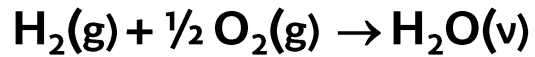
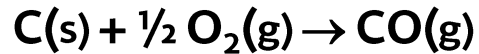
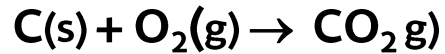
	% volumen		% peso	
	Real	Utilizado	Real	Utilizado
N <sub>2</sub>	78,08	79,0	75,51	77,0
O <sub>2</sub>	20,95	21,0	23,14	23,0
Ar	0,93	0	1,28	0
CO <sub>2</sub>	0,04	0	0,06	0
Otros	Trazas	0	Trazas	0

$$79/21=3,76 \text{ (1 vol O}_2 \rightarrow 3,76 \text{ vol N}_2\text{)}$$

$$\text{Peso molecular} = \frac{79 \text{ m}^3 \text{ N}_2 \cdot 28 \text{ kg N}_2}{100 \text{ m}^3 \text{ aire } 1 \text{ kmol N}_2} + \frac{21 \text{ m}^3 \text{ N O}_2 \cdot 32 \text{ kg O}_2}{100 \text{ m}^3 \text{ aire } 1 \text{ kmol O}_2} = 28,84 \frac{\text{kg aire}}{\text{kmol aire}}$$

$$1 \text{ kmol aire c.n. (0}^\circ\text{C y 1 atm): } 22,4 \text{ m}^3\text{N} \rightarrow \text{Densidad} = \frac{28,84 \text{ kg/kmol}}{22,4 \text{ m}^3\text{N/kmol}} = 1,29 \text{ kg/m}^3\text{N}$$

# ESTEQUIOMETRÍA DE LA COMBUSTIÓN



## \* Pesos atómicos utilizados

H-1

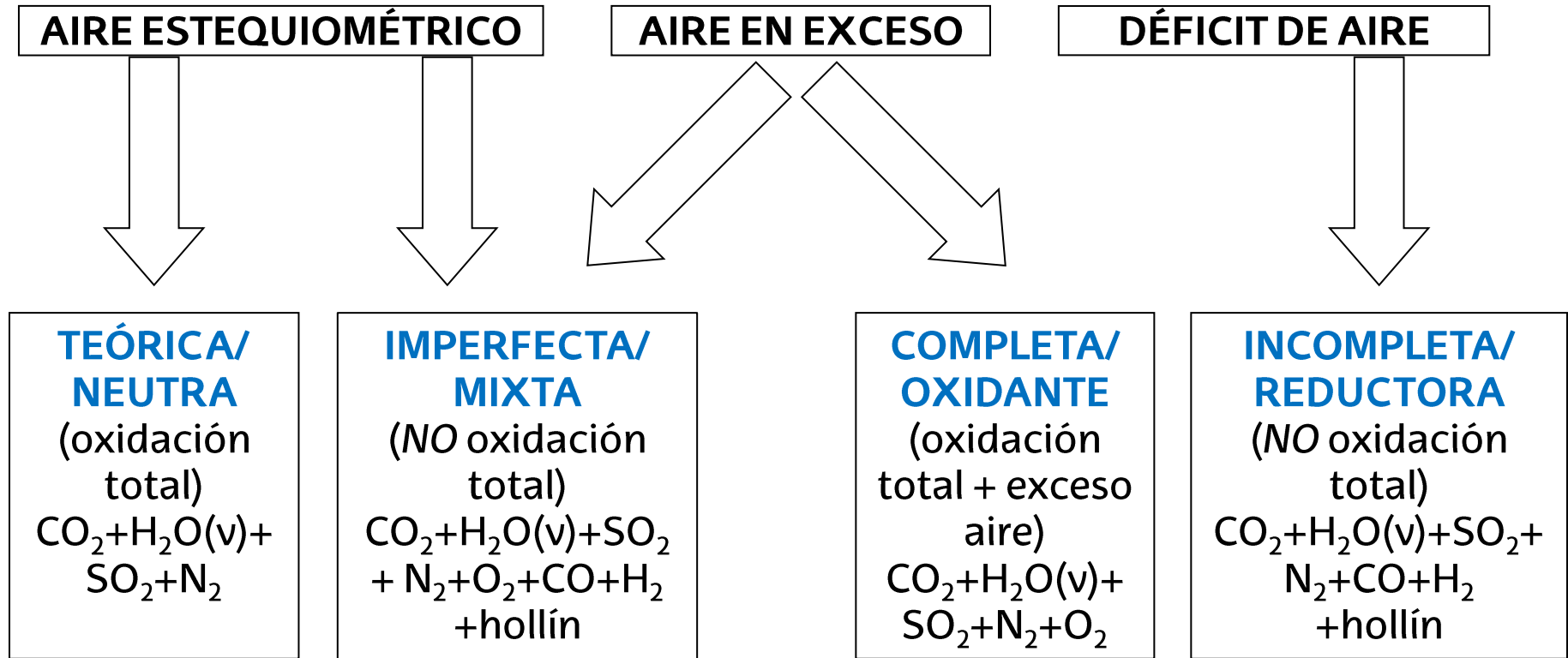
C-12

N-14

O-16

S-32

# TIPOS DE REACCIONES DE COMBUSTIÓN





# TIPOS DE REACCIONES DE COMBUSTIÓN

## COMBUSTIÓN TEÓRICA

**COMBUSTIBLES (% en peso) ⇒ AIRE TEÓRICO (volumen- $A_T$ ) Y (peso- $A_P$ ) seco y c.n.**

C.....a%

H.....b%

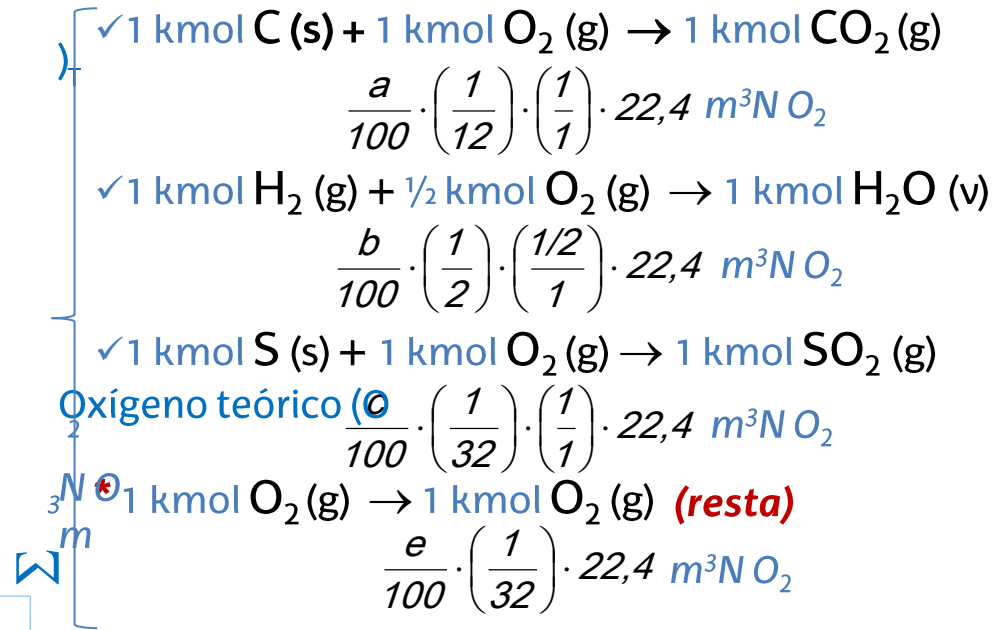
S.....c%

N.....d%

O.....e%

Humedad..w%

Cenizas.....z%



$$A_T = O_T \text{ m}^3\text{N aire O}_2 \cdot \frac{100 \text{ m}^3\text{N aire}}{21 \text{ m}^3\text{N aire O}_2}$$

$$(A_T) = \frac{22,4}{21} \left( \frac{a}{12} + \frac{b}{4} + \frac{c}{32} - \frac{e}{32} \right) \text{ m}^3 \text{ N aire /kg combustible}$$

←-----O<sub>2</sub> (combustible)

$$(A_P) = 1,29 \text{ kg/m}^3\text{N} \cdot A_T \text{ m}^3 \text{ N aire /kg combustible (kg aire/kg combustible)}$$



# TIPOS DE REACCIONES DE COMBUSTIÓN

## COMBUSTIÓN TEÓRICA

COMBUSTIBLES (% en peso)  $\Rightarrow$  GASES COMBUSTIÓN (volumen- $V_T$ ) Y (peso- $G_T$ ) secos y c.n.

C.....a%

H.....b%

S.....c%

N.....d%

O.....e%

Humedad..w%

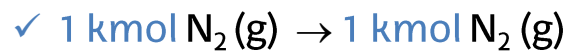
Cenizas.....z%



$$\frac{a}{100} \cdot \left(\frac{1}{12}\right) \cdot \left(\frac{1}{1}\right) \cdot 22,4 \text{ m}^3\text{N CO}_2$$



$$\frac{c}{100} \cdot \left(\frac{1}{32}\right) \cdot \left(\frac{1}{1}\right) \cdot 22,4 \text{ m}^3\text{N SO}_2$$



$$\frac{d}{100} \cdot \left(\frac{1}{28}\right) \cdot 22,4 \text{ m}^3\text{N N}_2 \text{ (combustible)}$$

$$V_{T(\text{secos})} = m^3\text{N CO}_2 + m^3\text{N SO}_2 + m^3\text{N N}_2$$

$$V_{T(\text{secos})} = \frac{22,4}{100} \left( \frac{a}{12} + \frac{c}{32} + \frac{d}{28} \right) \cdot \frac{79}{100} \cdot A_T \text{ m}^3\text{N gases combustión} / \text{kg combustible}$$

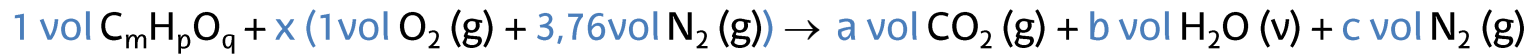
← N<sub>2</sub> (aire)

$$G_{T(\text{secos})} = \left( 1 - \frac{z}{100} \right) + A_T - \frac{1}{100} (9b + w) \text{ kg gases combustión} / \text{kg combustible}$$

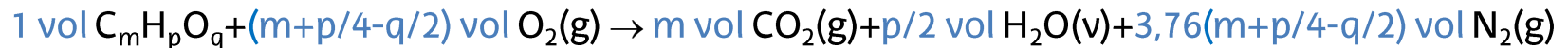
# TIPOS DE REACCIONES DE COMBUSTIÓN

## COMBUSTIÓN TEÓRICA

**COMBUSTIBLES (fórmula molecular)  $\Rightarrow$  AIRE TEÓRICO (volumen- $A_T$ ) Y (peso- $A_p$ ) seco y c.n.**



$$\text{balance de masa} \left\{ \begin{array}{l} \text{(C) } m=a; \text{ (H) } p=2b \rightarrow b=\frac{p}{2}; \text{ (N) } 3,76x=c \\ \text{(O) } q+2x=2a+b \rightarrow 2x=2a+b-q \rightarrow x=a+\frac{b}{2}-\frac{q}{2} \rightarrow x=m+\frac{p}{4}-\frac{q}{2} \end{array} \right.$$



Oxígeno teórico ( $O_T$ )

$$A_T = O_T \text{ m}^3 \text{N aire } O_2 \cdot \frac{100 \text{ m}^3 \text{N aire}}{21 \text{ m}^3 \text{N aire } O_2}$$

$$A_T = \frac{100}{21} \left[ m + \left( \frac{p}{4} - \frac{q}{2} \right) \right] \text{ m}^3 \text{N } O_2 / \text{m}^3 \text{N combustible}$$

**$\Rightarrow$  GASES COMBUSTIÓN (volumen- $V_T$ ) Y (peso- $G_T$ ) secos y c.n.**

$$V_{T(\text{secos})} = \text{m}^3 \text{N } CO_2 + \text{m}^3 \text{N } N_2$$

$$V_{T(\text{secos})} = m + 3,76 \left[ m + \left( \frac{p}{4} - \frac{b}{2} \right) \right] \text{ m}^3 \text{N gases combustión} / \text{m}^3 \text{N combustible}$$

# TIPOS DE REACCIONES DE COMBUSTIÓN

## COMBUSTIÓN TEÓRICA

**COMBUSTIBLES (% en volumen) ⇒ AIRE TEÓRICO (volumen- $A_T$ ) Y (peso- $A_P$ ) seco y c.n.**

CO.....a%

CO<sub>2</sub>.....b%

H<sub>2</sub>.....c%

CH<sub>4</sub>.....d%

C<sub>n</sub>H<sub>m</sub>.....e%

N<sub>2</sub>.....f%

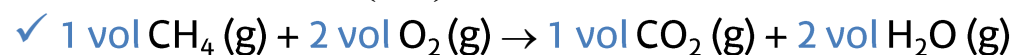
\*O<sub>2</sub>, otros....



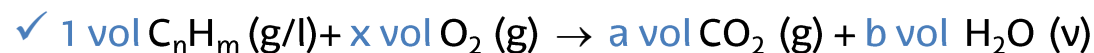
$$\frac{a}{100} \cdot \left( \frac{1/2}{1} \right) m^3 N O_2$$



$$\frac{c}{100} \cdot \left( \frac{1/2}{1} \right) m^3 N O_2$$

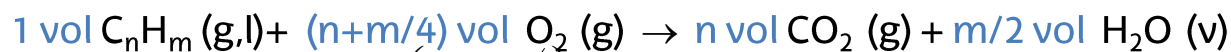


$$\frac{d}{100} \cdot \left( \frac{2}{1} \right) m^3 N O_2$$



balance  
de masa

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{(C) } n=a; \text{ (H) } m=2b \rightarrow b=\frac{m}{2}; \text{ (O) } 2x=2a+b \rightarrow 2x=2n+\frac{m}{2} \rightarrow x=n+\frac{m}{4} \end{array} \right.$$



$$\frac{e}{100} \cdot \left( \frac{n+m/4}{1} \right) m^3 N O_2$$

$$\Sigma m^3 N O_2 = \text{Oxígeno teórico (O}_T\text{)}$$

$$A_T = O_T m^3 N \text{ aire } O_2 \cdot \frac{100 m^3 N \text{ aire}}{21 m^3 N \text{ aire } O_2}$$

# TIPOS DE REACCIONES DE COMBUSTIÓN

## COMBUSTIÓN TEÓRICA

**COMBUSTIBLES (% en volumen) ⇒ AIRE TEÓRICO (volumen- $A_T$ ) Y (peso- $A_p$ ) seco y c.n.**

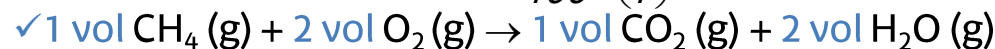
$$A_T = \frac{1}{21} \left[ \frac{a}{2} + \frac{c}{2} + 2d + \left( n + \frac{m}{4} \right) e \right] \text{ m}^3\text{N aire/m}^3\text{N combustible}$$

$$A_p = 1,29 \text{ kg/m}^3\text{N} \cdot A_T \text{ m}^3\text{N aire/m}^3\text{N combustible (kg aire/m}^3\text{N combustible)}$$

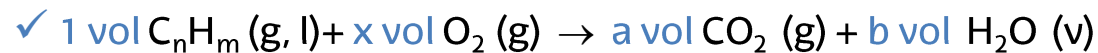
**⇒ GASES COMBUSTIÓN (volumen- $V_T$ ) Y (peso- $G_T$ ) secos y c.n.**



$$\frac{a}{100} \cdot \left( \frac{1}{1} \right) \text{ m}^3\text{N CO}_2$$



$$\frac{c}{100} \cdot \left( \frac{1}{1} \right) \text{ m}^3\text{N CO}_2$$



balance de masa  $\left\{ \begin{array}{l} 1 \text{ vol C}_n\text{H}_m \text{ (g/l)} + (n+m/4) \text{ vol O}_2 \text{ (g)} \rightarrow n \text{ vol CO}_2 \text{ (g)} + m/2 \text{ vol H}_2\text{O (v)} \\ \frac{e}{100} * \left( \frac{n}{1} \right) \text{ m}^3\text{N CO}_2 \end{array} \right.$



$$\frac{f}{100} \cdot \left( \frac{1}{28} \right) \cdot 22,4 \text{ m}^3\text{N N}_2$$

# TIPOS DE REACCIONES DE COMBUSTIÓN

## COMBUSTIÓN TEÓRICA

COMBUSTIBLES (% en volumen)  $\Rightarrow$  GASES COMBUSTIÓN (volumen- $V_T$ ) Y (peso- $G_T$ ) secos y c.n.

$$V_{T(\text{secos})} = m^3N \text{CO}_2 + m^3N \text{SO}_2 + m^3N \text{N}_2$$

$$V_{T(\text{secos})} = \frac{a + b + d + n \cdot e + f + 79 \cdot A_T}{100} \text{ m}^3\text{N gases combustión/m}^3\text{N combustible}$$

$\leftarrow$   $\text{N}_2$  (aire)

$$G_{T(\text{secos})} = \frac{44(a + b + d + n \cdot e) + 28(f + 79 \cdot A_T)}{100} \text{ kg gases combustión/m}^3\text{N combustible}$$

$\leftarrow$   $\text{N}_2$  (aire)

# TIPOS DE REACCIONES DE COMBUSTIÓN

## COMBUSTIÓN OXIDANTE

COEFICIENTE DE EXCESO DE AIRE, (EXCESO DE AIRE) "n"



$$"n" = \frac{A_o}{A_T} = \frac{\text{Aire utilizado}}{\text{Aire teórico}} \rightarrow "n" > 1$$

GASES  $\rightarrow$  CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, SO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> (exceso aire)

$$A_o = n \cdot A_T \text{ (en volumen)}$$

$$A_o = n \cdot A_p \text{ (en peso)}$$

$$V_{o(\text{secos})} = V_T + (n-1) \cdot A_T \text{ (en volumen)}$$

$$G_{o(\text{secos})} = G_T + (n-1) \cdot A_p \text{ (en peso)}$$

Tabla 1.3- Valores recomendados del coeficiente "n"

Combustible	"n"
Sólido	1,4-2,5
Líquido	1,2-1,6
Gas	1,1-1,4

# TIPOS DE REACCIONES DE COMBUSTIÓN

## COMBUSTIÓN INCOMPLETA. COMBUSTIÓN IMPERFECTA

⇒ Defecto de aire: *COMBUSTIÓN INCOMPLETA/REDUCTORA* ( $n < 1$ )

GASES → CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, SO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub> + hollín/partículas

⇒ Limitaciones en el proceso industrial: *COMBUSTIÓN IMPERFECTA/MIXTA*

GASES → CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, SO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> (exc. aire) + hollín/partículas