

Motores de Combustión Interna

Universidad Carlos III de Madrid

Capítulo 2: Termoquímica

Ejemplos y actividades propuestas

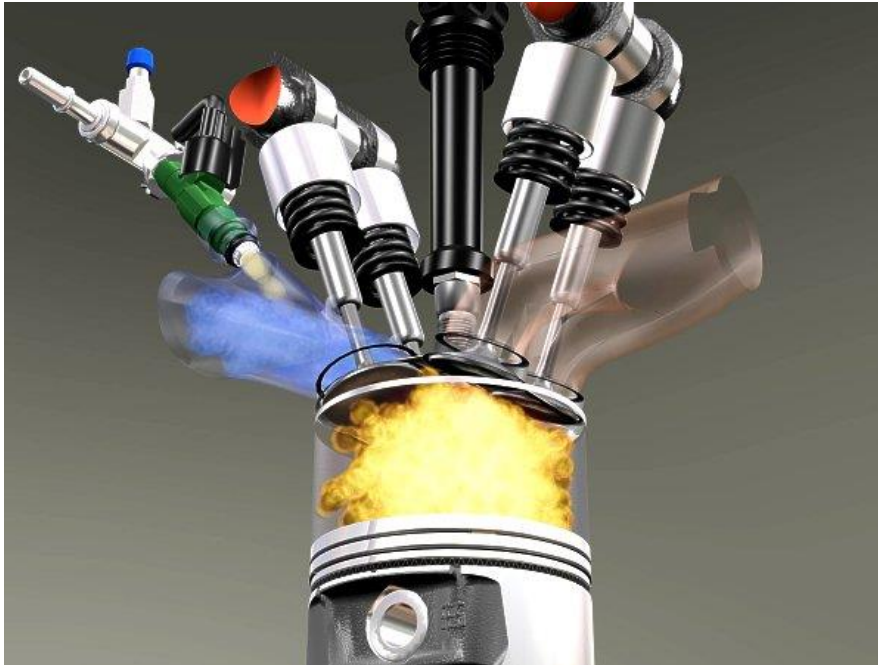


Fig. 2.1.- MEP con inyección en colector. Gentileza de General Motors-Opel. El color de la llama no es real.

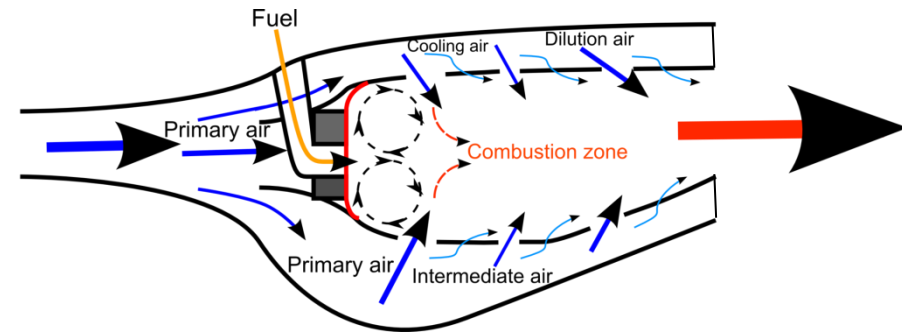


Fig. 2.2.- Cámara de combustión continua de una turbina de gas. La combustión es próxima a la estequiométrica en las proximidades del inyector, diluyéndose progresivamente corriente abajo con el aire secundario y de dilución para limitar la temperatura y lograr completar la combustión, resultando globalmente pobre a la salida. Este aire periférico refrigera las paredes. La pared exterior soporta la presión y la interior soporta la temperatura. [Fuente:](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Combustor_diagram_airflow.png#mediaviewer/File:Combustor_diagram_airflow.png) "Combustor diagram airflow" by SidewinderX - Own work. Licensed under CC BY-SA 3.0 via Wikimedia Commons - http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Combustor_diagram_airflow.png#mediaviewer/File:Combustor_diagram_airflow.png

La información contenida en este trabajo sirve de propósito exclusivo para la enseñanza y la de procedencia externa ha sido obtenida de las mejores fuentes que se han podido encontrar, generalmente de reconocido prestigio. No obstante los autores no garantizan la exactitud, actualización, disponibilidad o perfección de su contenido ni se responsabilizan del mismo. Por ello, no será/n responsable/s de cualquier error, omisión o daño causado por el uso de la información contenida, no tratando con este documento prestar ninguna clase de servicio profesional o técnico; antes bien, se ofrece como simple guía general de apoyo a la docencia. Cualquier indicación de error u omisión será bienvenida. El contenido del documento pudiera estar sujeto a derechos de autor o de propiedad industrial o intelectual, por lo que su reproducción total o parcial queda prohibida.

Capítulo 2: Termoquímica ([Volver](#))

5. Poder calorífico de la cilindrada L_{im} . *Ex cursus*

Actividad propuesta: Obtener L_{im} y $L_{im,c}$ para combustibles habituales con $F_R = 1$. Puede usarse la [Tabla A.I.1](#) y los datos de la [Tabla A.III.1](#). Resultado:

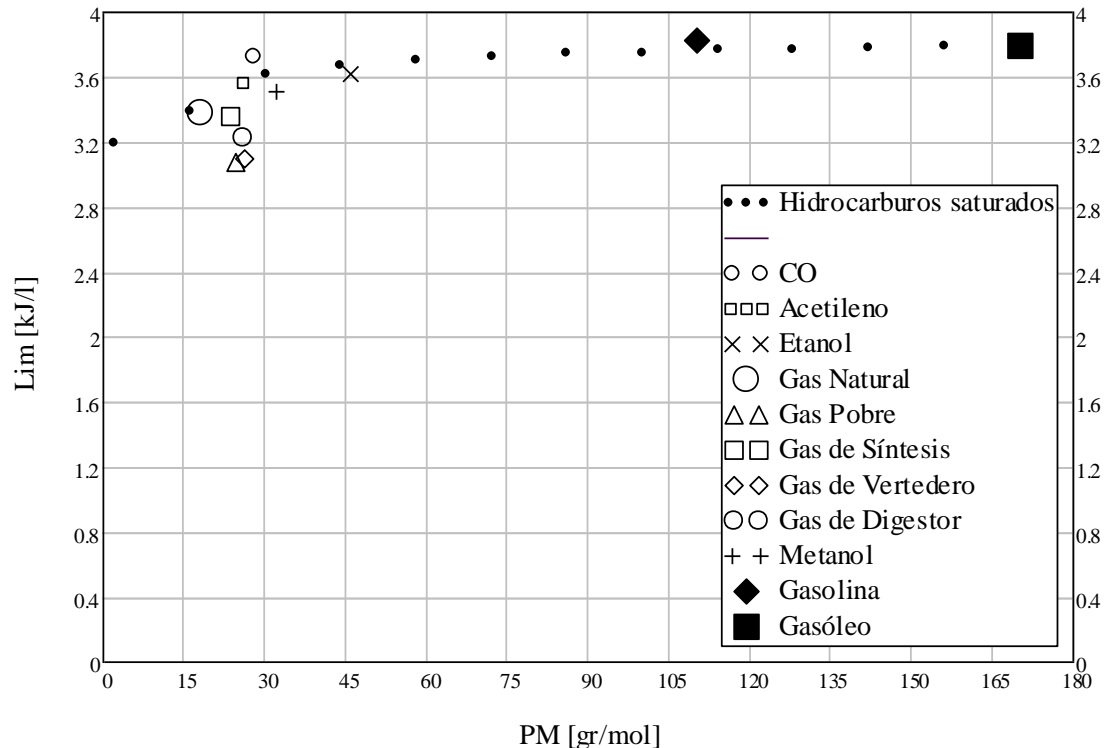


Fig. 2.7.- Poder calorífico de una mezcla estequiométrica de aire y distintos combustibles en estado gaseoso a 1 atm y 0 °C, como función del peso molecular del combustible.

6. Rendimiento de combustión. *Demostración ex cursus* ([Volver](#))

Ejercicio.- En un motor Diésel alimentado con gasóleo A, el resultado de una análisis de gases de escape en caliente (para evitar la condensación de HCs y del agua) indica $x_{CO} = 1.000$ ppmv; $x_{HC} = 800$ ppmv, equivalente a heptano y de la medición de opacidad de los humos se deduce un $x_C = 2.500$ ppmv. De acuerdo a la [Fig. 2.5](#), asuma

$$\varpi = 0,25 \frac{121,6 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \cdot 2 \frac{\text{g}}{\text{mol}}}{10,1 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \cdot 28 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} = 0,22 \text{ e ignore el efecto de los } \text{NO}_x. F_R = 0,8.$$

Solución.- Dada la baja fracción molar de los contaminantes, la aproximación de combustión completa es aceptable. De la [Ec. \(2.20 y 21\)](#) y de la [Tabla A.II.1](#) se tiene:

$$N_p \approx N_{p,cp} = \frac{h}{4} + \left(c + \frac{h}{4} \right) \frac{1}{F_R} \frac{100}{21} = \frac{18,7}{4} + \left(10,8 + \frac{18,7}{4} \right) \frac{1}{0,8} \frac{100}{21} = 96,8 \frac{\text{mol}}{\text{mol}_{\text{comb}}}$$

$$\eta_c = 1 - N_p \frac{x_{CO} L_{i,CO} PM_{CO} (1 + \varpi) + x_{HC} L_{i,HC} + x_C L_{i,C} PM_C}{L_i PM_{comb}}$$

$$\eta_c = 1 - 96,8 \frac{\text{mol}}{\text{mol}_{\text{comb}}} \frac{10^{-3} \times 10,1 \frac{\text{kJ}}{\text{g}} 28 \frac{\text{g}}{\text{mol}} (1,22) + 0,8 \times 10^{-3} \times 44,9 \frac{\text{kJ}}{\text{g}} 100 \frac{\text{g}}{\text{mol}} + 2,5 \times 10^{-3} \times 32,8 \frac{\text{kJ}}{\text{g}} 12 \frac{\text{g}}{\text{mol}}}{45,5 \frac{\text{kJ}}{\text{g}} (10,8 \times 2 + 18,7 \times 12) \frac{\text{g}}{\text{mol}_{\text{comb}}}} = 0,96$$

Capítulo 2: Termoquímica ([Volver](#))

8. Actividades propuestas

Para casa:

- Existe un Avance al Encendido [AE](#) o a la inyección [AI](#) para tener en cuenta que la combustión, tanto en MEP como en MEC toma un tiempo. El ángulo de cigüeñal que ocupa la combustión suele repartirse por igual entre antes y después del [PMS](#). Exprese cuál cree que es la hipótesis más adecuada para modelar de forma simplificada la combustión en un MCI, $p = \text{cte.}$ o $V = \text{cte.}$ u otra. Opine sobre el trabajo que los gases realizan sobre el émbolo durante la combustión.
- Compruebe un punto de composición y de temperatura adiabática de la llama de las figuras de los apuntes con el cálculo realizado con [STANJAN](#) (necesita emulador MS-DOS) u otro programa similar, disponible en Internet, p. e. [CHEMKIN](#). Otra posibilidad de la [NASA](#).
- Repita para un alcohol la actividad que a continuación se muestra resuelta y de ello deduzca lo diferente que es el dosado estequiométrico de los alcoholes, en comparación con los hidrocarburos, por incorporar oxígeno en su molécula. Descubra si hay diferencias en T_{ad} . Sobre la base de sus poderes caloríficos, razone sobre cual ha de ser el precio de estos combustibles para poder ser competitivos con los productos petrolíferos. Razone sobre los cambios que un MMT ha de incorporar para poder usar alcoholes, o sus mezclas con hidrocarburos.

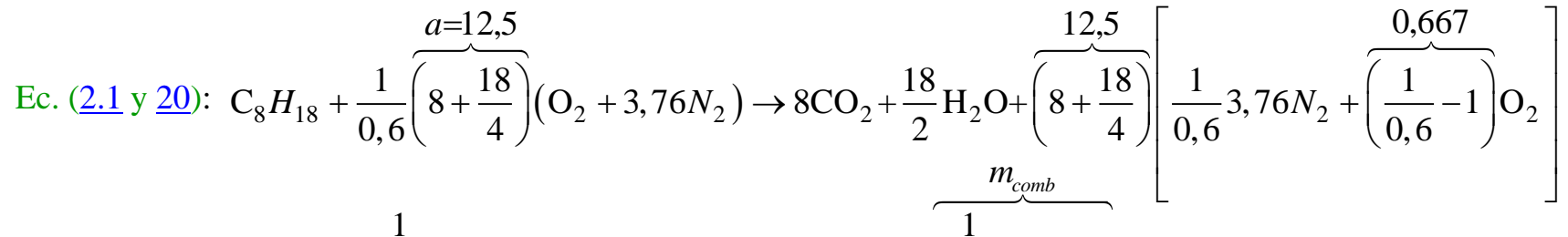
Capítulo 2: Termoquímica ([Volver](#))

8. Actividades propuestas (cont.)

Para clase: Haciendo uso de la Ec. (2.26) y tomando valores representativos de los calores específicos, determine la recta que da la temperatura adiabática de la llama para el octano como función del dosado relativo. Compare con los resultados de la Fig. 2.6.

Solución:

- De la [Tabla A.III.1](#): $L_i = 44,79$ MJ/kg
- La Ec. (2.26) es válida para cuando no hay disociación, luego elegimos en la Fig. 2.6 un dosado cuya temperatura sea no muy superior a 1.500 °C, que puede ser la correspondiente a $F_R = 0,6$; que es 1.700 K para el octano.



$$\text{Ec. (2.2): } F_e = \frac{N_{\text{comb}} PM_{\text{comb}}}{a \left(PM_{\text{O}_2} + \frac{78}{21} PM_{\text{N}_2} + \frac{1}{21} PM_{\text{Ar}} \right)} = \frac{N_a}{\underbrace{\frac{a}{0,21} \left(0,21 PM_{\text{O}_2} + 0,78 PM_{\text{N}_2} + 0,01 PM_{\text{Ar}} \right)}_{PM_a}} = \frac{8 \times 12 + 18 \times 1}{\frac{12,5}{0,21} 28,975} = 0,0661$$

$(m_a)_e$

Capítulo 2: Termoquímica ([Volver](#))

8. Actividades propuestas (cont.)

$$N_r = 1 + \frac{a}{F_R} \left(\frac{100}{21} \right) = 1 + \frac{12,5}{0,6} \left(\frac{100}{21} \right) = 100 \text{ moles}$$

$$F = F_R F_e = 0,6 \times 0,0661 = 0,0397 \quad N_p = 8 + 9 + 12,5 \left[3,76 \left(\frac{1}{0,6} \right) + \left(\frac{1}{0,6} - 1 \right) \right] = 103,7 \text{ moles}$$

$$PM_p = \sum_i x_i PM_i = \frac{1}{103,7} \left\{ 8(12 + 32) + 9(2 + 16) + 12,5 \left[3,76 \left(\frac{1}{0,6} \right) 28 + \left(\frac{1}{0,6} - 1 \right) 32 \right] \right\} = 28,68 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$$

Apenas cambia con respecto al PM del aire, que es 28,975 g/mol, por la gran proporción de N_2 .
Tomando una media aritmética para $c_{p,p}$ entre 300 K y 1.600 K, en la [Figura A.II.4](#):

$$\widehat{c}_{p,p} = \sum_i x_i \widehat{c}_{pi} = x_{CO_2} \widehat{c}_{pCO_2} + x_{H_2O} \widehat{c}_{pH_2O} + x_{N_2} \widehat{c}_{pN_2} + x_{O_2} \widehat{c}_{pO_2} =$$

$$= \frac{1}{103,7} \left(8 \times \overset{\text{Fig. A.II.4}}{6,5} + 9 \times \overset{\text{Fig. A.II.4}}{4,9} + 12,5 \left[3,76 \left(\frac{1}{0,6} \right) \overset{\text{Fig. A.II.4}}{4,2} + \left(\frac{1}{0,6} - 1 \right) \overset{\text{Fig. A.II.4}}{3,8} \right] \right) \overset{8,3143 \frac{\text{J}}{\text{mol K}}}{R} = 36,6 \frac{\text{J}}{\text{mol K}}$$

$$\bar{c}_{p,p} = \frac{\widehat{c}_{p,p}}{PM_p} = \frac{36,6}{28,68} = 1,28 \frac{\text{J}}{\text{g K}}$$

Ligeramente > el del aire a causa de los [triatómicos](#)

$$T_{ad,cp} = T_r + \frac{F}{1+F} \frac{L_i}{\bar{c}_{p,p}} = 298 \text{ K} + \frac{0,0397}{1,0397} \frac{44,79 \text{ kJ/g}}{1,28 \text{ J/gK}} = 1.634 \text{ K} \quad \text{Error inapreciable}$$

Luego, la recta es muy próxima a la curva de la [Figura 4](#) y por arriba.

Anexo II.- Poder calorífico y calorímetros [\(Volver\)](#)

Contribución de la entalpía de formación del combustible

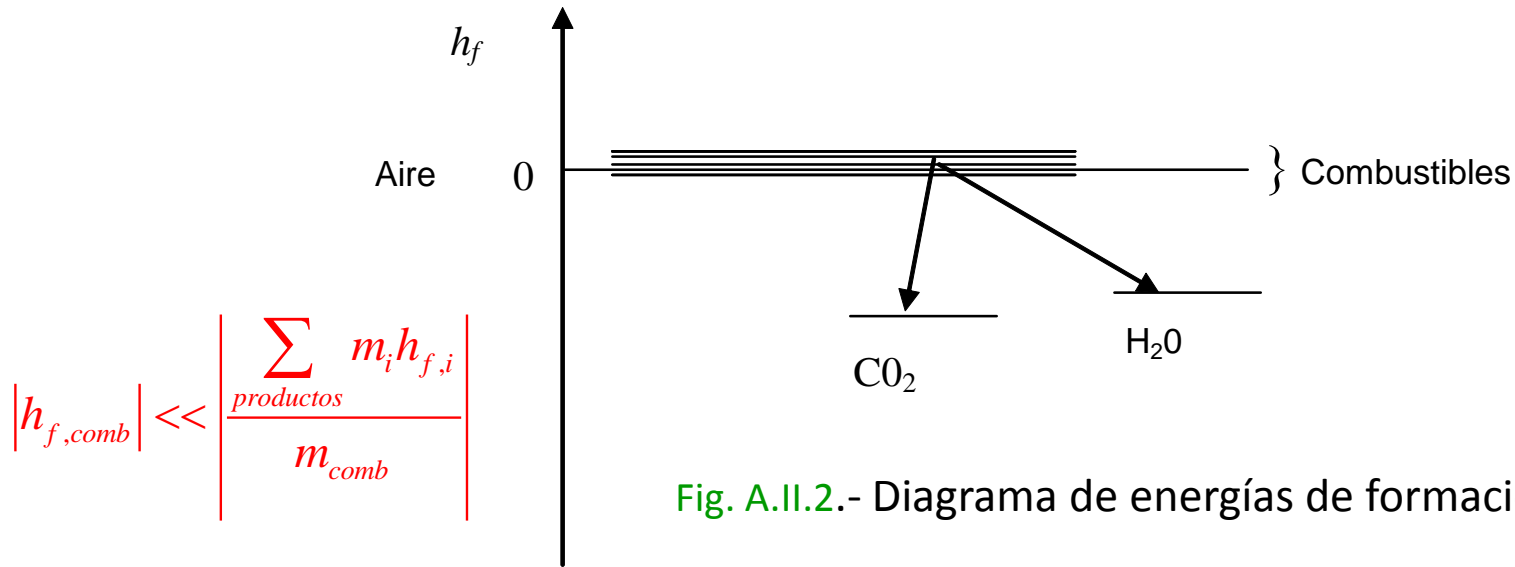


Fig. A.II.2.- Diagrama de energías de formación.

La escasa contribución de la entalpía de formación de los combustibles convencionales (enlaces débiles) hace que se pueda emplear el **análisis elemental** para estimar el poder calorífico. $C_c H_h O_o N_n$. Basta conocer c , h , o y n .

Trabajo en casa propuesto: Determine la expresión del poder calorífico de un combustible genérico $C_c H_h O_o N_n$ basado en las entalpías de formación.

Ejercicio A.II.1.- Estequiometría de la combustión perfecta ([Volver](#))

Enunciado: Calcúlese el dosado estequiométrico del octano (representativo de las gasolinas).

Solución: Octano: $c = 8$, $h = 8 \times 2 + 2 = 18$, fórmula: C_8H_{18}

Ec. (A.IV.1): $PM = 8 \times 12,0115 + 18 \times 1,00797 = 114,235 \text{ g/mol}$

Ec. (2.20): $a = c + h/4 = 8 + 18/4 = 12,5$

Ec. (2.2): $F_e = 114,235 / (12,5 \times 137,92) = 0,066262 = \mathbf{1/15,092}$

- Hacen falta unos 15 gramos de aire por gramo de combustible para la combustión completa, tanto del aire como del combustible.
- Si se repite con el nonano, representativo de los gasóleos ligeros, o para el octeno o el heptano, representativos de las gasolinas, sale un dosado parecido. Esto corrobora que para las distintas gasolinas y gasóleos no es necesario ajustar el equipo de dosificación de combustible del motor, salvo casos especiales.