

Tema 1.– Mezclas reactivas y combustión

1. El proceso de combustión

- Características generales
- Combustibles
- Comburentes
- Productos de combustión

2. Balance de materia: estequiometría

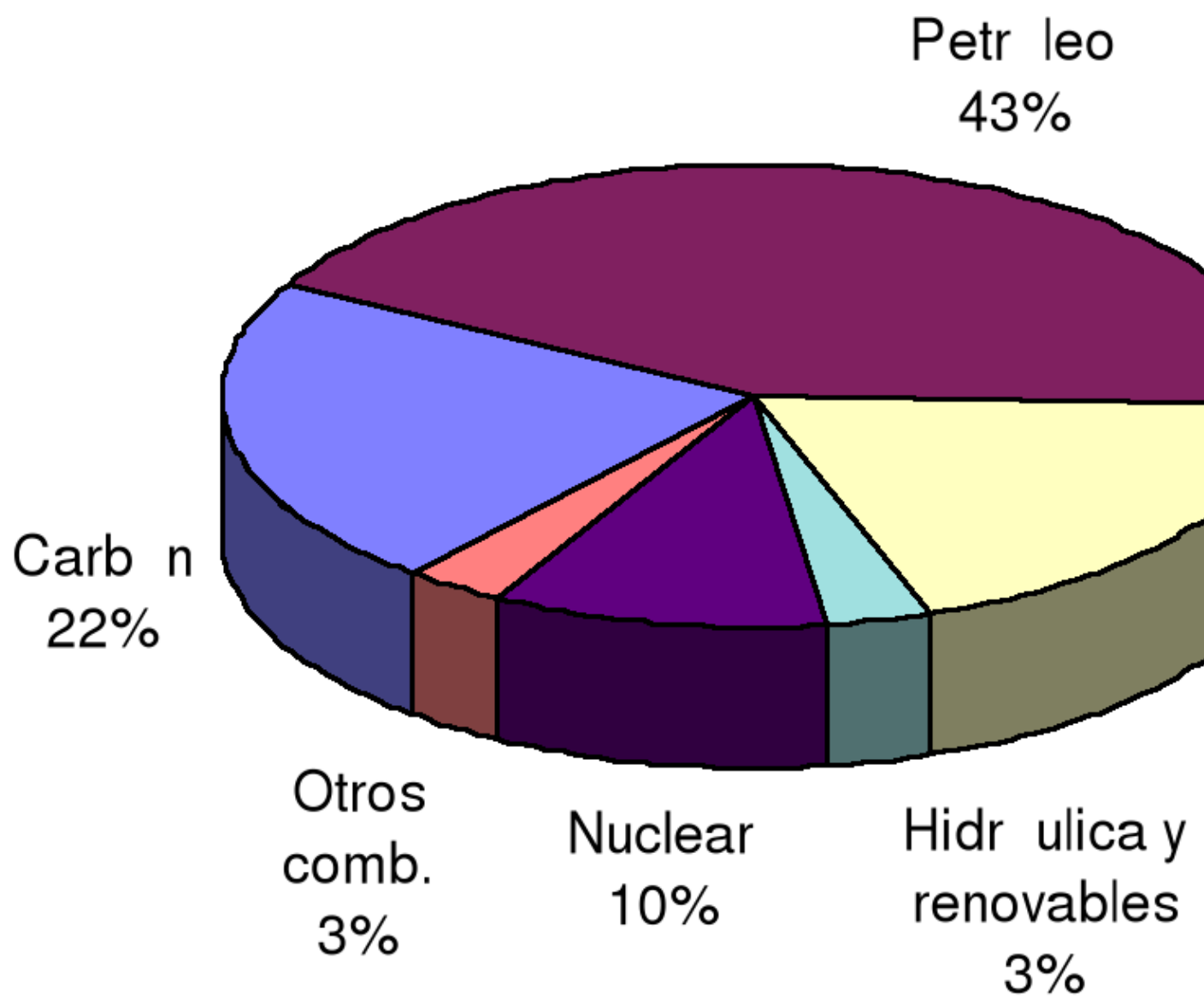
3. Combustión en régimen estacionario

4. Combustión a volumen constante

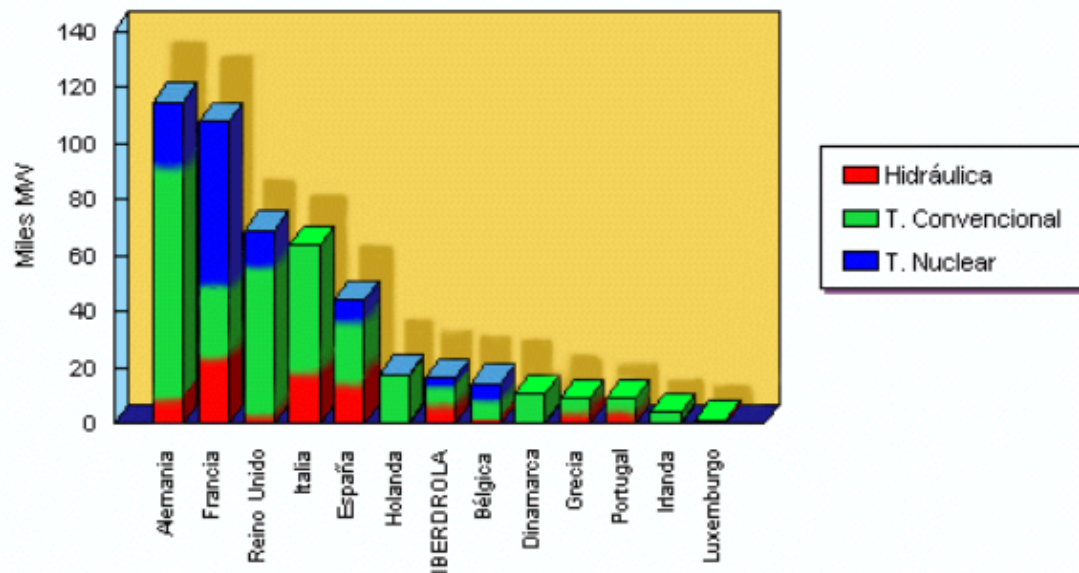
1. El proceso de combustión

- Reacción química exotérmica automantenida por conducción de calor y difusión de especies.
- El proceso térmico de mayor interés práctico por su escala de utilización mundial
- Muy fácil de realizar
- Genera mucha entropía: su viabilidad (tendencia) es muy alta.
- Muy difícil de estudiar
- Producción mundial de **energía**: petróleo, carbón y gas natural
- 1975 96 %
- 1985 90 %
- 1995 ~ 80 %
- Combustión incontrolada (incendios)
- Combustión controlada (incineración): prevención de la contaminación

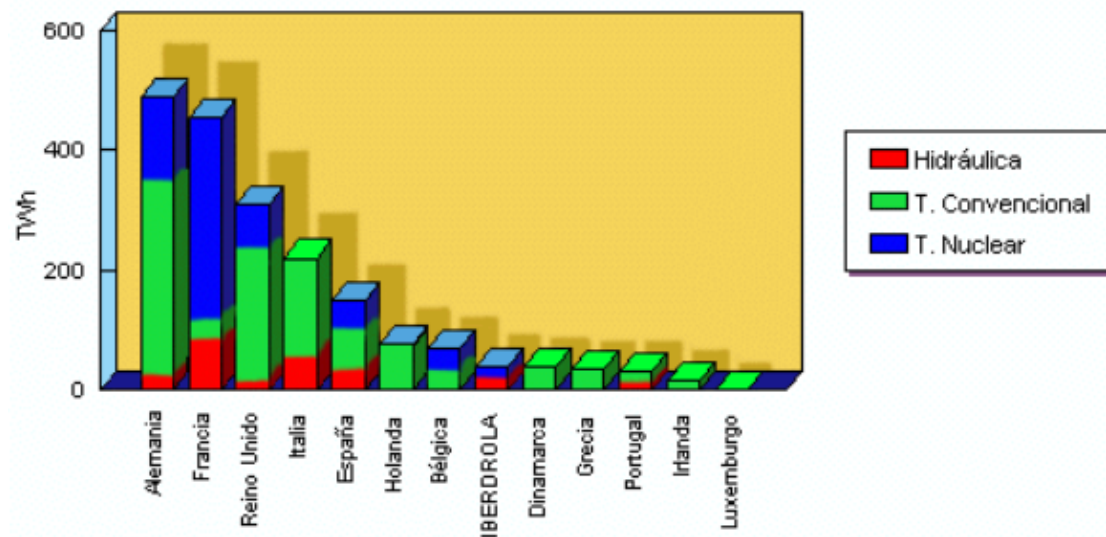
Consumo de energía final. Países OCDE (1991)



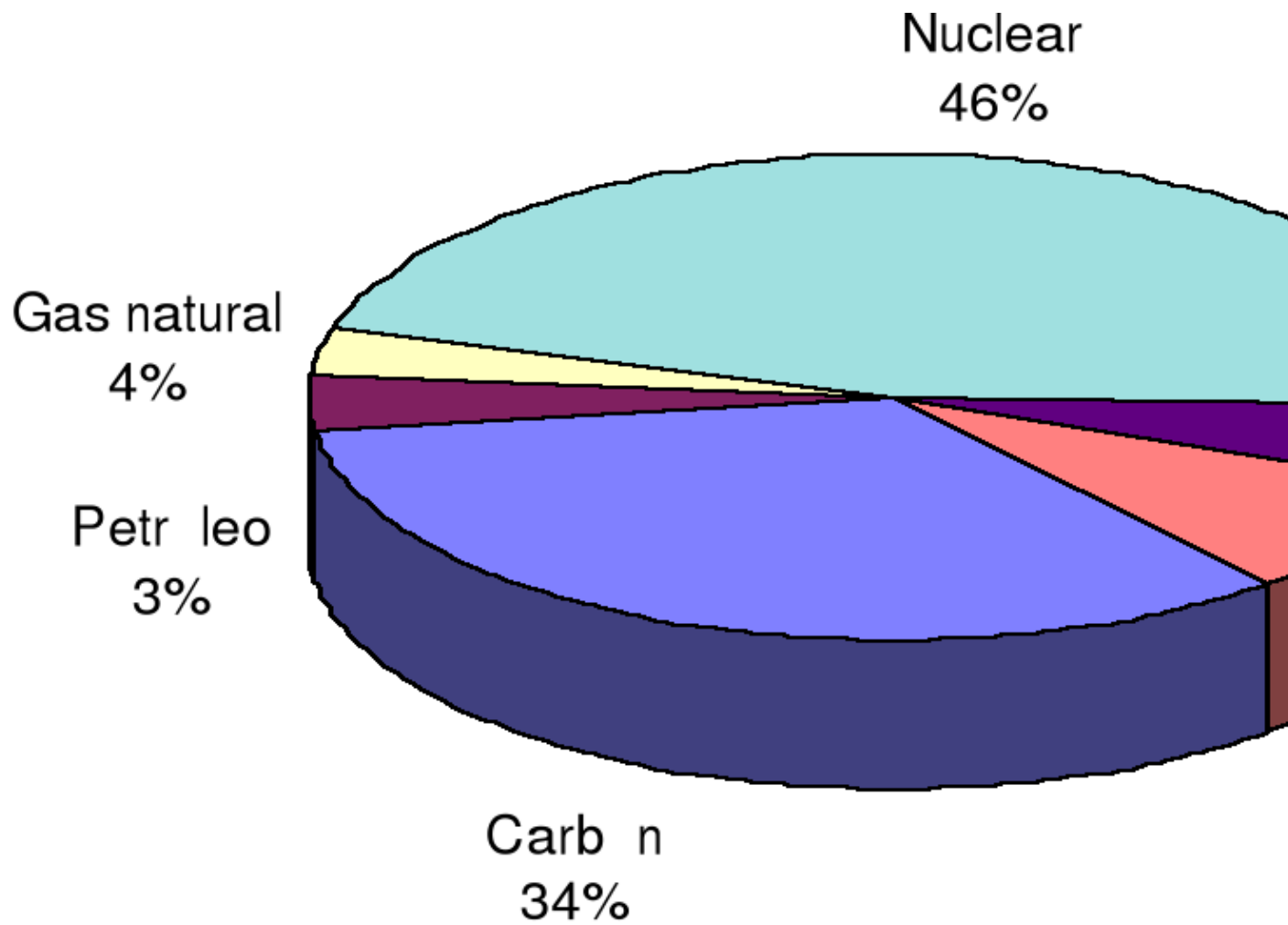
Potencia instalada en la UE (1994)



Producción neta de energía primaria en la UE (1994)



Producción de energía primaria en España (1992)



Reacción de combustión

- Reacción de combustión:

Combustible + Comburente =

Productos de combustión

Combustibles

- Cualquier reacción natural se puede automantener, bajo ciertas condiciones de contorno (P, T, composición, catalizadores), generando energía térmica y especies activas a alta velocidad.
- Mayoría de reacciones de combustión: combustibles fósiles + oxígeno del aire

Combustibles especiales (cohetes)

- Líquidos
 - $H_2(l) + O_2(l)$
 - Queroseno + $O_2(l)$
 - Dimetilhidracina $[NH_2-N(CH_3)_2] + N_2O_4$
- Sólidos

- Perclorato amónico (NH_4ClO_4)
- Pólvora (NaNO_3 ó $\text{KNO}_3 + \text{S} + \text{C}$)
- No detonan, aunque les atraviese una onda de choque

Combustibles comerciales

- Naturales o primarios
- Sólidos
 - Carbón, madera, biomasa
 - Muchos metales (caro, sólo para destellos)
 - Uranio (en sentido amplio)
- Líquidos
- Petróleo y derivados (gasolina, gasóleo, fuelóleo)
- Gases
 - Gas natural (H_2 , C_1 , C_2)
 - GLP (C_3 – C_5)
- Artificiales o secundarios
- Sólidos
 - Coque (destilado de hulla)
 - Carbón vegetal (destilado de madera a $\sim 250^\circ\text{C}$):

Madera + calor ®

carbón vegetal + licores piroleñosos + gas + alquitrán

- Aglomerado de hulla (ladrillos de aglomerado de menudos de hulla con brea)
- Biomasa residual (basura y desagües urbanos, estiércol, paja, panochas, etc.)
- Líquidos
 - Alcoholes (destilados de la biomasa)
 - Aceites de nafta y benzol (destilados de petróleo)
- Gaseosos
- Destilados de madera (900°C):

Madera + $1/3 \text{ Ot } \text{CO} + \text{H}_2$ (gas pobre)

- Destilados de la hulla:

Gas de aire (CO)

Gas de agua o gas ciudad antiguo ($\text{CO} + \text{H}_2$)

- Destilados de naftas de petróleo (gas ciudad moderno: $\text{H}_2 + \text{CH}_4$)
- Futuro: H_2 por descomposición térmica de agua a $T > 2500 \text{ K}$

No vale la energía solar (400 K) ni fisión nuclear (1500 K)

Propiedades de los combustibles

- Composición (y contenido de impurezas)
- Entalpía estándar de reacción (poder calorífico)
- Densidad, viscosidad y coef. de dilatación (para el almacenamiento y transporte)
- Entalpía de vaporización (conviene que sea baja)
- Presión de vapor (que sea alta para no gasificar artificialmente)
- Límites de ignición (por chispa), autoinflamación y extinción
- Toxicidad
- Compatibilidad con otros materiales (tubos, juntas, válvulas, bombas, etc.)

Propiedades de combustibles (cont.)

- Carbones
- Granulometría
- Contenido en humedad y cenizas
- Fuelóleo
- se debe precalentar para que fluya bien y se atomice mejor
- GLP (propano C_3 , butano C_4 , pentano C_5)
- Depósitos a presión (caro)
- $r > r_{\text{aire}}$: ventilación de seguridad
- Uso limpio, no contamina
- Gas natural (metano CH_4 , etano C_2 , hidrógeno H_2)
- Depósitos criogénicos (incómodo de almacenar)
- Canalización (gran coste de infraestructura)

Composición del aire (comburente)

Aire	% en volumen		% en peso	
	Real	Uso	Real	Uso
Nitrógeno	78,03	79	75,45	76,8
Oxígeno	20,99	21	23,20	23,2
Argón	0,94	0	1,30	0
CO_2	0,03	0	0,05	0
Otros	0,01	0	desprec.	0
Peso molecular (kg/kmol)			28,967	29

Productos de combustión

- Mayoritario:

C ® CO₂

H ® H₂O

- Combustión incompleta:

C ® CO

- Otros elementos:

N ® N₂ (a T-: NO, NO₂, N₂O₄, N₂O₅, = NO_x)

S ® SO₂ (® SO₃ ® H₂SO₄, lluvia ácida)

2. Estequiometría (balance de materia)

- Siempre en moles:
- H₂ + 1/2 O₂ ® H₂O
- 1 kmol H₂ + 0,5 kmol O₂ ® 1 kmol H₂O
- Pesos moleculares:
- M (H₂) = 2 kg/kmol
- M (O₂) = 32 kg/kmol
- M (H₂O) = 18 kg/kmol
- 2 kg H₂ + 16 kg O₂ ® 18 kg H₂O
-

Reacción teórica

- Combustión total, pasando todo el C a CO₂ y H a H₂O
- C₈H₁₈ + a (O₂ + 3,76 N₂) ® b CO₂ + c H₂O + d N₂
- Ajuste: con balances individuales (C, H, O, N,)
- Ecuación química estequiométrica:
- C₈H₁₈ + 12,5 (O₂ + 3,76 N₂) ® 8 CO₂ + 9 H₂O + 47 N₂

Reacción real

- $a.[\text{CuHvOwNxSy}] + b.[\text{O}_2] + 3,76b.[\text{N}_2] + c.[\text{humedad}] + d.[\text{impurezas}] = e.[\text{CO}_2] + f.[\text{H}_2\text{O}] + g.[\text{O}_2] + h.[\text{H}_2] + i.[\text{CO}] + j.[\text{SO}_2] + k.[\text{NO}] + l.[\text{NO}_2] + m.[\text{cenizas}] + a.PCI$
- [CuHvOwNxSy] es 1 mol de materia combustible (compuesto o mezcla), o 1 kg
- Suele tomarse:
- $a = 1$ (por mol de combustible), o bien
- $e + f + g + h + i + j + k + l = 1$ (por mol de productos gaseosos)
- Carbón: ~5 % de humedad, ~10 % de cenizas

Parámetros estequiometría

- AF: relación másica aire/combustible
- AFteo: relación másica aire/combustible teórica
- AF: relación molar aire/combustible
- AFteo: relación molar aire/combustible teórica

Parámetros estequiometría (cont.)

- $l = \text{aire real} / \text{aire teórico} = AF / AF_t$
- Aire en exceso:

$$X = (\text{aire real} / \text{aire teórico}) - 1 = l - 1$$

- Dosado relativo:

$$f = \text{comb. real} / \text{comb. teórico} = AF_t / AF = 1/l$$

$f < 1$: mezcla pobre

$f > 1$: mezcla rica

3. Combustión en rég. estacionario

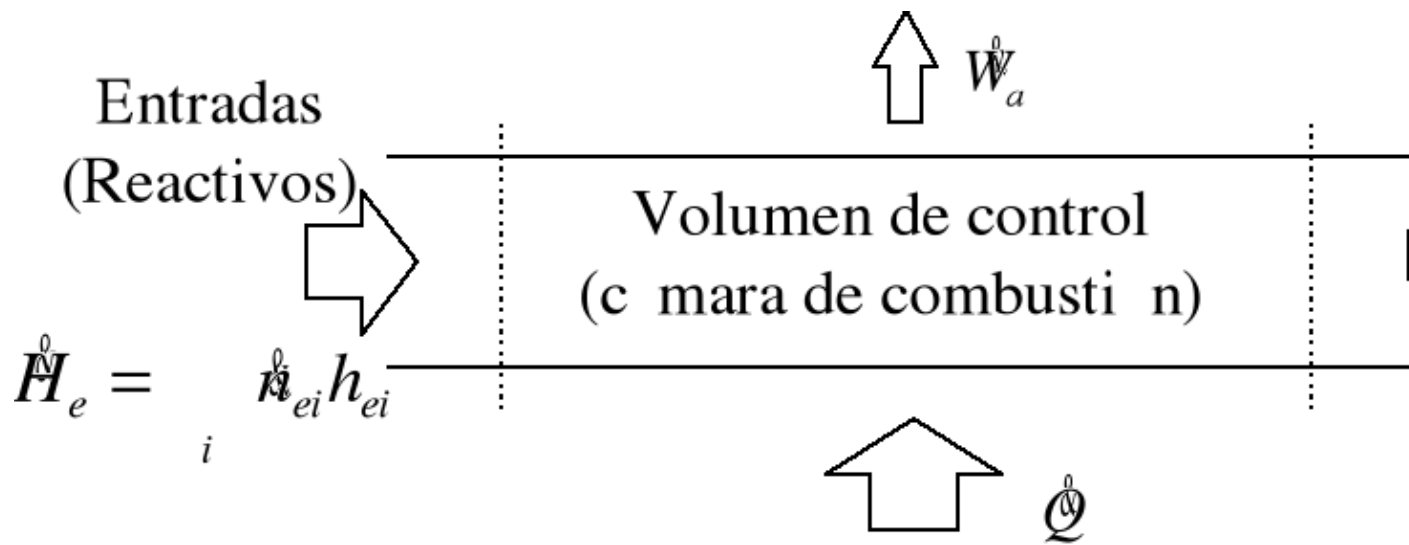
3.1 Primer Principio

- Calor de reacción
- Calor de reacción estándar
- Calor de formación estándar
- Calor de combustión. PCS, PCI
- Balance general de energía en reacción química

3.2 Temperatura adiabática de llama

3.3 Segundo Principio

3.1 Primer Principio



$$\dot{Q} - \dot{W}_a = \sum_j \dot{m}_{sj} h_{sj} - \sum_i \dot{m}_{ei} h_{ei} \quad [\text{J / s} = \text{W}]$$