



Motores Térmicos. Turboalimentación

Capítulo 1: Introducción a los motores de combustión interna alternativos.(1 hora)

Autores: Antonio Lecuona Neumann y José I. Nogueira Goriba

Contenido

- 1.1.- ¿Qué es un motor de combustión interna alternativo?.
- 1.2.- Ciclos.
- 1.3.- Eficiencia del motor.
- 1.4.- Procesos de renovación de la carga.
- 1.5.- Resumen y preguntas de autoevaluación.
- 1.6.- Asuntos adicionales.

NOTAS: Los paréntesis quebrados indican dependencia funcional (). Las unidades se muestran entre corchetes []. En verde se señalan las referencias a ecuaciones, capítulos y apartados.

La información contenida en este documento 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. No obstante el/los autor/es no garantizan la exactitud, exhaustividad, actualización o perfección de su contenido. 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 comuniquemos e intentaremos corregirlo. Puede contener material con copyright © por lo que su reproducción puede no estar permitida.



Este obra está bajo una [licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 3.0 España](#).

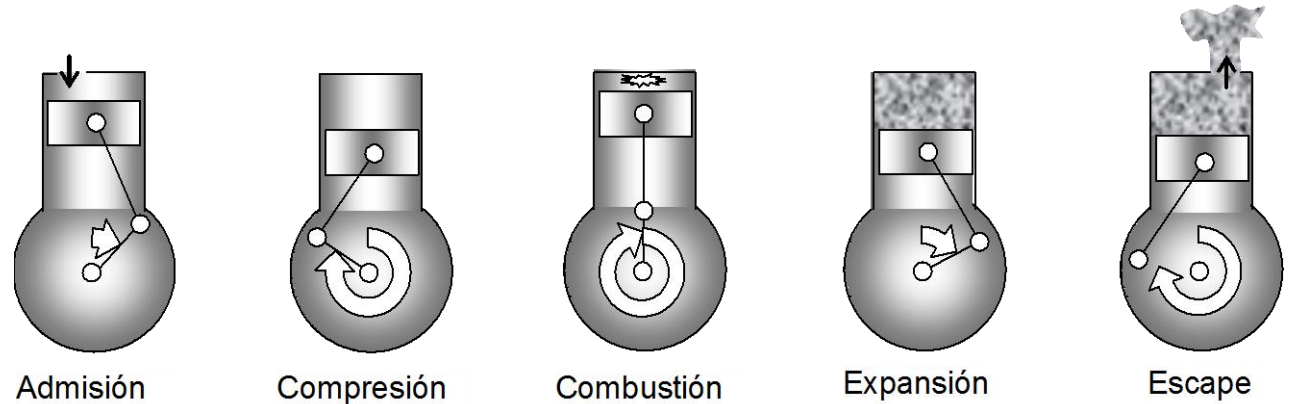
1.1.- ¿Qué es un motor alternativo de combustión interna (MACI)?

- Máquina térmica para obtener potencia en un eje (que gira a n revoluciones p. u. de tiempo) quemando un combustible líquido o gaseoso en su interior con el aporte de aire de la atmósfera.
- Basado en variaciones de volumen y de presión de gases en un recinto cerrado llamado cilindro.
- La presión y el volumen en el cilindro siguen evoluciones periódicas (ciclo).
- Los gases quemados han de evacuarse al final del ciclo hacia un sistema de escape y renovarse por gases frescos al comenzar el siguiente ciclo, aspirando desde un sistema de admisión. El cilindro puede conceptualizarse como un sistema termodinámico abierto en esas partes del ciclo.
- Debido a la liberación interna de calor al quemarse el combustible, para facilitar su modelización en ocasiones se ha asimilado ésta a un aporte de calor externo (o liberación interna) y así constituir un modelo termodinámico del ciclo real. En ellos se desprecia el cambio de composición de los gases.
- En los modelos termodinámicos más simples la renovación de gases se sustituye por evacuaciones de calor al ambiente, constituyendo su parte menos realista. En ciclos más avanzados se considera un sistema abierto con intercambio de gases simplificado.
- Los ciclos más usados son el Otto, el Diésel, el Atkinson y el Miller o variantes de ellos.
- Se denominan alternativos por el movimiento de vaivén de un émbolo dentro de un cilindro, formando un conjunto estanco. El émbolo transmite la fuerza sobre él al cigüeñal por medio de una biela, logrando así un par motor en el eje C_m que gira a velocidad angular ω . La potencia al eje W es entonces:

$$W = C_m \frac{d\alpha}{dt} \quad (1.1)$$

$$\omega = 2\pi n$$

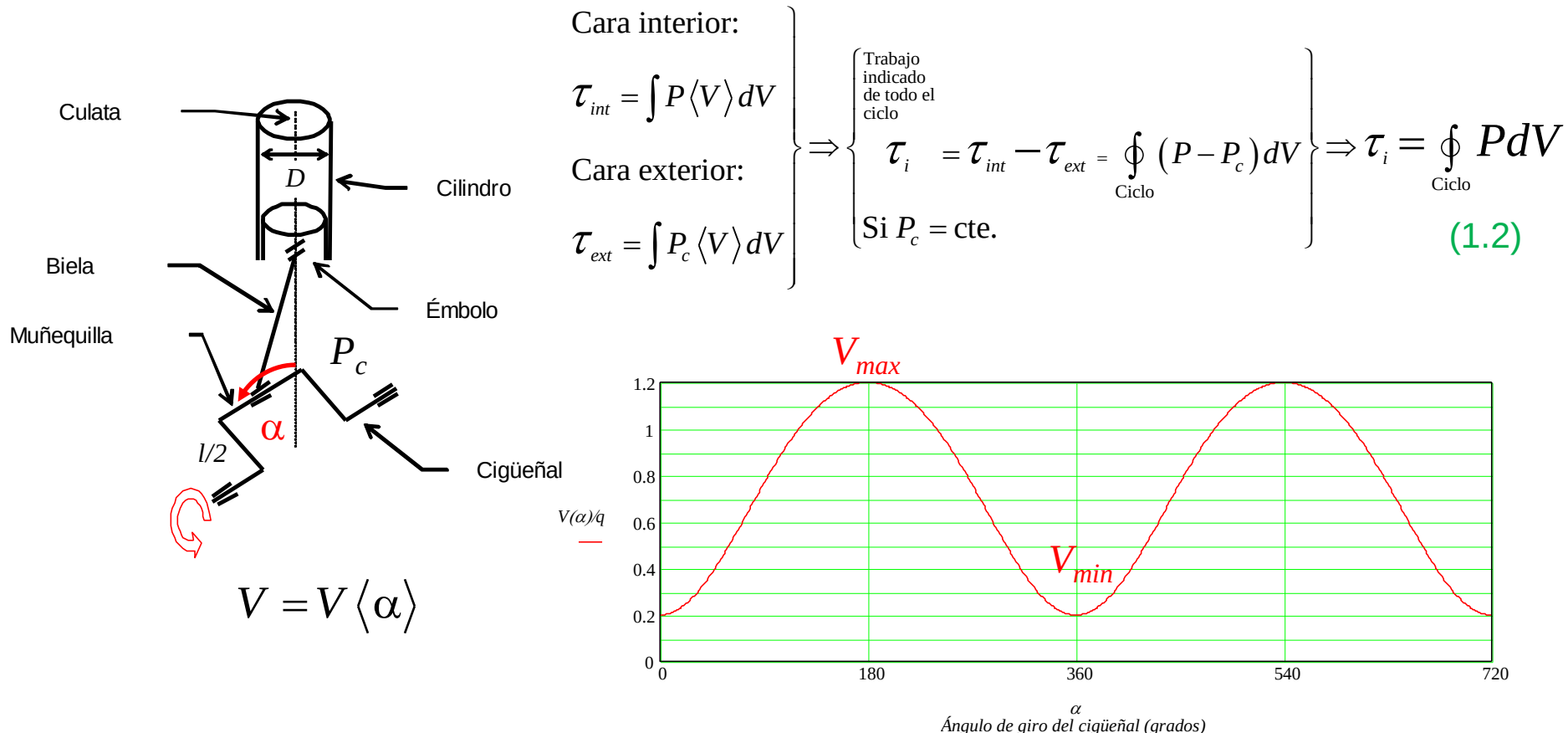
1.2.- Ciclos



- Los ciclos de un motor alternativo de combustión interna tienen un bucle de alta presión P en el cilindro, comprendido entre una compresión por disminución de volumen del cilindro V (carrera de compresión del émbolo) una subida de presión por la combustión cuando el volumen está cerca del mínimo y una expansión por aumento de volumen (carrera de expansión del émbolo). La presión final suele ser mayor que la del comienzo de la compresión y la temperatura también.
- Cuando el volumen del cilindro está cerca del máximo ($V_{max} \equiv$ puntos muertos inferiores PMI), ocurre el proceso de renovación de los gases: admisión y escape.
- En un motor de cuatro tiempos ($T = 4$) se expulsan los gases quemados abriendo un orificio (válvula de escape) y realizando una carrera de disminución de volumen evacuando a un exterior a una presión media P_{es} . Una vez llegado a las inmediaciones del volumen mínimo ($V_{min} \equiv$ punto muerto superior PMS) se cierra el orificio y se abre otro (válvula de admisión) y se admiten gases frescos, conteniendo oxígeno para la combustión, desde un exterior a la presión media P_{ad} . Para los motores de dos tiempos $T = 2$.

1.2.- Ciclos.

El trabajo indicado útil τ_i se logra por diferencias de presión entre ambas caras ($_{int}$ y $_{ext}$) de un émbolo con movimiento alternativo.



1.2.- Ciclos. El motor de cuatro tiempos $T = 4$

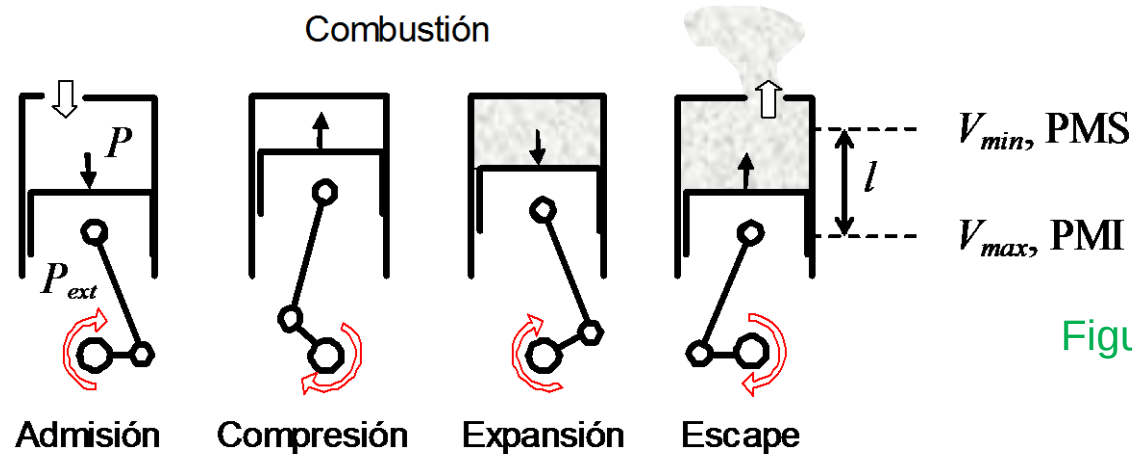


Figura 1.2

Ciclo
P-V

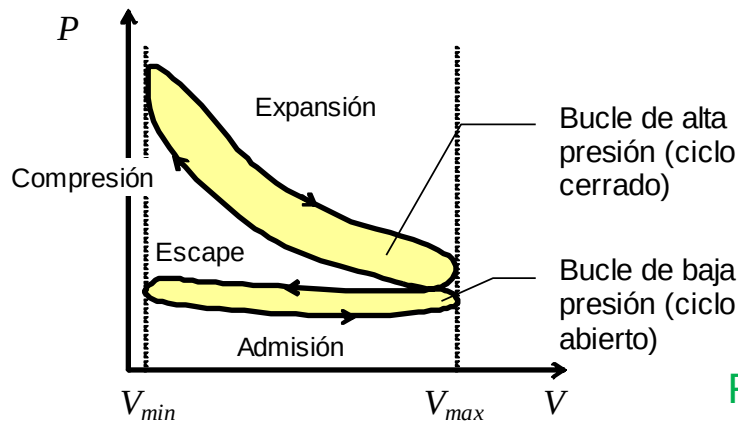


Figura 1.3

Un árbol de levas a la mitad de vueltas que el eje y sincronizado con él, impone las operaciones cada dos vueltas para motor de $T = 4$ tiempos. Luego la **frecuencia de repetición de los ciclos es $2n/T$** .

$$\omega = \frac{d\alpha}{dt} = \frac{2\pi}{[rad/vuelta]} \frac{n}{[1/s]}$$

1.2.- Ciclos. La cilindrada, el régimen de giro y el dosado.

- El volumen de gases frescos aspirado en un ciclo se debe a la cilindrada unitaria q [cm³], aumento de volumen entre el punto muerto superior PMS (volumen mínimo) y el punto muerto inferior PMI (volumen máximo).

$$q = V_{max} - V_{min} = \pi \frac{D^2}{4} l \begin{cases} D = \text{Diámetro del cilindro, o calibre} \\ l = \text{Carrera o recorrido del émbolo entre puntos muertos} \end{cases} \quad (1.3)$$

- Para aumentar la potencia, reducir vibraciones y dar un par motor más suave se disponen N cilindros idénticos actuando en paralelo (decalados entre sí), formando la cilindrada total Q .

$$Q = Nq$$

- Este volumen se trata de llenar $2n/T$ veces en la unidad de tiempo, n denominado régimen de giro, y se suele expresar en revoluciones (vueltas) por minuto [rpm] o bien [s⁻¹].
- El motor aspira de la atmósfera y tras los procesos que ocurren en el sistema de admisión (en donde puede existir un compresor) se alimenta el motor con una densidad media ρ_{ad} .
- En consecuencia, la **masa teóricamente disponible** para realizar la combustión [g], liberando calor en el interior del motor, y con ello obtener trabajo útil en un cilindro τ_i es:

$$m_{teo} = q\rho_{ad}$$

1.2.- Ciclos. La cilindrada, el régimen de giro y el dosado.

- A la masa de aire (pues contiene el oxígeno) m_a hay que acompañarla de una masa de combustible m_{comb} que permita una combustión completa y limpia, además de una conversión a trabajo útil eficiente.
- Se denomina dosado F a la masa de combustible dividida por la masa de aire. $F = \frac{m_{comb}}{m_a}$ (1.4)
- Hay un dosado de referencia, llamado estequiométrico F_e , que permite que todo el oxígeno y todo el combustible puedan reaccionar completamente; aproximadamente 1/15 para combustibles líquidos hidrocarburos del petróleo (e. g. gasolina y gasóleo). El dosado relativo es:

$$F_R = \frac{F}{F_e} \begin{cases} < 1: \text{Mezcla pobre, sobra aire. Es posible quemar todo el combustible} \\ = 1: \text{Mezcla químicamente correcta} \\ < 1: \text{Mezcla rica, sobra combustible. No es posible quemar todo el combustible} \end{cases}$$

- El dosado en los motores Diésel es siempre pobre, para evitar la formación de humos negros, lograr una alta eficiencia y baja toxicidad de los gases de escape.
- El dosado en los motores de gasolina de automoción es actualmente estequiométrico si dispone de [catalizador de escape](#) de 3 vías y pobre en motores de [inyección directa](#) al cilindro. Rica solamente en aceleración y marcha en [ralentí](#).

1.2.- Ciclos. La cilindrada, el régimen de giro y el dosado.

- Dado que es el combustible el portador de los átomos (C y H) que en combinación con el oxígeno liberan calor Q [MJ] en un ciclo, se suele asociar al mismo un poder calorífico inferior L_i [MJ/kg] y así, el calor **teóricamente liberable** ($_{teo}$) por ciclo es:

$$Q_{c,teo} = \underbrace{q \rho_{ad} F L_i}_{m_{a,teo} \over m_{comb,teo}}$$

- Esta energía (teórica por ahora) sería íntegramente convertible en trabajo útil, pero al liberarla en forma de calor (energía térmica) como consecuencia de la combustión, queda limitada la fracción < 1 del calor que es convertible en trabajo, denominada exergía.
- En la realidad se logra convertir en trabajo útil solo una fracción de la exergía, debido a las irreversibilidades que ocurren en el ciclo y en la transmisión del trabajo obtenido de los gases al eje. Parte del trabajo se pierde por tener que accionar mecanismos auxiliares del motor y el calor perdido lo es en parte en forma de entalpía disponible en los gases de escape, ya que éstos **no** salen al exterior a la temperatura y presión de la atmósfera, es decir en un estado que no permitiera obtener trabajo útil de ellos. Otra parte del calor perdido se invierte en calentar el fluido de la refrigeración del motor.

1.3.- Eficiencia del motor

- Al cociente entre el trabajo efectivo (τ_e , que es el útil del ciclo menos las pérdidas y degradaciones) por ciclo producido por el motor y el calor liberable por el combustible en el ciclo se le denomina **rendimiento o eficiencia**. $\eta_e = \frac{\tau_e}{m_{comb} L_i}$; donde el rendimiento mecánico se define: $\eta_m = \frac{\tau_e}{\tau_i}$, ver Ec. (1.2) (1.6)
- Como la potencia W es el trabajo por ciclo por la frecuencia de realización de éstos $2n/T$ y por el número de cilindros N , también la eficiencia efectiva es el cociente de potencias:

$$\eta_e = \frac{\overbrace{F m_a L_i}^{Q_{c,teo}} \frac{N 2n / T}{N 2n / T}}{\underbrace{\dot{m}_{comb} L_i}_{\text{Caudal másico de combustible [g/s]}}} = \frac{\overbrace{W_e}^{\text{Potencia efectiva [W]}}}{\underbrace{\dot{m}_{comb} L_i}_{\text{Caudal másico de combustible [g/s]}}} \quad (1.7)$$

Potencia calorífica teórica aportada [W]

- Los valores máximos de eficiencia conseguidos hasta ahora son con [motores Diésel](#) (Motores de Encendido por Compresión MEC), llegándose a 0,55 en el punto operativo óptimo del motor, debido a su elevada **relación de compresión geométrica r** , actuando con [mezcla pobre](#) y con motor [turboalimentado](#). En motores de gasolina o de gas ([MEP](#)) se llega a 0,45 por tener limitada su relación de compresión al objeto de evitar la [detonación](#). La eficiencia de un motor dado es función de su punto operativo y suele alcanzar un máximo a un régimen intermedio entre el máximo y el mínimo y a una [carga](#) (cociente entre el par y el par máximo) cercana al 100%.

1.4.- Procesos de renovación de la carga

- La [carga](#) es el par dividido por el de “plena carga”, con el máximo de combustible en el ciclo. También se denomina a la masa de aire o de mezcla que evoluciona en un ciclo. Ésta ha de renovarse al final del ciclo.
- Debido a que la masa que se logra introducir en el motor durante la admisión es distinta que la teórica, se define el rendimiento volumétrico, que es el cociente entre el caudal másico de aire que ingiere el motor, promediado en el tiempo, y el teóricamente posible, usando una densidad de referencia ρ_{ref} para el aire a :
$$\eta_v = \frac{\bar{m}_a}{Q \frac{2n}{T} \rho_{a,ref}} \quad (1.8)$$
- Una parte de los gases residuales del ciclo anterior quedan en el cilindro impidiendo su completa renovación. Cuanto menor sea la presión de escape y mayor sea la presión de la admisión, este efecto será menor, véase más adelante. También ocupa volumen el [EGR](#) y el combustible.
- La fricción viscosa en el colector de admisión de los gases frescos entrando reduce η_v . Fenómenos de pulsación por ondas lo pueden aumentar (resonancias en colector de admisión y de escape).
- ✓ Si $\rho_{a,ref} \equiv \rho_{a,ad}$ se denomina rendimiento volumétrico de entrada y generalmente $\eta_{v,e} < 1$.
- ✓ Si $\rho_{a,ref} \equiv \rho_{atm}$, densidad de la atmósfera, se valora globalmente todo lo que hay entre ella y el motor, incluido un posible compresor, por lo que pudiera ser $\rho_{ad} > \rho_{atm}$ y por ello pudiera ser $\eta_{v,g} > 1$.
- $\eta_{v,e}$ para un cierto motor y sin restricciones en la admisión (p. e. [mariposa de reducción de carga](#)) y en condiciones de admisión y escape fijas, depende del régimen del motor n y suele ser máximo a un régimen intermedio y caer para regímenes muy elevados (bloqueo sónico) y regímenes muy bajos.
- Al valor medio de la presión con la que se alimenta el motor se la denomina presión de admisión P_{ad} y a la de escape P_{es} . La temperatura de admisión T_{ad} es la de suministro al motor.

1.4.- Procesos de renovación de la carga

- El rendimiento volumétrico de entrada $\eta_{v,e}$ está bien estudiado. Sin embargo, su valor es laborioso de determinar teóricamente. Por ello es frecuente medirlo con un [caudalímetro](#) de aire. Si se evalúa con $P_{ad} = P_{es}$ y a una temperatura de referencia $T_{ad,0}$ se le llama rendimiento volumétrico de base $\eta_{v,e,b}$. Se puede corregir con un modelo sencillo que muestra **su escasa sensibilidad a la relación P_{ad}/P_{es}** y a la temperatura de admisión T_{ad} :

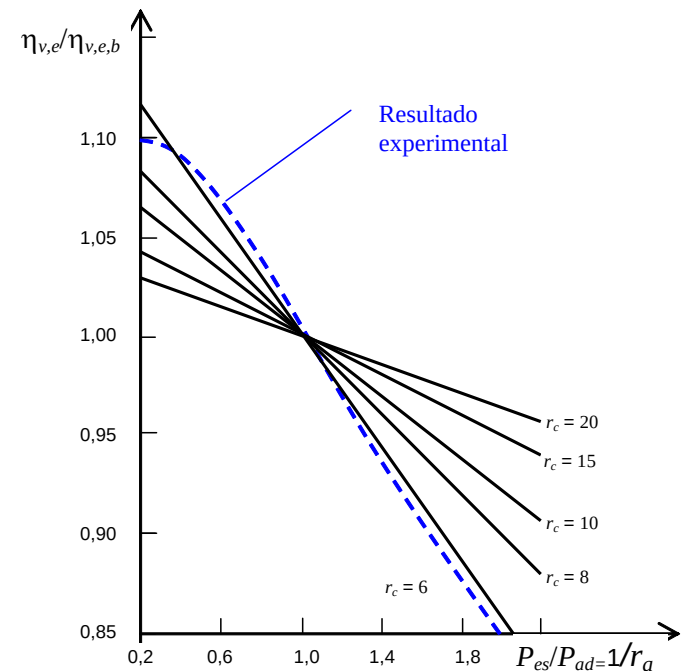
$$\eta_{v,e} = \sqrt{\frac{T_{ad}}{T_{ad,0}}} \left[1 + \frac{1 - \frac{P_{es}}{P_{ad}}}{\gamma(r_c - 1)} \right] \eta_{v,e,b} \quad \doteq 1/r_a \quad (1.9)$$

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v} \approx 1,4 \text{ para el aire}$$

$$\left. \begin{aligned} \text{Coef. de llenado: } a &= \frac{\overbrace{V_{RCA} - V_{min}}^{q'}}{\underbrace{V_{max} - V_{min}}_q} \\ \text{Rel. comp. geométrica: } r &= \frac{V_{max}}{V_{min}} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \text{Relación de} \\ \text{compresión} \\ \text{efectiva } r_c \end{array} \right\} r_c = 1 + a(r - 1) \quad (1.10)$$

$a \approx 0,8$ a $0,9$ queda determinado por el ángulo de [retraso al cierre de la admisión RCA](#) $\approx 40^\circ$ a 70° después del PMI.

Al (turbo)sobrealimentar el motor y/o cerrar la [mariposa](#) de admisión, P_{ad}/P_{es} puede cambiar mucho.



1.5.- Resumen y preguntas de autoevaluación

Resumen:

- En los motores alternativos de combustión interna el émbolo o pistón oscila entre los puntos muertos superior e inferior (PMS y PMI) distanciados la carrera l , dando lugar al volumen mínimo y máximo, véase la [Figura 1.3](#). En dos vueltas es posible realizar un ciclo de cuatro tiempos, que es el más habitual.
- Incluye este ciclo dos carreras para la renovación de los gases, escape entre los ángulos de cigüeñal del [AAE](#) y [RCE](#) (Avance a la Apertura de las [válvulas](#) de Escape c. r. al PMI y Retraso al Cierre del Escape c. r. al PMS respectivamente) y admisión entre el AAA y RCA (Adelanto a la Apertura de la Admisión c. r. al PMS y Retraso al Cierre de la Admisión c. r. al PMI), respectivamente. [Más información](#). [Más información](#).
- La adición de combustible, sea fuera del motor o directamente al cilindro permite su combustión y liberación interna de calor que hace subir la presión, [Figs 1.2 y 1.3](#). Esto hace que el trabajo obtenido en la carrera de expansión sea mayor que el invertido en la de compresión.
- Como no es posible quemar más combustible que el que permite el aire presente en el cilindro, conviene ajustar el diseño y la marcha para maximizar el rendimiento volumétrico, es decir maximizar la entrada de aire.
- El rendimiento volumétrico global puede aumentarse aumentando la densidad de admisión.
- No siempre son necesarios la potencia máxima ni el par máximos, por lo que se quema menos combustible por ciclo que el máximo posible -funcionamiento a carga parcial-.

1.5.- Resumen y preguntas de autoevaluación

Cuestiones adicionales:

- Del calor liberado en el interior del motor: una parte queda como calor sensible y energía de presión en el gas de escape y otra parte se evacúa en forma de calor por las paredes del motor; ambas pérdidas son parecidas en valor, 30% y 30 % p. e. de L_i .
- La refrigeración de los MACIs es necesaria para evitar el deterioro de sus materiales.
- Los ángulos de la distribución AAA, RCA, AAE y RCE generalmente son fijos.
- Recientemente se están introduciendo [distribuciones variables](#). Permiten maximizar el rendimiento volumétrico de entrada a todos los regímenes de giro.
- Los MACIs están caracterizados por un amplio rango de regímenes de giro y de carga. Aún así, los automóviles requieren cajas de cambio para adaptar el par del motor al par de tracción necesario y dejar el régimen dentro del rango operativo del motor; y a ser posible cerca del punto operativo óptimo del motor.
- Las relaciones de compresión geométrica r y efectiva r_c de un MACI en realidad son relaciones volumétricas. No confundir con relaciones de presiones.
- El rendimiento volumétrico de entrada y de base, $\eta_{v,e,b}$ suele ser a mariposa totalmente abierta (plena carga en MEP). Como la carga en los MEC (Diésel) se controla con la cantidad de combustible inyectado en el interior del motor y carecen de válvula de mariposa en la admisión para reducir P_{ad} , siempre es el máximo posible a cada régimen. A carga parcial en un MEP es que P_{ad} puede llegar a ser un 30% de P_{es} .

1.6.- Resumen y preguntas de autoevaluación (cont.)

Preguntas de autoevaluación:

1.1	Calcule la frecuencia de los ciclos de un motor de $T = 4$ y $n = 3.000$ rpm.	25/s
1.2	Calcule la cilindrada total de un motor cuatri-cilíndrico con diámetro $D = 100$ mm y carrera $l = 110$ mm.	3.456 cm ³
1.3	Calcule el calor liberado al arder completamente un hidrocarburo $Q_{c,teo}$ con $L_i = 45$ MJ/kg con dosado estequiométrico en el motor anterior, con una densidad de admisión de 1 kg/m ³ y $\eta_{v,e,b} = 0,9$ con $r_a = 1$ y $T_{ad,0} = 300$ K.	9,03 kJ
1.4	Calcule la potencia calorífica liberada en el interior de este motor $\dot{Q}_{c,teo}$.	226 kW
1.5	Calcule la potencia efectiva W_e si el rendimiento efectivo es 0,4	90,4 kW
1.6	Estime el rendimiento volumétrico $\eta_{v,e}$ si ahora $P_{ad}/P_{es} = 2$ y $T_{ad} = 400$ K, $r_c = 8$	1,09
1.7	Si se llenara todo el cilindro con aire a la densidad de referencia, ¿sería $\eta_v = 1$?	NO, > 1
1.8	Al turboalimentar un motor el rendimiento volumétrico de entrada puede aumentar o disminuir.	SI
1.9	Al turboalimentar un motor el rendimiento volumétrico global puede aumentar siempre.	SI