

## **TEMA 2 - CICLOS CUASI-REALES DE AIRE-COMBUSTIBLE.**

### **1.- Introducción.**

En los motores reales, cuyas condiciones básicas de funcionamiento vienen fijadas por los ciclos ideales, anteriormente vistos, se introducen inevitablemente un conjunto de fenómenos naturales que modifican en gran manera las evoluciones o transformaciones vistas hasta ahora.

Estos fenómenos son:

- a) Fugas.
- b) Combustión progresiva.
- c) Combustión incompleta.
- d) Pérdidas de calor.
- e) Inercia mecánica.
- f) Pérdidas de escape.

En el ámbito térmico las principales causas reseñadas son debidas a:

- 1.- Paso de calor de los gases al refrigerante a través de las paredes metálicas del cilindro y culata.
- 2.- Variabilidad del calor específico de los gases en evolución.
- 3.- Disociación del agua y el dióxido de carbono procedente de la combustión de los hidrocarburos en el interior del cilindro.

La primera de estas causas tiene una gran importancia ya que representa casi un 26 % de la energía suministrada por el combustible, es debida al hecho de que, sin refrigeración, los órganos del motor llegan a adquirir tal temperatura que su funcionamiento se hace imposible.

La segunda causa expuesta, hace que varíe la relación de calores específicos y por tanto varía el coeficiente adiabático, y tanto las líneas de compresión y expansión, así como las temperaturas máximas alcanzadas se alteran sensiblemente, estas últimas a la baja.

La tercera causa, es producida al disociarse el dióxido de carbono cuando se supera la temperatura de 1300°C, durante la combustión (en donde se alcanzan temperaturas entre los 2000 y 2500 °C), y es una reacción netamente endotérmica, por lo que disminuyen las temperaturas máximas teóricas del ciclo. El mismo fenómeno ocurre en el agua cuando alcanza los 900°C.

Un problema derivado de la disociación, es que cuando se produce la expansión, y las temperaturas bajan de los 1300 °C y 900 °C, aparecen nuevos componentes combustibles que combustionan, y hace que los gases a pesar de la refrigeración, sufran un total incremento positivo de calor, y por lo tanto de entropía, y que la expansión en lugar de adiabática, pase a ser una politrópica cuyo exponente medio "n" verifica:

$$1,15 < n < 1,25$$

mientras que el adiabático valía:  $\gamma = 1,39$ .

Durante la compresión, la mezcla fría admitida recibe calor de las paredes en la primera parte de dicho periodo, lo cede después, y el exponente politrópico medio, varía entre:

$$1,33 < n < 1,36$$

A fin de poder tomar en cuenta, al calcular un ciclo, la variabilidad del calor específico y los efectos de la disociación, se han publicado curvas para mezclas de combustible-aire, y para productos de la combustión. (Ver "Internal combustion-engine in theory and practice" de Taylor), mediante los datos de estas curvas podemos construir el ciclo aire-combustible.

## **2.- Combustibles.**

### **2.1.- Clasificación.**

Hay combustibles sólidos, líquidos y gaseosos.

Los combustibles sólidos (pulverizados), se han intentado probar en los motores, pero sin resultado satisfactorios, debido a los residuos postcombustión y la dificultad de transporte, inyección y encendido.

Por otra parte los combustibles gaseosos (gas natural-metano-, gases licuados -butano y propano-, etc) se utilizan casi exclusivamente en instalaciones fijas, en donde exista una red de distribución o en donde se posea grandes volúmenes de almacenamiento.

Los combustibles líquidos son los más utilizados por los motores, a causa de su facilidad de manejo, almacenamiento y su relativamente elevado poder calorífico.

Los combustibles líquidos proceden, prácticamente en su totalidad del petróleo crudo.

La composición media de un petróleo crudo es de un 85 % de carbono, un 12 % de hidrógeno, y un 3 % de azufre, oxígeno, nitrógeno y elementos metálicos.

Está formado por una mezcla muy compleja de varios miles de compuestos químicos en los que predominan los hidrocarburos. Los hay muy ligeros (con pocos C) que vaporizan rápidamente y muy pesados (con muchos C), que necesitan temperaturas elevadas para su vaporización. Esto permite separarlos fácilmente, en torres de destilación fraccionada.

En éstas se calienta el crudo hasta unos 400 °C, lo que provoca la gasificación de todos sus componentes excepto el F.O.; en la parte inferior de la torre la temperatura es de unos 350 °C, y dicha temperatura va decreciendo a medida que subimos por la torre hasta la parte superior donde la temperatura es la del ambiente.

A distintas alturas de la torre son extraídos los distintos productos:

PRODUCTO	Nº CARBONOS	INTERVALO DESTIL.
- Gasóleos.	de 16 a 34	de 220 a 350 °C
- Querosenos.	de 12 a 16	de 180 a 315 °C
- Gasolinas.	de 4 a 12	de 20 a 200 °C
- Butano, propano.	de 1 a 4	de 5 a 20 °C

El fuel-oil puede redestilarse, obteniéndose lubricantes como subproductos: gasóleos pesados, aceites lubricantes, vaselinas, parafinas y como elemento residual alquitrán.

Mediante diversos procedimientos se consiguen, también, moléculas válidas (entre 4 a 12 átomos de carbono) para incluirlas como gasolina, bien sea combinando dos o más moléculas ligeras (polimerización) bien dividiendo moléculas pesadas (craqueo), o mediante otra multitud de otros procedimientos.

### **2.2.- Características de las gasolinas y los gasoleos.**

El queroseno es un combustible adecuado para la aviación y turbinas de gas.

Las gasolinas son bastante volátiles, se gasifican todos sus hidrocarburos a unos 200 °C, los más ligeros lo hacen a temperatura ambiente.

Esta propiedad hace que la gasolina sea el combustible adecuado para los motores Otto.

Los gasóleos por su parte gasifican todos sus hidrocarburos entre los 350 a 400 °C, al ser menos volátiles que la gasolina, no son adecuados para los motores Otto, y son más adecuados para los motores de tipo diesel.

La composición de las distintas gasolinas y gasóleos varían poco, y puede adoptarse, los siguientes valores como valores standard:

#### **GASOLINA:**

CARBONO (C)	85,6 %
HIDROGENO (H)	14,4 %

PODER CALORÍFICO INFERIOR	43134,67 kJ/kg comb.
AIRE MÍNIMO COMBUSTIÓN	14,756 kg aire/kg comb.

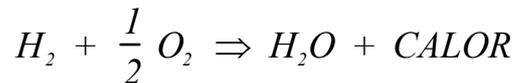
**GASÓLEOS:**

CARBONO (C)	86 %
HIDROGENO (H)	12 %
AZUFRE,OXIGENO,NITROGENO	2 %
PODER CALORÍFICO INFERIOR	41474 kJ/kg comb.
AIRE MÍNIMO COMBUSTIÓN	13,981 kg aire/kg comb.

Se entiende por poder calorífico al contenido de energía del combustible, se definen dos tipos de poder calorífico dependiendo de que se tenga en cuenta el calor de condensación del agua como producto resultante de la combustión (poder calorífico superior), o que no se tenga en cuenta (poder calorífico inferior) que es el que comunmente se utiliza en motores.

**3.- Aire mínimo para la combustión.**

Durante la combustión completa, todo el carbono y el hidrógeno reaccionan con el oxígeno del aire para formar dióxido de carbono y agua en estado de vapor respectivamente, si existe azufre se obtiene dióxido de azufre.



Si C, H, S son masas contenidas en 1 kg de combustible, este necesita la siguiente cantidad de oxígeno:

$$(O_2)_{\min} = \frac{32 \text{ kg } O_2 / \text{ kmol}}{12.011 \text{ kgC} / \text{ kmol}} * C \left( \frac{\text{kgC}}{\text{kgcomb}} \right) + \frac{16 \text{ kg } O_2 / \text{ kmol}}{2.016 \text{ kgH}_2 / \text{ kmol}} * H_2 \left( \frac{\text{kgH}_2}{\text{kgcomb}} \right) + \frac{32}{32.06} S \left( \frac{\text{kg}}{\text{kgcomb}} \right)$$

Como el O<sub>2</sub> se toma del que se encuentra en el aire, y este tiene sus proporciones practicamente constantes (23,2 % de O<sub>2</sub>, 76,8 % de N<sub>2</sub>).

La masa de aire minima para que se produzca la reacción completa (estequiométrica) de combustión, es :

$$Aire_{\min} = 100 \frac{(O_2)_{\min}}{23,2} \left( \frac{\text{kgAire}}{\text{kgcomb}} \right)$$

**2.4.-Dosado y coeficiente de exceso de aire.**

Se denomina "dosado" al cociente entre la masa de combustible y la masa de aire empleada en la combustión.

$$F = \frac{mf}{ma}$$

Un valor también usado es su inversa, que recibe el mismo nombre;

$$A = \frac{ma}{mf}$$

Si empleamos la masa mínima de aire necesaria para la combustión, se obtiene el dosado estequiométrico

$$Ae = \frac{ma_{\min}}{mf}$$

Al cociente entre ambos se le denomina el coeficiente de exceso de aire.

$$\lambda = \frac{A}{Ae} = \frac{ma}{ma_{\min}}$$

Por lo que tendremos tres posibles mezclas, si:

$\lambda > 1$  -> Hablamos de una mezcla pobre (exceso de aire).

$\lambda = 1$  -> Hablamos de una mezcla estequiométrica.

$\lambda < 1$  -> Hablamos de una mezcla rica (defecto de aire).

En las condiciones de consumo óptimo de combustible, los valores de  $\lambda$  en los motores Otto esta entre 1,05 y 1,15(bastante próximo al estequiométrico), en los motores diesel varía entre 1,2 a 1,8 (valor normal 1,4). Este mayor exceso de aire, es para compensar la menor homogeneidad de la mezcla aire-combustible.

Al haber más aire, hay más  $O_2$ , y por tanto aumenta la probabilidad de unión entre éste y los átomos de C e  $H_2$ .

### 2.5.-Componentes de los gases de combustión.

La combustión completa de 1kg de combustible produce como productos, los siguientes números de moles:

Si  $\lambda = 1$

$$n_{CO_2} = \frac{C(\text{kgC}/\text{kgcomb})}{12,011(\text{kgC}/\text{kgmol})} (\text{kmol}/\text{kgcomb})$$

$$n_{H_2O} = \frac{H_2(\text{kgH}_2/\text{kgcomb})}{2,016(\text{kgH}_2/\text{kgmol})} (\text{kmol}/\text{kgcomb})$$

$$n_{N_2} = \frac{ma_{\min}}{28,016} * \frac{\%N_2}{100} = \left( \frac{32}{12,011} C + \frac{16}{2,016} H_2 + \frac{32}{32,06} S \right) * \frac{1}{23,2} * \frac{76,8}{28,016} =$$

$$= 0,3148C + 0,93777H_2 + 0,11794S (\text{kmol}/\text{kgcomb})$$

Si  $\lambda > 1$ , existirá un sobrante de aire, el número de kmoles de aire que sobra, lo podemos calcular por:

$$n_{\text{airesobrante}} = \frac{ma_{\min}(\lambda - 1)}{28,964} = \left( \frac{32}{12,011} C + \frac{16}{2,016} H + \frac{32}{32,06} S \right) * \frac{100}{23,2} * \frac{1}{28,964} (\lambda - 1) =$$

$$= (0,396483 * C + 1,1811 * H + 0,14854 * S) * (\lambda - 1)$$

El total de moles de gases de combustión, es de:

$$n_{\text{total}} = n_{CO_2} + n_{H_2O} + n_{N_2} + n_{\text{aire sobrante}} + \dots$$

Si  $\lambda < 1$ , no sobra aire ( $n_{\text{aire sobrante}} = 0$ ), y por el contrario aparecen nuevos componentes como CO,  $H_2$ , y algún otro en menor cantidad.

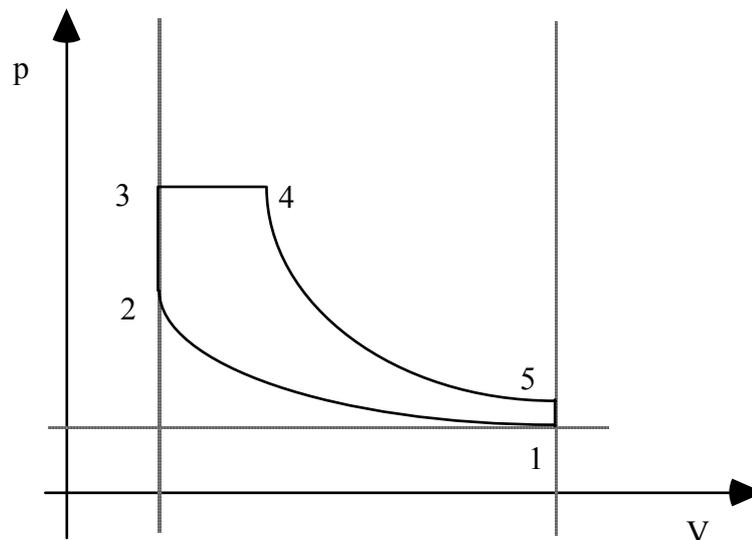
## 2.6.- Cálculo de las capacidades caloríficas, masa molecular y constante de los gases para los gases productos de la combustión.

Tanto las capacidades caloríficas, como la constante de los gases y la masa molecular se consideran propiedades aditivas, por lo que para una determinada cantidad de gases de combustión, se cumplirá:

$$\bar{c}_v^o = \frac{\sum n_i * \bar{c}_{vi}^o}{n_{total}}; \bar{c}_p^o = \frac{\sum n_i * \bar{c}_{pi}^o}{n_{total}}; M_m = \frac{\sum n_i * M_{mi}}{n_{total}}$$

## 3.- Ciclos de aire-combustible.

### 3.1.- Ciclo mixto de aire-combustible.



Si partimos de la composición y características del combustible ( $H_i, \lambda$ ), y de la presión y temperatura al inicio de la compresión, además de la presión máxima alcanzable, podemos analizar los procesos termodinámicos como sigue:

#### a) Compresión (1-2).

-Proceso sólo con aire.

-Proceso se puede considerar adiabático, utilizando un valor medio del coeficiente ( $1,33 < n < 1,35$ ).

-Proceso se puede considerar politrópico con exponente  $n=1,35$ .

La  $T_2$  y  $P_2$  se calcularían por:

$$T_2 = T_1 * \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{n-1} = T_1 * r_{cv}^{n-1}$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^n \Rightarrow P_2 = P_1 * r_{cv}^n$$

#### b) Combustión(2-3).

-Proceso en donde consideramos como componentes los humos.

-El proceso es isocórico.

$$T_3 = T_2 * \frac{P_3}{P_2}$$

#### c) Combustión 3-4(Humos).

-Proceso isobárico

$$\begin{aligned}
 Q &= m_c * H_u = Q_{2-3} + Q_{3-4} \\
 Q_{2-3} &= U_3 - U_2 = \bar{c}v(T_3 - T_2) \Rightarrow \\
 \bar{c}v &= \frac{\sum ni \bar{c}v_i}{n_{total}} \\
 Q_{3-4} &= U_4 - U_3 + p(V_4 - V_3) = \\
 &= U_4 + pV_4 - (U_3 + pV_3) = H_4 - H_3 \\
 Q &= m_c * H_u = U_3 - U_2 + H_4 - H_3 \Rightarrow \\
 H_4 &= m_c * H_u + H_3 - (U_3 - U_2) = m_c * H_u + \bar{R}T_3 + U_2 = \\
 &= m_c H_u + \bar{R}T_3 + \bar{c}vT_2
 \end{aligned}$$

Siendo :

$$\begin{aligned}
 \bar{c}v &= \frac{\sum(n * c_{vi})}{n_t}; \bar{R} = \frac{\sum(n * R_i)}{n_t} \\
 h_4 &= \bar{c}v * T_4 + \bar{R} * T_4 \Rightarrow T_4 = \frac{h_4}{\bar{c}v + \bar{R}} = \frac{h_4}{cp}
 \end{aligned}$$

#### d) La expansión 4-5.

Tenemos dos opciones:

a) Considerarla isoentrópica, operando con una valor medio de  $\gamma$  ( $1,25 < \gamma < 1,3$ ).

b) considerarla politrópica de exponente.

$n=1,3$  (Otto)

$n=1,25$  (Diesel)

$$\begin{aligned}
 T_5 &= T_4 \left(\frac{V_4}{V_5}\right)^{n-1} = T_4 \left(\frac{V_4}{V_3} * \frac{V_3}{V_1}\right)^{n-1} = \\
 &= T_4 \left(\frac{R_v}{r_{cv}}\right)^{n-1} \\
 p_5 &= p_4 \left(\frac{V_4}{V_5}\right)^n \Rightarrow p_5 = p_3 \left(\frac{R_v}{r_{cv}}\right)^n
 \end{aligned}$$

#### e) Rendimiento.

$$\eta_t = \frac{\sum W}{Q_1} = \frac{R(T_4 - T_3) + \frac{R(T_4 - T_5)}{n_{45} - 1} + \frac{R(T_1 - T_2)}{n_{12} - 1}}{m_c * H_u}$$

### 3.2.- Ciclo aire-combustible Otto.

La única variación será en el cálculo del punto 3.

$$U_3 = m_c * H_u + U_2$$

Siendo:

$$U_2 = c_{v_{humos}} * T_2$$

### 3.3.- Ciclo aire-combustible Diesel.

La única variación será en el cálculo del punto 3.

$$\begin{aligned}H_3 &= m_c * H_u + H_2 \\H_2 &= U_2 + p_2 * V_2 = c_{v_{humos}} * T_2 + p_2 * V_2 = \\&= c_{v_{humos}} * T_2 + R_{humos} * T_2 = c_{p_{humos}} * T_2\end{aligned}$$