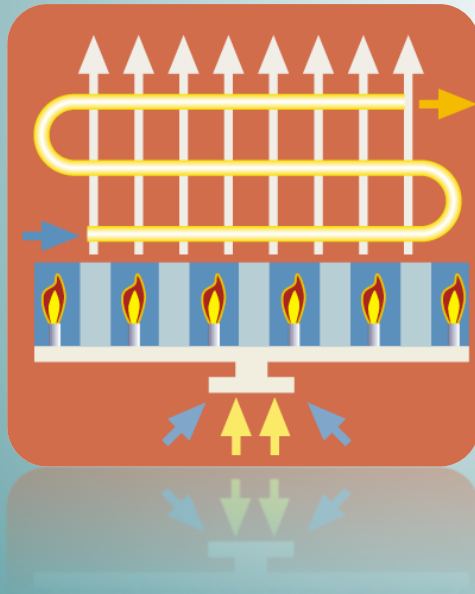


Termodinámica y Máquinas Térmicas

Tema 07. Combustión



Inmaculada Fernández Diego
Severiano F. Pérez Remesal
Carlos J. Renedo Estébanez

DPTO. DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ENERGÉTICA

Este tema se publica bajo Licencia:

[Creative Commons BY-NC-SA 3.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/)



T 07.- Combustión

Objetivos:

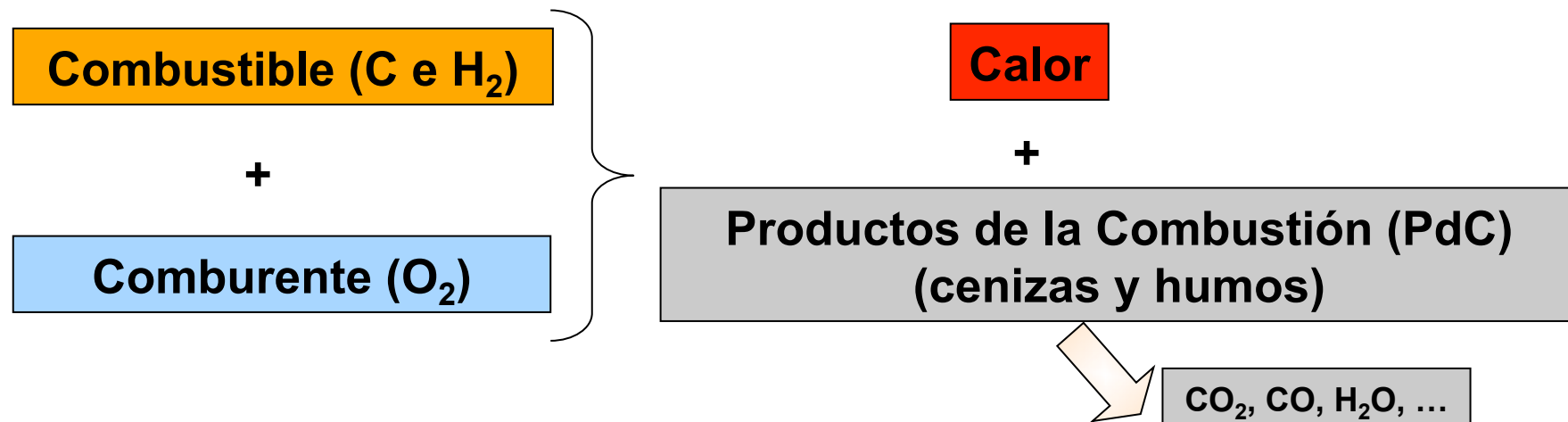
El objetivo de este tema es realizar un análisis general de la combustión y de los combustibles, así como la aplicación de balances de materia y energía a sistemas reactivos.



- 1.- Introducción
- 2.- Propiedades de la combustión
- 3.- Combustibles
- 4.- Termodinámica de la combustión

1.- Introducción (I)

•La combustión es una ***oxidación rápida***



1.- Introducción (II)

Se debe realizar a un nivel térmico aprovechable

El **quemador** es el encargado de realizar la mezcla
(combustible-oxígeno del aire)

Los **elementos básicos** que reaccionan son:

- El oxígeno del aire como comburente (aprox. 1m³ por kWh)
- El carbono y el hidrógeno del combustible
- Otros elementos (azufre), e inertes (cenizas)

Reacciones del **Carbono** :

- $C + O_2 = CO_2 + 32.780 \text{ MJ/kg}$
- $C + 1/2 O_2 = CO + 9.188 \text{ MJ/kg}$
- $CO + 1/2 O_2 = CO_2 + 10.111 \text{ MJ/kg}$

La reacción de **Azufre** es:

- $S + O_2 = SO_2 + 2.957 \text{ MJ/kg}$

La reacción del **Hidrógeno** es:

- $H_2 + 1/2 O_2 = H_2O (v) + 118.680 \text{ MJ/kg}$

Si el agua se condensa:

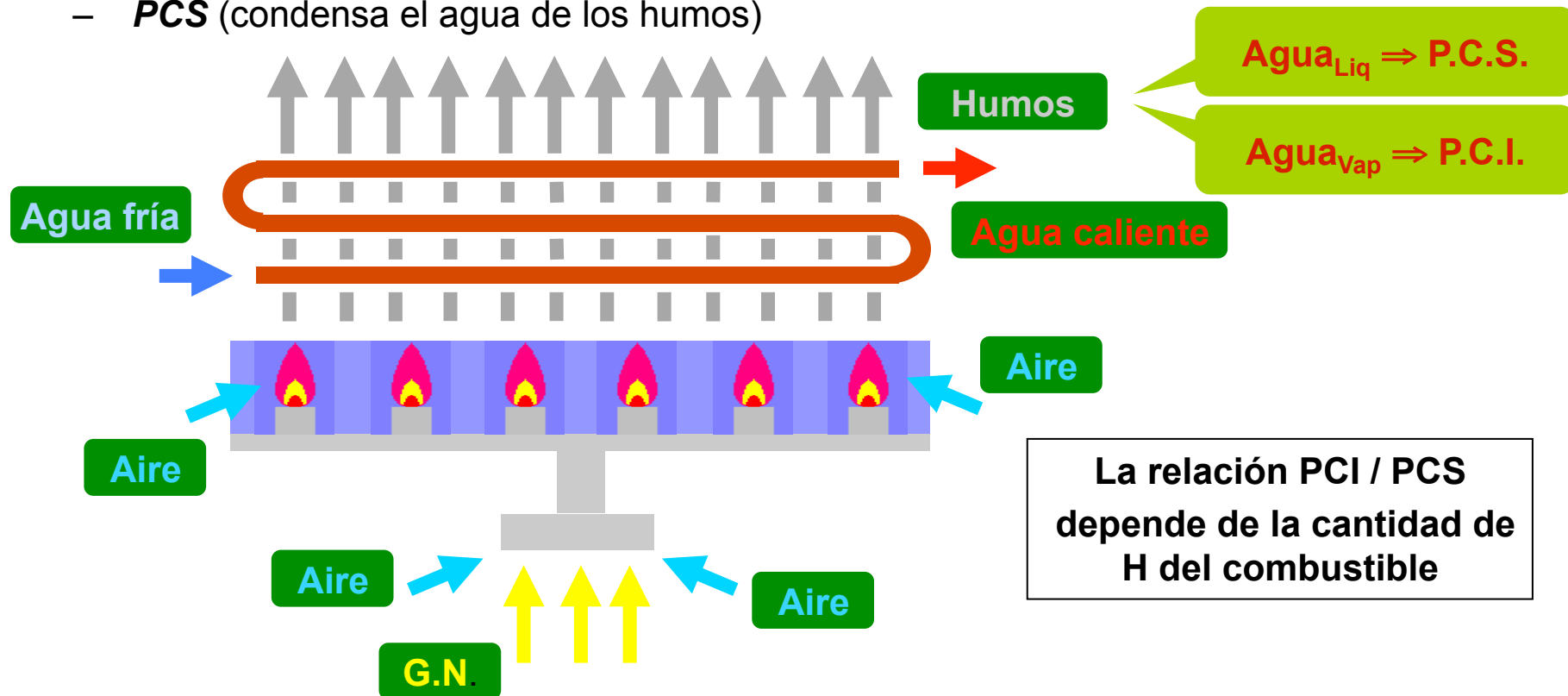
- $H_2 + 1/2 O_2 = H_2O (l) + 142.107 \text{ MJ/kg}$

Inertes ⇒ cenizas

2.- Propiedades de la Combustión (I)

La cantidad de calor por unidad de masa (o volumen) que desprende un combustible al quemarse es el **Poder Calorífico** (kJ/kg, kJ/Nm³)

- **PCI** (el agua de los humos no condensa)
- **PCS** (condensa el agua de los humos)



2.- Propiedades de la Combustión (II)

Combustión estequiométrica es una combustión con las proporciones justas de combustible y oxígeno para que todo el C del combustible se oxide a CO_2 (sin producir CO, ni emplear exceso de aire)

La composición del combustible marca el O_2 necesario

Teórica

- $\text{C} + \text{O}_2 = \text{CO}_2$ 12 g de C necesitan 22,4 litros de O_2
- $\text{H}_2 + 1/2 \text{O}_2 = \text{H}_2\text{O}$ 2 g de H_2 necesitan 11,2 litros de O_2
- $\text{S} + \text{O}_2 = \text{SO}_2$ 32 g de S_2 necesitan 22,4 litros de O_2

Poder Comburívoro: aire necesario para la combustión estequiométrica de 1 m^3 de gas

Aire y 79% N_2 + 21% O_2

Se necesita un 4,76 más de aire que de O_2

	Aire teórico m^3/Nm^3	PCI		m^3 aire / kWh
		kCal/ Nm^3	kWh/ Nm^3	
Gas natural	9,3	9.228	10,73	0,87
Butano	31	26.253	30,5	1,016
Propano	23,9	20.484	23,8	1



2.- Propiedades de la Combustión (III)

En la **combustión completa** todo el carbono se oxida en CO_2
(para que se produzca en condiciones reales necesita exceso de aire)

La **combustión incompleta** se produce si existe combustible inquemado o CO
en los humos
(se puede producir por falta de O_2 , o por mala mezcla aire-combustible)

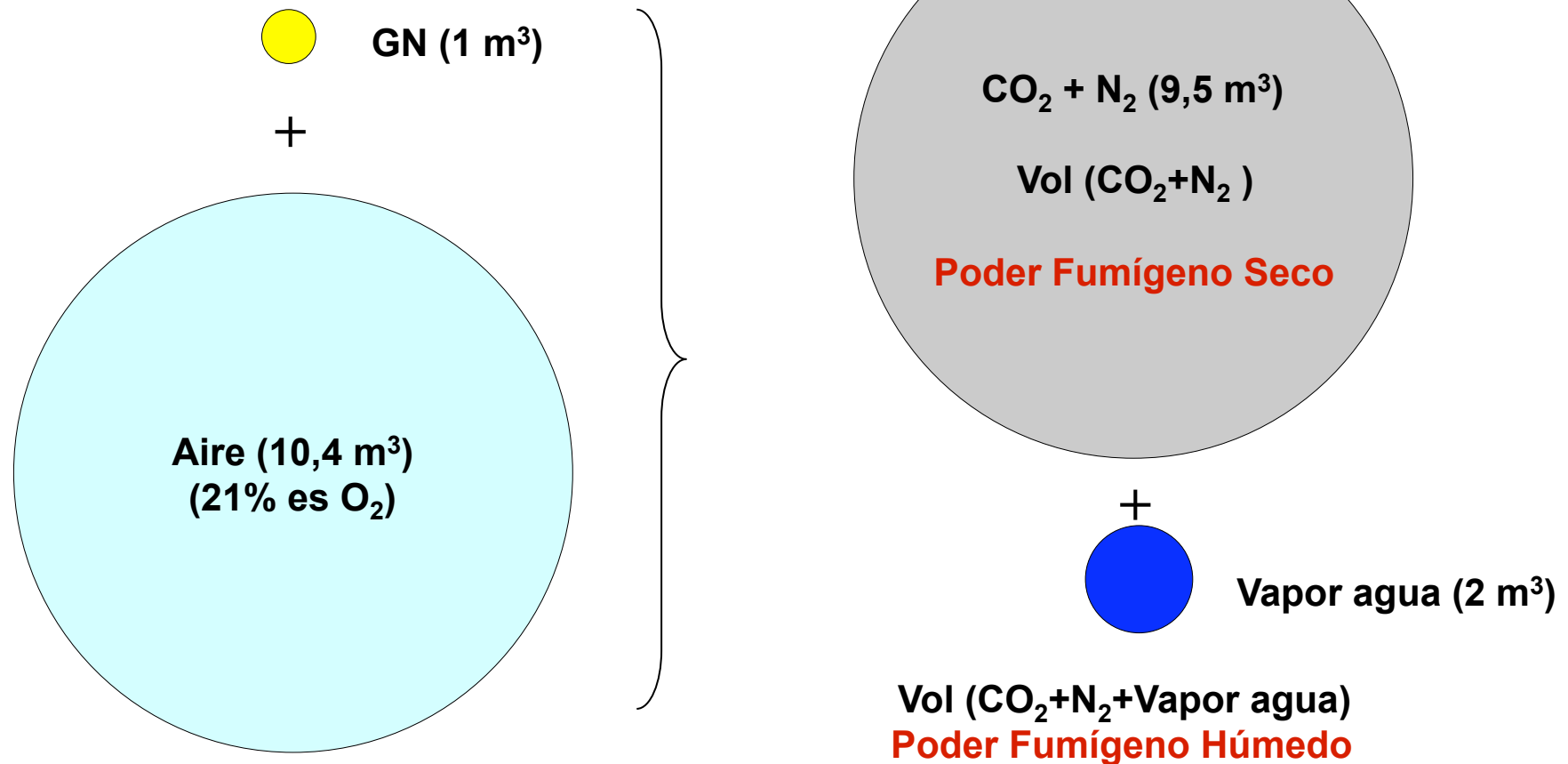
El **exceso de aire** necesitado para producir combustiones completas depende de
la homogeneidad de la mezcla aire-combustible que se consiga en el quemador

Contribuye a disminuir la T^a final y el nivel energético de los humos
se necesita para combustión completa, pero no es deseable
con combustibles gaseosos aprox. el 10% del estequiométrico (y $1\text{m}^3/\text{kWh}$)

El **Índice de aireación** es la relación entre el aire aportado a una combustión y el preciso
para una combustión estequiométrica

2.- Propiedades de la Combustión (IV)

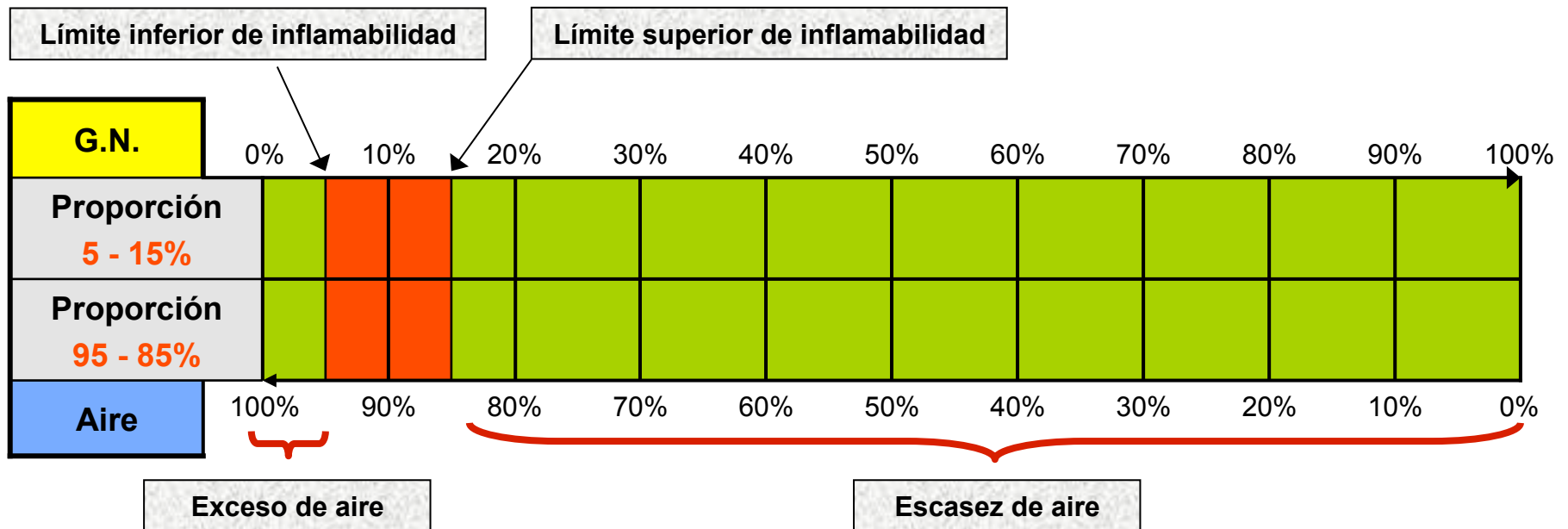
Poder Fumígeno: gases de combustión producidos por la combustión estequiométrica de 1 m³ de gas



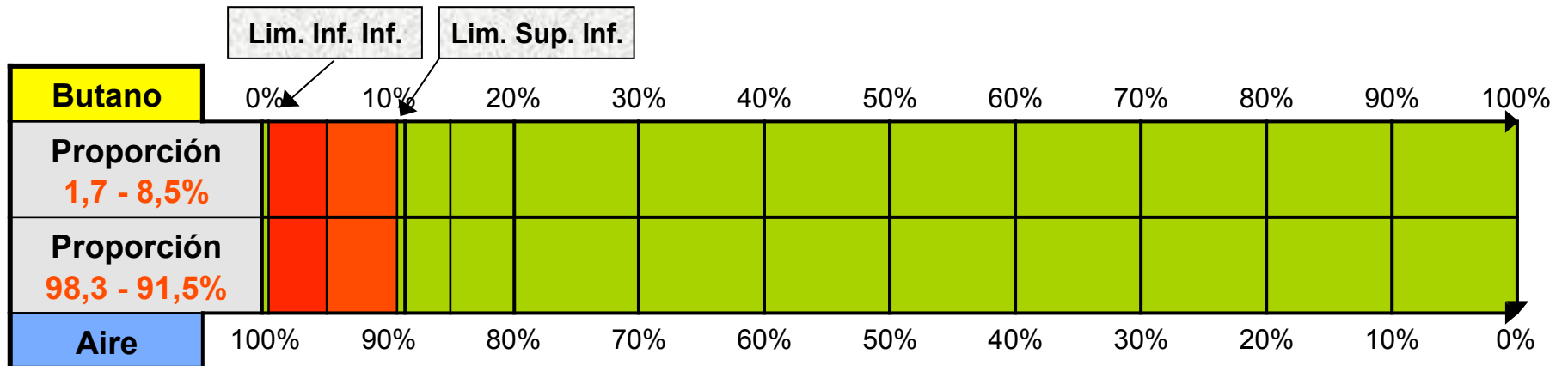
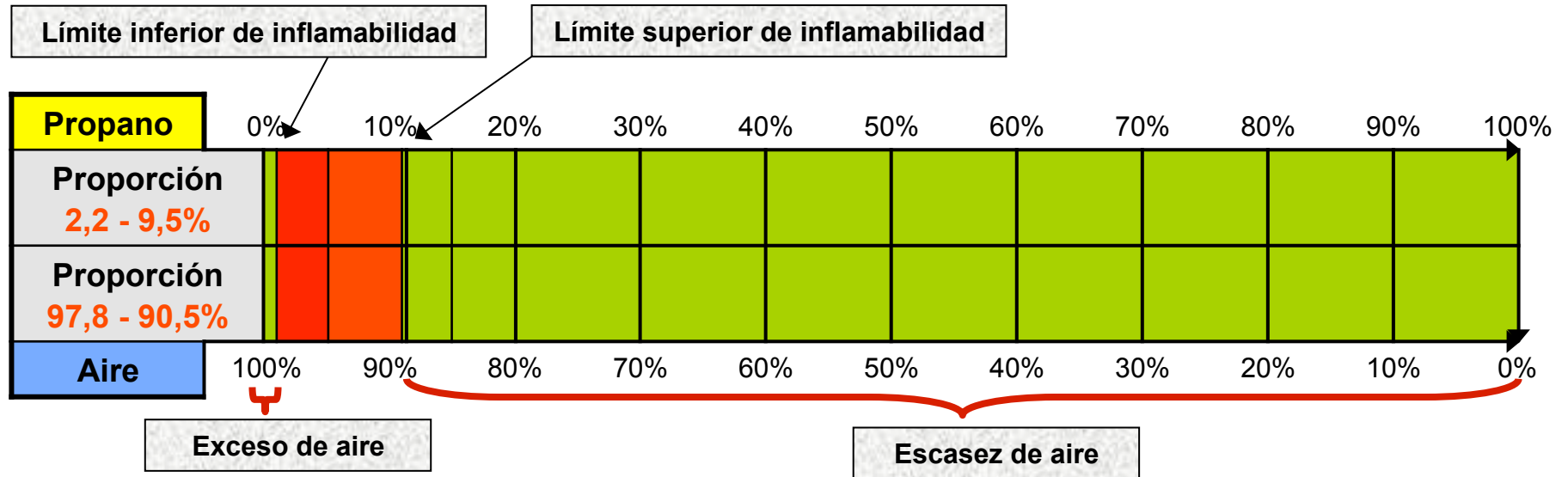
2.- Propiedades de la Combustión (V)

Inflamabilidad: medida de la facilidad que presenta un combustible para encenderse y de la rapidez con que, una vez encendido, se diseminarán sus llamas

Necesita que la proporción de O_2 esté en un rango (ni defecto de O_2 ni de combustible)



2.- Propiedades de la Combustión (VI)



2.- Propiedades de la Combustión (VII)

Punto de rocío húmedo y ácido \Rightarrow limitan la temperatura de los humos

- Gas Natural 155 gr.agua/kWh \Rightarrow (T humos mayor)
- Gasóleo C 87 gr.agua/kWh
- $\text{SO}_3 + \text{H}_2\text{O} = \text{SO}_4\text{H}_2$ $T > 130^\circ\text{C}$

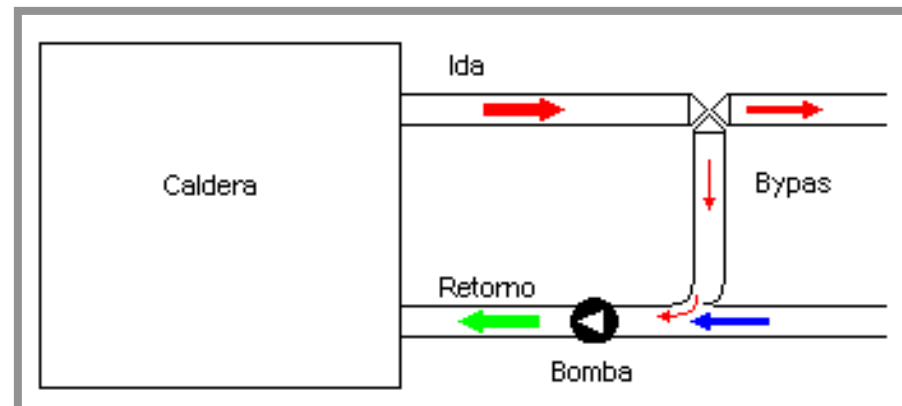
El exceso de aire disminuye la $T_{\text{rocío}}$

$$T_{\text{superficies}} > T_{\text{rocío}}$$

Si $T_{\text{sup}} = T_{\text{rocío}}$ empieza la condensación
(no implica la condensación de todo el vapor)

$T_{\text{rocío}}$ GN	53°C
$T_{\text{rocío}}$ gasóleo	47°C

- Tubos de la caldera de doble pared (aumento del A intercambio)
- Mantener la temperatura de retorno a la caldera alta con un bypass
- Calderas de condensación (materiales resistentes)





2.- Propiedades de la Combustión (VIII)

T^a de Inflamación: valor mínimo de T^a al cual debe ser llevada una mezcla (en proporciones de ser inflamable) para que la combustión pueda comenzar y propagarse

	Gas Natural	Propano	Butano
T^a inflamación (°C)	580	493	482

T^a adiabática de combustión: es la T^a que se obtendría en una combustión estequiométrica; aumenta con la potencia calorífica del combustible

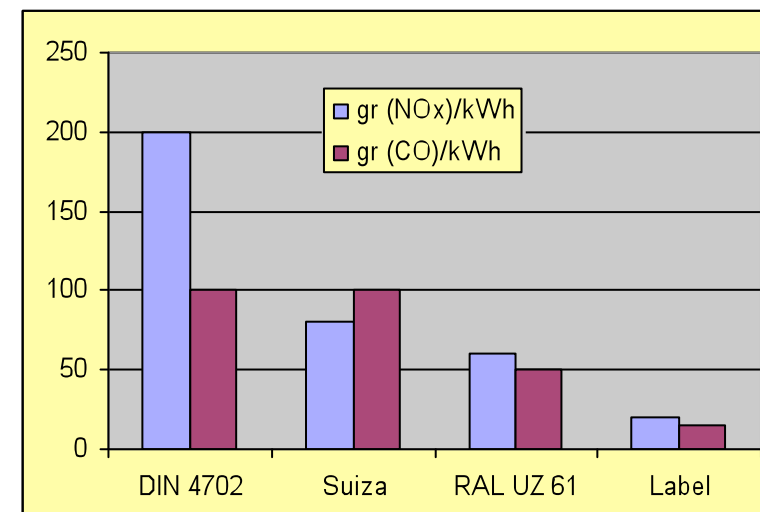
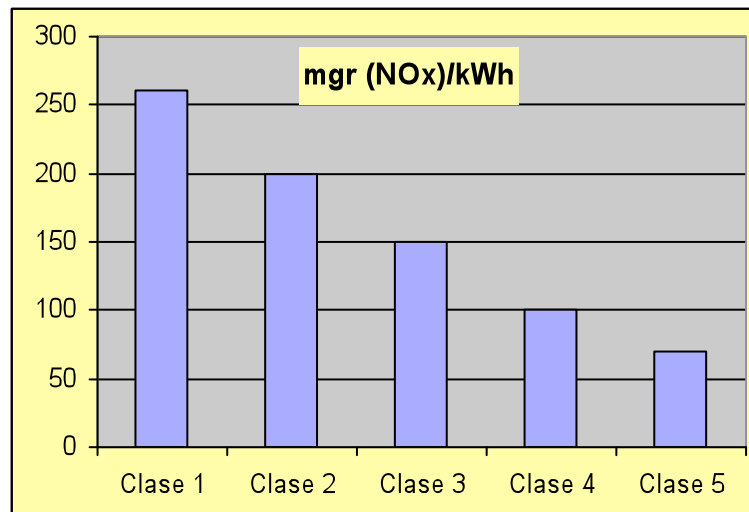
	Gas Natural	Propano	Butano
T^a adiabática (°C)	1.940	1.998	1.900

T^a real de llama: es entre 200 y 300°C inferior a la adiabática

2.- Propiedades de la Combustión (IX)

El N_2 se oxida si la T de la llama es elevada produciendo NO_x

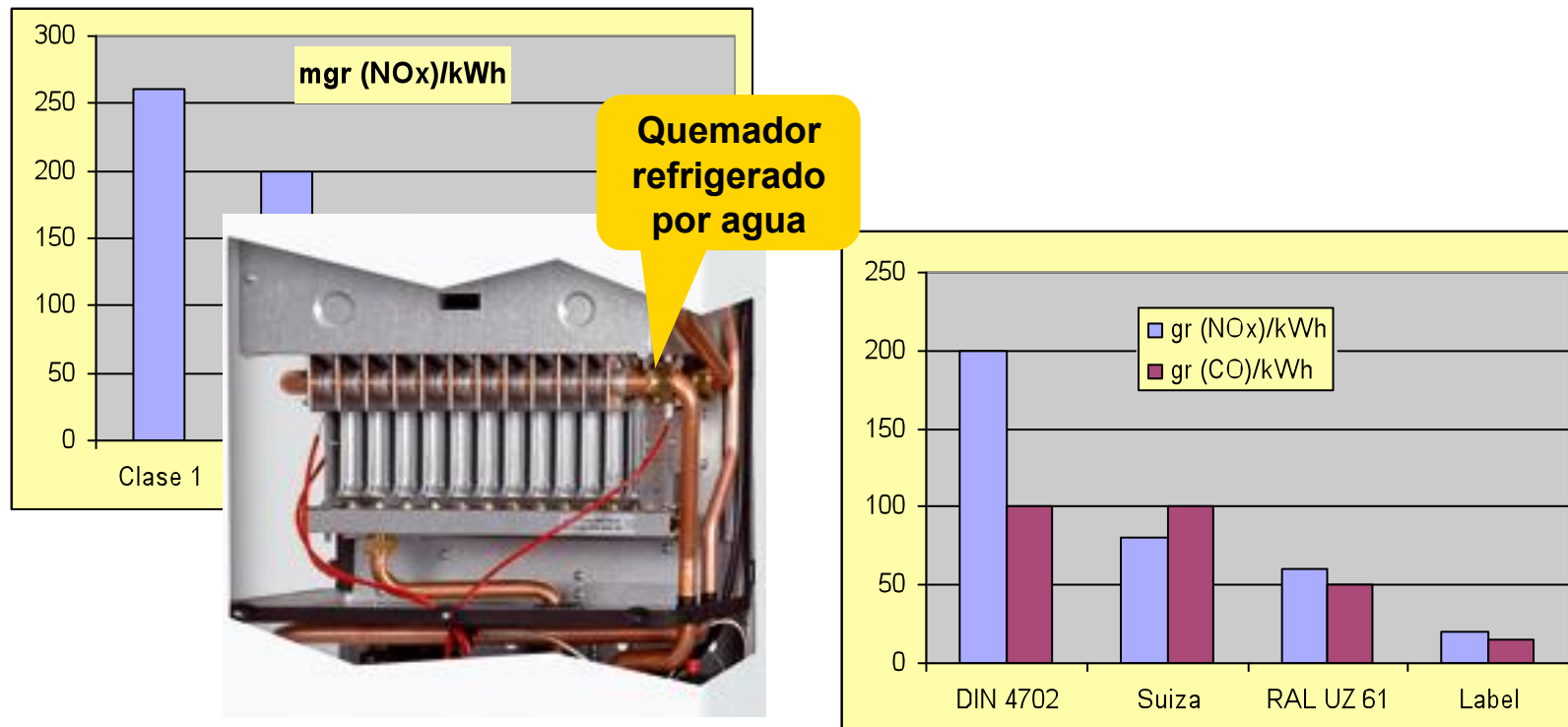
La **llama Azul** no produce emisiones de NO_x



2.- Propiedades de la Combustión (IX)

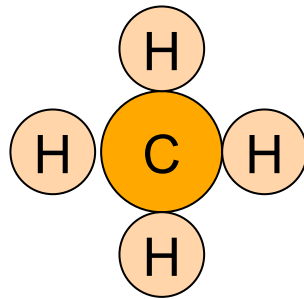
El N_2 se oxida si la T de la llama es elevada produciendo NO_x

La **llama Azul** no produce emisiones de NO_x

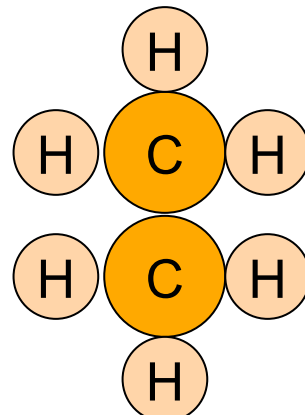


3.- Combustibles (I)

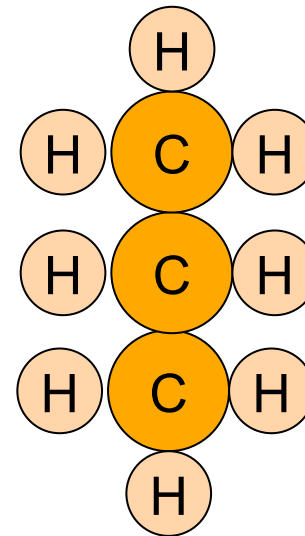
Son compuestos de CARBONO e HIDROGENO (Hidrocarburos)



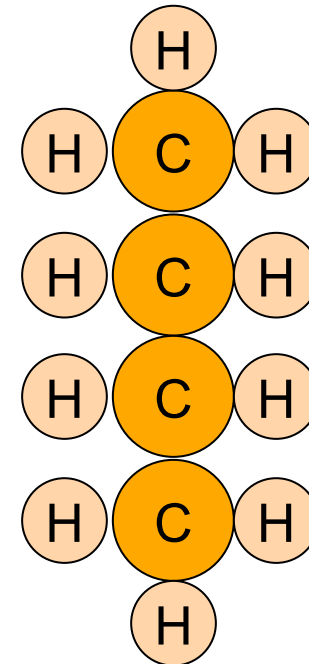
Metano



Etano



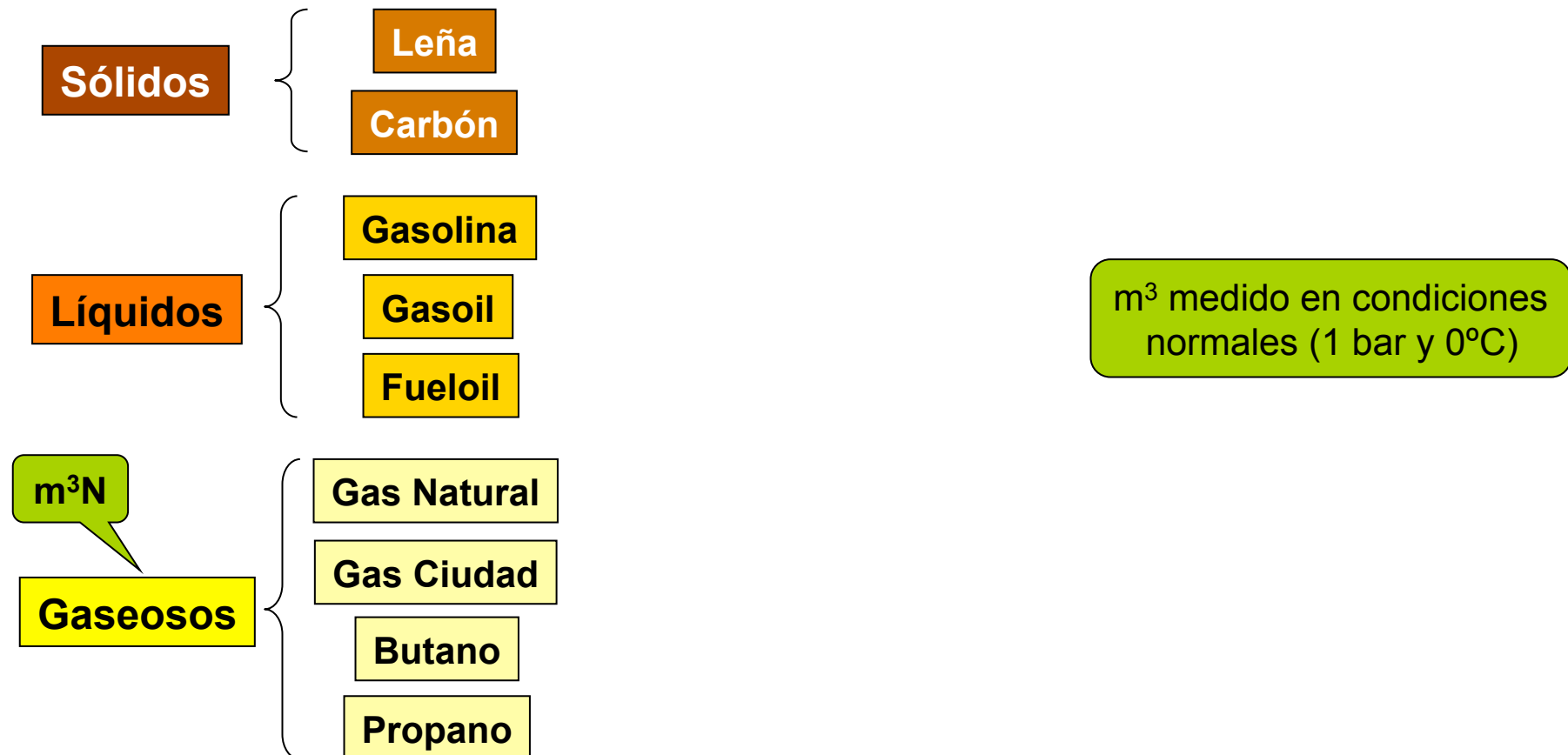
Propano



Butano

3.- Combustibles (II)

Los combustibles *se clasifican en*: sólidos, líquidos y gases.





3.- Combustibles (III)

Propiedades de los combustibles (I):

- **Potencia o poder calorífico**; el superior y el inferior
- **Poder comburívoro**
- **Índice de aireación**
- **Poder Fumígeno**; el seco y el húmedo
- **Inflamabilidad**; límites inferior y superior
- **Punto de rocío**; húmedo y ácido
- **Tª de Inflamación**
- **Tª de Llama**
- **Velocidad de propagación de la llama**: en un frente gaseoso

3.- Combustibles (IV)

Propiedades de los combustibles (II)

– **Indice Wobbe**; (combustibles gaseosos), es el cociente entre el PCS y la raíz cuadrada de la densidad relativa respecto del aire (MJ/m³)

$$W = \frac{P.C.S.}{\sqrt{D_R}}$$

Familia A:
Gases manufacturados

Gases obtenidos de naftas, coquería y aires metanados
W entre 5.300 y 7.500 kcal/Nm³
PCS alrededor de 4.200 kcal/Nm³ } **Ligero**

Familia B:
Gas Natural (Metano)

Gases obtenidos directamente de pozos de extracción
W entre 9.800 y 13.800 kcal/Nm³
PCS entre 8.500 y 11.500 kcal/Nm³. } **Ligero**

Familia C:
G.L.P. (Propano y Butano)

Fracciones ligeras del petróleo
W entre 19.800 y 21.900 kcal/Nm³
PCS entre 25.200 y 31.200 kcal/Nm³ } **Pesados**

3.- Combustibles (V)

La composición y propiedades de los **combustibles gaseosos** son:

(%)	Gas Natural	Propano	Butano
Metano (%)	89	0	0
Etano (%)	5	0,5	0,5
Propano (%)	2,5	87,5	9
Butano (%)	1	5,5	59,5
Isobutano (%)	0	6,5	31

PCS (kWh/Nm ³)	~12	~25,6	~32,9
Densidad relativa	Ligero ~0,62	Pesado ~1,5	Pesado ~2
Licuefacción	Seco		
Toxicidad	No tóxico, inodoro e incoloro		
Odorizantes	THT	Mercaptanos	
g CO ₂ /kWh	174,3	233,2	239

3.- Combustibles (VI)

Los **combustibles sólidos**, importan el carbono fijo, la humedad, las cenizas y las materias volátiles; mala mezcla con el aire, ensucian superficies

Los **combustibles líquidos**, fueloleo ($\uparrow S_2$), y gasóleo C

Distribución en camiones cisterna y almacenamiento en un depósito central, alcanzando la caldera por una red de tuberías

Los **combustibles gaseosos**, butano, propano, gas natural

Composición variable, y el suministro puede ser por medio de canalizaciones a alta baja o media presión, con depósitos fijos o con depósitos móviles (bombonas); necesitan vaporización

	Unidad	PCS kW h/kg	Propano	Butano	GN	Gas-oil C	Gas-oil C
			kg	kg	Nm ³	litro	kg
Propano	kg	13,837 kWh / kg	1	1,008	1,17	1,295	1,126
Butano	kg	13,72 kWh / kg	0,99	1	1,16	1,28	1,14
GN	Nm ³	11,8 kWh / Nm ³	0,85	0,86	1	1,1	0,98
Gas-oil C	Litro	10,68 kWh / kg	0,77	0,778	0,905	1	0,887
Gas-oil C	kg	12,03 kWh / kg	0,869	0,876	1,01	1,126	1

4.- Termodinámica de la Combustión (I)

$$\text{P.C.I.} = \text{P.C.S.} - 2500 m_{\text{H}_2\text{O}}$$

Sólidos y Líquidos

$$\text{PCI} = 34.040 m_{\text{C}} + 101.700 m_{\text{H}} + 6.280 m_{\text{N}} + 19.090 m_{\text{S}} - 9.840 m_{\text{O}} - 2.510 m_{\text{H}_2\text{O}} \quad [\text{kJ/kg}]$$

$m \Rightarrow$ tanto por 1 en masa

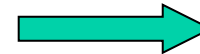
Gases

$$\text{PCI} = 12.640 r_{\text{CO}} + 10.760 r_{\text{H}} + 35.800 r_{\text{CH}_4} + 64.350 r_{\text{C}_2\text{H}_6} \quad [\text{kJ/m}^3\text{N}]$$

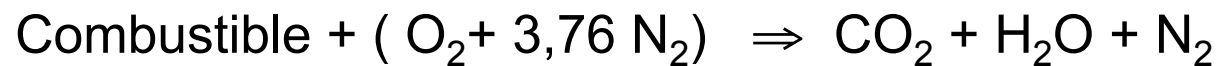
$r \Rightarrow$ fracción molar

4.- Termodinámica de la Combustión (II)

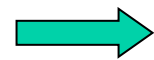
Reacción Estequiométrica o Teórica



$$Z_s = \frac{\text{kg}_{\text{aire}}}{\text{kg}_{\text{combustible}}}$$



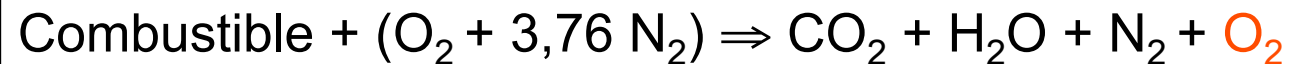
Reacción Real



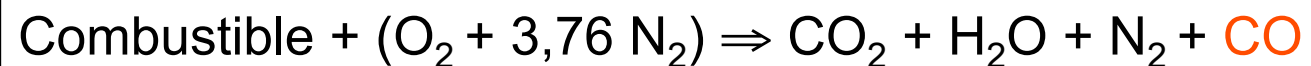
$$Z = \frac{\text{kg}_{\text{aire}}}{\text{kg}_{\text{combustible}}}$$

$$\lambda = \frac{Z}{Z_s} \begin{cases} \lambda > 1 \Rightarrow \text{exceso de aire} \\ \lambda < 1 \Rightarrow \text{defecto de aire} \end{cases}$$

➤ $\lambda > 1$



➤ $\lambda < 1$



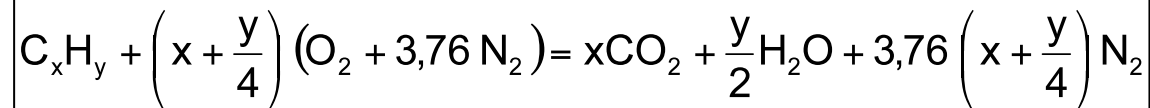
Si el combustible contiene azufre en los PdC hay SO_2

4.- Termodinámica de la Combustión (III)

Para un Hidrocarburo (C_xH_y)

Reacción Estequiométrica

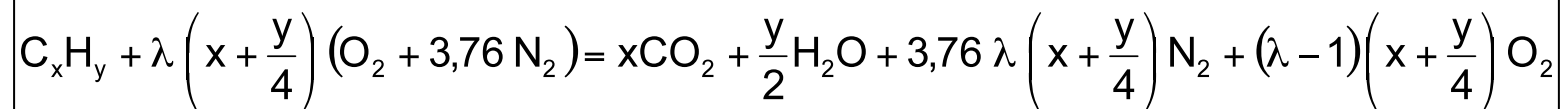
$$Z_s = \frac{4,76 \left(x + \frac{y}{4} \right) 28,96}{12x + y}$$



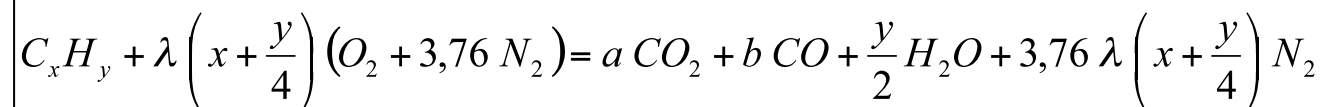
Reacción Real

$$Z = \frac{4,76 \lambda \left(x + \frac{y}{4} \right) 28,96}{12x + y}$$

➤ $\lambda > 1$



➤ $\lambda < 1$ $a + b = x$



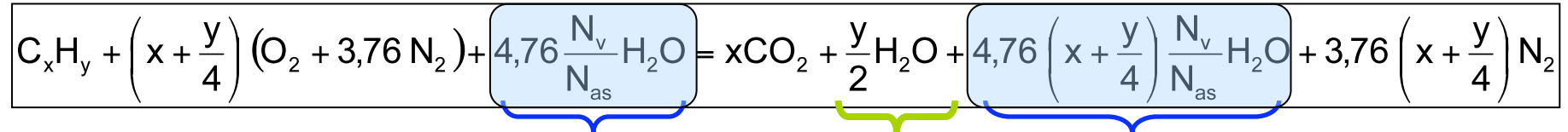
$$a = x(2\lambda - 1) + \frac{y}{2}(\lambda - 1)$$

$$b = 3x + \frac{y}{2} - \lambda \left(2x + \frac{y}{2} \right)$$

4.- Termodinámica de la Combustión (IV)

Influencia de la Humedad del Aire

Combustión completa



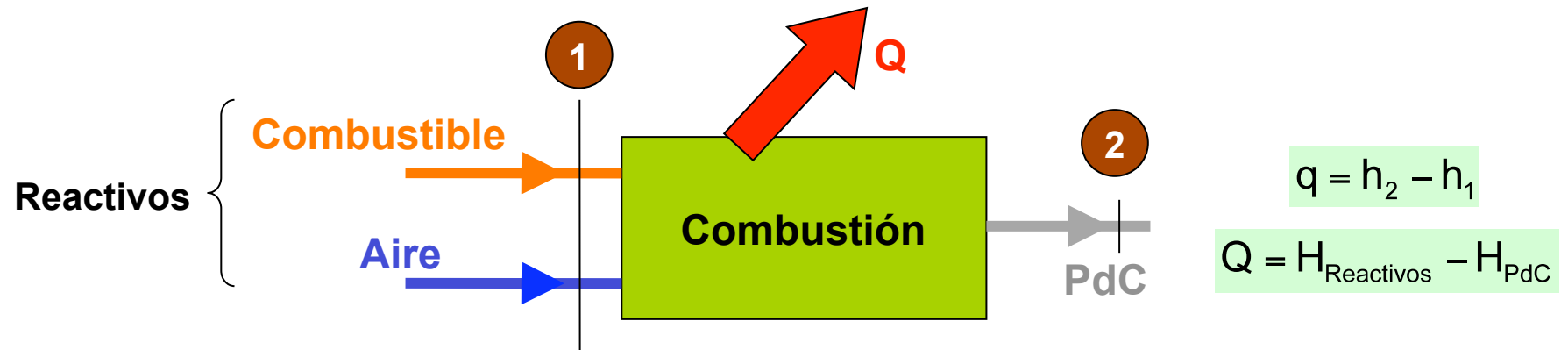
$$\frac{N_v}{N_{as}} = \frac{m_v}{m_a} \frac{M_{as}}{M_v} = \left| \omega = \frac{m_v}{m_a} \frac{\text{kg}}{\text{kg a.s.}} \right| = \omega \frac{M_{as}}{M_v} = \omega \frac{28,96 \text{ moles}}{18 \text{ moles a.s.}}$$

Humedad por H₂
del combustible

Humedad Por
H₂ del aire

4.- Termodinámica de la Combustión (IV)

Combustión Completa en Régimen Estacionario



$$H_{\text{Reactivos}} = N_{\text{combustible}} h_{\text{combustible}} + N_{\text{O}_2} h_{\text{O}_2} + N_{\text{N}_2} h_{\text{N}_2}$$

$$H_{\text{PdC}} = N_{\text{CO}_2} h_{\text{CO}_2} + N_{\text{H}_2\text{O}} h_{\text{H}_2\text{O}} + N_{\text{N}_2} h_{\text{N}_2}$$

**Se resuelve por kmol de combustible
($N_{\text{combustible}} = 1 \text{ kmol}$)**

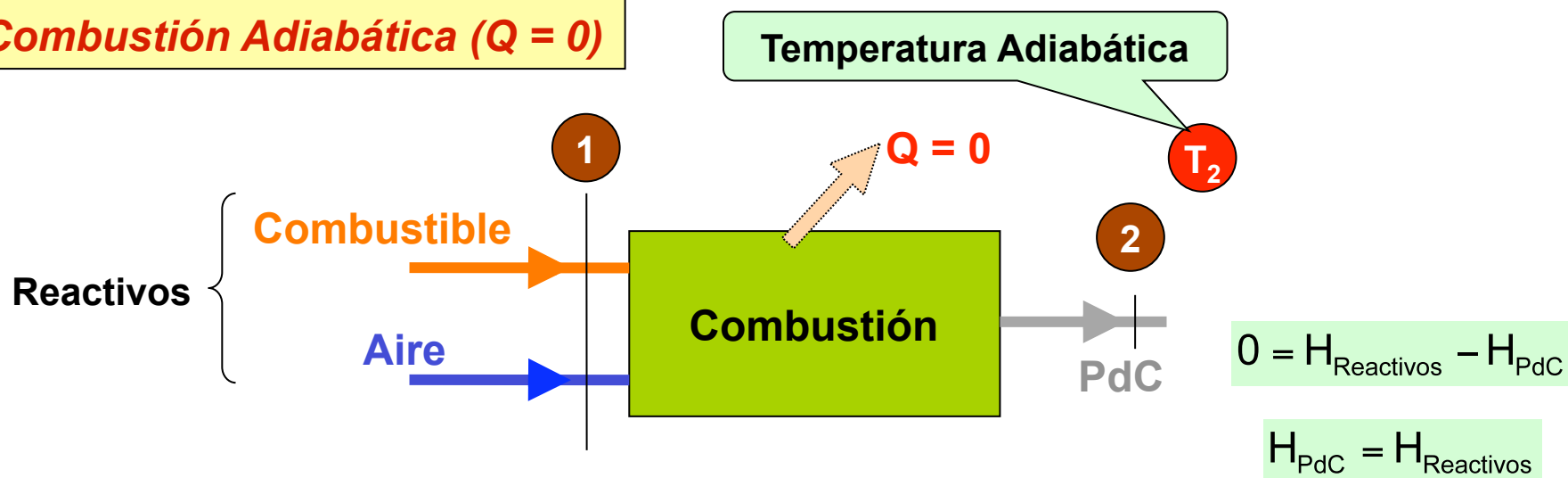
4.- Termodinámica de la Combustión (V)

Entalpía de los Gases de Combustión

T	O ₂	N ₂	CO ₂	Vapor H ₂ O
K	kJ/kmol	kJ/kmol	kJ/kmol	kJ/kmol
298	0	0	-393.520	-241.820
400	3.028	2.972	-389.513	-238.365
600	9.249	8.895	-380.605	-231.316
800	15.838	15.045	-370.707	-223.820
1.000	22.701	21.459	-360.118	-215.830
1.200	29.758	28.110	-349.041	-207.323
1.400	36.956	34.941	-337.617	-198.342
1.600	44.269	41.913	-325.947	-188.933
1.800	51.679	48.992	-314.084	-179.157
2.000	59.189	56.156	-302.078	-169.065
2.200	66.792	63.380	-289.951	-158.712
2.400	74.484	70.661	-277.737	-148.139

4.- Termodinámica de la Combustión (VI)

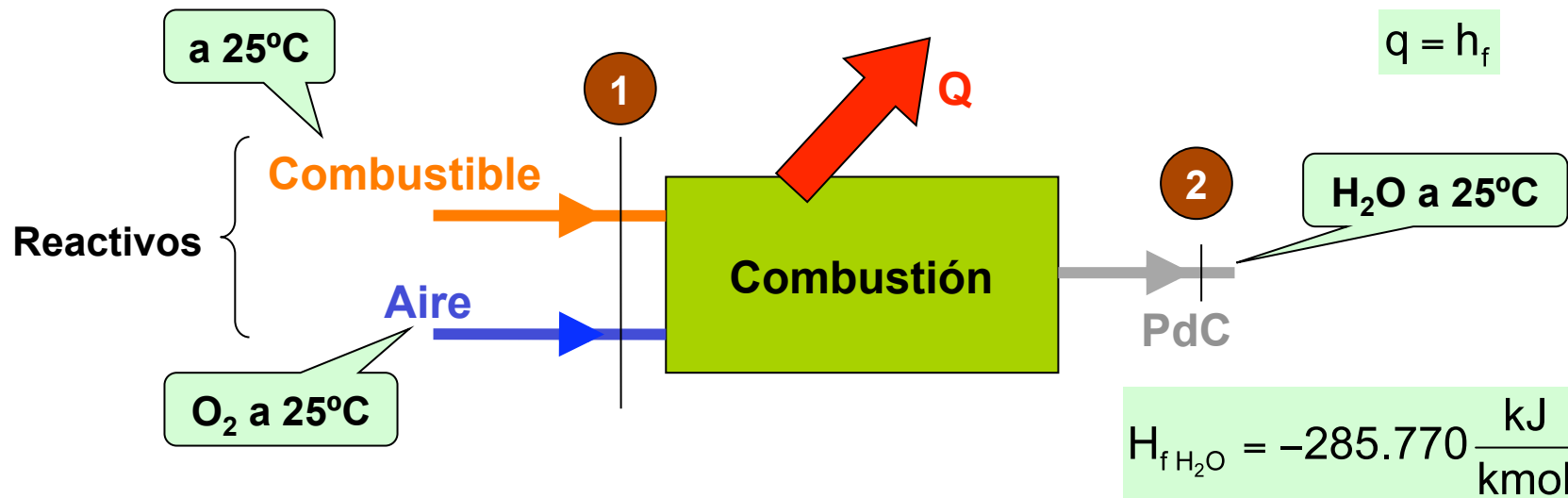
Combustión Adiabática ($Q = 0$)



4.- Termodinámica de la Combustión (VII)

Entalpía de Formación

Cambio de energía relacionado con la formación de un compuesto, a partir de sus elementos, en condiciones de referencia estándar



4.- Termodinámica de la Combustión (VII)

Entalpía de Formación

Cambio de energía relacionado con la formación de un compuesto, a partir de sus elementos, en condiciones de referencia estándar

a 25°C

q = h_f

Sustancia 25°C	Formula	Estado	h _f (kJ/kmol)
Dióxido de carbono	CO ₂	gas	-393.520
Vapor de agua	H ₂ O	gas	-241.820
Metano	CH ₄	gas	-74.870
Etano	C ₂ H ₆	gas	-84.670
Propano	C ₃ H ₈	gas	-103.840
Butano	C ₄ H ₁₀	gas	-126.140
Heptano	C ₇ H ₁₆	líquido	-224.390
Octano	C ₈ H ₁₈	líquido	-249.950
Oxígeno	O ₂	gas	0
Nitrógeno	N ₂	gas	0

Reactivos

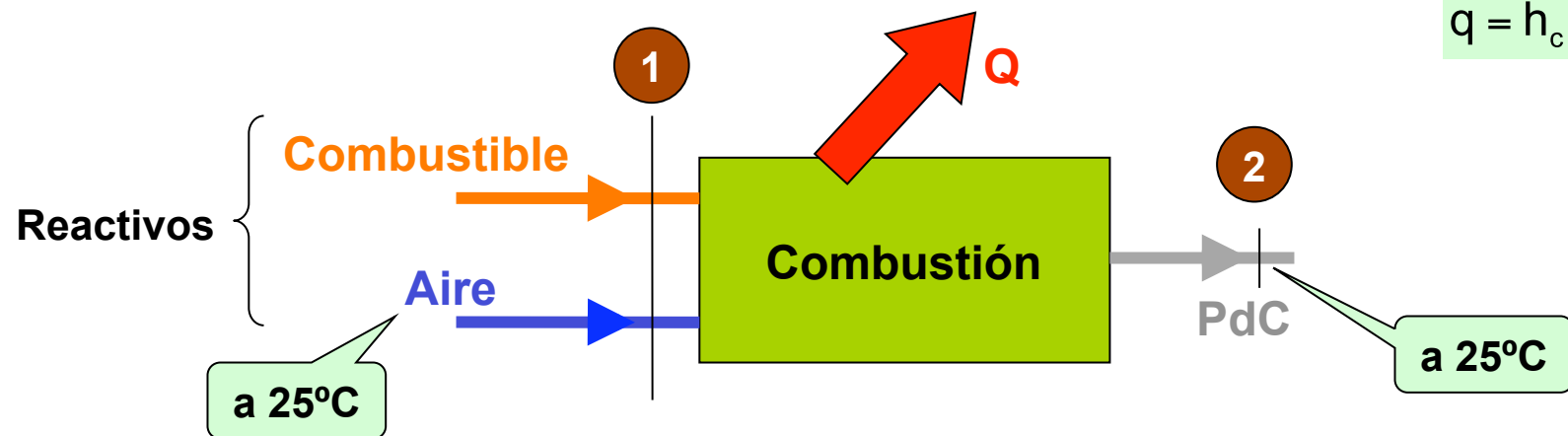
H₂O a 25°C

35.770 $\frac{\text{kJ}}{\text{kmol}}$

4.- Termodinámica de la Combustión (VIII)

Entalpía de Combustión

Cantidad de energía térmica liberada durante un proceso de combustión a presión constante



$$H_{\text{Reactivos}} = N_{\text{combustible}} h_{\text{combustible}} + N_{\text{O}_2} h_{f \text{O}_2} + N_{\text{N}_2} h_{f \text{N}_2}$$

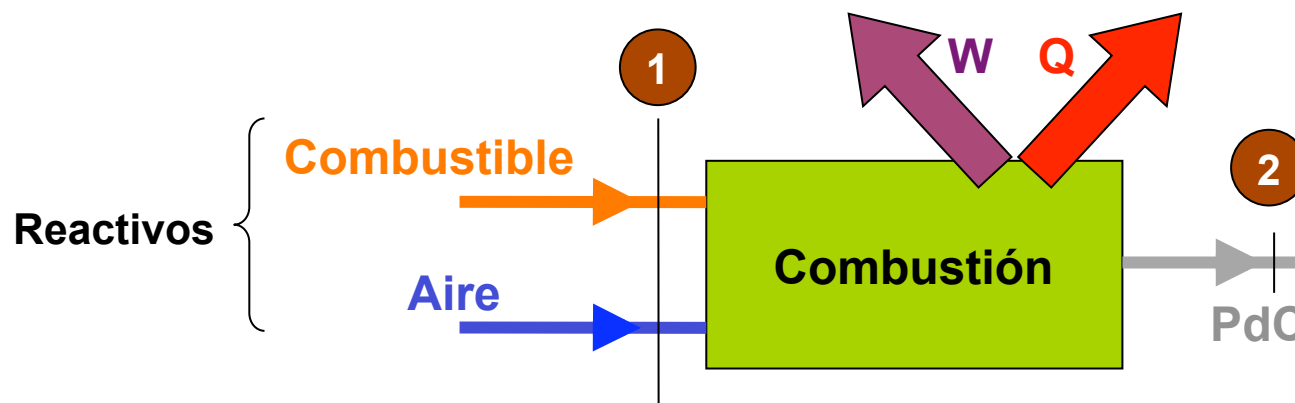
$$H_{\text{PdC}} = N_{\text{CO}_2} h_{f \text{CO}_2} + N_{\text{H}_2\text{O}} h_{f \text{H}_2\text{O}} + N_{\text{N}_2} h_{f \text{N}_2}$$

Se resuelve por kmol de combustible
($N_{\text{combustible}} = 1 \text{ kmol}$)

$$H_c = H_{\text{Reactivos}} - H_{\text{PdC}} = N_{\text{combustible}} h_{\text{combustible}} - N_{\text{CO}_2} h_{f \text{CO}_2} - N_{\text{H}_2\text{O}} h_{f \text{H}_2\text{O}}$$

4.- Termodinámica de la Combustión (IX)

Balance de Energía en un Motor de Combustión Interna



Ecuación de la Energía:

$$Q \text{ [kW]} = \left(N_{\text{comb}} \left[\frac{\text{kmol}_{\text{comb}}}{\text{s}} \right] (h_{\text{Reactivos}} - h_{\text{PdC}}) \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kmol}_{\text{comb}}} \right] \right) + W \text{ [kW]}$$



4.- Termodinámica de la Combustión (X)

Eliminación de Contaminantes en la Combustión

NO_x

- Introducción de vapor de agua
- Adición de NH₃
- Aminorando la T^a de la parte más caliente de la llama
- Reduciendo el % de oxígeno en el centro de la llama
- Acortando el tiempo de operación del combustible

SO_x

- Adición de lechada de cal
- Adición de piedra caliza

Partículas en suspensión

- Ciclones
- Filtros de mangas
- Filtros electrostáticos