

Motores de combustión Interna

Parámetros de diseño y operación

Pedro Curto-Risso, Santiago Martinez-Boggio, Lidio Braga

INSTITUTO DE INGENIERÍA MECÁNICA Y PRODUCCIÓN INDUSTRIAL
FACULTAD DE INGENIERÍA
UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA

Características del motor

Qué se busca de un motor de combustión interna?

Objetivo:

- 1 El desempeño del motor a lo largo de su rango operativo.
- 2 El consumo del motor dentro de su rango operativo
- 3 Costo del combustible requerido.
- 4 Ruido y vibraciones del motor
- 5 Emisión de contaminantes trabajando dentro de su rango operativo.
- 6 El costo inicial del motor y su instalación.
- 7 La confiabilidad y durabilidad del motor, sus requerimientos de mantenimiento y cómo éstos afectan los costos operativos.

Características para potencia en régimen transitorio

Se caracteriza mediante:

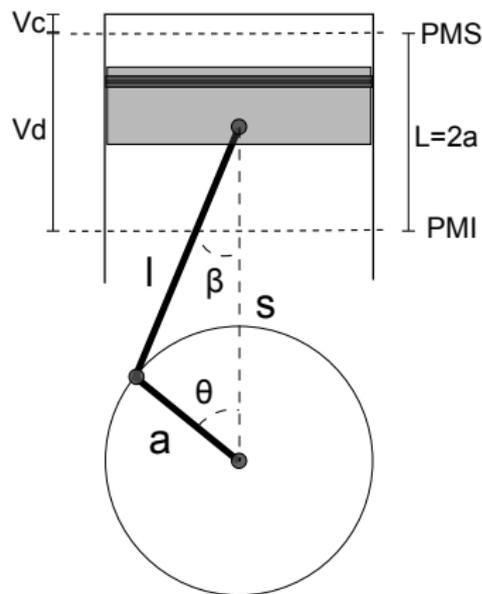
- 1 La **potencia máxima** (o el par máximo, comúnmente llamado torque) disponible a cada velocidad de giro dentro del rango operativo útil.
- 2 El **rango de velocidad y potencia** dentro del cual la operación del motor es satisfactoria.
- 3 **Potencia máxima nominal**: la mayor potencia que un motor puede desarrollar en cortos períodos de tiempo.
- 4 **Potencia nominal normal**: la mayor potencia que un motor puede desarrollar en operación continua.
- 5 **Velocidad nominal**: velocidad de giro del cigüeñal a la cual se desarrolla la potencia nominal.
- 6 **Consumo de combustible** en el rango de operación del motor.

Características para potencia en régimen estacionario

Cuando se trabaja con motores de combustión interna de generación eléctrica en general es necesario definir la potencia según su aplicación.

- ➊ **Potencia Continua (COP):** Es el valor de Potencia que el equipo generador puede entregar de forma continua, sin límite de horas de uso. Se utiliza en autoabastecimiento.
- ➋ **Potencia Prime (PRP):** Es el valor de Potencia máxima disponible para un uso de potencia variable que el equipo generador puede entregar durante un número ilimitado de horas al año. Sin embargo presenta una restricción, la potencia promedio durante 24 horas no debe superar un valor determinado (en general entre 75 y 85% del valor de potencia PRP). Este tipo de sistemas se utilizan para aplicaciones de compensación de suministro eléctrico.
- ➌ **Potencia Stand-By Fuel Stop Power (FTP):** Es el valor de potencia máxima disponible, para un uso de potencia variable durante 500 horas al año, con un factor de carga media menor o igual al 90% de la potencia FTP. Estos sistemas son utilizados para aplicaciones de respaldo.

Propiedades geométricas de los motores alternativos



Relación de compresión:

$$r = \frac{V_d + V_c}{V_c}$$

Relación carrera-diámetro:

$$R_{sb} = \frac{L}{B} = \frac{2a}{B}$$

Volumen desplazado:

$$V_d = L A_p$$

Área de pistón:

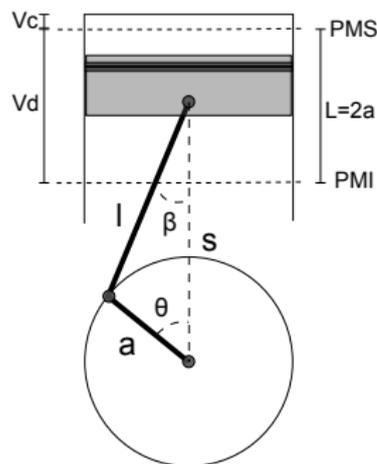
$$A_p = (r - 1) \frac{V_c}{L} = (r - 1) \frac{V_c}{2a}$$

Volumen libre:

$$V = V_c + A_p (l + a - s)$$

$$V = V_c \left[1 + \frac{r-1}{2a} (l + a - s) \right]$$

Propiedades geométricas de los motores alternativos



$$s = l \cos\beta + a \cos\theta$$

$$l \operatorname{sen}\beta = a \operatorname{sen}\theta \rightarrow \operatorname{sen}\beta = \frac{a}{l} \operatorname{sen}\theta$$

$$\cos\beta = \left(1 - \operatorname{sen}^2\beta\right)^{0,5} = \left[1 - \left(\frac{a}{l}\right)^2 \operatorname{sen}^2\theta\right]^{0,5}$$

$$s = a \cos\theta + l \sqrt{1 - \left(\frac{a}{l}\right)^2 \operatorname{sen}^2\theta}$$

$$V = V_c \left\{ 1 + \frac{(r-1)}{2a} \left[l + a - a \cos\theta - l \left(1 - \left(\frac{a}{l}\right)^2 \operatorname{sen}^2\theta \right)^{0,5} \right] \right\}$$

$$f = \frac{a}{l} \rightarrow \boxed{V = V_c \left\{ 1 + \frac{(r-1)}{2} \left[1 - \cos\theta + \frac{1}{f} \left(1 - \sqrt{1 - f^2 \operatorname{sen}^2\theta} \right) \right] \right\}}$$

Propiedades geométricas de los motores alternativos

Área de la cámara de combustión dependiendo del ángulo θ

$$A = A_c + A_p + \pi B(l + a - s)$$

$$A = A_c + A_p + \pi B \left[l + a - \left(a \cos\theta + l \sqrt{1 - \left(\frac{a}{l}\right)^2 \sin^2\theta} \right) \right]$$

$$A = A_c + A_p + \pi B \left[1 - \cos\theta + \frac{1}{f} \left(1 - \sqrt{1 - f^2 \sin^2\theta} \right) \right]$$

Velocidad media del pistón

$$\bar{S}_p = 2LN$$

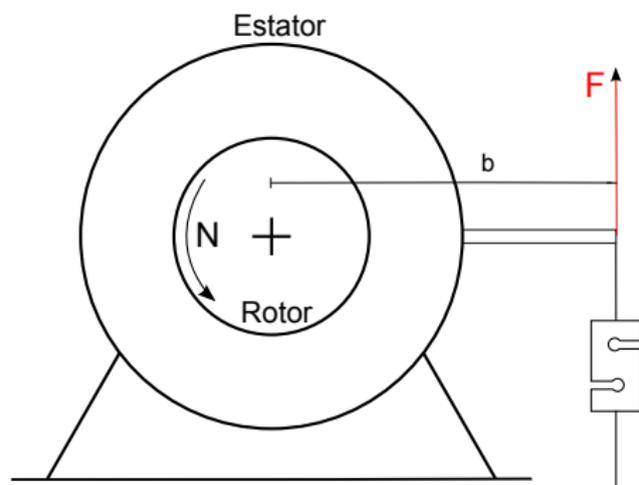
N: velocidad de rotación del cigüeñal

L: carrera

La \bar{S}_p es un parámetro más apropiado que N para determinar, por ejemplo, las velocidades de los flujos de entrada y salida dentro del cilindro.

Potencia y par de freno

El par (M) es una medida de la disponibilidad de un motor a hacer un trabajo y la Potencia (P) es la razón a la que este trabajo es hecho. El par generado en un motor se mide con un **Dinamómetro** acoplado. Generalmente hidráulicos o eléctricos.



$$M = F b$$

$$P = M \Omega = \frac{2\pi N}{60} M = \frac{2\pi}{60} N F b$$

$$P[W] = \frac{2\pi}{60} N[rpm] F[N] b[m]$$

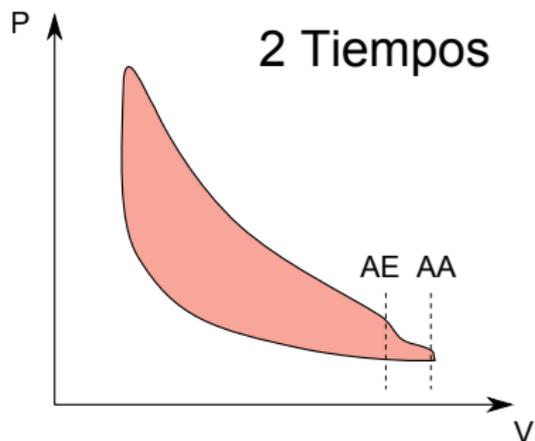
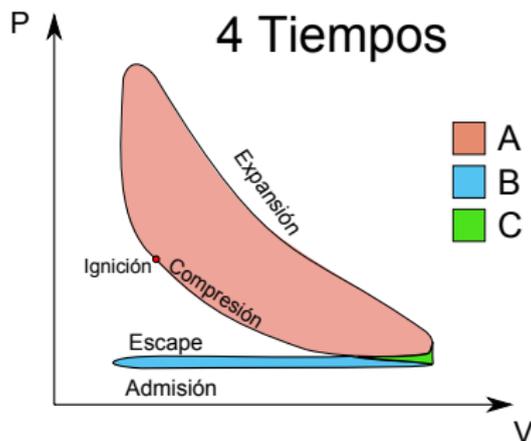
P es la potencia que entrega el motor a la carga, en este caso es un **freno**.

Trabajo indicado por ciclo

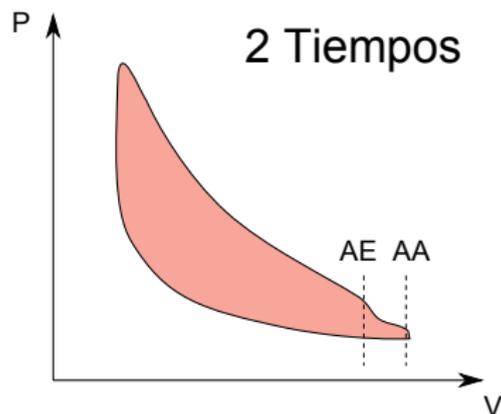
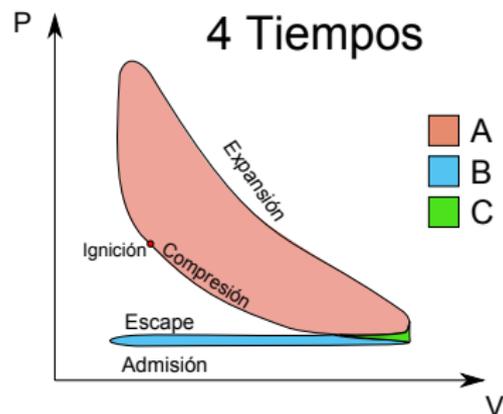
Los datos de presión y volumen durante un ciclo permiten calcular el trabajo realizado:

$$W = \oint p dV$$

En ciclos de 2T se puede aplicar esta fórmula directamente. Sin embargo, en ciclos de 4T la integral no da el trabajo entre las carreras de compresión y expansión.



Trabajo indicado por ciclo



- 1 **Trabajo indicado bruto** corresponde al trabajo producido entre las carreras de compresión y expansión.

$$W_{ig} = A + C$$

- 2 **Trabajo indicado neto** es el trabajo entregado por el pistón durante los 4T en un ciclo normal aspirado ($A > 0$ y $B > 0$)

$$W_{in} = (A + C) - (B + C) = A - B$$

Trabajo indicado por ciclo

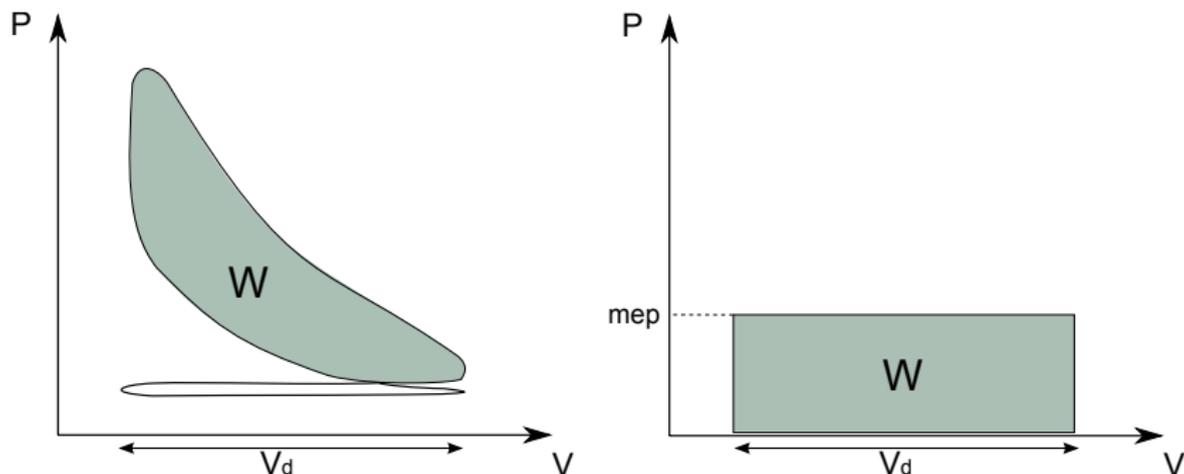
- El trabajo B + C es el trabajo transferido por el pistón a los gases durante el período de admisión y escape y se llama **trabajo de bombeo** W_p (pumping work).
- La **potencia indicada** del ciclo se relaciona con el trabajo indicado por:

$$P_i = \frac{W_i N}{n_R}$$

- Donde n_R es el número de vueltas del cigüeñal por cada carrera motora del ciclo:
 - $4T \rightarrow n_R = 2$
 - $2T \rightarrow n_R = 1$
- La potencia indicada difiere de la potencia de freno debido a las pérdidas por fricción.
- Adicionalmente, la potencia indicada bruta difiere de la de freno en la potencia de bombeo.

Presión media efectiva (mean effective pressure) *mep*

Como medida de desempeño del motor se utiliza el trabajo dividido por el volumen desplazado, Es una forma de ver el trabajo que entrega un motor, relativo a su tamaño.



$$P = \frac{WN}{n_R} \rightarrow W = \frac{P n_R}{N} \rightarrow \boxed{mep = \frac{P n_R}{V_d N}}$$

Presión media efectiva (mean effective pressure)

Quando se considera la potencia indicada, se define la presión media indicada (imep):

$$imep = \frac{P_i n_R}{V_d N}$$

Análogamente se define la presión media efectiva al freno (bmep):

$$bmep = \frac{P_b n_R}{V_d N}$$

La potencia indicada bruta (sin considerar el trabajo de bombeo) es la suma de la potencia al freno y lo que se pierde de potencia por fricción.

$$P_i = P_b + P_f \rightarrow imep = bmep + fmep$$

La relación entre P_i y P_b es el rendimiento mecánico:

$$\eta_m = \frac{P_b}{P_i} = \frac{bmep}{imep}$$

Algunos valores típicos

	bmep (kpa)
Natural aspirado (≈ 3000 rpm) SI	850-1050
Sobrealimentados SI	1250-1700
Sobrealimentados CI	1000-1200
Sobrealimentados intercooler CI	1000-1400
Grandes y lentos CI	1600

Ejemplo: Un motor de 4T de un automóvil encendido por chispa (SI) de 4 cilindros, se está diseñando para entregar un par máximo al freno de 150 Nm en un rango medio de velocidades (3000 rpm). Estimar el desplazamiento (vd) requerido por el motor, carrera, diámetro si $R_{sb}=1$ y $b_{mep} = 925$ kpa.

Consumo específico de combustible (specific fuel consumption) **sfc**

$$\boxed{sfc = \frac{\dot{m}_f}{P}} \quad \rightarrow \quad sfc_b = \frac{\dot{m}_f}{P_b} \quad \rightarrow \quad sfc_i = \frac{\dot{m}_f}{P_i}$$

Donde \dot{m}_f es el flujo de masa por unidad de tiempo que entra al sistema en el ciclo y P es la potencia entregada en el ciclo (al freno o indicada).

- Es un reflejo del consumo de combustible relativo a la potencia que entrega.
- Mientras más bajo se el sfc mejor.
- Valores típicos de sfc:

	SI	CI
sfc (g/kW h)	270	200

Rendimiento

$$\eta = \frac{\text{trabajo saliente}}{\text{energía entrante}} \rightarrow \eta = \frac{W}{Q_H}$$

- Q_H es la energía que entra al sistema (gas).
- $E = m_{fuel} Q_V^i$ la energía que entra con el combustible.
- Si la combustión es completa y se quema todo el combustible $\rightarrow Q_H = E$
- Si la combustión no es completa y/o no se quema todo el combustible $\rightarrow Q_H < E$

Se define el **rendimiento de conversión de combustible** como:

$$\eta_f = \frac{W}{E} \rightarrow \eta_{fi} = \frac{W_i}{E} \rightarrow \eta_{fb} = \frac{W_b}{E}$$

$$\eta_f = \frac{W_c}{m_f Q_V^i} = \frac{P_b n_R}{N} \frac{1}{\frac{\dot{m}_f n_R}{N} Q_V^i} = \frac{P_b}{\dot{m}_f Q_V^i} \rightarrow \boxed{\eta_f = \frac{1}{(sfc)_b Q_V^i}}$$

Relaciones entre el aire y el combustible

Se definen las siguientes relaciones entre la cantidad de aire y combustible utilizadas para definir las condiciones de operación de los motores:

Relación aire-combustible:

$$A/F = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_f}$$

Dilución: Relación A/F sobre la relación A/F estequiométrica:

$$\lambda = \frac{\frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_f}}{\left(\frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_f}\right)_s}$$

Relación combustible-aire:

$$F/A = \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_a} \quad r_q = \left(\frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_a}\right)_s$$

Riqueza: Relación F/A sobre la relación F/A estequiométrica:

$$\phi = \frac{\frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_a}}{\left(\frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_a}\right)_s} \rightarrow \phi = \frac{\alpha_q}{\alpha}$$

Valores estándar de operación:

- SI utilizando nafta $\rightarrow 12 \leq A/F \leq 18 \rightarrow 0,056 \leq F/A \leq 0,083$
- CI utilizando gasoil $\rightarrow 18 \leq A/F \leq 70 \rightarrow 0,014 \leq F/A \leq 0,056$

Eficiencia volumétrica

El filtro de aire, múltiple de admisión, el puerto de entrada, la válvula de entrada, etc, restringen la cantidad de aire que entra al cilindro en cada ciclo.

El parámetro utilizado para medir la efectividad con la que el motor hace que entre aire a cada cilindro en cada ciclo se denomina **eficiencia volumétrica**.

Definición: Se define como la relación entre el caudal volumétrico de aire que entra al cilindro y la tasa de aire desplazado por el pistón.

$$\eta_V = \frac{n_R \dot{m}_a}{\rho_{a,i} V_d N}$$

o bien

$$\eta_V = \frac{m_a}{\rho_{a,i} V_d}$$

donde m_a es la masa de aire que ingresa al pistón en cada ciclo y $\rho_{a,i}$ es la densidad del aire a la entrada.

Relaciones entre los parámetros de desempeño 4T

$$\eta_{ti} = \frac{P_i}{\dot{m}_f Q_{v,p}^i} \quad \rightarrow \quad P_i = \dot{m}_f Q_{v,p}^i \eta_{ti}$$

$$\dot{m}_f = \dot{m}_a \left(\frac{F}{A} \right) \quad \rightarrow \quad P_i = \dot{m}_a \left(\frac{F}{A} \right) Q_{v,p}^i \eta_{ti}$$

$$\dot{m}_a = \rho_{a,i} V_d \frac{N}{n_r} \eta_v \quad \rightarrow \quad P_i = \rho_{a,i} V_d \left(\frac{F}{A} \right) Q_{v,p}^i \eta_v \eta_{ti} \frac{N}{n_r}$$

$$\left. \begin{aligned} imep &= \rho_{a,i} \left(\frac{F}{A} \right) Q_{v,p}^i \eta_v \eta_{ti} \\ \frac{F}{A} &= \phi r_q \end{aligned} \right\} \rightarrow \boxed{imep = \phi r_q \rho_{a,i} Q_{v,p}^i \eta_v \eta_{ti}}$$