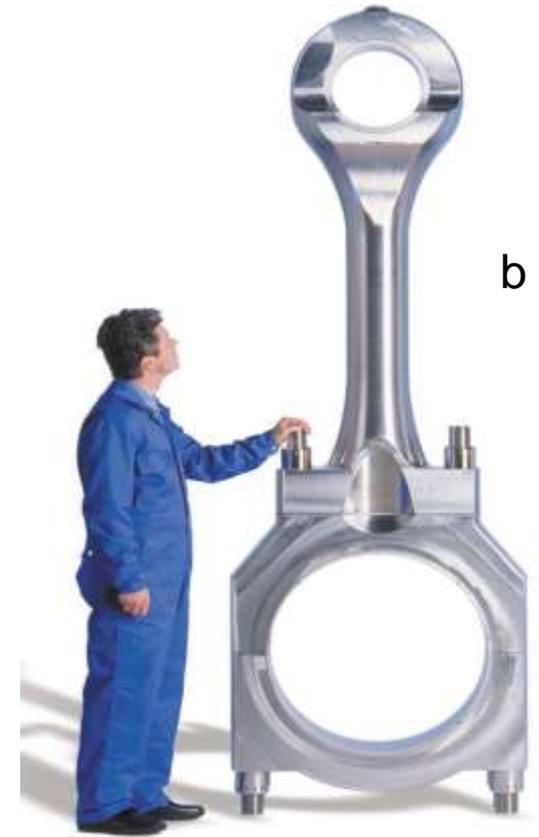


Capítulo 1.- Fundamentos de motores de combustión interna alternativos



a

Fig. 1.0.- a) Motor en doble estrella refrigerado por aire para aviación. b) Biela de un motor Diésel de propulsión marina. Fuentes desconocidas



b

Autor: Antonio Lecuona Neumann. Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos. Universidad Carlos III de Madrid

La información contenida en este trabajo sirve de propósito exclusivo como apuntes para alumnos en la enseñanza de la asignatura indicada y ha sido obtenida de las mejores fuentes que se han podido encontrar, generalmente de reconocido prestigio, recomendándose las fuentes citadas por su calidad. No obstante el/los autor/es no garantizan la exactitud, exhaustividad, actualización o perfección de su contenido ni pueden considerarse materia de la asignatura. 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. En caso de detectar algún error, rogamos nos lo comuniquen e intentaremos corregirlo. Puede contener material con copyright © por lo que su reproducción puede no estar permitida.

Capítulo 1.- Fundamentos de motores de combustión interna alternativos

Índice

[Nomenclatura](#)

1.1.- [Introducción y objetivos](#)

1.2.- [Arquitectura funcional y tipos](#)

1.3.- [Parámetros básicos](#)

1.4.- [Combustibles para MCIAs](#)

1.5.- [Equipos de los Motores de Encendido Provocado](#)

1.6.- [Equipos de los Motores de Encendido por Compresión](#)

1.7.- [Configuración de los motores pluricilíndricos](#)

1.8.- [Refrigeración](#)

1.9.- [Lubricación](#)

1.10.- [Sistema de renovación de la carga: distribución y su diagrama](#)

1.11.- [Sobrealimentación y Turboalimentación](#)

Capítulo 1.- Fundamentos de motores de combustión interna alternativos

Índice (cont.)

- 1.12.- [Dinámica del motor. Cinemática del embielaje normal. Fuerza de inercia alternativa](#)
- 1.13.- [Efecto del RCA](#)
- 1.14.- [Dosado global y local y motores de mezcla estratificada](#)
- 1.15.- [Trabajo y Potencia indicados del ciclo](#)
- 1.16.- [Par Motor instantáneo y medio](#)
- 1.17.- [Rendimiento Mecánico y pérdidas](#)
- 1.18.- [Presión Media Equivalente](#)
- 1.19.- [Rendimientos Globales del Motor](#)
- 1.20.- [Actuaciones](#)
- 1.21.- [Cuestiones de autoevaluación](#)
- 1.22.- [Conclusiones](#)

Nomenclatura ([Volver](#))

- Trabajo > 0 hacia fuera del volumen de control VoC o de la masa de control MaC.
- Las variables se indican con latina cursiva y con minúsculas las intensivas, excepto la presión y la masa.
- Las unidades representativas se indican entre corchetes y sin cursiva [].
- $\langle \rangle$ significa dependencia funcional.
- $\hat{=}$ significa definición.

AAA adelanto a la apertura de la admisión [rad]

AAE adelanto a la apertura del escape [rad]

AE apertura del escape, avance al encendido

AI avance a la inyección

AT apertura del transfer

A_e área frontal del émbolo [m^2]

ACA adelanto al cierre de la admisión [rad]

α_x coeficientes del desarrollo en serie de Fourier de la aceleración del émbolo

a coeficiente de llenado, a moles de oxígeno por mol de combustible, parámetro.

C par, también constante para pmfr [kPa]

CA cierre de la admisión [rad]

CE cierre del escape

C_e consumo específico

CR cruce de válvulas [rad]

CT cierre del transfer

c_p calor específico a presión constante

D diámetro del pistón o émbolo, calibre del cilindro [mm]

F relación másica combustible-aire, fuerza

F_e relación másica combustible-aire estequiométrica

F_R relación relativa combustible-aire

f_c función cinemática

g_i gas ideal

g_{icp} gas ideal caloríficamente perfecto

h entalpía específica

I momento de inercia

L longitud entre centros de la biela

L_i poder calorífico inferior a presión constante [$J\ kg^{-1}$]

l carrera [mm]

Nomenclatura (cont.) ([Volver](#))

m masa [kg]
 m_{al} masa con movimiento alternativo
 N moles, número de cilindros
 n régimen de giro [rpm]
 p presión [bar]
 p_{ext} presión en el cárter [bar]
 p_{iny} presión de inyección [bar]
 PM masa molecular [kg mol⁻¹]
 pme presión media efectiva [bar]
 $pmfr$ presión media equivalente de fricción [bar]
 pmi presión media indicada (neta) [bar]
 Q calor [J]
 Q cilindrada total [cm³]
 q cilindrada unitaria [cm³]
 Q' cilindrada unitaria efectiva [cm³]
 RCA retraso al cierre de la admisión [rad]
 RCE retraso al cierre del escape [rad]
 R_g Constante del gas ideal
 r relación entre el volumen máximo y mínimo
 r_c relación de compresión volumétrica efectiva
 r_e relación de expansión volumétrica geométrica
 T temperatura absoluta [K]
 T número de tiempos, 2 o 4
 t temperatura, p. e. en °C
 t tiempo [s]
 u velocidad media del pistón [m s⁻¹]
 V volumen [m³]
 W potencia [kW]
 x coordenada genérica
 y desplazamiento del pistón desde el PMS [mm]

Griegas

α ángulo de giro del cigüeñal c. r. al PMS [rad]
 $\Delta\alpha_e$ intervalo angular en el cigüeñal entre encendidos
 β ángulo de inclinación de la biela. Con ' sus derivadas.
y relación de calores específicos
 φ ángulo del árbol de levas
 η rendimiento del motor
 η_m rendimiento mecánico
 $\omega = 2\pi n$ velocidad angular de giro [rad/s]
 ρ densidad [kg m⁻³]
 κ grado de carga
 λ relación longitud entre centros de biela a carrera
 \mathcal{T} trabajo > 0 hacia afuera [J]
 \mathcal{T}_{ext} trabajo de la cara exterior del émbolo > 0 hacia afuera [J]
 τ trabajo específico [J kg⁻¹]
 φ ángulo girado por el árbol de levas
 ξ coordenada angular genérica

Adornos

— media entre ciclos consecutivos
⌋ media entre cilindros
· flujo

Acrónimos

a. n. aspiración normal
C Compresor
c.d.g. centro de gravedad
EGR recirculación de gases de escape
GI Gas Ideal
GLP Gases Licuados del Petróleo (propano y butano)
MACI Motor Alternativo de Combustión Interna (MCIA)
MEC Motor de Encendido por Compresión (Diésel o de encendido espontáneo)
MEP Motor de Encendido Provocado (Otto, de gasolina o de encendido por chispa)
PMI Punto Muerto Inferior
PMS Punto Muerto Superior
r.p.m. ó rpm revoluciones por minuto
TDI Turbo Diésel Inyección directa
TG Turbina de Gas (ciclo Brayton)

Subíndices

a aire, del bucle de alta, pérdida de calor gases de escape
ad de admisión
al con movimiento alternativo
am ambiente
au de elementos auxiliares del motor
ar arrastrada por el motor
atm atmosférica
b del bucle de baja
comb combustible
e estequiométrico, en el eje, encendido
eex en la parte exterior del eje del motor
ef efectivo, exterior al motor (trabajo, par, potencia y pme), del motor con las pérdidas inherentes (distribución, bombas de agua y de aceite, ventilador, etc.) y sin las pérdidas auxiliares (climatizador, bomba de vacío, alternador para auxiliares, etc.).
es de escape
ext
sist del exterior sobre el sistema
fr fricción
g global, de gases
i del ciclo indicado
j índice de sumatorio a todos los cilindros
in de inercia
m motor
mu motor útil
n neto, bucle de alta y de baja
nom nominal
p primaria
pm de pérdidas mecánicas
pr elementos propios del motor

r de par resistente
re refrigeración
res residual
ric rica
ro de rozamiento
s secundaria
t de remanso o total
u útil
I y *II* componentes del par de rozamiento
0 condiciones atmosféricas de referencia

1.1.- Introducción y objetivos ([Volver](#))

Introducción

- Los motores térmicos hacen uso del calor para producir [trabajo](#). Generalmente a través de un eje, aunque los propulsivos producen empuje. El calor remanente se denomina [calor residual](#).
- Dentro de ellos, los Motores de Combustión Interna Alternativos (MCIAs o MACIs) representan la mayoría, por su flexibilidad de operación, bajo coste y capacidad de ser construidos en tamaños variados, desde fracciones de kW hasta unos 40 MW.
- Hacen uso de combustibles líquidos o gaseosos; refinados, pues los queman en su interior.
- Están basados en variar el [volumen](#) de una cámara por medio de un émbolo o pistón con movimiento alternativo dentro de un cilindro recto.
- Se disponen varios cilindros en paralelo, idénticos, para aumentar la potencia y suavizar la marcha.
- Al finalizar los procesos es necesario renovar la carga, gases residuales que se sustituyen por gases frescos, y volver a empezar.
- La repetitividad de los procesos hace idóneo el concepto termodinámico de [ciclo](#) extendido al caso en que solo **hay repetición $p - V$, pero no de T y composición.**

1.1.- Introducción y objetivos (cont.) ([Volver](#))

Objetivos

- Describir la operativa básica de los MACIs.
- Introducir los tipos principales de MACIs.
- Introducir los equipos necesarios para su funcionamiento.
- Definir los parámetros básicos que caracterizan los MACIs.
- Introducir la cinemática y dinámica básica de este tipo de motores.
- Justificar de forma básica la disposición de los cilindros y su equilibrado.
- Introducir los conceptos de rendimiento indicado, útil y mecánico y de consumo específico.
- Introducir el concepto de presión media efectiva, como parámetro intensivo de prestaciones.
- Presentar las curvas características de estos motores en su forma básica. Introducción al ensayo de motores.

1.2.- Arquitectura funcional y tipos [\(Volver\)](#)

Configuración mecánica de un [cilindro](#) y su [embielaje](#). Modo de obtener trabajo en una atmósfera, pues en la cara exterior del émbolo hay una presión p_{ext} :

Cara interior:

$$\tau = \int p \langle V \rangle dV$$

Cara exterior:

$$\tau_{ext} = \int p_{ext} \langle V \rangle dV$$

Perdido por
los gases

$$\rightarrow \tau_u = \tau - \tau_{ext} = \int (p - p_{ext}) dV \quad (1.1)$$

Generalmente $p_{ext} \cong p_{atm}$

$V = V \langle \alpha \rangle$ Esta ley se verá [más adelante](#).

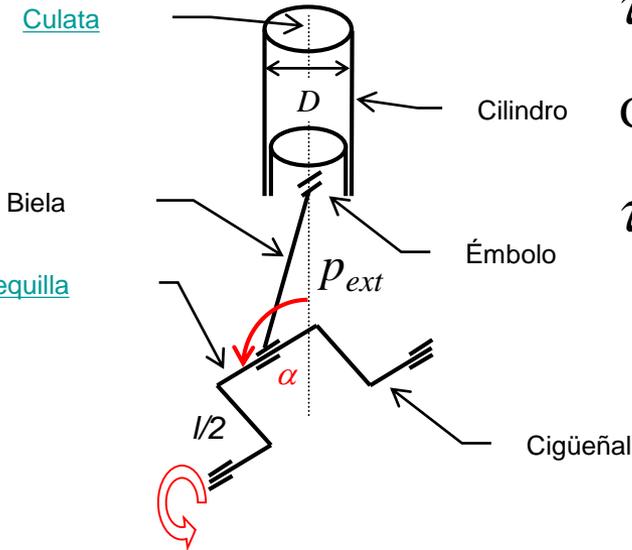


Fig. 1.1.- Esquema de un monocilindro

Fuerza de gases:

$$(p - p_{ext})dV = (p - p_{ext})A_e dy = F_g dy \quad (1.2)$$

Generalmente p_{ext} es constante y no se tiene en cuenta pues el émbolo vuelve a su posición inicial

$V(\alpha)/q$

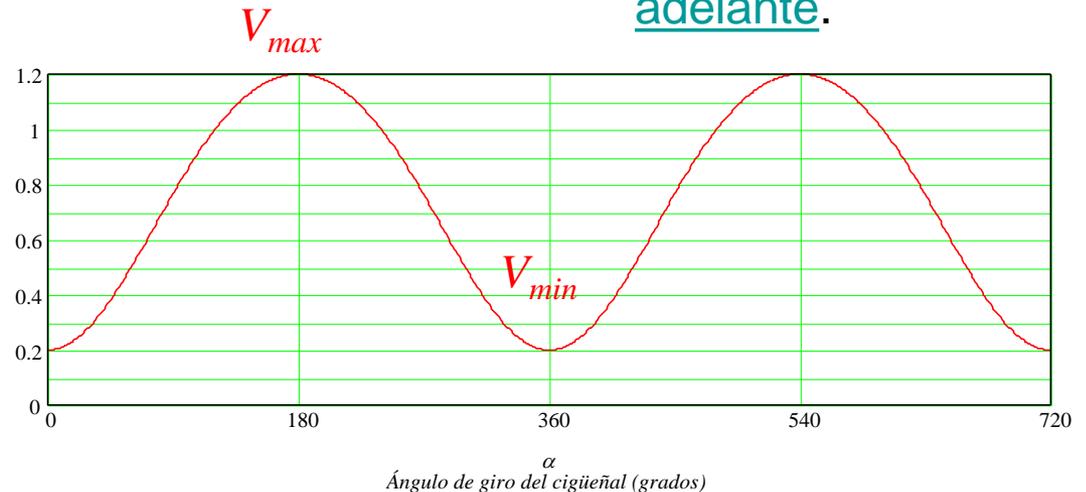


Fig. 1.2.- Volumen como función del ángulo de cigüeñal.

1.2.- Arquitectura funcional y tipos (cont.) [\(Volver\)](#)

- Motor de cuatro tiempos, $T = 4$

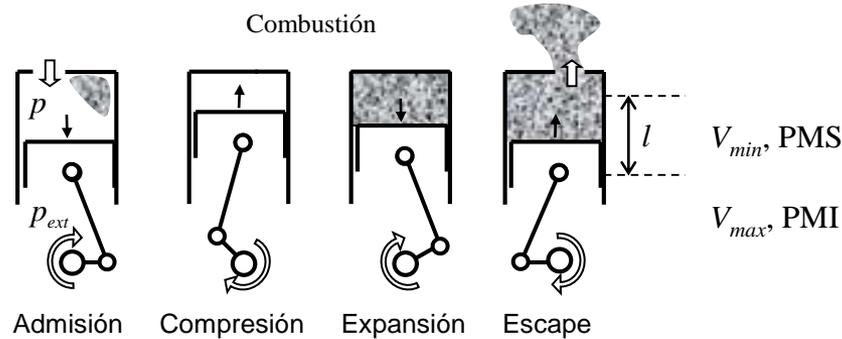


Fig. 1.3.- 4 tiempos del motor. Los gases quemados se indican en gris. La renovación de gases no suele ser completa, mezclándose con los frescos.

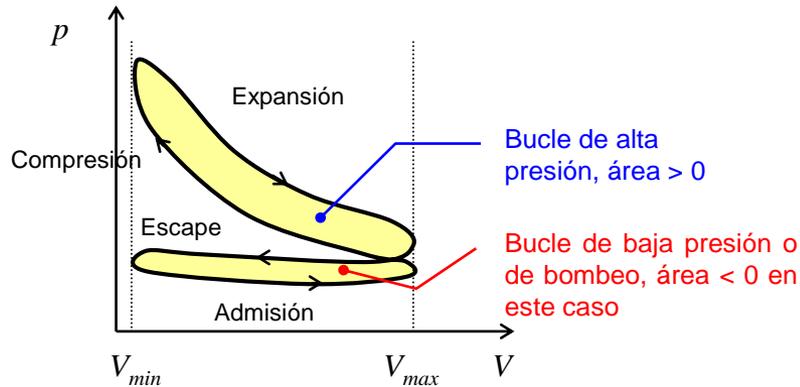


Fig. 1.4.- Ciclo de 4 tiempos. Se llama indicado, por ser el real.

- La mayor presión en la carrera descendente permite obtener trabajo.
- Se necesitan 2 vueltas para el ciclo.
- Un árbol de levas a la mitad de vueltas que el eje y sincronizado con él, repite las operaciones cada dos vueltas

1.2.- Arquitectura funcional y tipos (cont.) *(Volver)*

- [Una animación](#). Motor de 4 tiempos de 4 cilindros en línea de automoción (antiguo). [Introducción a los MCIAs](#).

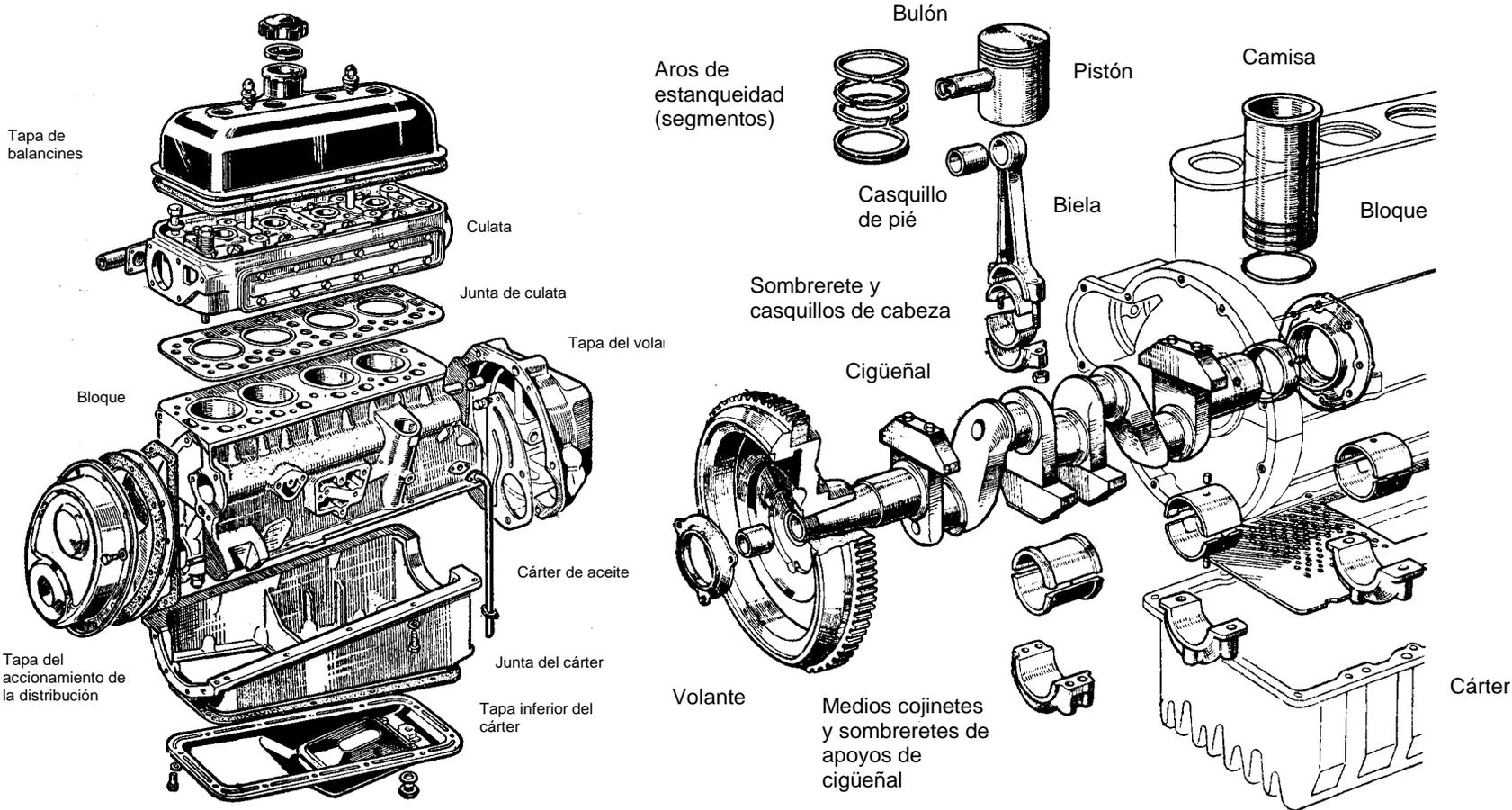


Fig. 1.5.- Desmontaje de un motor de automoción. Fuente: [Arias Paz](#), M. Manual de Automóviles, editorial Dossat 1973.

1.2.- Arquitectura funcional y tipos (cont.) ([Volver](#))

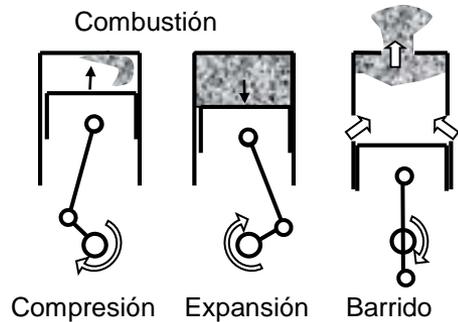


Fig. 1.6.- 2 tiempos del motor.

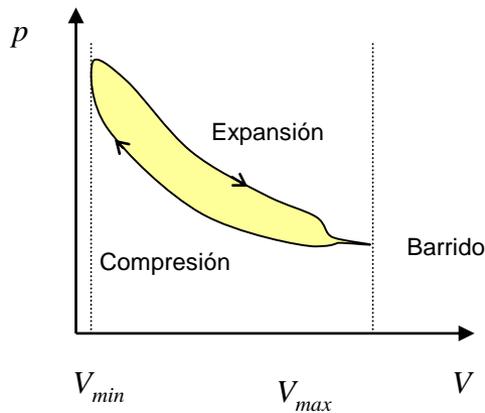


Fig. 1.7.- Ciclo indicado de 2 tiempos.

Motor de dos tiempos, $T = 2$

- En las proximidades del PMI se descubre una lumbrera de escape para que la presión baje.
- A continuación se abre una lumbrera de transfer que comunica con un compresor, que empuja los gases.
- Entran gases frescos, que expulsan a la atmósfera los residuales directamente, en el proceso de barrido.
- Se realiza en ciclo completo en una vuelta.
- Teóricamente es posible duplicar la potencia c. r. al de cuatro tiempos.
- Es inevitable:
 - El paso de gases frescos al escape
 - Gran cantidad de residuales en el cilindro.
- Ello limita la potencia y origina gran contenido de los gases residuales en el ciclo.
- La contaminación por los gases de escape es alta si los frescos contienen combustible e incluso aceite.

1.3.- Parámetros básicos ([Volver](#))

- Cilindrada unitaria: $q \doteq V_{max} - V_{min}$ (1.3)

$$\left. \begin{array}{l} q = A_e l \\ A_e = \pi \frac{D^2}{4} \end{array} \right\} \rightarrow q = \pi \frac{D^2}{4} l \quad (1.4)$$

- Carrera y diámetro:

- Cilindrada total: $Q \doteq Nq$ (1.5)

- De carrera larga: $l > D$
- Cuadrados: $l = D$
- Súper-cuadrados o de carrera corta: $l < D$

- Relación de compresión geométrica:

$$r \doteq \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{q + V_{min}}{V_{min}} \quad (1.6)$$

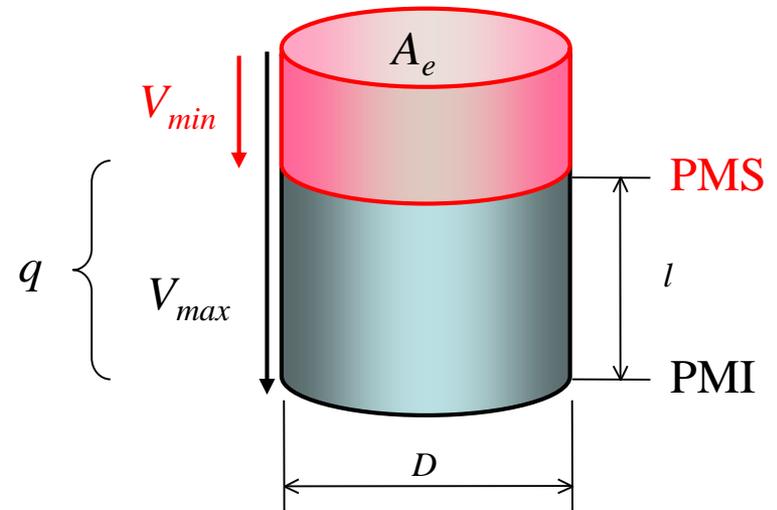


Fig. 1.8.- Esquema de un cilindro

1.3.- Parámetros básicos (cont.) ([Volver](#))

- Velocidad media del émbolo

- **Al recorrerse dos carreras (ascendente y descendente) por vuelta:**

$$u \doteq 2nl \quad (1.7)$$

Ejemplo: $n = 6.000 \text{ rpm}; l = 80 \text{ mm} \rightarrow u = 2 \times 6.000 \text{ min}^{-1} \frac{\text{min}}{60 \text{ s}} 80 \text{ mm} \frac{1 \text{ m}}{1.000 \text{ mm}} = 16 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

Es el parámetro de semejanza (no depende del tamaño del motor) que establece la “rapidez” del motor desde el punto de vista fluidodinámico y en parte mecánico.

A plena potencia:

- **Rápidos:** $u > 15 \text{ m/s}$, automoción deportivos
- **Normales:** $10 \text{ m/s} < u < 15 \text{ m/s}$, industriales, de aviación, automoción
- **Lentos:** $u < 10 \text{ m/s}$, motores muy fiables (marinos p. e.) y/o de tecnología sencilla.
- Obtener la misma rapidez hace que los motores de gran tamaño (diámetro y carrera muy grande) giren más despacio que los de pequeño tamaño.
- Como la potencia resulta proporcional a n , los motores deportivos suelen ser cuadrados o súper-cuadrados para lograr más n con igual u . Se debe a que el motor deja de llenar bien a partir de una cierta u por bloqueo sónico de la válvula de admisión (número de Mach).

1.3.- Parámetros básicos (cont.) ([Volver](#))

- **Dosado**

- Relación entre masa (caudal) de combustible y masa (caudal) de aire:

$$F \doteq \frac{m_{comb}}{m_a} = \frac{\dot{m}_{comb}}{\dot{m}_a} \quad (1.8)$$

- Hay un dosado que permite la reacción completa de ambos para formar productos estables, combustible y aire, denominado **estequiométrico**.

$$F_e \doteq \frac{m_{comb}}{m_a} \Big|_e \left\{ F_e \approx \frac{1}{15} \text{ para gasolinas y gasóleos} \right. \quad (1.9)$$

- El **dosado relativo** compara el dosado actual con el estequiométrico:

$$F_R \doteq \frac{F}{F_e} \left\{ \begin{array}{l} < 1: \text{mezcla pobre, sobra aire, típico en MEC y en MEP de mezcla estratificada.} \\ = 1: \text{mezcla químicamente correcta, MEP con catalizador de 3 vías.} \\ > 1: \text{mezcla rica, sobra combustible, típico de MEP para máximo par.} \end{array} \right.$$

- El **coeficiente de exceso de aire**:

$$\lambda \doteq \frac{1}{F_R} \quad (1.10)$$

1.4.- Combustibles ([Volver](#))

- Necesariamente sin cenizas al ser la combustión interna.
- **Motores de encendido provocado** (MEP), Otto, encendido por bujía o de ignición forzada (MIF):
 - [Gasolinas](#), [alcoholes](#), gases licuados del petróleo ([GLP](#)), [gas natural](#), [biogases](#).
 - Es necesario formar una mezcla aire/combustible antes de la ignición.
 - Se valoran: **volatilidad, resistencia a la autoignición ([N. O.](#)), etc.**
- **Motores de encendido por compresión** (MEC), Diésel o de ignición espontánea:
 - La mezcla se forma a alta temperatura → no es necesaria volatilidad.
 - Combustibles medios y pesados, [gasóleos](#), [biodiésel](#) (p. e. gasóleo+5% [MTBE](#)).
 - Se valora **la facilidad para la autoignición ([I. C.](#)), lubricidad, etc.**
- Los combustibles para MACIs fuertemente estandarizados en amplias regiones del planeta.
- Existen motores [multi-combustible](#), capaces de adaptarse a múltiples combustibles. P. e. los motores de combustible dual pueden pasar de gasolina a GLP (p. e. [autogás](#)) y los [flexifuel](#) o [flexfuel](#), que permiten distintas proporciones de alcohol en gasolina, p. e. [E85](#) es gasolina con 85% de etanol.
- Existen motores de doble combustible, usando la combinación de dos combustibles, en desarrollo.
- El [H₂](#) actualmente se [obtiene](#) del gas natural, con pérdida de energía. El [CO₂](#) resultante es confinable en la obtención para evitar su vertido a la atmósfera.

1.5.- Equipos de los Motores de Encendido Provocado ([Volver](#))

- Carburación: mezclar aire con combustible ([carburadores](#))
- Carburador elemental para MEP: dispositivo mecánico de dosificación de combustible, automático:

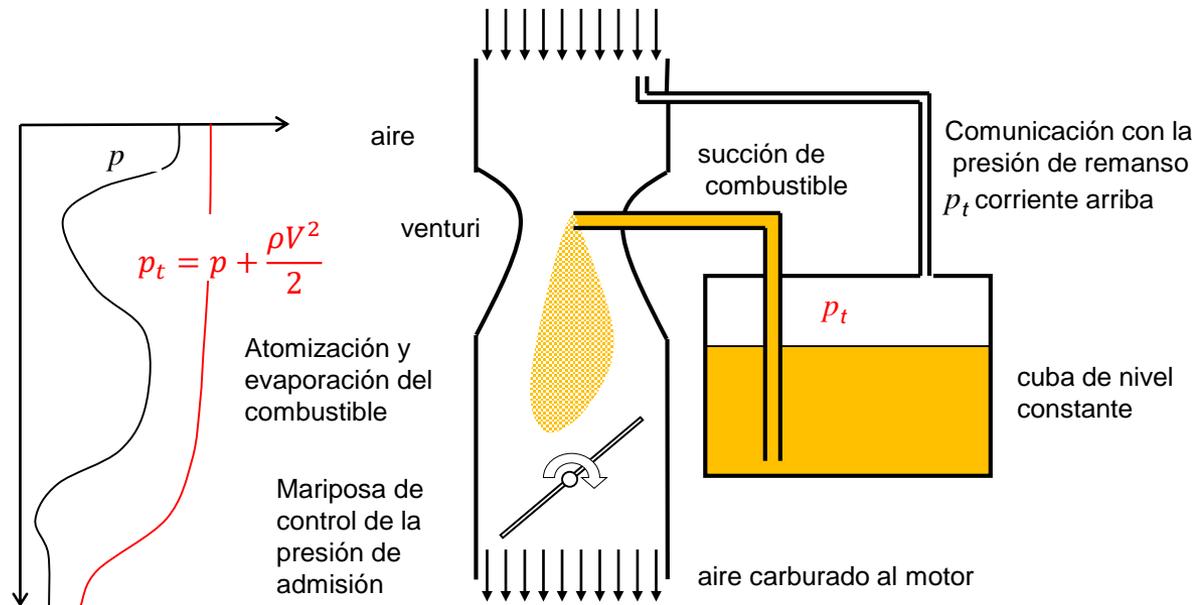


Fig. 1.9.- Distribución de presión estática y de remanso a lo largo de un carburador elemental con la mariposa semi-cerrada.

- Se combina con la válvula de control de la presión de admisión (mariposa).
- Resulta insatisfactorio para los requerimientos de [dosado](#), por lo que se sofisticó o sustituyó por la inyección electrónica.
- Actualmente solo se usa en motores muy simples.

1.5.- Equipos de los Motores de Encendido Provocado (cont.) [\(Volver\)](#)

- [Inyección electrónica de gasolina](#). Unos inyectores de apertura eléctrica todo-nada o incluso con dos modos (para MEP de mezcla estratificada), dosifican y atomizan, siendo alimentados a presión constante. [Más](#).

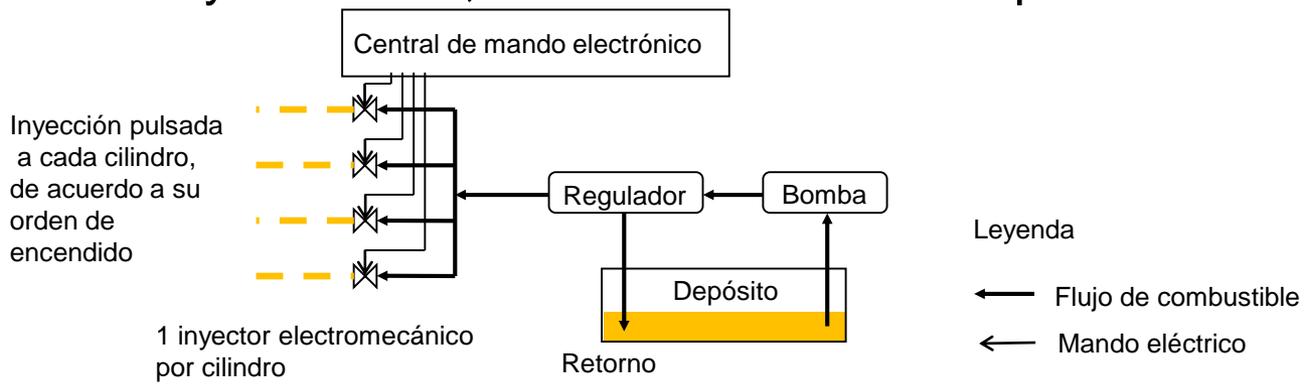


Fig. 1.5.- Esquema de un sistema de inyección electrónica secuencial (se inyecta durante la admisión) multipunto (a cada cilindro).

Presión de inyección: 2 a 6 bares al colector de admisión ([inyección indirecta](#)). 20 a 200 bares al cilindro ([inyección directa](#) de gasolina).

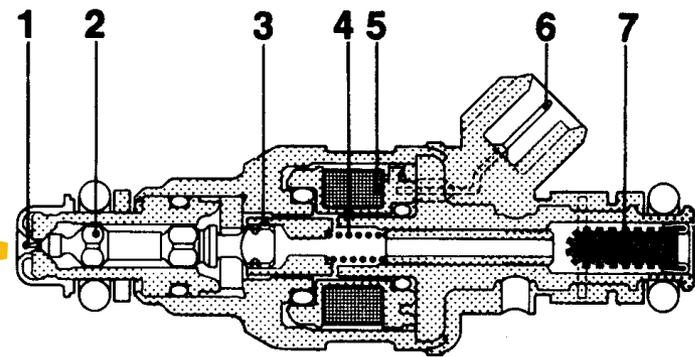
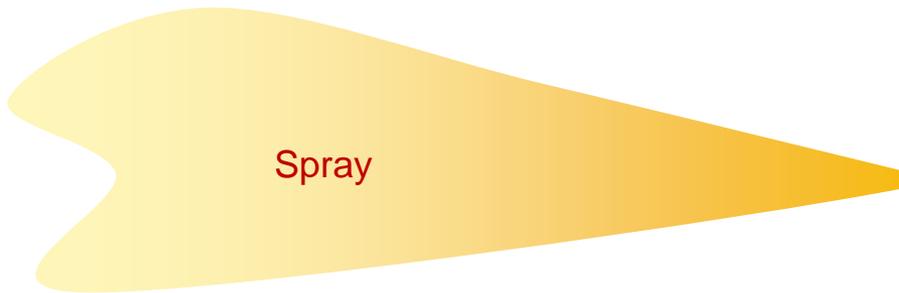
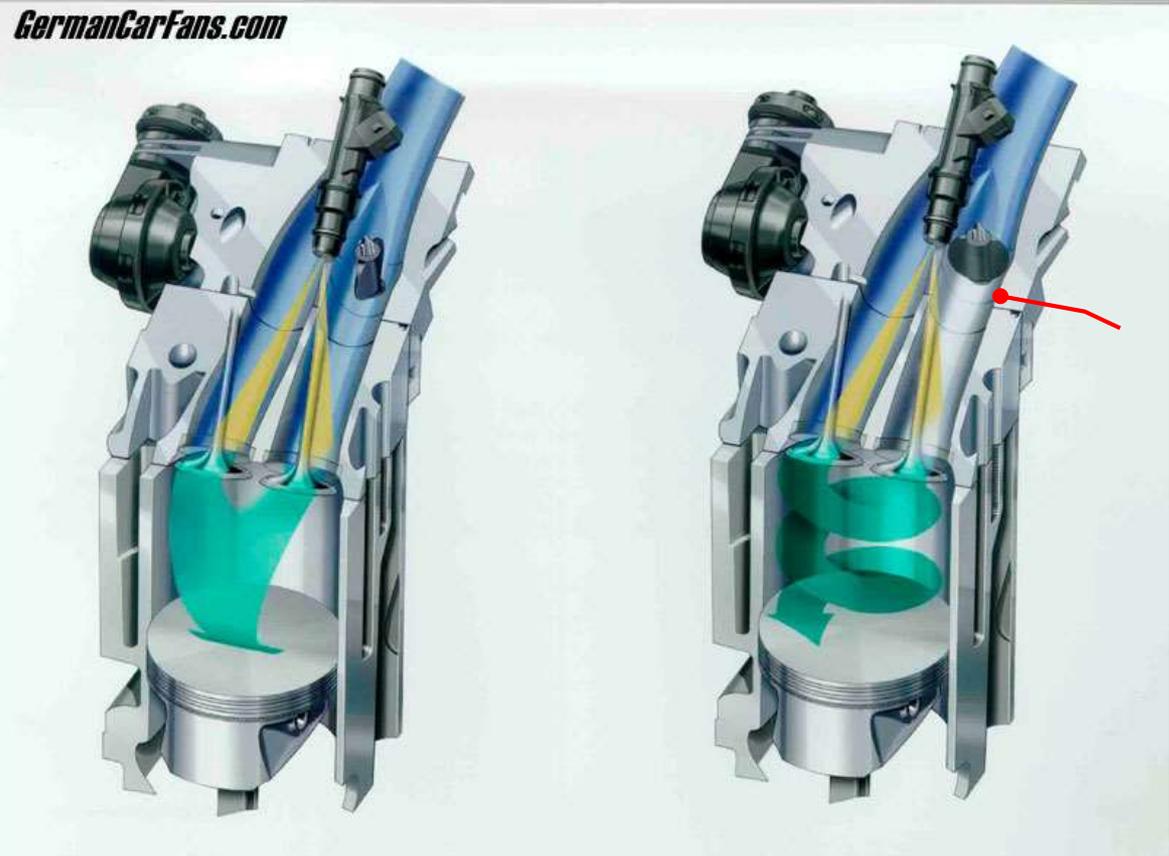


Fig. 1.10.- Sección de un [inyector electrónico](#) (electromecánico) de gasolina. La apertura (1) del inyector la provoca la excitación (6) de una bobina (5) que atrae el vástago (2) contra un muelle, entrando combustible por (7). La cantidad inyectada se controla con el tiempo de apertura. Fuente: [Automotive Handbook](#), Robert Bosch GmbH, 1986.

1.5.- Equipos de los Motores de Encendido Provocado (cont.) *(Volver)*

- Ejemplo de sistema de inyección electrónica de gasolina a la pipa de admisión (*indirecta*). Inyector de dos orificios. Con clapeta deflectora para control de la fluido-dinámica de la combustión dentro del cilindro. Otro ejemplo, sistema *GDI*.



*Plena carga,
movimiento
de vuelco
“tumble”*

Clapeta cerrada

*Carga parcial,
movimiento de
remolino de eje
vertical “swirl”.*

Fig. 1.11.- Sistema Opel TWINPORTS. Fuente: <http://www.spiegel.de/auto/werkstatt/twinport-technik-zweiter-strohalm-a-225715.html> y <http://www.corsa-c.co.uk/forum/showthread.php?311182-Twinport> accedido 18/04/2015. Cortesía de GM. Más información en el capítulo de combustión en MEP.

1.5.- Equipos de los Motores de Encendido Provocado (cont.) [\(Volver\)](#)

- El encendido generalmente es por chispa eléctrica de alta tensión entre los electrodos de una [bujía](#), separados por el gas de la cámara.

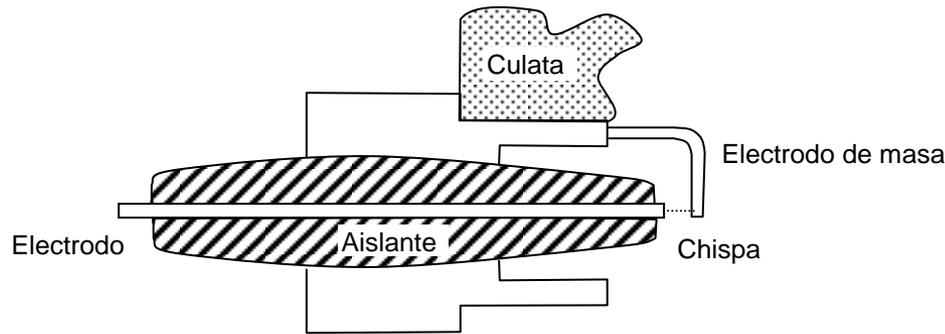


Fig. 1.12.- Esquema de una bujía y vistas de una bujía representativa.

- Tipos, según la generación eléctrica:
 - [Por magneto](#) o plato magnético (no necesita batería, al engendrar la chispa un generador de pulsos movido por el motor) cuya tensión se amplifica con un transformador, llamado bobina.
 - [Por batería](#). La variación brusca de intensidad en el primario de un transformador, alimentado por batería, induce alta tensión en el secundario, produciendo chispa en la bujía del cilindro seleccionado por medio de un distribuidor de acuerdo al [orden de encendido](#). Puede disponerse de una [bobina](#) individual para cada bujía.

1.6.- Equipos de los Motores de Encendido por Compresión ([Volver](#))

- La formación de la mezcla se produce en el cilindro, de forma rápida y simultánea con la [combustión](#) por medio de un [inyector](#) multi-orificio.
- Para lograr una atomización fina y entregar combustible rápidamente se recurre a presiones de inyección muy altas, actualmente de 1.600 a 2.200 bar.
- Para involucrar la máxima cantidad del aire presente, se recurre a un intenso “[swirl](#)”, junto con una cuenco en la cabeza del émbolo $F_{R,max} < 0,9$.
- No obstante, no se logra emplear todo el aire presente, salvo formando mucho humo negro, por lo que globalmente se tiene mezcla pobre.
- El [equipo de inyección](#) puede ser:
 - **De acción directa:** una leva actúa sobre un émbolo empujando el líquido contra el inyector, que se encuentra cerrado, abriéndolo a la presión requerida. La cantidad de líquido por embolada es fija, por lo que la carga parcial se logra reduciendo la carrera del émbolo. Sistema en regresión ante la superioridad de los sistemas d acumulación.
 - **De acumulación:** Se acumula combustible puesto a la presión de inyección requerida, por medio de una bomba de funcionamiento continuo. Los inyectores se abren eléctricamente, dejando entrar una cantidad de combustible controlado por el tiempo de apertura. Para modular el ritmo de combustión se recurre a dividir la inyección en hasta 6 tramos, en aperturas secuenciales del inyector de todo-nada. Los inyectores pueden ser con bobina o piezoeléctricos. [Sistema common rail](#). [Sistema common rail](#). [Sistema common-rail](#).

1.7.- Configuración de los motores pluricilíndricos (*Volver*)

Disposición de los cilindros. La disposición idónea depende de muchos factores. Entre ellos: equilibrado de fuerzas y pares alternativos y giratorios, suavidad de par en el eje (par motor), compacidad, facilidad de refrigeración, mínima longitud del cigüeñal, peso, área frontal, coste de fabricación, accesibilidad para reparaciones...

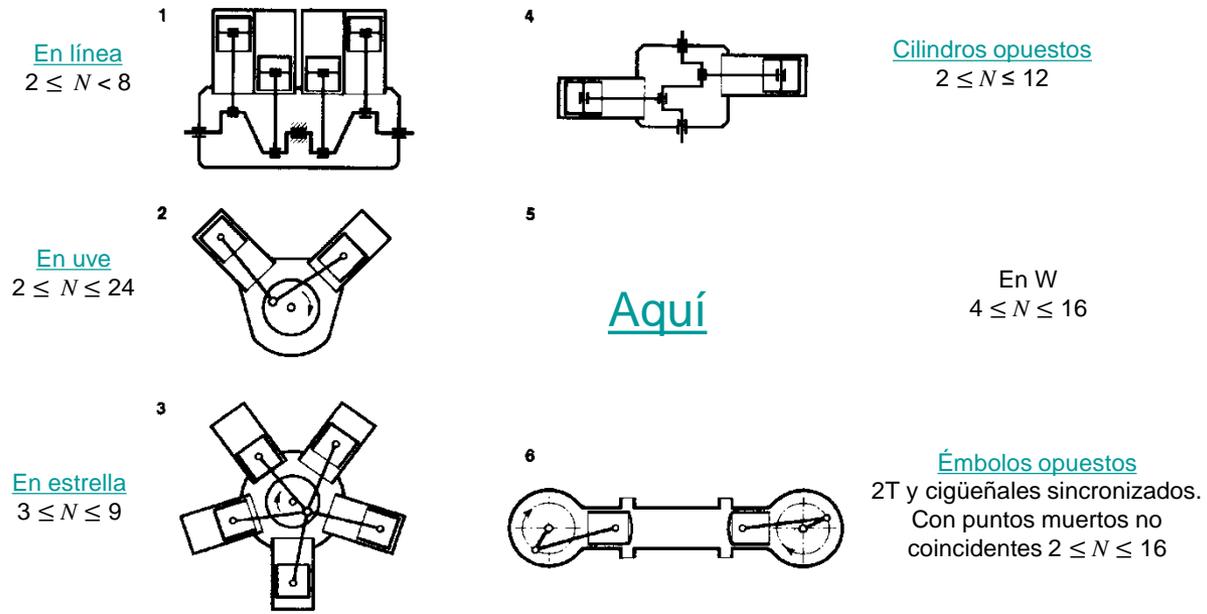


Fig. 1.13.- Disposiciones habituales de los cilindros. Adaptado de: C. F. Taylor. The Internal Combustion Engine In Theory and Practice, MIT Press, 1968.

1.7.- Configuración de los motores pluricilíndricos (*Volver*)

- Intervalo de encendido entre cilindros:

Se procura hacer igual para suavizar la marcha del motor. Para ello, en un ángulo $2\pi T/2$ de cigüeñal ha de repetirse la secuencia de encendido de los N cilindros:

$$\Delta\alpha_e = \frac{\pi T}{N} ; \begin{cases} \text{Motor de 4 tiempos: } T = 4 \\ \text{Motor de 2 tiempos: } T = 2 \end{cases} \quad (1.11)$$

Es igual al decalaje angular entre muñequillas de cigüeñal de cilindros de encendido consecutivo en línea, ya que el encendido debe ser acompañado del movimiento en fase del cigüeñal y del **árbol de levas**, que gira φ a la vez que el cigüeñal gira α .

$$\left. \begin{array}{l} \Delta\varphi_e = \Delta\alpha_e \frac{2}{T} \\ \Delta\alpha_e = \frac{\pi T}{N} \end{array} \right\} \rightarrow \Delta\varphi_e = \frac{2\pi}{N} \quad (1.12)$$

Ejemplo.- En un motor de 2 cilindros (independientemente de si son en línea u opuestos) el intervalo entre encendidos equidistantes es para 4 tiempos $\Delta\alpha_e = \frac{\pi 4}{2} = 2\pi = 360^\circ$, cigüeñal plano. Para que esto sea posible, los cilindros solo pueden estar en línea u opuestos, no pudiendo tener encendidos equidistantes los de cilindros en V. Si el cigüeñal tiene el mismo ángulo de la V entre sus muñequillas, es posible encendido equidistante.

1.7.- Configuración de los motores pluricilíndricos (cont.) ([Volver](#))

El [cigüeñal](#) ha de permitir el intervalo entre encendidos y generalmente implica el [orden de encendido](#).

Ejemplo: $T = 4, N = 4, \Rightarrow \Delta\alpha_e = 180^\circ = \Delta\varphi_e$.

- Motor en línea. Las muñequillas consecutivas 2 y 3 no están decaladas 180° . Esto se debe a que no son de encendido consecutivo. Hay 2 órdenes de encendido posibles en este motor:
 - 1-2-4-3 llamado centrípeto.
 - 1-3-4-2 llamado centrífugo.
- La forma idónea del cigüeñal ha de dar un sólido en rotación que no genere fuerzas ni momentos (pares) sobre sus apoyos al girar, por lo que se busca que su eje de giro coincida con un [eje principal de inercia](#). De ahí que tenga **forma simétrica c. r. al plano perpendicular al eje**, entre los cilindros 2 y 3, ver [Fig. 1.6](#).

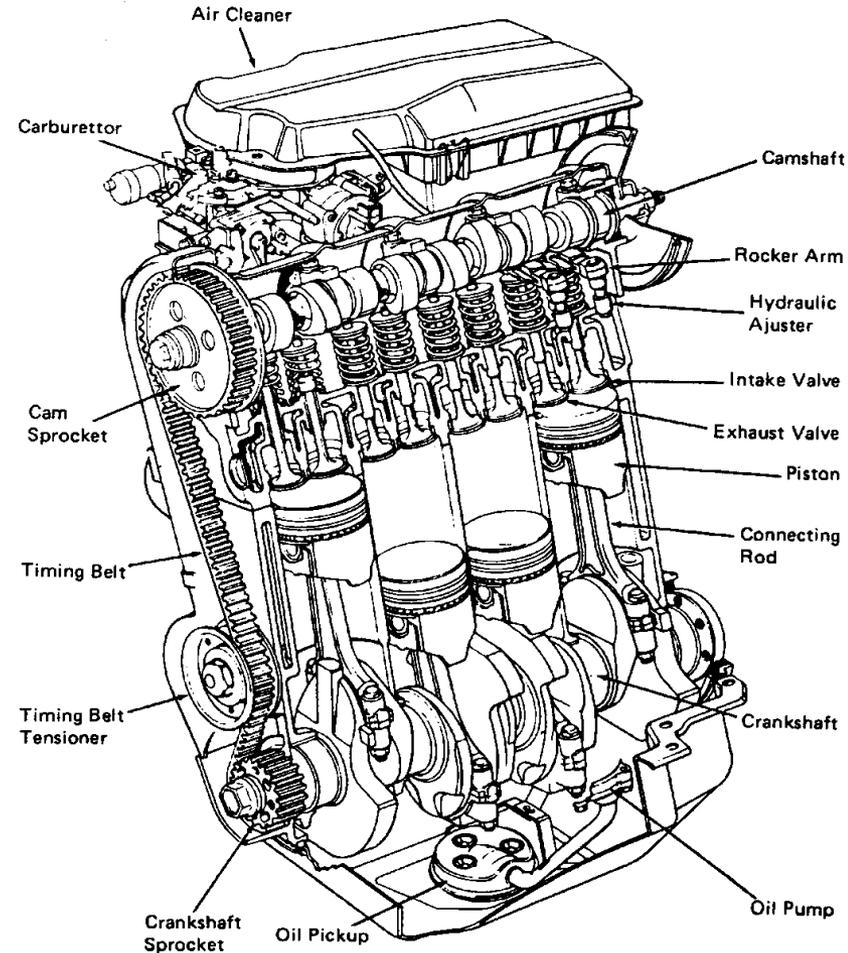


Fig. 1.14.- Sección de un motor de 4 cilindros en línea con árbol de levas en culata movido por correa dentada. Fuente: J. B. Heywood.

Actividad: Determine la forma del cigüeñal y los órdenes de encendido apropiados para motor de 4 cilindros opuestos.

1.8.- Refrigeración ([Volver](#))

- Es necesaria para evitar el deterioro del lubricante y de los materiales. [Descripción.](#)
[Sistemas:](#)
 - [Por agua](#): o indirecta. Excelente capacidad de evacuación de calor, necesidad de evitar la congelación y la ebullición y soportar la dilatación térmica, así como la corrosión. Una bomba fuerza la circulación del agua en circuito cerrado, evacuándose el calor en un radiador. El [termostato](#) reduce el tiempo de calentamiento.
 - [Por aire](#): o directa. Simple y fiable. Peor refrigeración. Motor ruidoso. No hay problema de congelación ni de ebullición. Bajo mantenimiento. Un ventilador fuerza aire alrededor de culata y cilindro aleteados. [En aviación](#) y motociclismo se emplea la corriente de aire alrededor del vehículo.
- El aceite de lubricación efectúa parte de la refrigeración.
- Dado que la refrigeración supone una pérdida calórica sustancial, actualmente se recurre a la [refrigeración de precisión](#). Esto es refrigerar lo justo en cada parte del motor, p. e. separando en un circuito para la culata y otro para los cilindros, y/o usando una bomba de agua de régimen o geometría variable.
- La refrigeración es una fracción de la potencia calorífica del combustible quemado en el interior del motor. Así, en un [balance energético](#) se puede decir que ésta se reparte en [partes semejantes en magnitud](#), entre:
 - Potencia al eje: efecto útil
 - Potencia de refrigeración: solo aprovechable si se tiene refrigeración por agua
 - Potencia calórica en los gases de escape: aprovechable por su alta temperatura

1.9.- Lubricación ([Volver](#))

- [Necesaria](#) para evitar el desgaste prematuro.
- [Sistema](#) que generalmente es de tipo forzado, por medio de una bomba de engranajes y regulador de presión de aceite. Es necesario filtrar continuamente.
- [Descripción.](#) [Descripción.](#)

El aceite se toma del cárter y se envía presurizado (2 a 6 bar) a los cojinetes, rebosando por sus extremos y cayendo al cárter; con lo que lubrica y refrigera.

Algunos motores disponen de radiador de aceite.

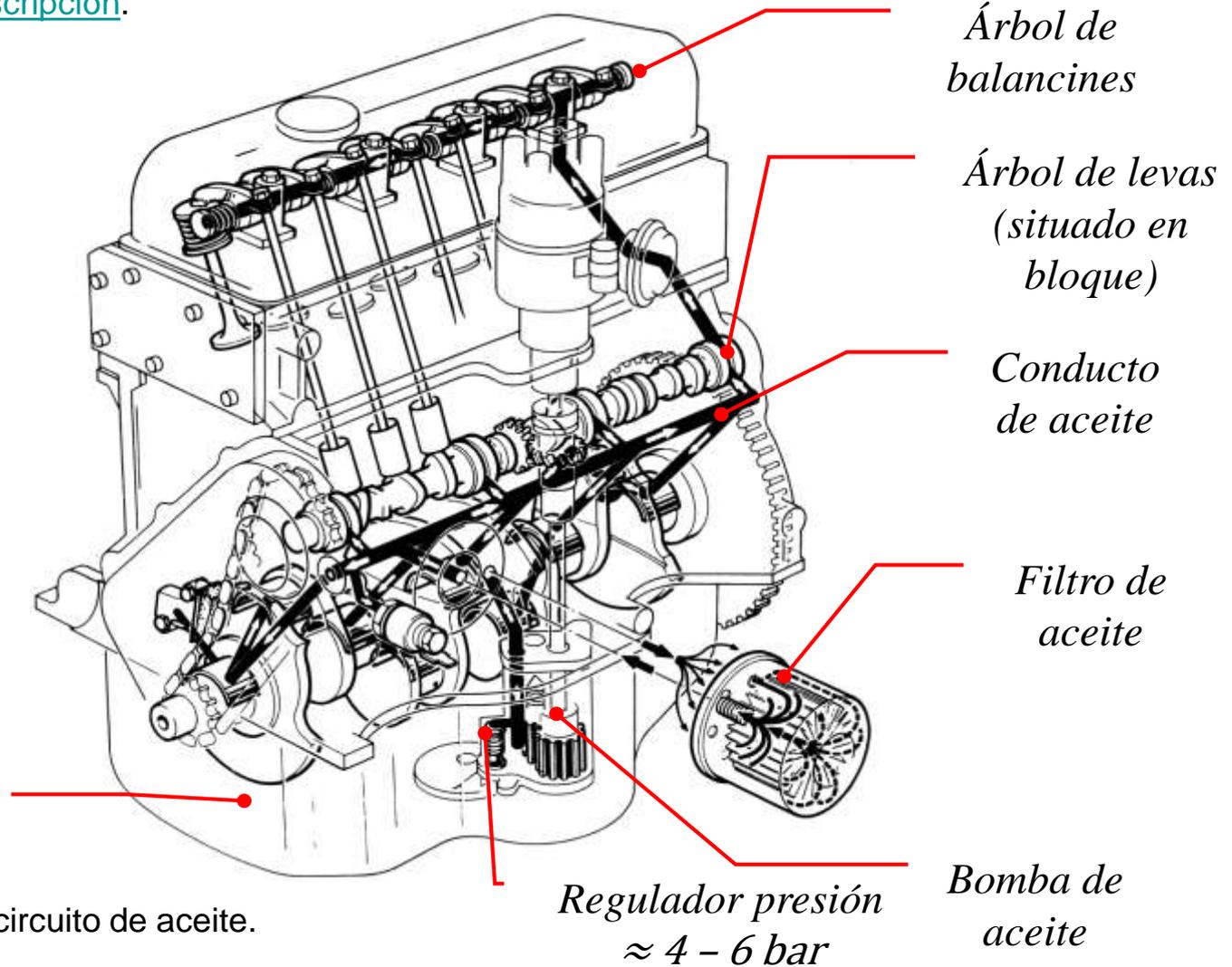


Fig. 1.15.- Esquema del circuito de aceite.

1.10.- Sistema de renovación de la carga: distribución y su diagrama ([Volver](#))

- Misiones:

- Llenar el motor con la máxima masa de aire (y de combustible en su caso) a plena carga.
- Limitar la masa de aire de forma eficiente a carga parcial, mariposa o distribución variable.
- Algunos motores disponen de [desactivación de cilindros](#), para reducir el consumo a cargas parciales.
- Procurar que en el interior del motor queden gases residuales del ciclo anterior en cantidad apropiada. Generalmente: el mínimo posible a plena carga y lo que demande el equipo anti-contaminación a carga parcial, pues los residuales contribuyen a limitar los [NOx](#).
- Procurar un movimiento (el coherente y además el turbulento) del aire dentro del cilindro adecuado, [swirl](#) y [tumble](#).
- En motores de régimen variable, procurar una transición satisfactoria de un estado operativo a otro.
- Facilitar el arranque en frío ([mariposa de arranque en frío](#), [descompresor](#), etc.).
- Procurar el efecto de [freno del motor](#).
- El gobierno del sistema de renovación de la carga se suele asociar con el de encendido e inyección de combustible.

1.10.- Sistema de renovación de la carga: distribución y su diagrama ([Volver](#))

- La necesaria [sincronización](#) de la renovación de los gases y de la combustión con los tiempos del ciclo se efectúa con el sistema de la distribución, respectivamente de válvulas y de encendido (MEP) o de inyección (MEC).
- Las [válvulas de admisión](#) (A) y de escape (E) en un motor de cuatro tiempos, idealmente abren (A) y cierran (C) en los puntos muertos (PM, superior S, e inferior I), pero la apertura suele adelantarse (A) y el cierre retrasarse (R). Se debe a que ambos procesos se efectúan progresivamente, a causa de la inercia de la masa en movimiento, por lo que se quiere evitar que la válvula no esté plenamente abierta durante la carrera de interés.
- El accionamiento de válvulas se efectúa por medio de [levas](#) que las empujan a abrirse, levantándose sobre su asiento cónico. La estanqueidad se asegura con un fuerte muelle que aprieta sobre el asiento cónico.
- El [árbol de levas](#) reúne en un eje las levas de varios cilindros. Para accionarlas directamente se sitúa en culata. Puede haber dos árboles en culata, uno para las de admisión y otro para las de escape.
- El encendido (E) en MEP (o la inyección de gasolina, si es de inyección directa al cilindro) y la [inyección](#) (I) en MEC, se efectúa antes del PMS, con adelanto (A).
- El conjunto se suele resumir en un [diagrama de la distribución](#).
- Actualmente existen varios sistemas que permiten [variar](#) el diagrama de la distribución en marcha ([distribución variable](#)). Permiten maximizar la potencia y el par del motor a sus regímenes respectivos, y además: a) actuar a carga parcial de forma eficiente, b) lograr la recirculación de gases de escape ([EGR](#)) requerido para la reducción de contaminantes, incluso c) [desactivar cilindros](#) para reducir el consumo a carga parcial y d) convertir el motor en un freno para los automóviles (freno-motor).
- En actuación normal se tiene la siguiente disposición del diagrama:

1.10.- Sistema de renovación de la carga: distribución y su diagrama (cont.) [\(Volver\)](#)

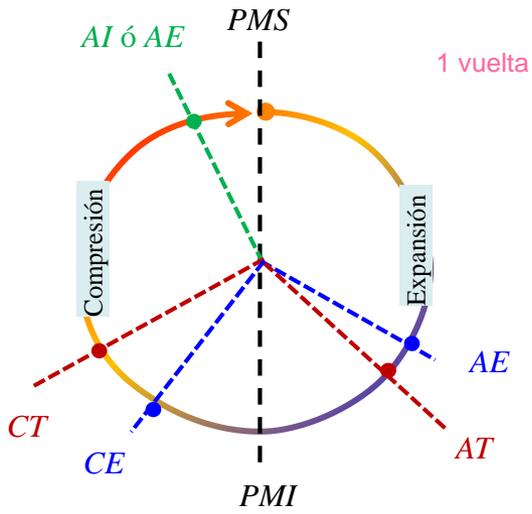
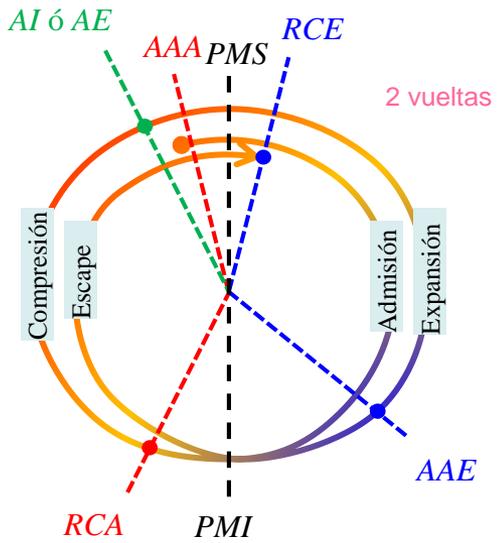
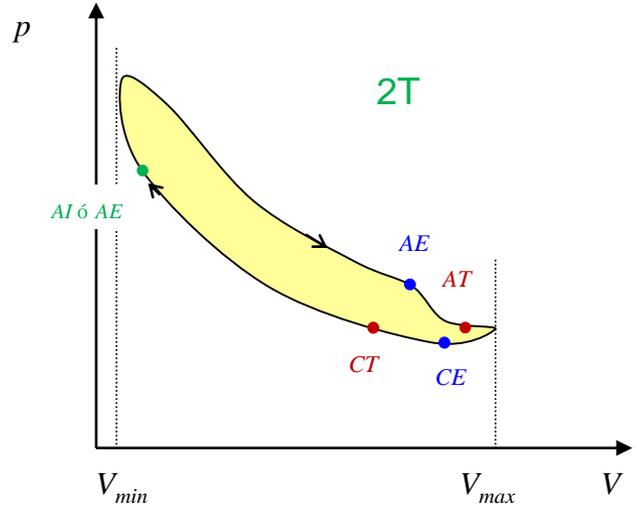
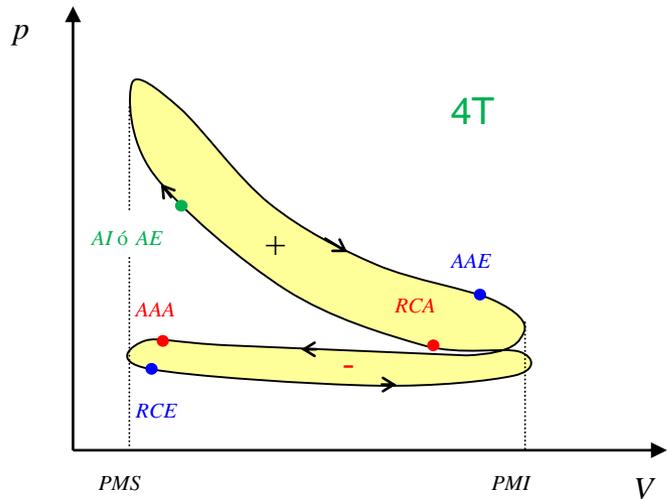


Fig. 1.16.- Diagramas de la distribución para motor de 4 y de 2 tiempos.

1.10.- Sistema de renovación de la carga: distribución y su diagrama (cont.) [\(Volver\)](#)

- La introducción de aire en el motor es necesaria para quemar el combustible. De la combustión de ambos resulta la liberación interna de calor en los MACIs.
- El calor máximo liberado por el combustible ocurre cuando arde completamente dando los productos de menor energía interna, habitualmente CO₂ y H₂O. Éste se mide haciendo regresar los productos a la misma temperatura que los reactantes, obteniéndose el [poder calorífico](#) del combustible L . Véase el [Capítulo 2](#) de termoquímica.
- El **rendimiento del motor** η (adimensional) se referencia a este valor (poder calorífico inferior L_i) de tal manera que la potencia del motor es:

$$W = \frac{\dot{m}_{comb} L_i}{W_{comb}} \eta \rightarrow \text{Fórmula fundamental de los MACIs} \tag{1.13}$$

- El [dosado](#) F relaciona el caudal de combustible con el de aire, luego: $W = \dot{m}_a F L_i \eta$ (1.14)
- El dosado se encuentra dentro de unos límites. Si es [demasiado bajo](#) o demasiado alto, simplemente la combustión [no ocurre](#). Si es químicamente correcto ([estequiométrico](#)) es posible el empleo simultáneo de todo el aire y de todo el combustible. Por ello, maximizar la masa de aire ingresada es crucial para que no sea limitante.
- Como la capacidad renovadora de aire del motor es su variación T de volumen Q a la frecuencia $2n/T$, si se toma una densidad del aire de referencia, p. e. la atmosférica, se tiene una medida de la eficacia en la renovación de la carga:

$$\text{Rendimiento volumétrico global: } \eta_{v,g} \doteq \frac{\dot{m}_a}{Q \frac{2n}{T} \rho_{atm}} \tag{1.15}$$

- En MACIs sin sobrealimentación se llega hasta valores máximos de $\eta_{v,g} \approx 1$ en motores especiales, y a una cierta n . En motores sobrealimentados se ha llegado a valores de 9, siendo en automoción un valor de 2 a 3 corriente.

- **Luego, la potencia de un MACI resulta ser:**

$$W = Q \frac{2n}{T} \rho_{atm} \eta_{v,g} F L_i \eta \tag{1.16}$$

1.10.- Sistema de renovación de la carga: distribución y su diagrama (cont.) [\(Volver\)](#)

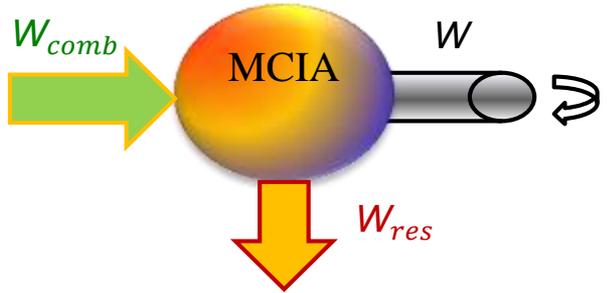
Actividad: Sea un MEP de 4 tiempos y 3 cilindros con los siguientes datos, actuando en estado estacionario:

q [cm ³]	n [rpm]	P_{atm} [bar]	t_{atm} [°C]	$\eta_{v,g}$ [-]	F [-]	L_i [MJ/kg]	η [-]	R_g [$\frac{J}{kg K}$]
400	5.000	1,013	25	0,87	1/15	42	0,35	286,9

Caudales y potencias. **Solución:**

- Densidad del aire atmosférico:** $\rho_{atm} = \frac{p_{atm}}{R_g T_{atm}} = \frac{1,013 \times 10^5 \text{ Pa}}{286,9 \frac{J}{kgK} (25 + 273,16) \text{ K}} = 1,197 \frac{kg}{m^3}$
- Caudal de aire:** Ec. (1.15) $\rightarrow \dot{m}_a = Nq \frac{2n}{T} \rho_{atm} \eta_{v,g} = 1,2 \times 10^{-3} m^3 \frac{2 \times 5.000}{4 \times 60 s} 1,197 \frac{kg}{m^3} 0,87 = 0,05207 \frac{kg}{s}$
- Caudal de combustible:** Ec. (1.8) $\dot{m}_{comb} = F \dot{m}_a = 0,05207 \frac{kg}{s \times 15} = 3,471 \times 10^{-3} \frac{kg}{s}$
- Potencia calorífica:** Ec. (1.13) $\rightarrow W_{comb} = \dot{m}_{comb} L_i = 3,471 \times 10^{-3} \frac{kg}{s} 42 \times 10^6 \frac{J}{kg} = 146 \text{ kW}$
- Potencia al eje:** Ec. (1.14) $\rightarrow W = W_{comb} \eta = 146 \text{ kW} \times 0,35 = 51 \text{ kW}$
- Potencia calorífica residual:** $W_{res} = W_{comb} - W = 95 \text{ kW}$

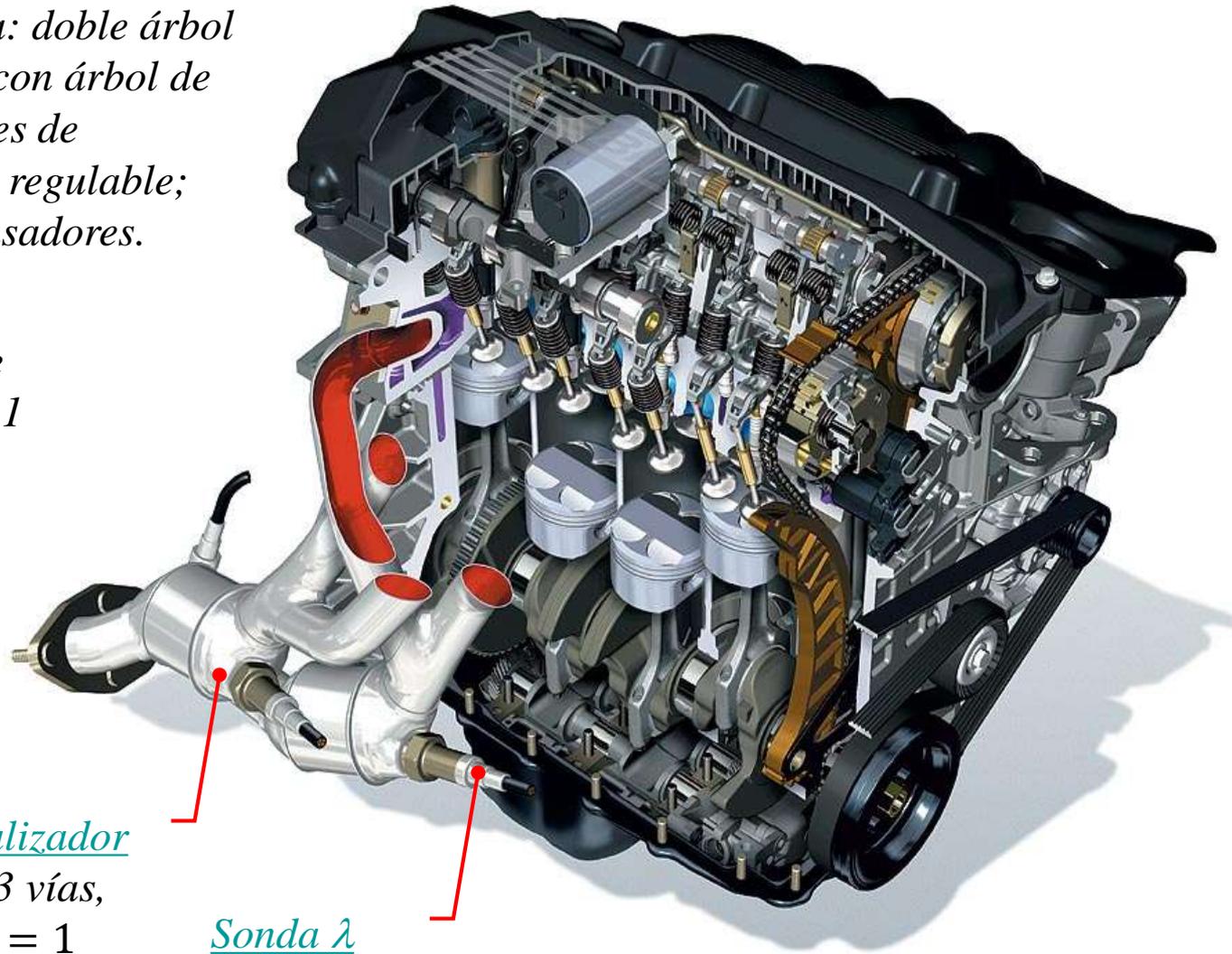
La potencia calorífica residual incluye la refrigeración (del propio motor, del aceite y del posenfriador) las pérdidas directas al ambiente y la entalpía sensible de los gases de escape. Éstos liberan entalpía latente también, si el agua de la combustión condensa.



1.10.- Sistema de renovación de la carga: distribución y su diagrama (cont.) [\(Volver\)](#)

En culata: doble árbol de levas con árbol de balancines de admisión regulable; dos desfasadores.

Colector de escape 4-2-1 [resonante](#)



*[Catalizador](#)
de 3 vías,
 $\lambda = 1$*

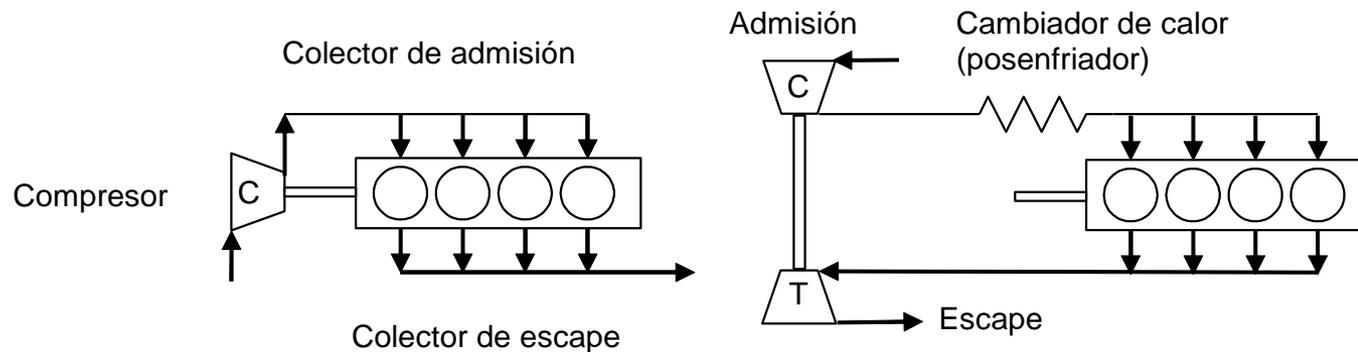
[Sonda \$\lambda\$](#)

Fig. 1.17.- Ejemplo de MEP BMW de automoción con diagrama de la distribución [variable Double Vanos](#) y [Valvetronic](#). [Valvetronic](#). Cortesía de [BMW](#), [Más](#). [Fuente](#). La [Fig. 1.21](#) es complementaria.

1.11.- Sobrealimentación y Turboalimentación ([Volver](#))

- Objeto: aumentar artificialmente con un compresor la densidad del aire admitido a la cilindrada para aumentar la carga. Asumiendo gas ideal (GI):

$$M = \rho V; V \text{ es la cilindrada}; \rho = \frac{p}{R_g T} \left\{ \text{Aumentar } p, \text{ pero } T \text{ aumenta al comprimir} \rightarrow \text{posenfriamiento} \right. \quad (1.17)$$



Consumiendo potencia mecánica:
sobrealimentación mecánica

Generando contrapresión en el escape usando una turbina: turboalimentación

Fig. 1.18.- Esquema simplificado de sobrealimentación y Turboalimentación con posenfriador. En ambos se puede conseguir un bucle de bombeo de área positiva, [Fig. 1.28](#).

- El posenfriamiento (intercooling) consiste en enfriar a $p \approx \text{cte.}$ tras comprimir. Logra aumentar aún más la densidad de admisión ρ_{ad} y además en MEP reducir el riesgo de detonación.
- El motor turboalimentado funciona como en una atmósfera artificial, pues tanto su admisión como su escape están a presión superior a la atmosférica. El eje del turbo es libre.

1.12.- Dinámica del motor. Cinemática del embielaje normal. Fuerza de inercia Dinámica del motor ([Volver](#))

➤ La 2ª ley de Newton, lineal, aplicada las **partes móviles** del motor:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = \sum \vec{F}_{ext/sist} \quad \text{Aceleraciones:} \quad (1.18)$$

- **Aceleraciones lineales**, por el movimiento alternativo de la masa de émbolo M_{al} (émbolo, segmentadura, bulón y masa asociada al pie de biela):
 - *Fuerza alineada con el eje del cilindro, de PMS a PMI. Las de unos cilindros pueden cancelarse con las de otros, al menos parcialmente, pero al no estar alineadas pueden ocasionar pares alternativos sobre los apoyos del motor.*
- **Aceleraciones angulares**, por el giro del cigüeñal (asumiendo $\omega = cte.$):
 - *Si se logra que el c. d. g. pase por el eje de giro (**equilibrado estático**) \Rightarrow se anulan las fuerzas centrífugas giratorias. Si es necesario, se usan contrapesos.*
 - *Si además se logra que el eje de giro sea principal de inercia (**equilibrado dinámico**) \Rightarrow se anulan los pares giratorios. Se puede lograr con contrapesos.*

➤ La 2ª ley de Newton, angular, aplicada al **conjunto** del motor:

$$\bar{I} \frac{d^2 \xi}{dt^2} = \sum \vec{C}_{ext/sist} \quad (1.19)$$

- .. hace que al aplicarla sobre la carcasa del motor, $\xi \equiv 0$, aparezca un par de vuelco igual y contrario al par motor instantáneo para hacer nula su aceleración angular.
- Veamos el eje ...

1.12.- Dinámica del motor. Cinemática del embielaje normal. Fuerza de inercia

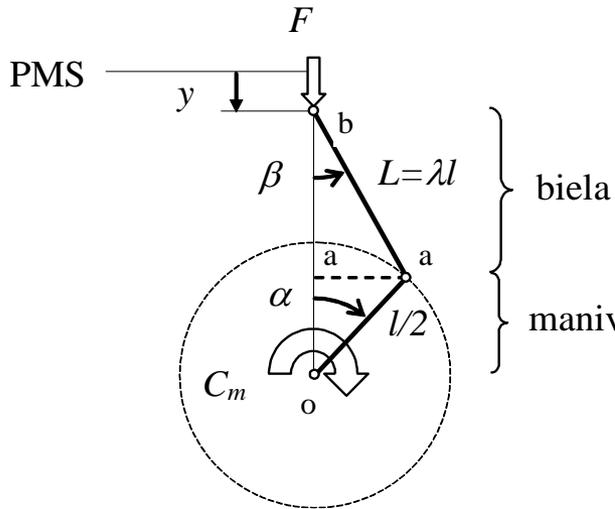
Dinámica del motor (cont.) ([Volver](#)). Recurriendo a la [Ec. \(1.19\)](#):

$$\left. \begin{array}{l} \bar{I} \frac{d^2 \vec{\xi}}{dt^2} = \sum \vec{C}_{\substack{ext \\ sist}} \\ \xi \equiv \alpha \end{array} \right\} \Rightarrow I \frac{d^2 \alpha}{dt^2} = I \frac{d\omega}{dt} = C_{m,u} \langle \alpha, t \rangle - C_{ar} \langle \alpha, t \rangle ; \quad \omega = \frac{d\alpha}{dt} = 2\pi n \quad (1.20)$$

- Al momento de inercia rotatorio I , contribuyen: todas las piezas en movimiento giratorio del interior del motor + volante de inercia + carga arrastrada rígidamente por el motor.
- El par motor útil instantáneo $C_{m,u} \langle \alpha \rangle$:
 - Se debe a los gases (media no nula) y a la inercia (media nula) $C_{m,u} \langle \alpha \rangle = C_g \langle \alpha \rangle + C_{in} \langle \alpha \rangle$.
 - Es más irregular en MEC (Diésel) por la brusquedad de la combustión que en MEP (gasolina).
 - Es más irregular al bajar N y $T = 4$ (solo una explosión cada dos vueltas).
- El par de la carga arrastrada C_{ar} :
 - Depende de la carga conectada al motor, pero generalmente es constante.
- Un aumento de I , se puede lograr con el [volante de inercia](#); otorga:
 - Una mayor homogeneidad de marcha, ω oscila menos.
 - Un arranque más fácil (se vence la contrapresión de la compresión con I).
 - Una caída de régimen en vacío menor (p. e. cambio de marchas en automóvil)
 - Un reprise (aumento de velocidad) más lento.

1.12.- Dinámica del motor. Cinemática del embielaje normal. Fuerza de inercia

Cinemática del embielaje normal [\(Volver\)](#)



$\lambda = \frac{L}{l}$ (1.21) Longitud de biela. Entre 1,5 y 2,2, pero la menor posible para minimizar la altura del motor

Desplazamiento y desde PMS (> 0 de PMS a PMI):

$$\frac{y}{l} = \frac{1}{2} \left[1 + 2\lambda - \cos(\alpha) - \sqrt{4\lambda^2 - \sin^2(\alpha)} \right] \doteq f_c \langle \alpha, \lambda \rangle \quad (1.22)$$

$$V = V_{min} + \frac{\pi D^2 y}{4} = V_{min} + q \frac{y}{l} \left. \vphantom{\frac{y}{l}} \right\} \rightarrow V = V_{min} + q f_c \langle \alpha, \lambda \rangle \quad (1.23)$$

Fig. 1.19.- Esquema del embielaje.

Derivando para la velocidad con $\omega = \text{cte.}$:

$$\frac{dy}{dt} \frac{1}{\omega l} = \frac{1}{2} \left(\underbrace{\sin(\alpha) + \frac{\sin(2\alpha)}{2\sqrt{4\lambda^2 - \sin^2(\alpha)}}}_{\doteq f_c'} \right) \quad (1.24)$$

Derivando para la aceleración:

$$\frac{d^2 y}{dt^2} \frac{1}{\omega^2 l} = \frac{1}{2} \left(\underbrace{\cos(\alpha) + \frac{4\lambda^2 \cos(2\alpha) - \sin^4(\alpha)}{(4\lambda^2 - \sin^2(\alpha))^{3/2}}}_{\doteq f_c''} \right) \quad (1.25)$$

$$\sin(\beta) = \frac{1}{2\lambda} \sin(\alpha) \Rightarrow \frac{d\beta}{dt} \frac{1}{\omega} \doteq \beta' = \frac{\cos(\alpha)}{\sqrt{4\lambda^2 - \sin^2(\alpha)}} \quad (1.26) \quad (1.27)$$

$$\frac{d^2 \beta}{dt^2} \frac{1}{\omega^2} \doteq \beta'' = - \frac{\sin(\alpha)(4\lambda^2 - 1)}{(4\lambda^2 - \sin^2(\alpha))^{3/2}} \quad (1.28)$$

1.12.- Dinámica del motor. Cinemática del embielaje normal. Fuerza de inercia

- Fuerza de inercia alternativa (> 0 de PMS a PMI) ([Volver](#))

$$\left. \begin{aligned} F_{in} &= -m_{al} \frac{d^2 y}{dt^2} = -m_{al} \frac{d^2 y}{d\alpha^2} \left(\frac{d\alpha}{dt} \right)^2 \\ \frac{d\alpha}{dt} &= \omega = \text{cte. por hipótesis razonable} \end{aligned} \right\} \rightarrow F_{in} = -m_{al} \omega^2 \frac{d^2 y}{d\alpha^2} = -m_{al} \omega^2 l \times f_c'' \quad (1.29)$$

Función adimens. de α y λ

- Esta fuerza se puede descomponer en serie de Fourier, analíticamente, resultando (*a título informativo los valores*):

$$f_c'' = a_1 \cos \alpha + a_2 \cos 2\alpha + a_4 \cos 4\alpha + a_6 \cos 6\alpha + \dots$$

$$\text{PRIMARIA } p : a_1 = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{1}{4} \left(\frac{1}{2\lambda} \right) + \frac{3}{64} \left(\frac{1}{2\lambda} \right)^3 + \frac{5}{256} \left(\frac{1}{2\lambda} \right)^5 \right] \cong \frac{1}{2} \left[1 + \frac{1}{4} \left(\frac{1}{2\lambda} \right) \right] \cong 0,537 \text{ para } \lambda = 1,7$$

$$\text{SECUNDARIA } s : a_2 = \frac{1}{2} \left[1 + \left(\frac{1}{2\lambda} \right) + \frac{1}{4} \left(\frac{1}{2\lambda} \right)^3 + \frac{15}{128} \left(\frac{1}{2\lambda} \right)^5 \right] \cong \frac{1}{2} \left[1 + \left(\frac{1}{2\lambda} \right) \right] \cong 0,650 \text{ para } \lambda = 1,7$$

$$\left. \begin{aligned} a_4 &= -\frac{1}{2} \left[\frac{1}{4} \left(\frac{1}{2\lambda} \right)^3 + \frac{3}{16} \left(\frac{1}{2\lambda} \right)^5 \right] \cong 0,00389 \\ a_6 &= \frac{9}{128} \left(\frac{1}{2\lambda} \right)^5 \cong 0,000155 \end{aligned} \right\} \text{ Insignificantes} \quad (1.30)$$

1.12.- Dinámica del motor. Cinemática del embielaje normal. Fuerza de inercia

Equilibrado de fuerzas de inercia ([Volver](#))

$$F_{in} \langle \alpha \rangle \cong F_{in,p} \langle \alpha \rangle + F_{in,s} \langle 2\alpha \rangle \quad (1.31)$$

- La fuerza de inercia alternativa se trata de equilibrar con el decalaje de muñequillas entre cilindros. P. e. 4 cilindros en línea:

$$\Delta\alpha_e = 180^\circ = 2\pi$$

- Se equilibra la primaria, flechas lisas.
- No se equilibra la secundaria por estar en fase, flechas rayadas → [volantes contra-rotatorios](#)

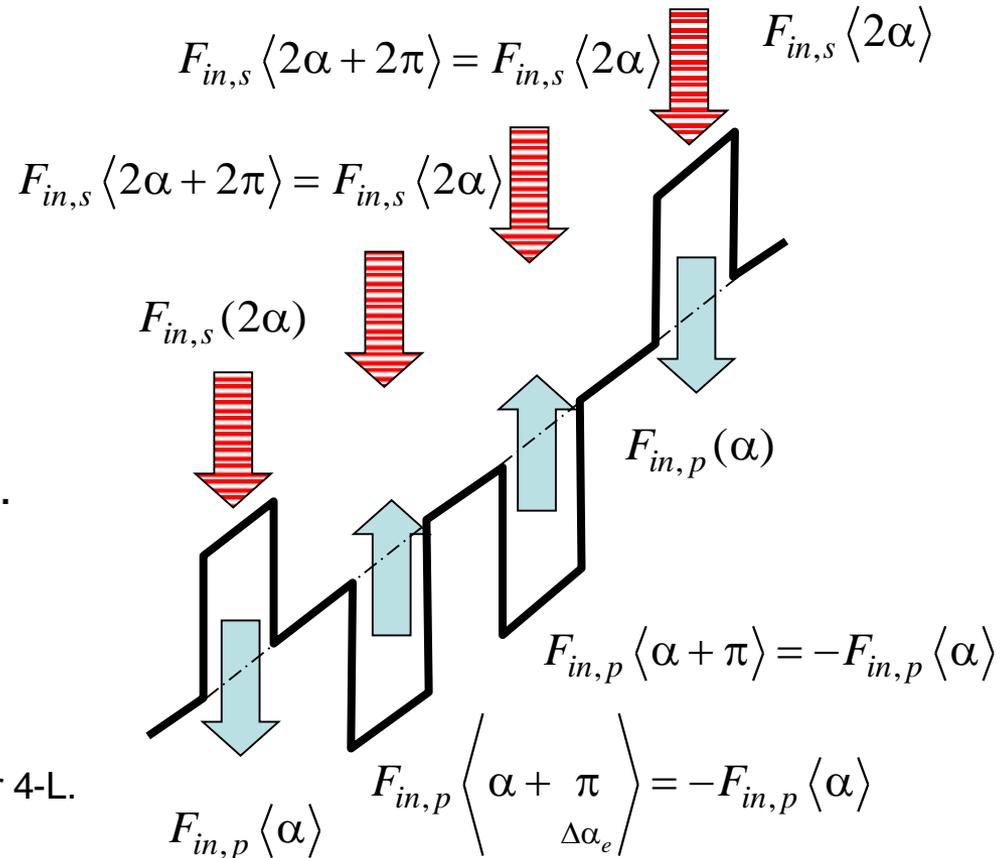
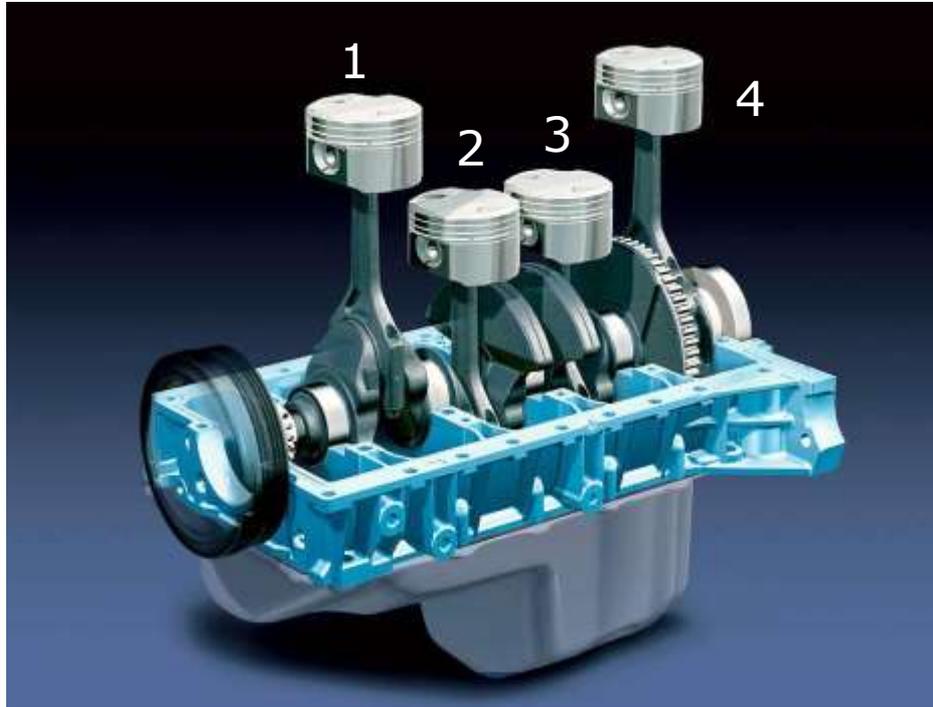


Fig. 1.20.- Esquema del equilibrado de un motor 4-L.

1.12.- Dinámica del motor. Cinemática del embielaje normal. Fuerza de inercia

Estando el cigüeñal estática y dinámicamente equilibrado, además se puede equilibrar cada codo, como si fuera independiente del resto, para reducir las cargas sobre cojinetes.



← Se puede ver los contrapesos de equilibrado codo a codo en los cilindros 2 y 3.

Entre el 3 y el 4 hay una toma de potencia.

Un motor eléctrico modifica la alzada de las válvulas de admisión variando el punto de apoyo de los balancines, sistema Valvetronic.



2 ejes contra-rotatorios a doble de régimen bajo el cigüeñal, con contrapesos para la eliminación de las fuerzas de inercia secundarias. →

Fig. 1.21.- Ejemplo de equilibrado perfeccionado, con aumento de peso y pérdidas mecánicas. Fuente, Cortesía BMW. La Fig. 1.17 es complementaria.

1.13.- Efecto del *RCA* ([Volver](#))

- Permite que entren más gases frescos, pero ocasiona una cilindrada menor q' y reduce la relación de compresión a un valor efectivo menor r_c .

$$q = V_{max} - V_{min} = V_{PMI} - V_{PMS} = V|_{\alpha=180^\circ} - V|_{\alpha=0} \qquad q' \doteq V_{RCA} - V_{min} \qquad (1.32)$$

Relación de compresión **geométrica** r Ec. (1.6):

$$r \doteq \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{V_{min} + q}{V_{min}} = 1 + \frac{q}{V_{min}}$$

Relación de compresión **efectiva**:

$$r_c \doteq \frac{V_{RCA}}{V_{min}} \qquad (1.33)$$

Los valores usuales de r son:

- Menores para motores de gasolina, desde 7, para motores sobrealimentados y refrigerados por aire hasta 12, para motores de aspiración normal de pequeño diámetro y elevado *RCA* (se ha llegado a 15 en algún caso).
- Los motores Diésel usan valores entre 14 y 25. Su valor viene limitado por la forma de la cámara de combustión, por las tolerancias de fabricación y dejar sitio para levantar válvulas.

Para relacionar ambas, coeficiente de llenado $a \approx 0,5-0,9$:

$$a \doteq \frac{\overbrace{V_{RCA} - V_{min}}^{q'}}{\underbrace{V_{max} - V_{min}}_q} = \frac{V_{RCA} / V_{min} - 1}{V_{max} / V_{min} - 1} = \frac{r_c - 1}{r - 1} \Rightarrow r_c = 1 + a(r - 1) \qquad (1.34)$$

Que es función de la **cinemática** biela-manivela:

$$a = \frac{V_{RCA} - V_{min}}{V_{max} - V_{min}} = \frac{\cancel{A_e} y_{RCA} / l}{\cancel{A_e} y_{\pi} / l} = \frac{y_{RCA}}{l} = \frac{y \left\langle \pi + \overset{30^\circ \text{ a } 90^\circ}{\widetilde{RCA}}, \lambda \right\rangle}{l} \qquad (1.35)$$

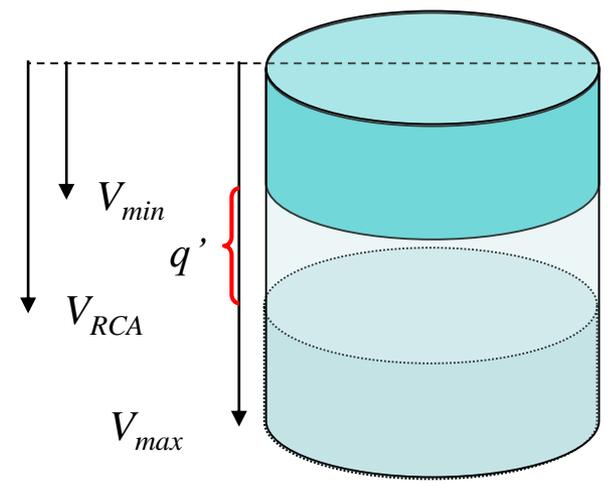


Fig. 1.22.- Esquema de volúmenes en el cilindro.

1.13.- Efecto del *RCA* (cont.) ([Volver](#))

- Luego, se llega a la conclusión de que modificar el *RCA* resulta en un motor de relación de compresión variable. [Video con solución alternativa](#).
- Aumentar el *RCA* más allá del que produce el máximo llenado conduce a reducirlo, lo cual se está empleando en MEP para sustituir a la mariposa como sistema reductor de la carga, ciclo Atkinson y ciclo Miller.

Actividad: Sea un MEP que se desea que tenga una relación de expansión grande, para mejorar su eficiencia, mientras que la de compresión se desea que sea variable, haciendo uso de distribución variable en la admisión. Para ello se diseña con $r = 12$ y un $RCA = 40^\circ$ a plena carga y a régimen de máximo par. A ese mismo régimen se desea aumentarlo hasta $RCA = 120^\circ$ por medio de un desfaseador del árbol de levas de admisión con respecto al cigüeñal. Asuma relación de longitud de biela a carrera $\lambda = 1,7$

Calcular la cilindrada efectiva en ambos casos; compararla con la real.

Solución:

$$a_{40^\circ} = q'/q =$$
$$a_{120^\circ} = q'/q =$$

Calcular la relación de expansión (hasta PMI, despreciando el efecto del *AAE*) y de compresión efectiva.

Solución:

$$r_{e,40^\circ} =$$

$$r_{e,120^\circ} =$$

$$r_{c,40^\circ} =$$

$$r_{c,120^\circ} =$$

1.14.- Dosado global y local y MEP de mezcla estratificada ([Volver](#))

- Una carga con exceso de aire (mezcla con dosado pobre en combustible) proporciona eficiencias elevadas, véase capítulo de ciclos.
- La ignición de mezclas pobres es tanto más difícil cuanto más pobre es, llegando incluso a no encender (límite de empobrecimiento). La llama, una vez establecida aguanta algo mejor el empobrecimiento.
- Resultaría ideal disponer de una estratificación en el dosado. Así entre los electrodos de la bujía se tendría mezcla rica, fácilmente ignitable y no productora de NOx. Periféricamente se tendría aire para diluir los productos de la combustión rica (CO y HCs) y lograr así la plena oxidación del combustible antes de la expansión.
- [Video ilustrativo](#). [Video ilustrativo](#).
- Solo se logra con inyección directa de gasolina o de gas al cilindro

- Mezcla levemente rica en la chispa para favorecer la ignición.
- **Mezcla pobre global** para minimizar emisiones y consumo.
- Solo aire en contacto con las paredes para evitar pérdidas de calor y gasolina inquemada o incluso gases de escape del ciclo anterior ([EGR](#)).

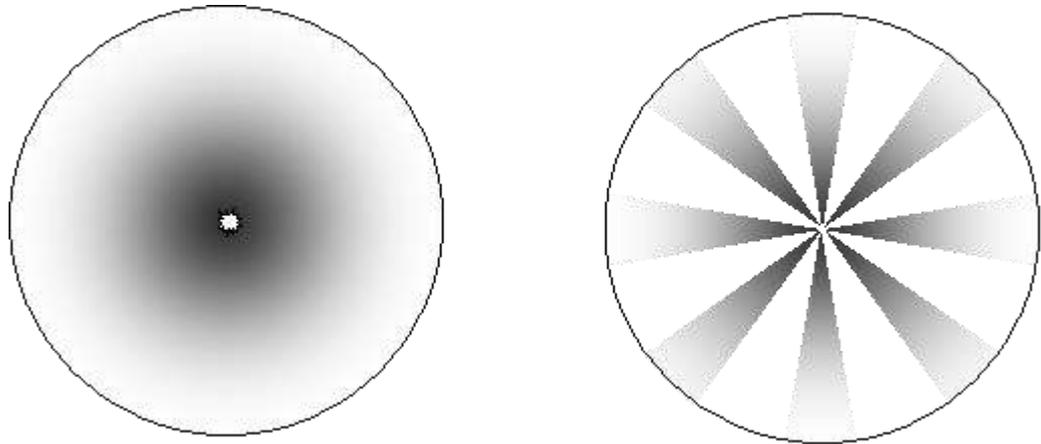
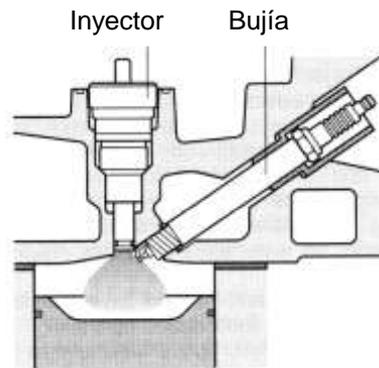


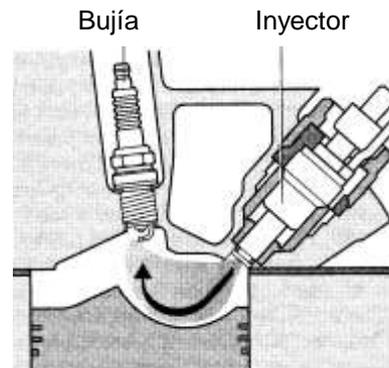
Figura 1.23.- Dos idealizaciones de motor de mezcla estratificada. Izquierda: con bujía central. Derecha: Diésel con inyector central de 8 orificios.

1.14.- Dosado global y local y MEP de mezcla estratificada (cont.) ([Volver](#))

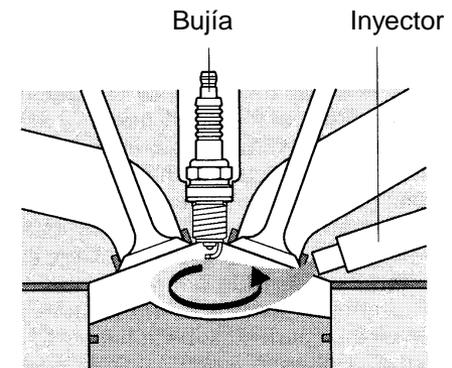
- Existen distintas aproximaciones para lograr la estratificación.
- Involucran [inyección directa al cilindro](#), similar a la de los MEC.
- Involucran movimientos globales de la carga, como el “swirl” y el “[tumble](#)”.
- Involucran formas complejas de la cabeza del émbolo.
- El muy amplio intervalo operativo de los motores de automoción suele exigir cambiar de modo de inyección, de combustión, e incluso colector de admisión de [geometría variable](#).
- Si se desea la máxima potencia posible del motor, es necesario abandonar la estratificación e ir a mezcla homogénea estequiométrica para aprovechar todo el aire en el cilindro.



Formada por el inyector y eventualmente por remolino del aire. [Bosch](#).



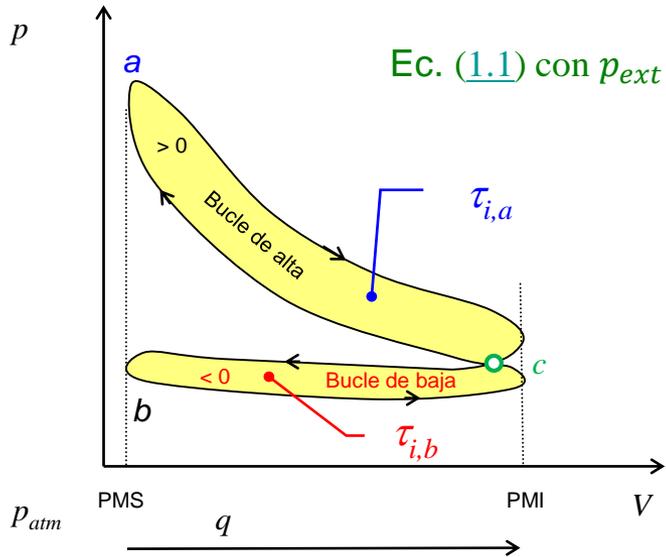
Formada por pared y con vuelco del aire “*tumble*”, tipo [GDI](#), [FSI](#) y [Motronic](#).



Conducida por el aire, por su remolino “*swirl*”

Fig. 1.24.- Tres formas genéricas de lograr estratificación en motores de gasolina con inyección directa. Fuente: [Automotive Handbook](#), [Robert Bosch GmbH](#). 1986.

1.15.- Trabajo y Potencia indicados del ciclo (*Volver*)



Ec. (1.1) con $p_{ext} = p_c$, presión en el cárter: $\tau_i = \oint_{\text{ciclo}} (p - p_c) dV = \oint_{\text{ciclo}} F_g dy$ (1.36)

$$\tau_i = \underbrace{\oint_{\text{ciclo } aca} (p - p_c) dV}_{\text{Área } aca: \tau_{i,a}} + \underbrace{\oint_{\text{ciclo } abc} (p - p_c) dV}_{\text{Área } abc: \tau_{i,b}}$$
 (1.37)

- La frecuencia de realización de ciclos es $2n/T$ luego la potencia indicada:

Se mide en tiempos largos, valor medio	media de muchos ciclos
$W_i = \overline{\tau}_i \frac{2n}{T}$ (1.38)	

Fig. 1.25.- Definición de parámetros indicados.

1 cilindro:

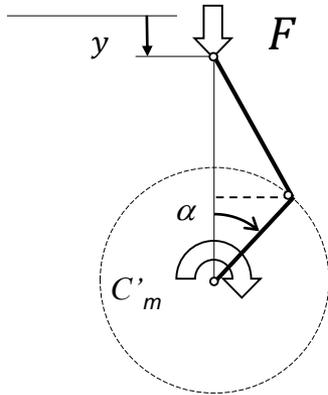
- La dispersión cíclica y las diferencias entre cilindro piden un promediado doble:

Temporal: $W_i = \sum_{j=1}^N \overline{\tau}_{i,j} \frac{2n}{T}$	}	\Rightarrow	$W_i = \overline{\overline{\tau}}_i \frac{2n}{T} N$	Para N cilindros	Por brevedad no se usan los símbolos de promediado.
Entre cilindros: $\overline{\overline{\tau}}_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \overline{\tau}_{i,j}$				(1.39)	

1.16.- Par Motor instantáneo y medio [\(Volver\)](#)

Debido a fuerzas con igual movimiento que el émbolo: Igualando trabajo elemental cilindro j :

$$C'_{m,j} d\alpha = F_j dy \rightarrow C'_{m,j} \langle \alpha, t \rangle = \left(\underbrace{F_g + F_{in} - F_{ro}}_{\substack{\text{Rozam.} \\ \text{émbolo}}} \right)_j l \times f'_c \frac{dy}{d\alpha} = \underbrace{C_{m,g,j}}_{F_g \frac{dy}{d\alpha}} + \underbrace{C_{m,in,j}}_{F_{in} \frac{dy}{d\alpha}} - \underbrace{C_{ro,I,j}}_{F_{ro} \frac{dy}{d\alpha}} \quad (1.40)$$



Par de gases Par de inercia Par de rozamientos émbolo (I)

Para un cilindro j , el par en el eje es el anterior menos los pares de rozamiento del eje (II):

$$C_{m,e,j} \langle \alpha, t \rangle = C'_{m,j} \langle \alpha, t \rangle - C_{ro,II,j} \langle \alpha, t \rangle \quad (1.41)$$

Fig. 1.26.- Fuerza y par resultante en el eje.

Par en el eje de todo el motor, se suma:

$$C_{m,e} \langle \alpha, t \rangle = \sum_{j=1}^N C_{m,e,j} \langle \alpha + \Delta\alpha_{e,j}, t \rangle \quad (1.42)$$

Es necesario detraer el par de los **elementos propios** $_{pr}$ (árbol de levas, encendido, bomba de combustible) y auxiliares $_{au}$ (aire acondicionado, alternador, ...) para dar el **par exterior en el eje** ($_{eex}$) y entonces detraer el de elementos auxiliares ($_{au}$) para dar **par útil** ($_{u}$):

$$C_{m,eex} \doteq C_{m,e} - C_{pr} \quad (1.43)$$

$$C_{m,u} \doteq C_{m,eex} - C_{au} \quad (1.44)$$

1.16.- Par Motor instantáneo y medio [\(Volver\)](#)

Resumen de pares de todo el motor

$$\left. \begin{aligned}
 \text{Ecs. (1.41 y 42), En eje} &\rightarrow C_{m,e} = C_m - C_{ro} \\
 \text{Ec. (1.43), Exterior} &\rightarrow C_{m,eex} = C_{m,e} - C_{pr} \\
 \text{Ec. (1.44), Útil} &\rightarrow C_{m,u} = C_{m,eex} - C_{au}
 \end{aligned} \right\} \rightarrow C_{m,u} = C_m - \underbrace{\underbrace{C_{ro} + C_{pr} + C_{au}}_{\doteq C_{pm}}}_{\doteq C_r} \quad (1.45)$$

Gases e inercia.
No es real pues siempre hay rozamientos.

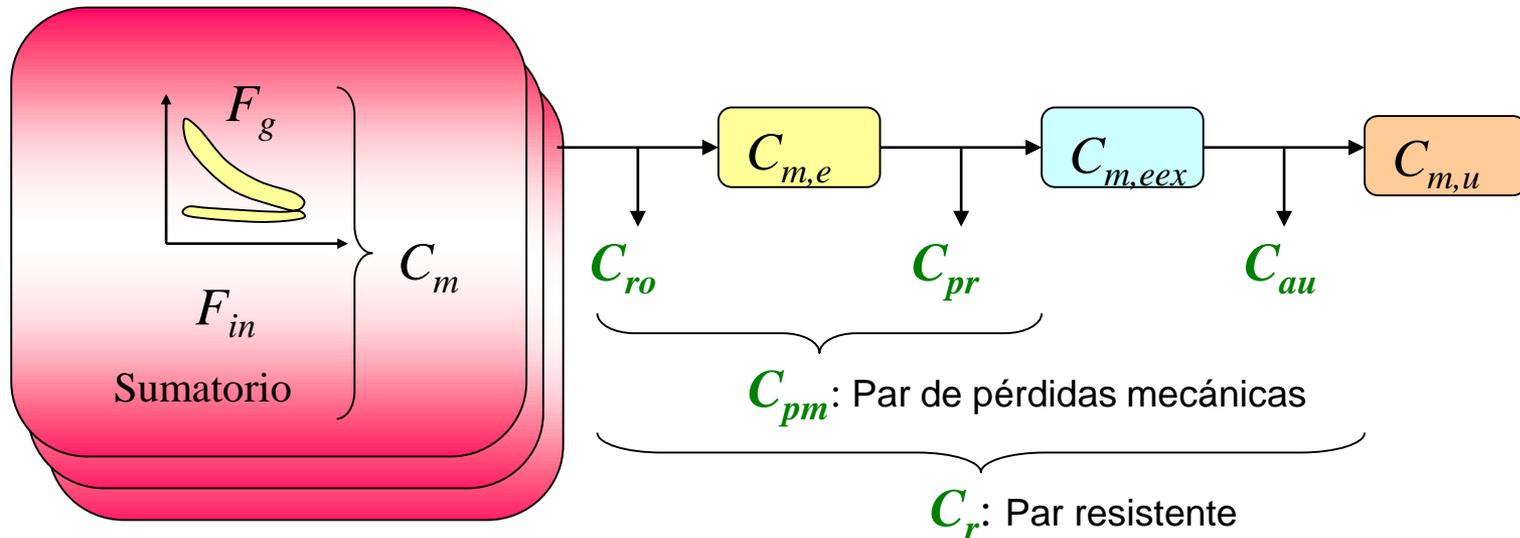


Fig. 1.27.- Par motor de gases y de inercia indicado, pérdidas hasta a par útil.

1.16.- Par Motor instantáneo y medio ([Volver](#))

Par y trabajo medios

$d\tau_i = C_{m,i} \langle \alpha, t \rangle d\alpha$ *Al hallar un valor medio durante un número entero de ciclos, el par de inercia da trabajo nulo, luego el par motor medio se reduce a par medio indicado $\bar{\tau}$, es decir debido solamente a gases.*
 $\omega = \frac{d\alpha}{dt} = 2\pi n$

$$\left. \begin{aligned} W_{\left\{ \begin{matrix} i \\ e \\ ex \\ u \end{matrix} \right\}} &= \bar{C}_{m, \left\{ \begin{matrix} i \\ e \\ ex \\ u \end{matrix} \right\}} \omega \\ \text{Por otro lado Ec (1.38): } W_{\left\{ \begin{matrix} i \\ e \\ ex \\ u \end{matrix} \right\}} &= \bar{\tau}_{\left\{ \begin{matrix} i \\ e \\ ex \\ u \end{matrix} \right\}} \frac{2n}{T} N \end{aligned} \right\} \bar{C}_{m, \left\{ \begin{matrix} i \\ e \\ ex \\ u \end{matrix} \right\}} = \bar{\tau}_{\left\{ \begin{matrix} i \\ e \\ ex \\ u \end{matrix} \right\}} \frac{N}{\pi T} \quad (1.46)$$

- El par motor medio y el trabajo medio por ciclo difieren en una constante numérica.
- Para igual trabajo por ciclo, el motor de dos tiempos da el doble de par, pues realiza el doble de ciclos en la unidad de tiempo.
- El par motor medio **exterior** y **útil** tienen significado físico, al aparecer en el eje, pero no así el par motor de gases e indicado C_m . Es una idealización, pues sería el par que aparecería si no hubiera rozamiento alguno.
- El trabajo por ciclo indicado tiene significado físico, pues la presión es medible y este trabajo se realiza sobre el émbolo. El trabajo efectivo, el exterior y más aún el útil son valores que aparecen en el eje, pero no en el ciclo. En consecuencia su significado físico es menos claro.

1.17.- Rendimiento Mecánico y pérdidas [\(Volver\)](#)

- Evalúa las pérdidas desde el trabajo indicado medio hasta la salida que se considere del motor.

1. **Neto:** Usa de referencia el trabajo indicado neto

$$\eta_{m,n,\left\{ \begin{matrix} e \\ eex \\ u \end{matrix} \right\}} \doteq \frac{\overline{\tau}_{\left\{ \begin{matrix} e \\ eex \\ u \end{matrix} \right\}}}{\overline{\tau}_i} = \frac{W_{\left\{ \begin{matrix} e \\ eex \\ u \end{matrix} \right\}}}{W_i} \tag{1.47}$$

2. **Bruto o de alta:** Usa de referencia el trabajo indicado del bucle de alta presión

$$\eta_{m,a,\left\{ \begin{matrix} e \\ eex \\ u \end{matrix} \right\}} \doteq \frac{\overline{\tau}_{\left\{ \begin{matrix} e \\ eex \\ u \end{matrix} \right\}}}{\overline{\tau}_{i,a}} = \frac{W_{\left\{ \begin{matrix} e \\ eex \\ u \end{matrix} \right\}}}{W_{i,a}} \begin{cases} \overline{\tau}_i = \overline{\tau}_{i,a} + \overline{\tau}_{i,b} \\ W_i = W_{i,a} + W_{i,b} \end{cases} \tag{1.48}$$

Por lo tanto, con esta variante, el trabajo indicado del bucle de baja presión (de bombeo) se considera una pérdida propia

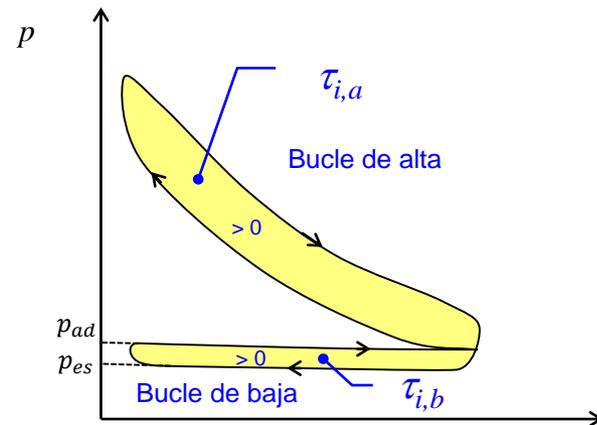


Fig. 1.28.- Ciclo mostrando un trabajo de alta positivo y un trabajo de baja (de bombeo) positivo también, por efecto de la sobrealimentación.

1.17.- Rendimiento Mecánico y pérdidas (cont.) [\(Volver\)](#)

*El bombeo **no** son pérdidas El bombeo **si** son pérdidas*

$$\begin{array}{l}
 \Downarrow \\
 W_e = W_i - \left(\begin{array}{c} >0 \\ W_{ro} \end{array} \right) \\
 W_{eex} = W_i - \left(\begin{array}{c} >0 \\ W_{pm} \end{array} \right) \\
 \\
 W_u = W_i - \underbrace{\left(\begin{array}{c} >0 \\ W_{pm} + W_{au} \end{array} \right)}_{W_r} \\
 \\
 \Downarrow \\
 W_e = W_{i,a} - \left(\begin{array}{c} <0 \\ -W_{i,b} + W_{ro} \end{array} \right) \\
 W_{eex} = W_{i,a} - \underbrace{\left(\begin{array}{c} <0 \\ -W_{i,b} + W_{pm} \end{array} \right)}_{W_{fr}} \\
 \\
 W_u = W_{i,a} - \underbrace{\left(\begin{array}{c} \\ W_{fr} + W_{au} \end{array} \right)}_{W_{rt}}
 \end{array}
 \quad \left. \vphantom{\begin{array}{l} \Downarrow \\ W_e = W_{i,a} - \left(\begin{array}{c} <0 \\ -W_{i,b} + W_{ro} \end{array} \right) \\ W_{eex} = W_{i,a} - \underbrace{\left(\begin{array}{c} <0 \\ -W_{i,b} + W_{pm} \end{array} \right)}_{W_{fr}} \\ W_u = W_{i,a} - \underbrace{\left(\begin{array}{c} \\ W_{fr} + W_{au} \end{array} \right)}_{W_{rt}} } \right\} \eta_{\left. \begin{array}{l} n, \left\{ \begin{array}{l} e \\ eex \\ u \end{array} \right\} \\ m, \left\{ \begin{array}{l} e \\ eex \\ u \end{array} \right\} \\ a, \left\{ \begin{array}{l} e \\ eex \\ u \end{array} \right\} \end{array} \right\} = 1 - \frac{\left[\begin{array}{l} \left\{ \begin{array}{l} W_{ro} \\ W_{pm} \\ W_r \end{array} \right\} \\ \left\{ \begin{array}{l} -W_{i,b} + W_{ro} \\ W_{fr} \\ W_{rt} \end{array} \right\} \end{array} \right]}{W_{i,\{a\}}} \quad (1.49)$$

NOTA: No es necesario “memorizar” estas fórmulas, tan solo conocer el concepto y saber manejarlo. Los subíndices a menudo se obvian cuando no hay posibilidad de error.

1.18.- Presión Media Equivalente [\(Volver\)](#)

Aquella **sobrepresión** que en el cilindro da igual trabajo en la carrera de expansión que el ciclo:

$$pm \doteq \frac{\tau}{\underbrace{V_{max} - V_{min}}_q} \quad (1.50)$$

(I) **Indicada** cuando es en el émbolo:

$$pmi = \frac{\tau_i}{q} \quad (1.51)$$

(II) **Efectiva**, cuando es en eje:

$$pme \left\{ \begin{matrix} e \\ eex \\ u \end{matrix} \right\} = \frac{\overline{\tau} \left\{ \begin{matrix} e \\ eex \\ u \end{matrix} \right\}}{q}$$

Ec. (1.38) trabajo función de potencia:

$$W \left\{ \begin{matrix} i \\ e \\ eex \\ u \end{matrix} \right\} = \overline{\tau} \left\{ \begin{matrix} i \\ e \\ eex \\ u \end{matrix} \right\} \frac{2n}{T} N$$

$$\rightarrow pme \left\{ \begin{matrix} e \\ eex \\ u \end{matrix} \right\} = \frac{1}{q} \frac{W \left\{ \begin{matrix} e \\ eex \\ u \end{matrix} \right\}}{N \left(\frac{2n}{T} \right)} = \frac{T}{2nQ} W \left\{ \begin{matrix} e \\ eex \\ u \end{matrix} \right\}; \text{ luego: } pmi = \frac{T}{2nQ} W_i \quad (1.52)$$

Para las **pérdidas mecánicas** hay también pm: pmro, pmpr, pmou, pmr, pmfr, pmrt ... ver **Ec. (1.49)**

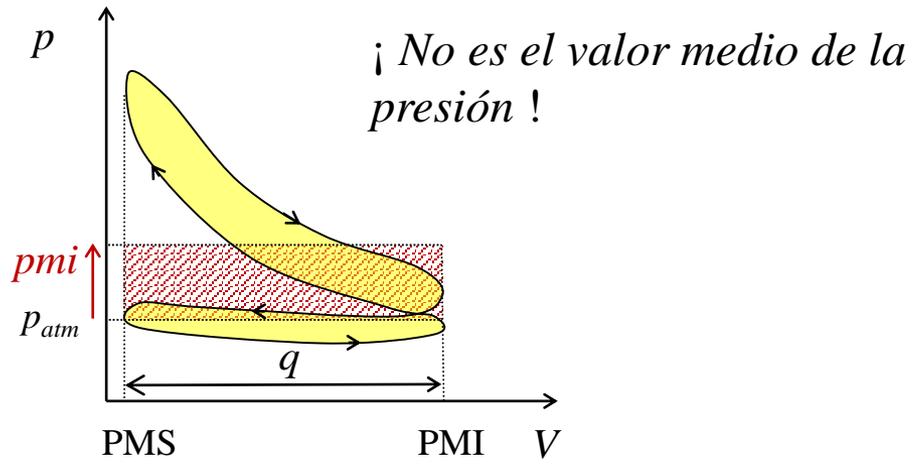


Fig. 1.29.- Concepto de presión media equivalente indicada..

1.18.- Presión Media Equivalente (cont.) [\(Volver\)](#)

- Valores **máximos** típicos:
 - 4 tiempos
 - Aspiración atmosférica o normal (a. n.) a nivel del mar:
 - MEP: *p_{mi}* de 6 a 12 bar
 - MEC: *p_{mi}* de 6 a 10 bar
 - Turboalimentados o sobrealimentados:
 - *Posenfriado*: Multiplicar por la relación de presiones del compresor: 2 a 3 en automoción y hasta 4 en los más modernos) y hasta 10 en motores industriales avanzados
 - Sin posenfriador, solo para relaciones de presiones moderadas: Multiplicar por 0,7.
 - 2 tiempos
 - Multiplicar por 0,7 a 0,9 a causa de pérdidas por el barrido.

Actividad: Estime la *p_{mi}* máxima de un motor de automoción diésel tipo TDI de $Q = 2.000 \text{ cm}^3$ de cilindrada, sabiendo que la presión absoluta tras el turbo es de 2 bar y que es posenfriado. Sabiendo que gira a 4.500 r.p.m. calcular la potencia indicada. Calcular la potencia útil estimando el $\eta_{m,a,eex}$ con una correlación de Heywood:

$$10 \text{ cm} < D < 14 \text{ cm}: p_{mfr} \text{ [kPa]} = C + 48 \left(\frac{n}{1.000 \text{ rpm}} \right) + \underbrace{0,4 \left(\frac{u}{\text{m/s}} \right)^2}_{\substack{\text{Primordialmente} \\ \text{pérdidas de} \\ \text{bombeo: } -p_{mi_b}}} ; \begin{cases} C = 75 \text{ kPa para inyección directa} \\ \text{para inyección en precámara de swirl:} \\ C = 140 \text{ kPa para el menor } D \\ C = 110 \text{ kPa para el mayor } D \end{cases} \quad (1.52\text{bis})$$

1.18.- Presión Media Equivalente (cont.) [\(Volver\)](#)

- Relación con la potencia y con el par:

Ec. (1.51) \Rightarrow
$$pme_{\left\{ \begin{smallmatrix} e \\ eex \\ u \end{smallmatrix} \right\}} = \frac{T}{2nQ} W_{\left\{ \begin{smallmatrix} e \\ eex \\ u \end{smallmatrix} \right\}}$$

Ec. (1.47) expresada en $pme \Rightarrow$
$$pme_{\left\{ \begin{smallmatrix} e \\ eex \\ u \end{smallmatrix} \right\}} = \left\{ \begin{array}{l} pmi \cdot \eta_{m,n,\left\{ \begin{smallmatrix} e \\ eex \\ u \end{smallmatrix} \right\}} \\ pmi_a \eta_{m,a,\left\{ \begin{smallmatrix} e \\ eex \\ u \end{smallmatrix} \right\}} \end{array} \right\} \rightarrow W_{\left[\begin{smallmatrix} e \\ eex \\ u \end{smallmatrix} \right]} = Q pmi_{\left\{ a \right\}} \frac{2n}{T} \eta_{m,\left\{ a \right\},\left[\begin{smallmatrix} e \\ eex \\ u \end{smallmatrix} \right]}$$
 (1.53)

Presión media equivalente y par

$$\left. \begin{array}{l} C\omega = W \\ \omega = 2\pi n \end{array} \right\} \Rightarrow C_{m,\left\{ \begin{smallmatrix} a \\ e \\ eex \\ u \end{smallmatrix} \right\}} = Q pmi_{\left[a \right]} \frac{1}{\pi T} \left\{ \begin{array}{l} 1 \\ \eta_{m,\left[a \right],e} \\ \eta_{m,\left[a \right],eex} \\ \eta_{m,\left[a \right],u} \end{array} \right\} = Q \left\{ \begin{array}{l} pmi_{\left[a \right]} \\ pme_e \\ pme_{eex} \\ pme_u \end{array} \right\} \frac{1}{\pi T}$$

Como la pmi no depende de Q , el par es $\propto Q$

(1.54)

1.19.- Rendimientos Globales del motor (*Volver*)

- Se parte de la idea de que la integridad de la energía contenida en el combustible es convertible en trabajo útil (*exergía*), si bien no con un motor térmico, pues en cuanto se libera en forma de calor ello no es posible, por las limitaciones de Carnot. Debería liberarse reversiblemente. La energía contenida en el combustible se determina con el *poder calorífico*, que a efectos útiles se toma como el su valor inferior L_i .
- Por ello en inglés, al rendimiento o *eficiencia* de un MACI, el cual compara la potencia obtenida con el flujo exergético del combustible, se le denomina *fuel efficiency*, para distinguirlo del *thermal efficiency*, válido para motores de combustión externa y otras máquinas que intercambian calor.

• Rendimiento indicado: $\eta_i \doteq \frac{W_i}{W_{comb}} = \frac{W_i}{\dot{m}_{comb} L_i}$

• Rendimiento efectivo: $\eta_e \doteq \frac{W_e}{W_{comb}} = \frac{W_e}{\dot{m}_{comb} L_i}$

Solo para estudios del interior del motor (1.54)

• Rendimiento exterior (sin auxiliares): $\eta_{eex} \doteq \frac{W_{eex}}{W_{comb}} = \frac{W_{eex}}{\dot{m}_{comb} L_i}$

• Rendimiento útil (incluye auxiliares): $\eta_u \doteq \frac{W_u}{W_{comb}} = \frac{W_u}{\dot{m}_{comb} L_i}$

Los más usados (1.55)

Las distintas normas para especificar potencias y rendimientos determinan las condiciones precisas.

1.19.- Rendimientos Globales del motor ([Volver](#))

- Consumo específico:** Una manera de dar el rendimiento del motor para un combustible dado, por W lo que no interviene el poder calorífico. Definición: *Masa de combustible consumido para realizar un trabajo determinado, el cual se manifiesta como una potencia media por el tiempo considerado.*

$$C_e \doteq \frac{m_{comb}}{\tau} = \frac{\dot{m}_{comb}}{W} \tag{1.56}$$

- Por otra parte, **Ec. (1.13)**: $W = \dot{m}_{comb} L_i \eta$, con lo que resulta, con iguales unidades que L_i^{-1} :

$$C_e = \frac{1}{L_i \eta} \tag{1.57}$$

Las unidades habituales son g/kWh, luego, si se introduce L_i en kJ/g o MJ/kg, tenemos la conversión a las unidades, expresadas en el corchete. Usamos la multiplicación por 1 para transformar unidades; simplificando:

$$C_e \left[\frac{g}{kWh} \right] = \frac{1}{L_i \left[\frac{kJ}{g} \frac{h}{3.600s} \frac{kW}{kJ/s} \right] \eta} = \frac{3.600}{L_i \left[\frac{MJ}{kg} \right] \eta} \tag{1.58}$$

Ejemplo: Un motor consume 10 litros de gasolina a la hora, con una densidad de 0,8 kg/l, entregando una potencia media de 30 kW. Su consumo específico es: $\frac{8.000 \text{ g/h}}{30 \text{ kW}} = 267 \frac{g}{kWh}$. Con $L_i = \frac{42 \text{ MJ}}{kg}$ le corresponde un rendimiento : $\eta = \frac{3.600}{C_e L_i} = \frac{3.600}{160 \times 42} = 0,32$

1.20.- Actuaciones ([Volver](#))

- Carga puede definirse como el trabajo que realiza el ciclo e interesa que sea variable.
- Recibe este nombre porque viene dado por la carga (masa) de gases de combustión retenidos dentro del motor. También se justifica este nombre por la carga que es capaz de arrastrar el motor.
- Habitualmente se valora como una fracción o “grado” de un resultado externo, p. e. $\kappa_{eex} = \text{par/par máximo}$ que a ese régimen es capaz de proporcionar el motor en su eje externo, “a plena carga” p_c ; pero puede ser valorada por un parámetro interno, p. e. de trabajo indicado κ_i o de presión de admisión κ_{ad} , c. r. a los máximos valores de estos parámetros, etc. $\kappa_x = x/x_{pc}$.
- Tipos de reducción de la carga a través del **grado de carga primario**, que es aquél que directamente se controla:
 - **MEC (Diésel)** se admite todo el aire posible y se parcializa la carga con la cantidad de combustible inyectado κ_{comb} . Así, actúa a dosado global muy bajo a carga parcial y casi estequiométrico a plena carga, por limitación de humo en el escape. La alta r y el bajo F_R logran una alta eficiencia η .
 - **MEP (ignición forzada con chispa)**. r limitada por la aparición de detonación. Hay dos posibilidades de parcializar la carga:
 - I. Con mariposa en la admisión** (clásicos). Se parcializa la masa de aire admitido reduciendo la presión de admisión, κ_{ad} . Se dosifica el combustible necesario a cada estado operativo y combustión de dosado homogéneo $F_R > 0,9$ para conseguir una buena combustión, elevada eficiencia y bajas emisiones.
 - II. Sin mariposa de admisión**. Se evita un área muy negativa del [bucle de bombeo](#) a carga parcial, lo que reduciría η . [Ejercicio](#). El grado de carga primario es la cilindrada efectiva q' .
 - II.a. Con retraso al cierre de la admisión ([RCA](#)) variable. Igual que I. [Ejercicio](#).
 - II.b. Igual que los MEC. [Combustión estratificada](#) globalmente pobre, por inyección de combustible directa al cilindro, siendo el grado primario κ_{comb} .

1.20.- Actuaciones ([Volver](#))

• La entrega del motor suele valorarse con la potencia o con el par y con C_e .

Variables independientes: régimen y carga. Condiciones atmosféricas estándar.

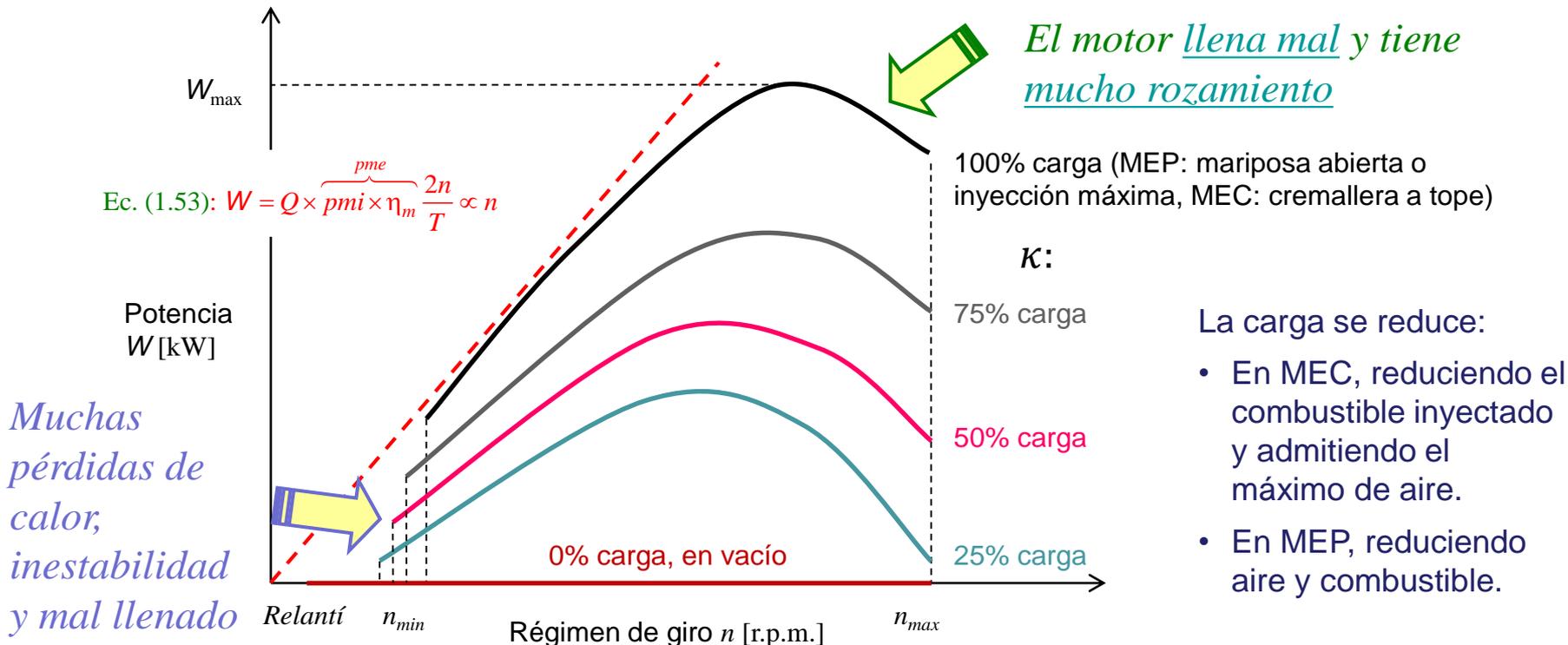


Fig. 1.30.- Curvas características de potencia a carga plena y parcial..

- La potencia crece con el régimen hasta alcanzar el máximo W_{max} , descendiendo rápidamente a regímenes mayores a causa de un descenso de p_{mi} (por mal llenado) y de η_m .
- El régimen máximo n_{max} determina la frontera de funcionamiento seguro frente a roturas.
- El régimen mínimo n_{min} es por estabilidad de marcha. Se para con facilidad.

1.20.- Actuaciones ([Volver](#))

- Para evitar roturas es frecuente el uso de limitadores de régimen máximo, generalmente cortando el aporte de combustible, [p. e.](#) o cortando el encendido de forma progresiva en MEP. Es posible que no se alcance W_{max} .
- La potencia máxima suele distinguirse entre potencia máxima continua, sin límite de tiempo y potencia nominal, solo posible por un tiempo limitado.
- Dada la inercia térmica de los MCIA, se puede cerrar la [válvula de cortocircuito](#) de la turbina del [turbo](#) para obtener durante unos segundos una sobre-potencia, denominada “*overboosting*”.
- Los motores para generación eléctrica suelen girar a un régimen fijo, dado por la frecuencia de la red y el número de pares de polos del generador, típicamente alrededor de 1.500 rpm, 1.800 rpm, 3.000 rpm o 3.600 rpm según sea la red de 50 o de 60 Hz.
- Cuando las condiciones atmosféricas son diferentes a las que se tienen durante la obtención de las prestaciones (curvas de par o potencia y consumo específico, en condiciones θ_0) se aplican [fórmulas de corrección](#). Suelen aplicarse separadamente a las [pérdidas mecánicas](#) y a la [potencia indicada](#):

$$W_i = W_{i,0} \left(\frac{p_{atm}}{p_{atm,0}} \right)^a \left(\frac{T_{atm,0}}{T_{atm}} \right)^n ; a \approx 1; 0 \leq n \leq 1 \quad (1.59)$$

La potencia indicada aumenta con aumentos de la presión y disminuye con aumentos de la temperatura atmosféricas.

El [consumo específico](#) necesita una corrección aparte.

Al aumentar la altura geográfica, la presión atmosférica cae y la temperatura suele caer, en media. El resultado es una caída de la potencia, de acuerdo a la [Ec. \(1.59\)](#).

La [Ec. \(1.59\)](#) es particularmente aplicable a motores de aspiración normal (sin sobrealimentación).

Cuando hay (turbo)sobrealimentación, es necesario tener en cuenta el mecanismo de regulación de este dispositivo, por lo que la forma de corregir puede cambiar.

De hecho, los motores con turboalimentación tratan de mantener la potencia con la altura, hasta un límite.

1.20.- Actuaciones ([Volver](#))

Ejercicio yy: Determinar la potencia útil que un motor de [aspiración normal](#) (atmosférico) pierde en verano en Madrid, $t_{atm} = 35 \text{ }^\circ\text{C}$; $p_{atm} = 0,9 \text{ atm}$, con respecto a la potencia medida en condiciones estándar de $t_{atm,0} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$; $p_{atm,0} = 1 \text{ atm}$ al mismo régimen de giro. El fabricante especifica $a = 1$; $n = 0,5$ y potencia de pérdidas mecánicas constantes frente a los cambios atmosféricos, véanse [Ecs. 1.52bis](#) y [1.59bis](#). Tiene el motor en las condiciones estándar un rendimiento mecánico $\eta_{m,0} = 0,9$. Calcular el rendimiento mecánico en altura η_m .

Solución:

$$\% \text{ de pérdida} = 100 \left(1 - \frac{W_u}{W_{u,0}} \right) = 100 \left(1 - \frac{W_i - \frac{W_{pm}}{W_{pm,0}}}{W_{i,0} - \frac{W_{pm,0}}{W_{pm,0}}} \right) \left. \vphantom{\frac{W_u}{W_{u,0}}} \right\} \rightarrow \% \text{ de pérdida} = 100 \left[1 - \frac{W_i - W_{i,0}(1 - \eta_{m,0})}{\eta_{m,0} W_{i,0}} \right] \rightarrow$$

$$W_{pm,0} = W_{i,0}(1 - \eta_{m,0})$$

$$\rightarrow \% \text{ de pérdida} = 100 \left[1 - \frac{1}{0,9} \frac{p_{atm}}{p_{atm,0}} \left(\frac{T_{atm,0}}{T_{atm}} \right)^n + \frac{0,1}{0,9} \right] = 100 \left[1,111 - \frac{1}{0,9} 0,9 \frac{W_i/W_{i,0}=0,8703}{\left(\frac{15+273,16}{35+273,16} \right)^{0,5}} \right] = 14,4\%$$

$$\eta_m = 1 - \frac{W_{pm}}{W_i} = 1 - \frac{W_{pm,0}/W_{i,0}}{W_i/W_{i,0}} = 1 - \frac{1 - \eta_{m,0}}{W_i/W_{i,0}} = 0,885$$

Al disponer este motor de un sistema que mantiene el dosado con la altura, el rendimiento indicado del motor se puede asumir que se mantiene también con la altura; determinar la corrección a efectuar al consumo específico.

Solución: [Ecs. \(1.14\)](#), [\(1.47\)](#), [\(1.54\)](#) [\(1.55\)](#) y [\(1.57\)](#): $C_e = \frac{\eta_0}{\eta} C_{e,0} = \frac{\overbrace{\eta_{i,0}}^{=1}}{\eta_i} \frac{\eta_{m,0}}{\eta_m} C_{e,0} = \frac{0,9}{0,885} C_{e,0} = 1,016 C_{e,0}$

El consumo específico aumenta.

1.20.- Actuaciones (cont.) *(Volver)*

Ejercicio xx: Una fórmula de predicción de las pérdidas mecánica es la siguiente: MEP de 4 cilindros y 4 tiempos actuando a plena carga $845 \text{ cm}^3 < Q < 2.000 \text{ cm}^3$. $n < 6.000 \text{ r.p.m.}$, correlación tomada de J. B. Heywood, proporcionando valores del orden del doble de los motores actuales, en 2016:

$$pmfr_{pc} [\text{bar}] = 0,97 + 0,15 \left(\frac{n}{1.000 \text{ r.p.m.}} \right) + 0,05 \left(\frac{n}{1.000 \text{ r.p.m.}} \right)^2 ; \text{ Ecs. (1.49 y 52)} : pme_{\left\{ \begin{smallmatrix} eex \\ u \end{smallmatrix} \right\}} = pmi_a - \left\{ \begin{smallmatrix} pmfr \\ pmrt \end{smallmatrix} \right\} \quad (1.59\text{bis})$$

Asuma 3 valores de la pmi , desde el valor máximo esperable para motores de aspiración normal hasta marcha en vacío y de ello obtenga el valor correspondiente de $\eta_{m,a,eex}$ para tres regímenes típicos, mínimo, medio y máximo en este tipo de motores: 1.000, 3.000 y 6.000 r.p.m. respectivamente.

Solución: El motor marcha en vacío cuando $pmi = pmfr$, con lo que $\eta_{m,a,eex} = 0$. Disponemos de 2 valores de pmi para calcular la $pmfr$ y de ella el rendimiento mecánico:

Como es a plena carga, salvo a 6.000 r.p.m: $pmi \approx pmi_a$

Ec. (1.49):

$$\eta_{m,a,eex} = 1 - \frac{W_{fr}}{W_{i,a}} \approx 1 - \frac{pmfr}{pmi} \approx \eta_{m,n,eex}$$

n [r.p.m.]	pmfr _{pc} [bar]	η _{m,a,eex}	
		pmi = 12 bares	pmi = 6 bares
1.000	1,17	0,90	0,81
3.000	1,87	0,84	0,69
6.000	3,67	0,69	0,39

Observaciones:

- Se obtiene elevado valor de $\eta_{m,a,eex}$ a bajo régimen y elevada pmi , radicando ahí uno de los intereses en lograr un llenado máximo y en la sobrealimentación. Esto último podría hacer subir aún más la pmi sin aumentar la $pmfr$ apreciablemente.
- Rendimiento mecánico muy bajo a elevado régimen y a baja pmi .
- Se ha usado un valor de $pmfr$ de plena carga, esto es, con un trabajo de bombeo muy bajo $\tau_{i,b} \ll \tau_{i,a}$, pues los motores ensayados son relativamente contemporáneos. Si la reducción de la pmi se obtuviera por cierre de la mariposa, se daría lugar una pmi_b mas negativa, por lo que es necesario corregir la correlación aportada, añadiendo el extra de trabajo de bombeo. No hay información suficiente para efectuar esta corrección.

1.20.- Actuaciones (cont.) [\(Volver\)](#)

Ejercicio xy: Considere que al entrar el aire a un motor de cuatro tiempos, sufre:

- Posible sobrealimentación (con posible poseenfriamiento) y pérdidas de presión de remanso en el tracto de admisión del motor por fricción con las paredes, antes del colector de admisión. Generalmente ocasiona un calentamiento.
- Calentamiento de las paredes del colector de admisión, de la pipa, la válvula y del cilindro. Enfriamiento por evaporación del combustible, ocupación de volumen por el combustible evaporado.
- Mezclado con los gases residuales procedentes del ciclo anterior.
- Pérdida de presión de remanso por efecto de la turbulencia y de la fricción con las paredes.

Todo ello acarrea una diferencia en la densidad del aire admitido al cilindro con respecto al de la atmósfera. Por ello, se define un rendimiento gravimétrico global, desde la atmósfera $\eta_{\rho,g} \doteq \frac{\rho_{RCA}}{\rho_{atm}}; \rho_{RCA} = \frac{m_{a,RCA}}{V_{RCA}}$.

- Usando la definición de rendimiento volumétrico y de cilindrada efectiva, obtener una expresión en la que intervenga esta definición y ponga de manifiesto el efecto del RCA.
- Usando la densidad media en el colector de admisión como referencia, manifestar los efectos antes del colector de admisión en el rendimiento volumétrico usando la definición de un rendimiento gravimétrico de entrada: $\eta_{\rho,e} \doteq \frac{\rho_{RCA}}{\rho_{ad}}$.

Solución: conjuntamente,

$$\text{Ecs. (1.15) y (1.34)} : \eta_{v,g} \doteq \frac{\dot{m}_a}{Q \frac{2n}{T} \rho_{atm}} = \frac{Q' \frac{2n}{T} \rho_{RCA}}{Q \frac{2n}{T} \rho_{atm}} = a \frac{\overbrace{\rho_{RCA}}^{\eta_{\rho,g}}}{\rho_{atm}} = a \frac{\rho_{RCA}}{\rho_{ad}} \frac{\rho_{ad}}{\rho_{atm}} = \tilde{a} \eta_{\rho,e} \times \frac{\rho_{ad}}{\rho_{atm}}$$

Sobrealimentación
o
Turboalimentación
y fricción antes de
la entrada.

Por lo tanto, la masa de aire en el RCA del motor (disponible para quemar combustible) puede ser variada a) modificando la densidad con la que se alimenta el motor y también b) modificando el volumen disponible para el aire.

La presencia de residuales suele reducirse permitiendo tener $CRUCE = RCE + AAA > 0$ pues al estar ligeramente abiertas ambos tipos de válvulas es posible engendrar un proceso de barrido durante ese periodo de tiempo, si se logra $p_{es} < p_{ad}$ y con ello sustituirlos por gases frescos, al menos parcialmente. Un $CRUCE < 0$ tiene por efecto una gran retención de gases residuales, beneficioso para reducir los gases contaminantes NO_x , constituyendo un EGR interno. Reduce el rendimiento volumétrico y con ello el par motor, por lo que resulta conveniente solamente a carga parcial.

1.20.- Actuaciones (cont.) (Volver)

Ejercicio zz: El mismo motor de a. n. del [Ejercicio xx](#) parte de plena carga (p_c) y [reduce carga](#) de dos formas alternativas: a) convencional con mariposa y b) distribución variable y sin mariposa, aumentando el RCA para reducir la masa admitida. El motor mantiene el dosado estequiométrico al variar la carga, por ser de catalizador de gases de escape [de tres vías](#). Sobre la base de ello, asuma que en ambas opciones $\eta_{i,a} = \eta_{i,a,pc}$. Se asume que $pmpm$ no varía al reducir la carga en ambas opciones, por no incluir este parámetro el bucle de bombeo.

a) Con mariposa: $\kappa_{i,a} \doteq \frac{pmi_a}{pmi_{a,pc}} = \frac{pad}{patm} = \kappa_{ad} \leq 1$ al ser de a. n.; por ser la expansión a través de la mariposa aproximadamente a $T = cte$. Y además se admite la aproximación de presiones constantes: $pmi_b = pad - patm = -patm(1 - \kappa_{ad})$.

b) Distribución variable, el grado de carga resulta: $\kappa_{i,a} \doteq \frac{pmi_a}{pmi_{a,pc}} = a$, al ser $\rho_{ad} = cte.$, $pmi_b \approx 0$ por ser $pad \approx patm \rightarrow \kappa_{ad} = 1$.

Formular cómo varía $\eta_{m,n,eex}$ con el grado de carga indicado, evaluado éste por la fracción de plena carga; $\kappa_i = \frac{pmi}{pmi_{pc}}$ y determinar la condición de marcha en vacío. Dato: a 1.000 rpm es $\eta_{m,n,eex,pc} = 0,9$.

Solución:

Ec. (1.49): $\eta_{m,n,eex} = 1 - \frac{pmpm}{pmi} \frac{pmi_{pc}}{pmi_{pc}} = 1 - \frac{1 - \eta_{m,n,eex,pc}}{\kappa_i}$. Al reducirse carga indicada, el rendimiento mecánico disminuye.

Marcha en vacío: $\eta_{m,n,eex} = 0 \rightarrow \kappa_i = 1 - \eta_{m,n,eex,pc} = 0,1$. Cuando la pmi (neta) es la décima parte de la de plena carga, se emplea plenamente en vencer las pérdidas mecánicas, por lo que la $pme_{eex} = 0$, marchando el motor en vacío. Esto significa que no puede arrastrar carga alguna, nulo grado de carga en el eje exterior $\kappa_{eex} = 0$.

De acuerdo a las aproximaciones aceptadas, formule el rendimiento en el eje exterior, con respecto al de plena carga para ambas opciones de motor, como función del grado de carga primario respectivo: κ_{ad} y a .

Solución: Haciendo uso de la [Ec. \(1.49\)](#),

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{a)} \\ \text{b)} \end{array} \right. \frac{\eta_{eex}}{\eta_{eex,pc}} = \frac{\eta_{i,a} \eta_{m,a,eex}}{\eta_{i,a,pc} \eta_{m,a,eex,pc}} = \frac{\eta_{m,a,eex}}{\eta_{m,a,eex,pc}} = \frac{1 - \frac{pmpm}{pmi_a}}{\eta_{m,a,eex,pc}} = \frac{1 - \frac{pmpm - pmi_b}{pmi_a}}{\eta_{m,a,eex,pc}} = \frac{1 - \left\{ \kappa_{ad} \right\}^{-1} \left[\overbrace{1 - \eta_{m,a,eex,pc}}^{\approx 0,1} + \frac{\overbrace{patm}^{\approx 1/12}}{pmi_{a,pc}} \left(1 - \left\{ \frac{\kappa_{ad}}{1} \right\} \right) \right]}{\eta_{m,a,eex,pc} \approx 0,9}$$

Puede observarse que el rendimiento del motor cae al disminuir la carga, a pesar de que su rendimiento indicado de alta se mantiene. Llega a 0 en la marcha en vacío por anularse el rendimiento mecánico. La opción a) con mariposa ofrece menor para igual carga parcial, por el bucle de bombeo, último sumando. De ahí la ventaja del motor sin mariposa cuando actúa a carga parcial. En los MEP de mezcla estratificada y en los MEC se dispone del efecto mejorador a cargas parciales por reducirse F_R con la carga. Este efecto se analiza en el [Capítulo 3](#).

1.20.- Actuaciones (cont.) ([Volver](#))

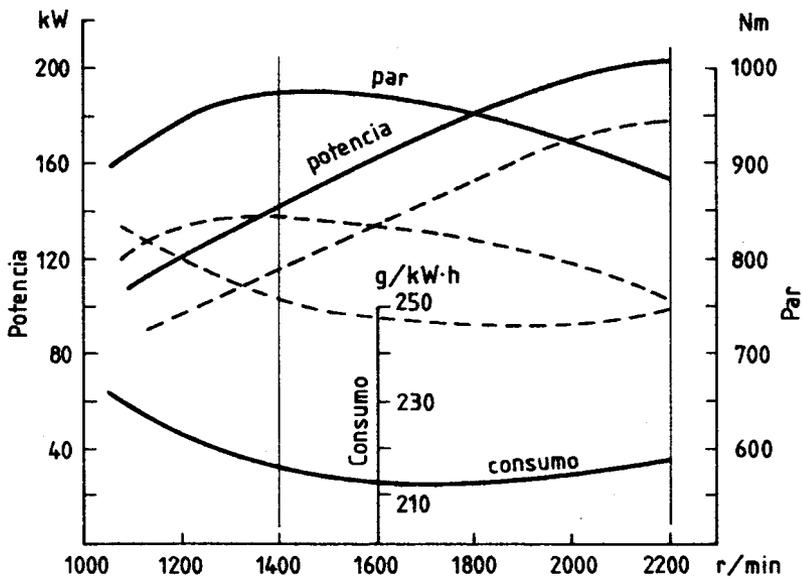


Fig. 1.31.- Curvas características de dos versiones de un mismo MEC de transporte pesado de carretera, a plena carga. De a. n. (línea de trazos) y ligeramente turboalimentado (línea continua), pero sin aumentar el aporte de combustible.

- **A plena carga:** se suele dar información redundante al dibujarse par y potencia.
- Todos los pares y potencias por debajo de los de plena carga son posibles. El consumo específico variará a carga parcial, en general disminuyendo y/o aumentando tendiendo a aumentar, por la caída de η_m , Ejercicio [xx](#).
- El régimen de máximo par:
 - Si es muy bajo, ayuda a acelerar el motor, [Ec. \(1.20\)](#), pero es difícil que sea alto también a elevado régimen, reduciendo la potencia máxima.
 - Si es alto, provoca elevada potencia máxima, pero se pierde capacidad de aceleración a reducido régimen.
 - La curva de par suele ser similar en forma a la de rendimiento volumétrico como función de n .

Actividad: Comprobar la corrección de las curvas de par y potencia del ejemplo de la [Fig. 1.31](#).

Solución: P. e., al régimen de máximo par, versión turbo, $n = 1.400 \text{ rpm}$; $C_m = 980 \text{ Nm} \rightarrow W = C_m \omega = 980 \text{ Nm} \cdot 2\pi \frac{1.400}{60 \text{ s}} = 144 \text{ kW} \rightarrow \text{OK}$.

1.20.- Actuaciones (cont.) [\(Volver\)](#)

- Según la [Ec. \(1.19\)](#) sobre el conjunto del motor aparece un par de vuelco igual y contrario al par motor en su eje. Lo mismo le ocurre a un dispositivo que absorba de forma estacionaria la potencia del motor. Se denomina freno dinamométrico y disipa la potencia del motor calentando agua de un circuito. El par motor se mide haciendo su carcasa basculante e impidiendo su giro con un Q medidor de la fuerza F .

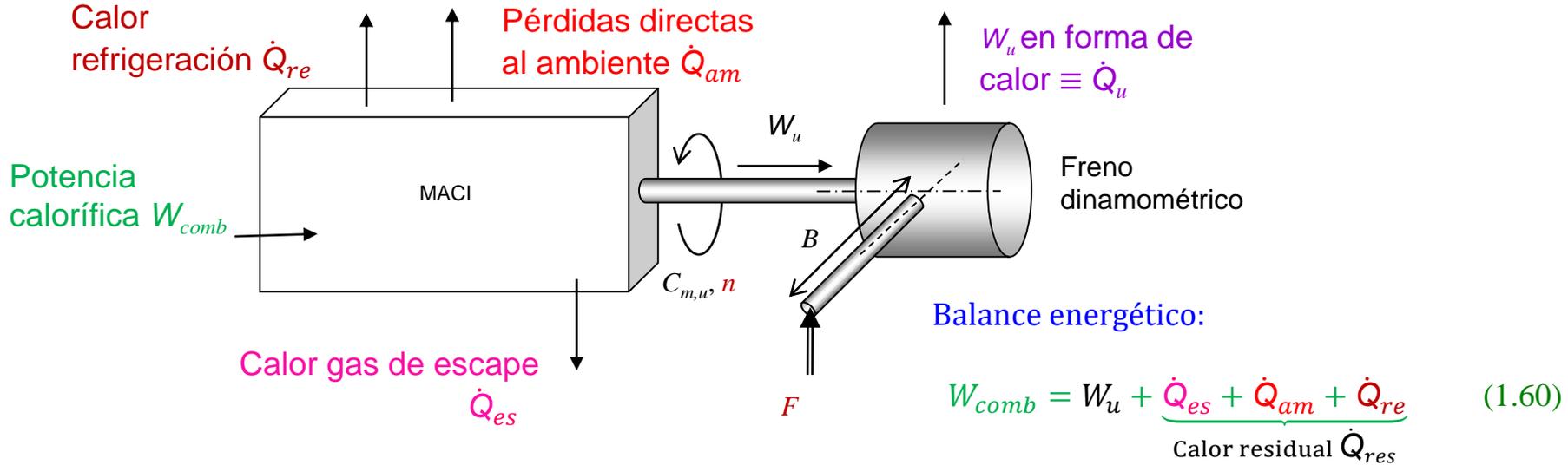


Fig. 1.32.- Esquema del ensayo de prestaciones de un MCI en freno dinamométrico, incluyendo un balance energético.

$$\left. \begin{aligned} W_u &= C_{m,u} \omega \\ C_{m,u} &= F \times B \\ \omega &= 2\pi n \end{aligned} \right\} \rightarrow W_u = FB2\pi n \text{ En marrón las variables medidas con sensores.}$$

NOTAS: La potencia del combustible se considera íntegramente convertible en trabajo útil, por lo que se usa W_{comb} . El calor obtenible del gas de escape es igual a la disminución de su entalpía hasta la temperatura ambiente, despreciando la condensación de agua: $\dot{Q}_{es} = \dot{m}_{es}(h_{es} - h_{amb}) = (\dot{m}_a + \dot{m}_{comb})c_{p,es}(T_{es} - T_{atm})$.

1.21.- Cuestiones de autoevaluación

1. Diferencias entre MEP y MEC; dónde se forma la mezcla, relación de compresión, régimen de giro máximo, presiones máximas en el ciclo, trabajo de bombeo ...
2. ¿Por qué se usa el *RCA*, si reduce el volumen de aire disponible para la admisión y la relación de compresión efectiva?
3. ¿Por qué sería interesante que el *RCA* variara con el régimen del motor?
4. Si se deseara un EGR interno al motor alto ¿qué *CE* elegiría?
5. ¿Cómo se controla la potencia?, ¿con una o con más variables independientes?
6. Dosados habituales en MEP y en MEC.
7. ¿Cuál es la función del termostato y cómo funciona?
8. Quien detrae potencia del motor, la sobrealimentación, la turboalimentación o ambas?
9. En un motor sobrealimentado mecánicamente ¿puede ser la presión de admisión (aquella reinante en el colector durante la admisión) superior a la presión de escape (aquella reinante en el colector de escape durante la carrera de escape)?
10. Parámetros que influyen en la irregularidad del par instantáneo y en las fuerzas de inercia de un pluricilindro.
11. ¿Por qué la fuerza de gas no se traslada a los apoyos del motor?
12. ¿Por qué el par de gases se traslada a los apoyos del motor y la fuerza de gases no?
13. Conceptos de trabajo del ciclo, par, potencia y presión media equivalente.
14. ¿Es la *p_{mi}* dependiente del tamaño del motor, ceteris paribus?
15. ¿Es la *u* típica de máxima potencia dependiente del tamaño del motor?

1.21.- Cuestiones de autoevaluación (cont.)

16. ¿Por qué aumenta el consumo específico de un motor de aspiración normal al aumentar la altura de operación?
17. Un vehículo aéreo dispone de dos motores idénticos, actuando en el mismo punto operativo, ¿el consumo específico de conjunto es el doble del de cada motor?
18. Comentar la razón básica de que el consumo específico tienda a ser muy alto a cargas muy parciales.
19. Se desea probar una versión de un MACI con mayor relación de compresión geométrica, manteniendo la cilindrada. ¿Qué parámetro básico modificaría para conseguirlo fácilmente?
20. Un motor de aspiración normal (sin sobrealimentación) ofrece una p_{me} máxima de 10 bares. Se desea que una versión futura del mismo entregue el triple de su potencia máxima turboalimentando y se asegura que el posenfriador consigue bajar la temperatura del aire comprimido prácticamente hasta la temperatura ambiente. Estime la relación de presiones del compresor del turbo necesario.
21. Muchos motores actuales están incorporando diagrama de la distribución variable. Si se desea maximizar el llenado a altas vueltas (rpm), los ángulos de calado: RCA , AAE , RCE y AAA ¿deberán aumentar o disminuir?
22. Sea un MACI de cuatro cilindros opuestos y 4 tiempos. ¿Puede tener encendidos equidistantes? Y ¿Cuál es el ángulo de cigüeñal y de árbol de levas entre cilindros de encendido consecutivo?
23. En las curvas características de un MACI, ¿es la p_{me} proporcional al par?
24. ¿Cree que la totalidad de la potencia calorífica residual es aprovechable? Tenga en cuenta que implicaría reducir la temperatura de los gases de escape hasta la temperatura ambiente.
25. ¿puede ser $\eta_{v,g} > 1$?

1.21.- Cuestiones de autoevaluación. Respuestas

1. Los MEP usan la alta temperatura del aire comprimido para provocar un autoencendido del combustible que se inyecta cerca del PMS. Durante la combustión se realiza la inyección, evaporación y mezclado por lo que no puede girar el motor muy rápido. La alta r_c origina elevadas presiones. Al no tener mariposa en la admisión, el trabajo de bombeo (bucle de baja en diagrama p-V) es mínimo.
2. Si no existiera el RCA, al no cerrarse la válvula de admisión instantáneamente, se tendría mucha restricción al final de la carrera de admisión, bajando p.
3. El proceso de llenado tarda más a alto n , por lo que interesa un mayor RCA.
4. Con un $CE < 0$ se lograría retener gases de escape.
5. Sobre la base de la fórmula fundamental de los MACIs la potencia se puede controlar con el producto de tres variables independientes, $nm_a F$.
6. MEP: $0,3 < F_R < 1,2$ como mucho y en MEC: $F_R < 0,85$ a $0,9$.
7. El termostato limita el agua saliente del motor que pasa por el radiador, para minimizar el tiempo de calentamiento del motor.
8. Solamente la sobrealimentación mecánica detrae potencia del motor.
9. Al aumentarse la presión de admisión y ser el escape libre, la primera es mayor que la segunda.
10. El par instantáneo de un monocilindro es tanto más irregular cuando mayores son las fuerzas de inercia; esto es, mayor es el producto de la masa alternativa por el cuadrado del régimen. También es tanto más irregular cuando mayor sea la fuerza de gases, que al ser contraria a la de inercia en el PMS de combustión, pueden compensarse parcialmente. Finalmente, cuantos más cilindros se tengan para igual cilindrada total, más se reduce la irregularidad de par y si los encendidos son equidistantes, más se reduce también.

1.21.- Cuestiones de autoevaluación. Respuestas (cont.)

11. Porque al ser uniforme en toda la cámara de combustión, da resultante nula.
12. El par de la fuerza de gases ha de ser nulo globalmente. Pero el motor lo separa en dos iguales y contrarios, el par motor y el par de basculamiento sobre sus apoyos.
13. El trabajo del ciclo es el trabajo que la presión de los gases ejerce sobre el émbolo de un cilindro. Tras las pérdidas correspondientes resulta en un par motor. Este par multiplicado por la velocidad angular de giro resulta en una potencia en el eje. La presión media equivalente es aquella presión (sobre la atmosférica) que aplicada durante la carrera de expansión proporciona el mismo trabajo que el ciclo.
14. La p_{mi} es una variable intensiva, que no depende del tamaño del motor fundamentalmente.
15. La velocidad media del émbolo u típica de máxima potencia no depende del tamaño del motor, fundamentalmente. Esta es la razón e porqué los motores pequeños giran a mayor n que los grandes.

1.21.- Cuestiones de autoevaluación. Respuestas. (cont.)

16. El consumo específico de un motor de aspiración normal al aumentar la altura de operación aumenta, porque al reducirse la masa admitida, se reduce el trabajo por ciclo, mientras que el trabajo de las pérdidas mecánicas es el mismo; claro, actuando al mismo régimen..
17. El consumo específico será el mismo, pero el consumo y la potencia, ambos son el doble.
18. A cargas muy parciales el trabajo por ciclo es muy bajo, mientras que el trabajo de las pérdidas mecánicas es sensiblemente el mismo. El resultado es que el rendimiento mecánico es muy bajo.
19. Una mayor relación de compresión geométrica, manteniendo la cilindrada. Se consigue reduciendo el volumen de la cámara en PMS
20. La masa se multiplicará por 3 si la presión de admisión se multiplica por 3, en primera aproximación.
21. Todos los ángulos del diagrama de la distribución deberán aumentar.
22. Los motores de 4 cilindros opuestos, denominado motor bóxer puede tener encendidos equidistantes, al estar los cilindros decalados entre sí 180° . El ángulo entre muñequillas de encendidos consecutivos habrá de ser 0 o 180° , dependiendo de su configuración, ya que estando los cilindros decalados 180° , depende del orden de encendido. Las levas de los cilindros de encendido consecutivo estarán decaladas la mitad de 180° es decir, 90° .
23. La p_{me} es proporcional al par.
24. Reducir la temperatura de los gases de escape hasta la temperatura ambiente es posible, pero resultará difícil, pues haría falta un cambiador de calor muy grande y por ello costoso, voluminoso y pesado. Por otro lado, raramente se necesita calor a temperaturas muy próximas a la ambiente.
25. Solo puede ser $\eta_{v,g} > 1$ si se interpone entre la atmósfera y el motor un compresor, pues entonces la masa admitida por el motor puede ser superior a la de referencia usando la densidad atmosférica.

1.21.- Cuestiones de autoevaluación (cont.)

Escribir en este espacio las fórmulas más relevantes de este capítulo, no más de 10.

Actividades:

1. Sobre la base de la información conseguida en Internet comparar una turbina de gas (TG, **Capítulo 4**) con un motor alternativo de similar potencia y para generación eléctrica. Se sugieren potencias nominales de 1 a 20 MW (necesariamente MEC o MEP de gas natural).
2. Realice el estudio del motor de 4 tiempos y 4 cilindros **opuestos** en cuanto a: intervalo angular de encendido, intervalo angular entre muñequillas consecutivas, configuración del cigüeñal para que esté estática y dinámicamente equilibrado. Cancelación de fuerzas de inercia primarias y secundarias. ¿Dónde colocaría contrapesos para el equilibrado codo a codo?
3. Repita el estudio anterior para un motor de 4 tiempos y 3 cilindros en línea.
4. Obtenga las relaciones de compresión geométrica de varios MEP y MEC, p. e. de información comercial. Compárelas.
5. Obtenga los regímenes de par máximo y de potencia máxima de MEP y MEC de automoción y similar cilindrada. Halle su relación y compare bajo la óptica de la flexibilidad del motor; esto es, la capacidad de acelerar.

1.22.- Conclusiones

1. Con la materia de este capítulo no es posible cuantificar de qué depende la pmi . Es necesario modelar el ciclo como sistema abierto para calcular la masa de aire que entra en el motor, determinar cuál es el dosado (F_R) más conveniente y del cálculo de un ciclo que represente al motor (ciclo equivalente) determinar η_i . El rendimiento mecánico depende de detalles constructivos del motor y se estima.

Para ello:

2. La termoquímica nos informa de la cantidad de calor que desprende la combustión y qué temperatura y presión se alcanzan, además de propiedades de los gases quemados, haciendo uso de hipótesis que simplifican el cálculo. Se explica en el [Capítulo 2](#).
3. Su aplicación a ciclos de MACIs permite obtener un modelo realista, si además se extiende el concepto de ciclo a que pueda estar abierto al exterior para la renovación de la carga. [Capítulo 3](#).
4. Los MACIs usan una mecánica pesada, a consecuencia de la alternancia de fuerzas, pero consiguen quemar mezclas casi estequiométricas, por ello de gran densidad energética/kg, similar a la de un explosivo como la dinamita o el [TNT](#).
5. El rendimiento mecánico de los MACIs es bajo, dada la gran cantidad de mecanismos a mover y las elevadas fuerzas que se transmiten a través de las películas lubricantes. Por ello actualmente se dedican grandes esfuerzos en reducirlo y a aumentar la potencia para igual cilindrada con la turboalimentación. Con ambas sube el rendimiento mecánico, p. e. véase que la $pmfr$ solo depende fundamentalmente del régimen, p. e. [Ecs. 1.52bis](#) y [1.59bis](#).