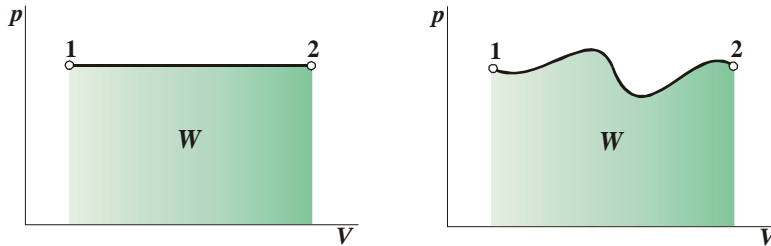


PRINCIPIOS DE TERMODINÁMICA Y MOTORES TÉRMICOS

En todo proceso, el trabajo realizado no depende sólo del trabajo inicial y final sino que también depende del camino seguido, ya que el área bajo la curva, que representa el trabajo realizado, puede ser diferente.



$$F = p \cdot A$$

$$W = F \cdot l$$

$$W = p \cdot A \cdot l = p \cdot V$$

F = Fuerza en **N**
 l = Distancia en **m**
 p = Presión en **Pa**
 A = Superficie en **m²**
 V = Volumen en **m³**

En el caso representado en la gráfica anterior, en el que hay variación de presión y volumen, el trabajo realizado será:

$$dW = p dV + V dp \Rightarrow W = \int_1^2 p dV + \int_1^2 V dp$$

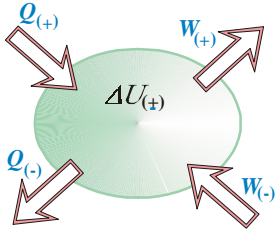
CICLOS TERMODINÁMICOS

Para que una máquina térmica pueda realizar un trabajo neto, es necesario que trabaje entre dos focos de calor, un foco caliente del que extraemos calor Q_1 o Q_c y un foco frío al que cedemos calor Q_2 o Q_f cuya diferencia $Q_1 - Q_2 = W_{realizado}$.

Denominamos:

- **Proceso abierto**, cuando no coincide el punto inicial y el final.
- **Proceso cerrado**, cuando el punto inicial coincide con el final.

Todo sistema termodinámico posee una energía interna de la que no se conoce su valor pero sí podemos conocer la variación que puede sufrir. Si tenemos un sistema como el de la figura:



Aplicando el primer principio de la termodinámica a un sistema cualquiera.

$$\Delta U_{(+)} = Q_{(+)} - W_{(+)} = Q - W$$

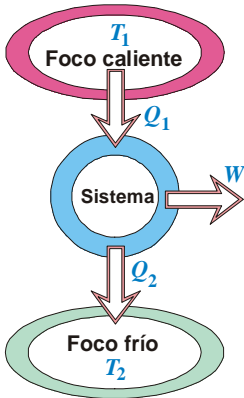
Magnitudes y unidades

U = Energía interna en Julios (**J**)

Q = Calor cedido o absorbido en Julios (**J**)

W = Trabajo realizado o absorbido en Julios (**J**)

Motor térmico



Es aquel que realiza un trabajo al pasar calor desde un foco caliente a otro frío.

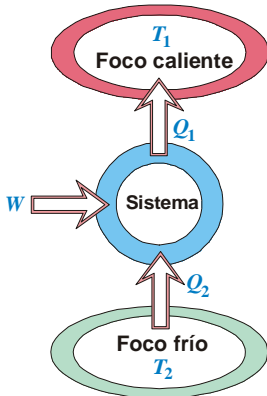
$$T_1 > T_2$$

Al realizar un ciclo $\Delta U = 0$

$$\Delta U = -W_{(+)} + Q_{1(+)} - Q_{2(-)} \Rightarrow 0 = -W + Q_1 - Q_2 \Rightarrow W = Q_1 - Q_2$$

$$\eta = \frac{W}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} \Rightarrow \eta < 1$$

Máquina frigorífica



Recibe trabajo para pasar calor desde un foco frío a otro caliente.

$$T_1 > T_2$$

Al realizar un ciclo $\Delta U = 0$

$$\Delta U = -(-W_{(-)}) - Q_{1(-)} + Q_{2(+)} \Rightarrow 0 = W - Q_1 + Q_2 \Rightarrow W = Q_1 - Q_2$$

Por lo tanto $Q_1 > Q_2$

Eficiencia (E)

Es un término referido a la máquina frigorífica, similar en concepto al rendimiento pero, con la particularidad de que puede ser mayor que uno.

$$E = \frac{Q_2}{W} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2}$$

Bomba de calor

Es una máquina frigorífica que extrae calor del exterior y lo cede a una habitación calentándola o viceversa; puede tener la eficiencia mayor que 1.

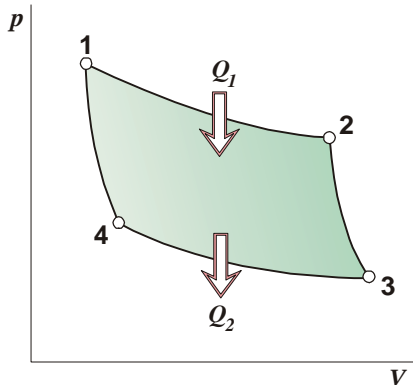
Motor de Carnot

Nicolas Léonard Sadi Carnot (ingeniero francés) estudió un motor térmico en el que:

- 1º Al motor se le suministra energía en forma de calor a temperatura elevada.
- 2º El calor realiza un trabajo mecánico.
- 3º El motor cede calor a temperatura inferior.

Ciclo de Carnot

Es un ciclo teórico y reversible.



Tiempo 1 \Rightarrow Expansión isotérmica, de 1 a 2.

Trabajo realizado $W_1 = Q_1$

Tiempo 2 \Rightarrow Expansión adiabática, de 2 a 3.

Tiempo 3 \Rightarrow Compresión isotérmica, de 3 a 4.

Trabajo realizado $W_2 = Q_2$

Tiempo 4 \Rightarrow Compresión adiabática, de 4 a 1.

El rendimiento de una máquina de Carnot está determinado por la temperatura del foco frío T_2 y del foco caliente T_1 .

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1} \Rightarrow T_1 > T_2$$

El rendimiento de una máquina de este tipo será mayor cuanto mayor sea la diferencia entre las temperaturas del foco caliente T_1 y el foco frío T_2 .

Proceso reversible

Es aquel en el que realizando un cambio pequeño en el ambiente podemos hacer que recorra su trayectoria inversa. En la práctica es imposible y en cierto modo la naturaleza nos dice que todos los procesos que ocurren en ella son irreversibles, ejemplo las personas crecen pero no decrecen.

ECUACIÓN DE LOS GASES PERFECTOS

Se considera gas perfecto al que cumple con la siguiente ecuación:

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

p = Presión en pascales (**Pa**)

V = Volumen en metros cúbicos (**m³**)

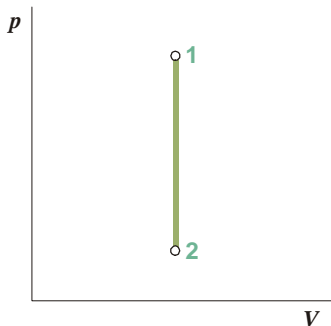
n = Cantidad de sustancia en moles del gas (**mol**)

R = Constante de los gases perfectos

T = Temperatura en Kelvin (**K**)

TRANSFORMACIONES TERMODINÁMICAS

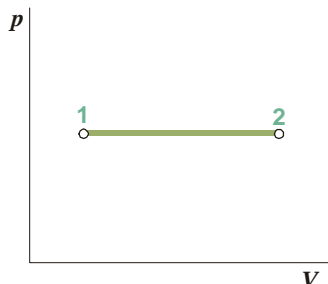
Transformación isócora o isométrica: es la que se realiza a volumen constante.



$$\left. \begin{aligned} p_1 \cdot V_1 &= R \cdot T_1 \\ p_2 \cdot V_2 &= R \cdot T_2 \end{aligned} \right| V_1 = V_2 = V$$

$$\boxed{\frac{T_2}{T_1} = \frac{p_2}{p_1}} \quad \text{Ecuación de estado}$$

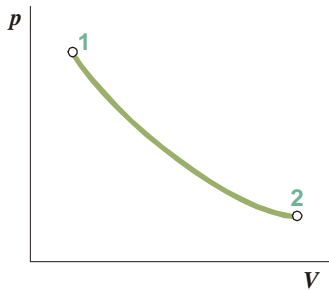
Transformación isóbara: es la que se realiza a presión constante.



$$\left. \begin{aligned} p_1 \cdot V_1 &= R \cdot T_1 \\ p_2 \cdot V_2 &= R \cdot T_2 \end{aligned} \right| p_1 = p_2 = p$$

$$\boxed{\frac{T_2}{T_1} = \frac{V_2}{V_1}} \quad \text{Ecuación de estado}$$

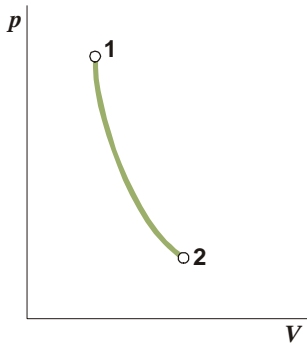
Transformación isoterma: Es la que se realiza a temperatura constante.



$$\left. \begin{aligned} p_1 \cdot V_1 &= R \cdot T_1 \\ p_2 \cdot V_2 &= R \cdot T_2 \end{aligned} \right| T_1 = T_2 = T$$

$$\boxed{p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2} \quad \text{Ecuación de estado}$$

Transformación adiabática: Es la que tiene lugar sin intercambio de calor.

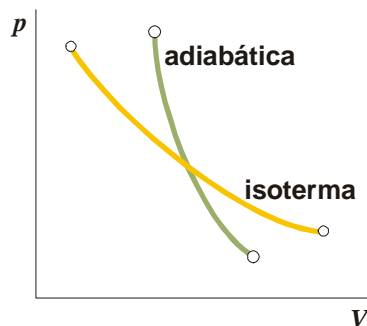


$$\left. \begin{aligned} p_1 \cdot V_1 &= R \cdot T_1 \\ p_2 \cdot V_2 &= R \cdot T_2 \end{aligned} \right| Q_1 = Q_2 = Q$$

$$\boxed{\begin{aligned} p_1 \cdot V_1^\gamma &= p_2 \cdot V_2^\gamma \\ T_1 \cdot V_1^{\gamma-1} &= T_2 \cdot V_2^{\gamma-1} \end{aligned}} \quad \text{Ecuaciones de estado}$$

γ = Coeficiente adiabático, depende del gas.
Para el aire vale 1,4

Diferencia en la pendiente de una adiabática y una isoterma: La adiabática presenta mayor pendiente que la isoterma.



PRINCIPIOS DE MOTORES TÉRMICOS

Los motores térmicos son aquellos que transforman la energía térmica en mecánica. Los podemos clasificar en dos grandes grupos, los de *combustión externa* realizan la combustión de una manera continua fuera del propio motor, como por ejemplo la antigua máquina de vapor y las actuales centrales térmicas; los de *combustión interna* realizan la combustión dentro de la propia máquina, como por ejemplo el motor Otto, motor Diesel, motor rotativo y turbina de gas.

En todos los motores de este tipo se precisa un comburente, normalmente oxígeno del aire, y un combustible que puede ser líquido: gasolina, gasoil, alcohol o aceite vegetal, gaseoso: butano, propano, metano, etc. y sólido: carbón, uranio, etc.

También puede hacerse una clasificación de los motores de combustión interna en función del número de carreras necesarias o *tiempos* para completar un ciclo. Así tenemos los motores de dos tiempos (2T) y los de cuatro tiempos (4T).

ELEMENTOS FUNDAMENTALES DE LOS MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

En este apartado nos centraremos en los motores de combustión interna con ciclo Otto y Diesel.

Describimos a continuación los elementos que componen los motores.

Culata: es el elemento que protege la parte superior del motor.

Bloque: se encuentra entre la culata y el cárter. Es la parte más pesada del motor. En él se encuentran los cilindros, los orificios de refrigeración y lubricación, así como los soportes de diferentes piezas del motor.

Cárter: es el elemento que protege la parte inferior del motor a la vez que sirve para depósito de lubricante.

Cilindro: es un hueco con forma cilíndrica practicado en el bloque en él que se realiza la combustión y sobre el que se desplaza el pistón.

Émbolo o pistón: se encuentra en el cilindro y puede desplazarse sobre él, transformando la energía térmica de la combustión (que se realiza sobre su superficie) en energía mecánica de traslación. Cada desplazamiento del pistón se denomina **carrera** (*L*).

Segmentos: son unos aros de un material muy duro y resistente que rodean al pistón y cierran la cámara de combustión con el cilindro, disminuyendo el rozamiento en cada carrera.

Bulón: es el elemento de unión del pistón con la biela.

Biela: junto con el cigüeñal, transforma el movimiento rectilíneo del pistón en rotativo.

Cigüeñal: en él están conectadas todas las bielas del motor y transfiere la energía rotativa a la caja de cambios del motor.

Volante de inercia: acumula energía en forma de momento inercia cuando se realiza una combustión, para cederla al motor cuando la precise, dando la sensación de un movimiento continuo. Se encuentra en un extremo del cigüeñal.

Válvula de admisión: es la válvula que deja pasar los gases de la combustión (comburente más combustible en los motores Otto o bien, sólo comburente en los motores Diesel) al cilindro.

Válvula de escape: es la válvula que deja salir los gases de la combustión al exterior.

Carburador: sólo es necesario en los motores Otto, en él se produce la mezcla de comburente y combustible.

Bomba de inyección: en los motores Diesel, es el elemento que proporciona al combustible la presión necesaria para entrar en el cilindro.

Bujía: se usa en los motores Otto y es el elemento encargado de proporcionar la chispa de ignición en el interior del cilindro.

Delco: en los motores de combustión interna con ciclo Otto, es el elemento distribuidor de la corriente de alto voltaje, que hace llegar por turno a cada una de las bujías.

Inyector: en los motores Diesel, es el elemento encargado de introducir el combustible dentro del cilindro en la proporción y presión determinada.

Cojinetes: son elementos dispuestos entre dos piezas, una fija y otra giratoria para reducir el rozamiento entre ellas, aumentando el rendimiento de la máquina y su vida útil.

Árbol de levas: es un elemento perfectamente sincronizado con el cigüeñal que permite la apertura y cierre de las distintas válvulas del motor controlando sus fluidos.

Tubo de escape: es el elemento que permite la evacuación de los gases, una vez quemados, al exterior.

Silenciador: se encuentra en el tubo de escape, su misión es reducir la contaminación acústica que pueden producir estos motores.

Catalizador: se encuentra en el tubo de escape, su misión es reducir la emisión de monóxido de carbono y la emisión de combustible a la atmósfera.

Embrague: es el elemento que nos permite desconectar y conectar la transmisión de energía mecánica desde el motor al eje de salida.

Caja de cambios: nos permite modificar la relación de transmisión desde el motor a las ruedas en función de las necesidades.

CICLO IDEAL OTTO

Nicolaus Otto fue un ingeniero alemán que, a mediados del siglo XIX, diseñó el motor que lleva su nombre y, aunque en nuestro país es más conocido como el motor de gasolina de cuatro tiempos, pueden utilizarse otros combustibles como alcohol, butano, propano, etc.

Tiempos del motor Otto

Tiempo 1º Admisión. (Transformación isobara 0 - 1): en este momento, el pistón se encuentra en el PMS, se abre la válvula de admisión, se inicia el descenso del pistón hacia el PMI, entrando en el cilindro comburente más combustible mezclados.

Tiempo 2º Compresión. (Transformación adiabática 1 - 2): cuando el pistón llega al PMI se cierra la válvula de admisión y el pistón inicia su ascenso hasta el

PMS comprimiendo la mezcla, a expensas de un trabajo negativo W_1 . Al ser la transformación adiabática no hay transferencia de calor.

Tiempo 3º Combustión – expansión. (Transformación isócara 2 - 3 y adiabática 3 - 4): cuando el pistón se encuentra próximo al PMS, se produce una chispa en la bujía, inflamando la mezcla y aumentando considerablemente la presión dentro del cilindro (Q_1 es el calor generado en la combustión). En este momento se inicia la única carrera útil del ciclo haciendo que el pistón pase desde el PMS al PMI.

En la expansión se genera el trabajo positivo W_2 .

Tiempo 4º Expulsión o escape. (Transformación isócara 4 - 1 y isobara 1-0): cuando llegue de nuevo al PMI se abre la válvula de escape provocando la evacuación de los gases quemados a la atmósfera, el resto de los gases son expulsados por el pistón en su ascenso al PMS. Cuando llega al PMS se cierra la válvula de escape y se abre la de admisión iniciándose un nuevo ciclo con el descenso del pistón.

NOTAS: PMS (Punto Muerto Superior). Indica la máxima altura que puede alcanzar el pistón.

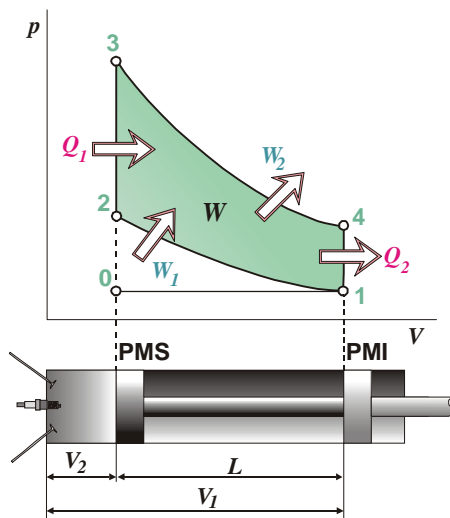
PMI (Punto Muerto Inferior). Indica la mínima altura que puede alcanzar el pistón.

CARRERA (L): distancia que puede recorrer el pistón, es decir, distancia que hay entre el PMS y el PMI.

El trabajo neto W , producido en el ciclo

$$W = W_2 - W_1$$

Ciclo termodinámico de Otto



Transformación 0-1 y 1-0 ⇒ Isobara a presión atmosférica.

Transformación 1-2 ⇒ Adiabática ($Q = 0$)

Transformación 2-3 ⇒ Isócara ($V = \text{cte}$)

Transformación 3-4 ⇒ Adiabática ($Q = 0$)

Transformación 4-1 ⇒ Isócara ($V = \text{cte}$)

Q_1 ⇒ Calor generado en la combustión.

Q_2 ⇒ Calor cedido al ambiente o perdido.

Análisis termodinámico

Rendimiento teórico (η_T)

Considerando al motor como un sistema cerrado en un cilindro y un ciclo se cumplirá:

$$\eta_T = \frac{W}{Q_1} = \frac{Q_1 - |Q_2|}{Q_1} = 1 - \frac{|Q_2|}{Q_1}$$

Por otra parte, si consideramos a la mezcla de aire más combustible como un gas ideal y estudiamos el trabajo producido en las diferentes transformaciones termodinámicas, obtendríamos la siguiente ecuación:

$$\eta_T = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\gamma-1}}$$

$$\varepsilon = R_c = \frac{V_1}{V_2} \quad \text{Ecuación conocida como } \textit{relación de compresión}$$

$V_1 = V_T$ = Volumen total del cilindro, se obtiene cuando el pistón se encuentra en el PMI.

$V_2 = V_c$ = Volumen de la cámara de combustión, es el volumen del cilindro que queda cuando el pistón se encuentra en el PMS. Ver figura anterior.

CICLO IDEAL DIESEL

Rudolf Diesel fue un ingeniero alemán que, a finales del siglo XIX, diseñó el motor que lleva su nombre y, aunque en nuestro país es más conocido como motor de gasoil de cuatro tiempos, pueden utilizarse otros combustibles como aceites ligeros de origen aceite mineral o vegetal como el aceite de girasol.

Tiempos del motor Diesel

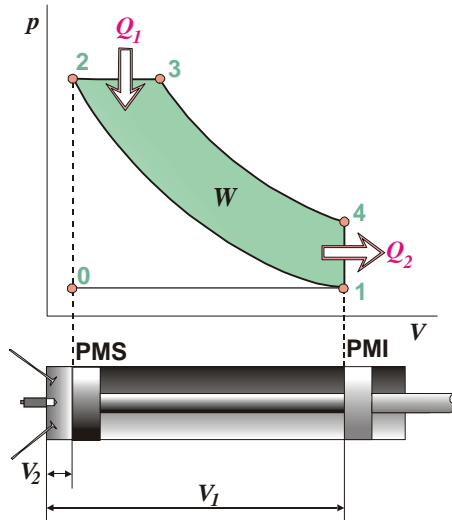
TIEMPO 1º Admisión. (Transformación isobara 0 - 1): en este momento, el pistón se encuentra en el PMS, se abre la válvula de admisión, se inicia el descenso del pistón hacia el PMI, entrando en el cilindro sólo comburente (aire).

TIEMPO 2º Compresión. (Transformación adiabática 1 - 2): cuando el pistón llega al PMI se cierra la válvula de admisión y el pistón inicia su ascenso hasta el PMS comprimiendo considerablemente al aire. Esta compresión eleva la temperatura del aire.

TIEMPO 3º Combustión – expansión. (Transformación isobárica 2 - 3 y adiabática 3 - 4): cuando el pistón se encuentra próximo al PMS, por el inyector, se introduce el combustible a gran presión, produciéndose una explosión como consecuencia del calor desprendido en el roce del aire con el combustible, aumentando considerablemente la presión dentro del cilindro. En este momento se inicia la única carrera útil del ciclo haciendo que el pistón pase desde el PMS al PMI.

TIEMPO 4º Expulsión o escape. (Transformación isócora 4 - 1 y isobara 1 - 0): cuando el pistón llegue de nuevo al PMI se abre la válvula de escape provocando la evacuación de los gases quemados a la atmósfera. El resto de los gases son expulsados por el pistón en su ascenso al PMS. Cuando llega al PMS se cierra la válvula de escape y se abre la de admisión iniciándose un nuevo ciclo con el descenso del pistón.

Ciclo termodinámico de Diesel



Transformación 0-1 y 1-0 ⇒ Isobara a presión atmosférica.

Transformación 1-2 ⇒ Adiabática

Transformación 2-3 ⇒ Isócora

Transformación 3-4 ⇒ Adiabática

Transformación 4-1 ⇒ Isócora

Q_1 ⇒ Calor generado en la combustión.

Q_2 ⇒ Calor cedido al ambiente o perdido.

Análisis termodinámico

Rendimiento teórico (η_T)

Considerando al motor como un sistema cerrado, en un cilindro y un ciclo se cumplirá:

$$\eta_T = \frac{W}{Q_1} = \frac{Q_1 - |Q_2|}{Q_1} = 1 - \frac{|Q_2|}{Q_1}$$

Por otra parte, si consideramos al aire como un gas ideal y estudiamos el trabajo producido en las diferentes transformaciones termodinámicas, obtendríamos la siguiente ecuación:

$$\eta_T = 1 - \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{1}{\epsilon^{\gamma-1}} \cdot \frac{\tau^\gamma - 1}{\tau - 1}$$

$$\varepsilon = R_c = \frac{V_1}{V_2} \quad \text{Ecuación conocida como relación de compresión}$$

$$\tau = \text{Relación de combustión a presión constante} \quad \tau = \frac{V_3}{V_2}$$

γ = Coeficiente adiabático.

V_1 = Volumen total del cilindro, se obtiene cuando el pistón se encuentra en el PMI.

V_2 = Volumen de la cámara de combustión, es el volumen del cilindro que queda cuando el pistón se encuentra en el PMS; ver figura anterior.

PARÁMETROS DE INTERÉS PARA TODOS LOS MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

Potencias

Potencia indicada (P_i)

Es la potencia desarrollada en el interior del cilindro.

$$P_i = \frac{W_i}{t} \Rightarrow W_i = F_i \cdot L \Rightarrow F_i = p_i \cdot A = p_i \frac{\pi \cdot D^2}{4}$$

$$W_i = p_i \cdot (V_1 - V_2) = p_i \cdot V_u$$

Teniendo en cuenta todos los cilindros del motor:

$$P_i = \frac{V_T \cdot p_i \cdot n}{K \cdot 60 \cdot 75}$$

P_i = Potencia indicada en Caballos de Vapor (**CV**)

p_i = Presión media indicada, representa la potencia media que se desarrolla en un cilindro en Kilogramos por metro cuadrado (**kg/m²**).

V_T = Cilindrada total en metros cúbicos (**m³**).

V_u = Cilindrada unitaria (**m³**).

n = Revoluciones por minuto del cigüeñal (**r.p.m.**)

L = carrera (**m**).

K = Representa las carreras útiles por vuelta del cigüeñal

K = 2 Para motores de cuatro tiempos.

K = 1 Para motores de dos tiempos.

1/60 = Constante para pasar los minutos de r.p.m. a segundos.

1/75 = Constante para pasar los kg·m a CV

Potencia efectiva (P_e)

Potencia desarrollada en el eje de salida del motor.

$$P_e = M \cdot \omega$$

P_e = Potencia en Julios (J)

M = Par motor en el eje del motor en Newton metro (N·m)

ω = Velocidad angular en radianes por segundo (rad/s)

Potencia perdida o potencia pasiva (P_p)

Es función de los rozamientos entre las piezas del motor.

$$P_p = P_i - P_e$$

Cilindradas

Cilindrada unitaria (V_u)

Representa el volumen barrido por el pistón al pasar desde el PMS al PMI en un cilindro, es decir, es el volumen barrido en una carrera.

$$V_u = V_1 - V_2 = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot L$$

Magnitudes y unidad

V_u = Volumen del cilindro en centímetro cúbicos (**cm³**)

D = Diámetro del cilindro en centímetros (**cm**)

L = Carrera del pistón en centímetros (**cm**)

Cilindrada total (V_t): Representa el volumen útil total de los cilindros del motor.

$$V_t = N \cdot V_u$$

Magnitudes y unidades

V_t = Cilindrada del motor en centímetros cúbicos (cm^3)

N = Número de cilindros del motor.

V_u = Cilindrada unitaria en centímetros cúbicos (cm^3)

Calor aportado al ciclo y calor útil transformado en trabajo

En general se define como calor aportado al ciclo a $Q_{ap} = G \cdot Q_e$, donde G es el gasto o consumo de combustible y Q_e el poder calorífico o calor de combustión.

Se define el calor útil transformado en trabajo como $Q_u = G \cdot Q_e \cdot \eta_u$, donde η_u es el rendimiento efectivo o útil.

Combustibles**Dosado (D)**

Representa la proporción de aire necesaria para quemar un combustible determinado.

$$D = \frac{\text{masa de aire}}{\text{masa de combustible}}$$

Consumo específico de combustible

Para obtener una unidad de trabajo se necesita una masa de combustible denominada consumo específico de combustible G_{pe} que viene dado por la expresión

$$G_{pe} = \frac{1}{Q_e \cdot \eta}$$

Rendimientos**Rendimiento indicado (η_i)**

Representa la relación entre el trabajo realizado en el interior del cilindro y el calor aportado.

$$\eta_i = \frac{W_i}{Q_{ap}}$$

W_i = Trabajo realizado en el cilindro en Julios (**J**)

Q_{ap} = Calor aportado en Julios (**J**)

Rendimiento efectivo (η_e)

Representa la relación entre el trabajo realizado motor en su eje y el calor aportado.

$$\eta_e = \frac{W_e}{Q_{ap}}$$

W_e = Trabajo realizado por la máquina en su eje en Julios (J)

Q_{ap} = Calor aportado en Julios (J).

Rendimiento mecánico (η_m)

Representa la relación entre el rendimiento efectivo y el indicado. Da una idea de las pérdidas por rozamientos que posee la máquina.

$$\eta_m = \frac{\eta_e}{\eta_i}$$