



2º de Bachillerato

Tecnología Industrial II

Contenidos

Principios de máquinas: Motores térmicos

Ya has estudiado los dos primeros temas de la unidad. A lo largo de ellos hemos hecho un recorrido por los principales principios teóricos de la dinámica y la termodinámica que nos van a servir para entender como funciona cualquier tipo motor, primero térmico y más adelante eléctrico de corriente continua.

El objetivo de este tema es hacer un recorrido por los principales tipos de motores térmicos, analizando sus características y funcionamiento.

Sin embargo y antes de pasar más adelante es imprescindible que tengas claro a que nos referimos cuando estamos hablando de una máquina de este tipo, que sepas que se entiende por motor térmico.

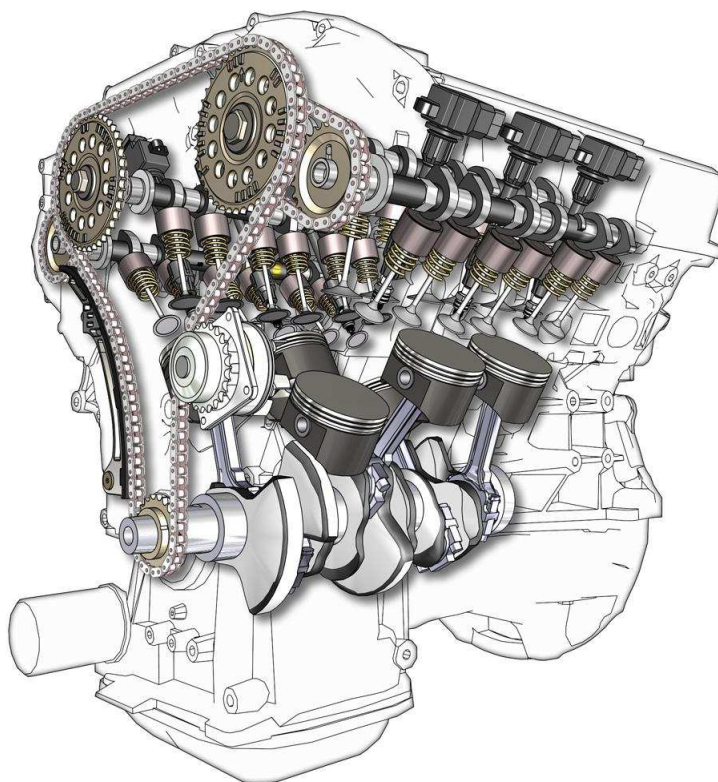


Imagen de Swaroopvarma en [Wikimedia](#). Dominio público

Importante

Un motor térmico es cualquier máquina cuya operación se basa en la repetición de un ciclo termodinámico y que tiene por objetivo transformar energía térmica en energía mecánica que se pueda utilizar para generar trabajo.

Curiosidad

Podemos considerar que la primera máquina térmica de la historia de la humanidad tiene su origen en el año 75 d. e. y que es obra de Herón de Alejandría.

Este gran matemático e ingeniero de la Grecia clásica colocó sobre una fuente de calor una esfera de metal. La esfera estaba llena de agua y tenía la posibilidad de girar libremente alrededor de su eje. En dos puntos diametralmente opuestos de la esfera instaló dos tubos con forma de L comunicados con el interior.

Cuando el agua, tras calentarse, empezó a hervir, comprobó como dos chorros de vapor surgían de los conductos en sentidos opuestos entre si, dando lugar a un movimiento de rotación de la esfera sobre si misma. Herón llamó a este invento eolipila (válvula de viento).

Es la primera información, de que se tiene noticia, de que el calor era una fuente de energía, y que era posible convertir el calor en energía mecánica rotativa.



Imagen de Trikly en [Wikimedia](#). Dominio público

1. Clasificación



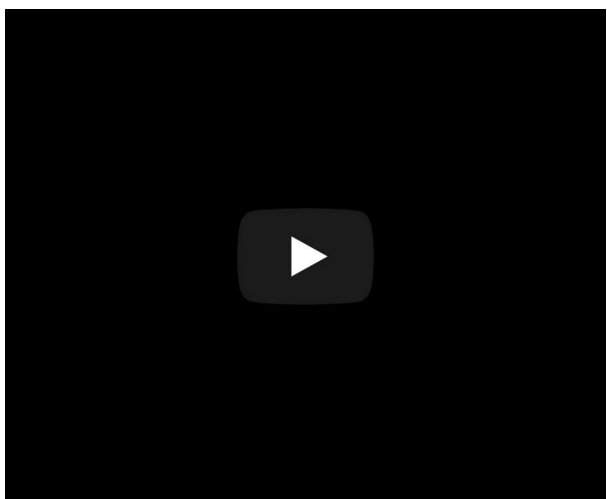
El caso más habitual es que el motor térmico utilice como fuente de energía térmica un combustible, en ese caso se denomina a la máquina **motor de combustión**, pudiéndose establecer distintas clasificaciones dependiendo del criterio que se siga.

Atendiendo al **lugar en que se produce la combustión**, podremos distinguir motores de combustión interna o externa, como ya hemos visto en el tema anterior.

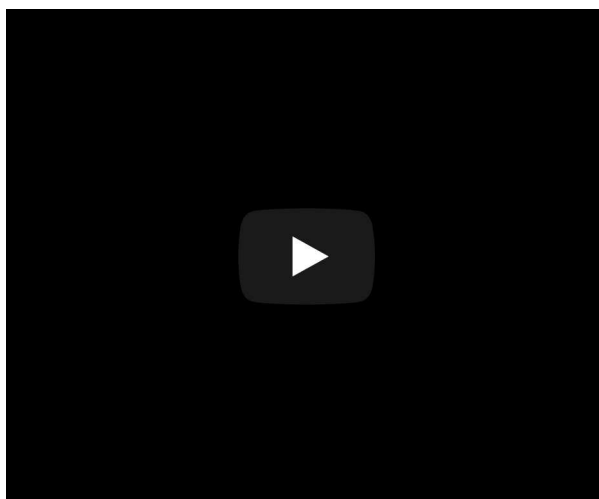
Si atendemos al **ciclo que sigue el motor** podemos distinguir:

- **Motores de cuatro tiempos**, así llamados debido a que un ciclo termodinámico completo de funcionamiento se puede dividir en cuatro etapas. El nombre de estas etapas es admisión, compresión, expansión y escape. Es el motor más utilizado en los automóviles.
- **Motores de dos tiempos**, en ellos el ciclo se completa en dos etapas: Admisión-compresión y expansión-escape, los ciclomotores se mueven por este tipo de motor.

Motor diesel de cuatro tiempos



Motor de dos tiempos



Vídeo de Cain Quarantasei alojado en [Youtube](#) Vídeo de Cain Quarantasei alojado en [Youtube](#)

La siguiente animación muestra de una manera gráfica más detallada el funcionamiento del motor de dos tiempos_



Video de Eder Gallardo alojado en [Youtube](#)

Si la clasificación la hacemos atendiendo al tipo de movimiento, podremos diferenciar:

● **Motores alternativos.** En este tipo de motores un pistón se mueve alternativamente arriba y abajo en el interior de un cilindro.



Imágenes en Banco de Imágenes del [INTEF](#). Licencia [CC](#)

● **Motores rotativos.** En ellos el fluido actúa sobre pistones o turbinas cuyo movimiento es giratorio. De estos el más conocido es el motor Wankel, en el que la cámara de combustión tiene una pieza giratoria de forma triangular que gira firmemente unida al rotor, y que no dispone de cilindros ni de pistones, como se observa en la figura.

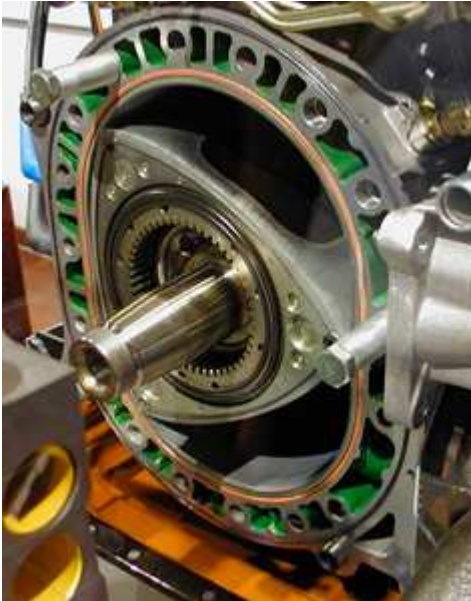


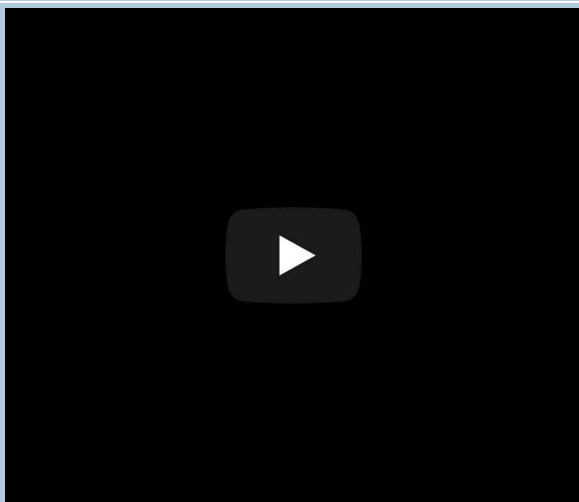
Imagen de Amux en [Wikimedia](#). Licencia [CC](#)



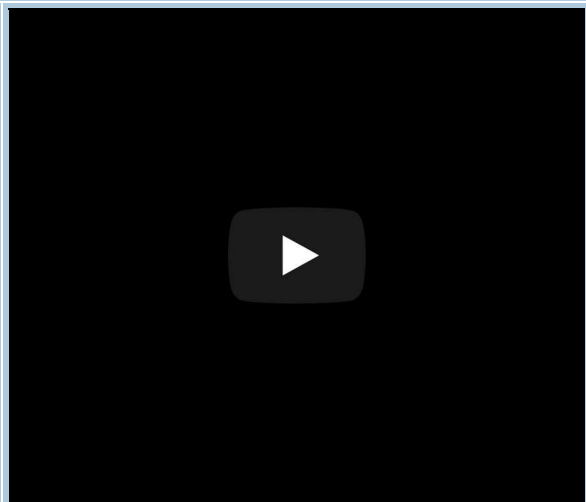
Imagen en Banco de Imágenes del [INTEF](#). Licencia [CC](#)

Curiosidad

Los dos videos siguientes te muestran el funcionamiento de un motor Wankel. El primero de ellos es muy sencillo pero fácil de entender. El segundo es mucho más elaborado y complejo pero te servirá para hacerte una idea más real de su estructura real:



Video de danielme91 alojado en [Youtube](#)



Video de Matt Rittman alojado en [Youtube](#)

2. Motor de cuatro tiempos. Ciclo de Otto



El motor de gasolina es un motor alternativo, de combustión interna, con encendido por chispa, de cuatro tiempos, que convierte la energía química que contiene el combustible en energía cinética.

El proceso se inicia con la mezcla homogénea de gasolina y aire fuera de la cámara de combustión en un elemento llamado carburador. La mezcla obtenida se hace llegar a dicha cámara, donde es comprimida. La combustión se inicia por un sistema de encendido externo al motor (bujía) de control temporizado. En el interior del cilindro se inflama y quema la mezcla de aire y gasolina. El calor generado por la combustión provoca un incremento en la presión de los gases, previamente comprimidos originando un trabajo mecánico a través del pistón, la biela y el cigüeñal. Los gases quemados son expulsados por el tubo de escape y son sustituidos por una nueva porción de mezcla tras cada carrera de combustión, todo ello se produce según el principio de los cuatro tiempos.

Un **ciclo Otto** es una aproximación teórica al comportamiento de un motor de encendido por bujía o de explosión. Se representa en un diagrama p-V como en la figura adjunta. Siendo sus fases las siguientes:

- **Admisión (1).** El pistón desciende con la válvula de admisión abierta, aumentando la cantidad de mezcla (aire y combustible) en la cámara. (Expansión a presión constante puesto que al estar la válvula abierta la presión es igual a la exterior). E-A.

- **Compresión (2).** El pistón asciende comprimiendo la mezcla, ambas válvulas permanecen cerradas (Compresión adiabática). A-B.

- **Combustión.** Con el pistón en el punto muerto superior, salta la chispa de la bujía, que inicia la combustión de la mezcla a volumen prácticamente constante (ya que al pistón no le ha dado tiempo a bajar). B-C.

- **Expansión (3).** Debido a la combustión se produce un ascenso brusco de temperatura que empuja al pistón hacia abajo, realizando trabajo sobre él, las válvulas continúan cerradas. (Expansión adiabática). C-D.

- **Escape (4).** Se abre la válvula de escape y el gas sale al exterior, empujado por el pistón a una temperatura mayor que la inicial, siendo sustituido por la misma cantidad de mezcla fría en la siguiente admisión. El sistema es realmente abierto, pues intercambia masa con el exterior. No obstante, dado que la cantidad de aire que sale y la que entra es la misma podemos, desde el punto de vista del balance energético, suponer que es el mismo aire, que se ha enfriado. Este enfriamiento ocurre en dos fases. Cuando el pistón se encuentra en el punto muerto inferior, el volumen permanece aproximadamente constante D-A.

- Cuando el pistón empuja el aire hacia el exterior, con la válvula abierta, A-E, cerrando el ciclo.

Para que se produzca un ciclo ha debido haber dos subidas y dos bajadas del pistón, por lo que recibe el nombre de motor de cuatro tiempos y el cigüeñal ha necesitado dar dos vueltas para completar un ciclo.

Observando el ciclo Otto ideal, podemos considerar despreciables los procesos de admisión y de escape a presión constante A-E y E-A, puesto que son idénticos en la gráfica y de sentido opuesto, por lo que el calor y el trabajo intercambiados entre ellos se anulan mutuamente.

El siguiente gráfico animado te muestra de manera sencilla cada una de las etapas anteriores:

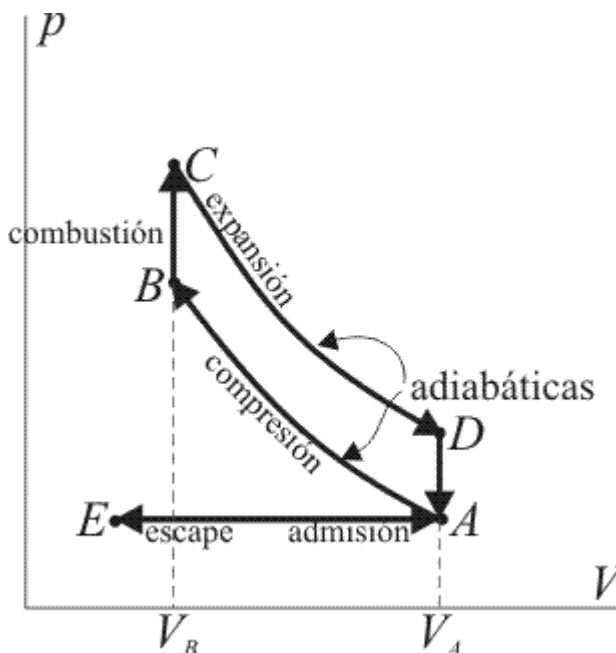


Imagen de elaboración propia

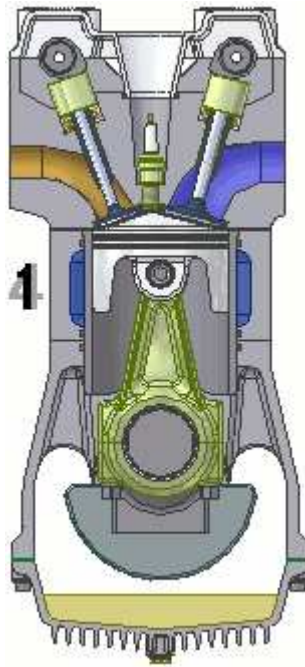
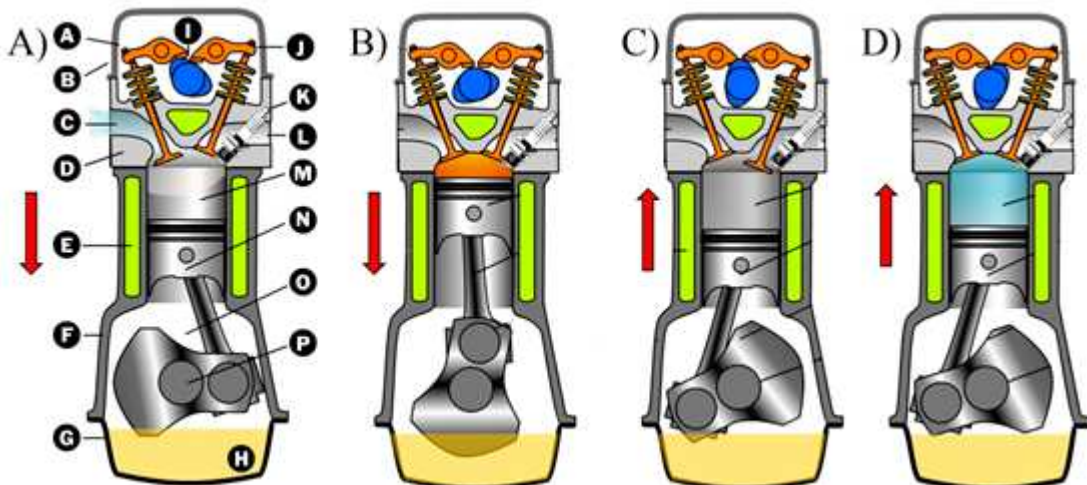


Imagen en [laplace](#). Licencia [CC](#)

Ejercicio resuelto

Cada uno de los cuatro dibujos siguientes se corresponde con un tiempo del ciclo del motor de gasolina. Identifícalos y explica detalladamente que ocurre en cada uno de ellos.



Tiempos del motor de gasolina

- A) Admisión.
- B) Expansión.
- C) Escape.
- B) Compresión

Intercambio de calor producido en el ciclo

De los cuatro procesos que constituyen el ciclo cerrado, solamente se intercambia calor en las dos transformaciones isócoras. B-C y D-A.

En la combustión de la mezcla B-C, una cierta cantidad de calor Q_c (procedente de la energía interna del combustible) se transfiere al aire. Dado que el proceso sucede a volumen constante, el calor coincide con el aumento de la energía interna, calculándose:

$$Q_c = \Delta U - W = n \cdot c_v \cdot \Delta T = n \cdot c_v \cdot (T_C - T_B)$$

En la expulsión de los gases D-A, el aire escapa a una temperatura mayor que la que tiene a la entrada, liberando posteriormente un calor Q_f al ambiente, su signo es negativo porque es expulsado desde el sistema hacia el ambiente. Su valor, como en el caso anterior, es:

$$Q_f = \Delta U - W = n \cdot c_v \cdot \Delta T = n \cdot c_v \cdot (T_D - T_A)$$

Trabajo realizado en el ciclo

Solo se realiza trabajo en las dos transformaciones adiabáticas.

Durante la compresión de la mezcla A-B, se realiza un trabajo positivo sobre la mezcla, como es un proceso adiabático, todo este trabajo se emplea en elevar la energía interna, incrementándose la temperatura:

$$W_{A-B} = \Delta U - Q = n \cdot c_v \cdot \Delta T = n \cdot c_v \cdot (T_B - T_A)$$

Durante la expansión C-D es el fluido quien realiza trabajo sobre el pistón, que tiene signo negativo, por ser el sistema el que lo realiza. Este trabajo equivale a la variación de la energía interna.

$$W_{C-D} = \Delta U - Q = n \cdot c_v \cdot \Delta T = n \cdot c_v \cdot (T_C - T_D)$$

Por lo que el trabajo útil que produce el motor, será igual al generado por el motor menos el que necesita para poder funcionar:

$$W_{util} = W_{C-D} - W_{A-B} = n \cdot c_v \cdot (T_C - T_D - T_B + T_A)$$

Como estamos hablando de un ciclo termodinámico, el incremento de energía interna tiene que ser nulo, por lo que el calor neto que se introduce en el ciclo tiene que ser igual al trabajo útil realizado, es decir:

$$Q_c - Q_f = W_{util} = W_{C-D} - W_{A-B}$$

Rendimiento del ciclo

El rendimiento o eficiencia de una máquina térmica se define, como el cociente entre el trabajo neto útil (W) y el calor total producido en la combustión (Q_c). Es decir:

$$\eta = \frac{W}{Q_c} = \frac{Q_c - Q_f}{Q_c} = 1 - \frac{Q_f}{Q_c}$$

El rendimiento se suele expresar en función de la temperatura, responde a la siguiente expresión:

$$\eta = 1 - \frac{T_A}{T_B}$$

Por lo tanto, el rendimiento o eficiencia depende solamente de la temperatura al inicio y al final del proceso de compresión, y no de la temperatura tras la combustión, o de la cantidad de calor que

introduce ésta.

Igualmente el rendimiento se suele expresar en función de la relación de compresión, con lo que su expresión será:

$$\eta = 1 - \left(\frac{V_B}{V_A} \right)^{\gamma-1} = 1 - \frac{1}{r^{\gamma-1}}$$

Donde r es la relación de compresión es decir el cociente entre el volumen del cilindro cuando el pistón se encuentra en el PMI y el volumen cuando el pistón se encuentra en el PMS.

$$r = \frac{V_A}{V_B}$$

El rendimiento en un motor de ciclo Otto, depende además del diseño mecánico del motor, de:

- **La compresión**, cuanto mayor sea la compresión mayor será el rendimiento térmico del motor y tanto más se aprovechará su combustible; aunque la compresión está limitada por el límite de detonación, que implica una combustión irregular de la mezcla inflamada, incluso una autocombustión, sin necesidad de chispa lo que provoca sobrecargas y posibles daños en el motor.

- **Desarrollo y calidad de la combustión**, depende de que el combustible y el aire se mezclen íntimamente, al objeto de que durante el tiempo que dure la combustión, el combustible se queme del modo más completo posible, para lo que también es importante que el frente de la llama avance uniformemente, tanto en el espacio como en el tiempo, hasta que se haya quemado todo el combustible.

- **Mezcla de aire y combustible**, El consumo de combustible depende de la proporción de la mezcla, produciéndose el consumo mínimo para una proporción denominada estequiométrica de 14,7:1, lo que quiere decir que por cada kg de combustible debemos utilizar 14,7 kg de aire, es decir por cada litro de combustible se necesitan unos 10000 litros de aire.

Ya que los automóviles funcionan la mayor parte del tiempo en un régimen de carga parcial, se diseñan para que el consumo sea mínimo en ese régimen. En los demás regímenes de servicio (relentí, plena carga), resulta más favorable una mezcla más rica en combustible.

Curiosidad

Los dos siguientes videos muestran de forma gráfica y muy sencilla aspectos importantes del comportamiento de un motor que funciones según las etapas definidas en el ciclo Otto.

- El primero muestra y explica de forma detallada los cuatro tiempos de funcionamiento.
- El segundo explica la forma de determinar la cilindrada y relación de compresión.



Ejercicio resuelto

Calcula la cilindrada de un motor que tiene las siguientes características:

- Diámetro del pistón: 200 mm.
- Carrera: 60 mm.
- Número de cilindros: 4.

Mostrar retroalimentación

Solución

Un motor funciona según un ciclo Otto ideal con una relación de compresión $r=8$. Al comenzar la compresión, el aire se encuentra a 100 kPa y 17°C (290K). Durante la combustión se añaden 800 kJ/kg de calor. (Coeficiente adiabático del aire $\gamma=1,4$).

Dibuja el diagrama p-V del ciclo y calcula:

- La temperatura máxima.
- Presión máximas producidas en el ciclo.
- Rendimiento del motor.
- Trabajo neto producido durante el ciclo.

Mostrar retroalimentación

Solución

Un motor monocilíndrico de cuatro tiempos, con un diámetro de pistón 60 mm, sigue un ciclo termodinámico de Otto. Los límites del ciclo están delimitados estando sus extremos por los siguientes valores: $V_1=480 \text{ cm}^3$, $V_2=120 \text{ cm}^3$, $p_1=0,1 \text{ MPa}$, $p_2=0,7$

Relación volumétrica de compresión.

c) Calcula el trabajo producido durante el ciclo, (para este cálculo considerar que los extremos del ciclo están unidos por líneas rectas).

Mostrar retroalimentación

[Solución](#)

2.2. Ciclo real de Otto



Hasta este momento hemos estudiado el funcionamiento teórico de un motor ideal que funcionara según un ciclo Otto. Lo cierto es que el ciclo real de un motor de encendido por chispa difiere ligeramente del ideal por los siguientes motivos:

- La válvula de admisión permanece abierta un cierto tiempo hasta después de que el pistón comience a descender, para conseguir que entre algo más de aire. Es el llamado Retraso al Cierre de la Admisión (RCA).
- La válvula de escape también se adelanta en la Apertura del Escape (AAE) para que los gases de la combustión salgan un poco antes de que el pistón llegue al PMI, para que salga la mayor cantidad posible de gases quemados.
- El proceso de ignición del combustible no es instantáneo, y la chispa salta antes de que el pistón alcance el PMS para optimizar el proceso de combustión.

Esto provoca que el diagrama real difiera ligeramente del diagrama ideal, siendo el trabajo producido, llamado trabajo indicado (WI) algo inferior al teórico (WT).

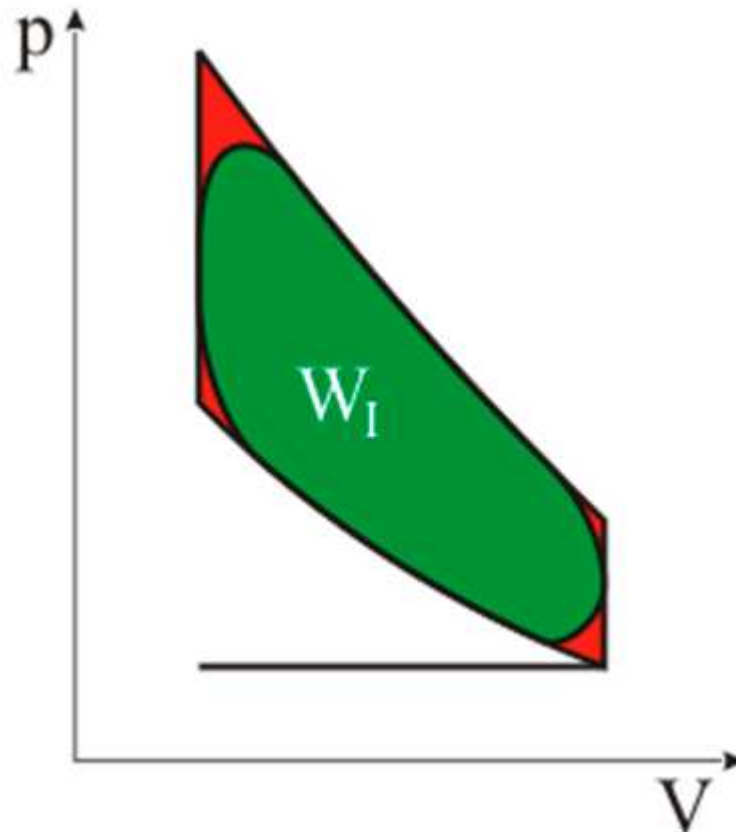


Imagen de elaboración propia

La relación entre ambos es el llamado rendimiento del diagrama:

$$\eta_{\text{Diagrama}} = \frac{W_{\text{indicado}}}{W_{\text{teórico}}}$$

Como además siempre existen pérdidas en los mecanismos de transmisión, el trabajo que realmente se dispone en el eje es una parte del trabajo indicado del ciclo real, llamándose rendimiento mecánico a la relación que existe entre ambos, es decir:

$$\eta_{\text{mecánico}} = \frac{W_{\text{eje}}}{W_{\text{indicado}}}$$

Importante

En un automóvil se considera que el **par** (también llamado torque o momento) es la fuerza de giro que el motor proporciona en el cigüeñal, el valor del par nos dirá con cuánta fuerza es capaz de hacerlo girar el motor, cuánta fuerza se puede extraer del cigüeñal a esa velocidad que gira.

La unidad de par en el Sistema Internacional es el Newton metro (Nm).

Mientras que la **potencia**, es la capacidad para realizar un trabajo durante un cierto tiempo, su expresión es el resultado de dividir trabajo por tiempo. Cuanta mayor potencia desarrolle un motor, menos tiempo necesitará para realizar un trabajo determinado.

El objetivo del automóvil es que el movimiento generado en el motor llegue al suelo, acelerando al coche o arrastrando una carga. Esta capacidad está directamente relacionando las magnitudes potencia, par y velocidad.

En un automóvil, a la salida del motor hay una caja de cambios, que convierte una velocidad y un par a la entrada, en otra velocidad y par diferentes en la salida, pero manteniendo la potencia constante.

Cuando un coche no puede subir una cuesta en 5ª, reducimos a 4ª. Esto provoca que el coche transmita más fuerza al suelo, aunque se reduzca la velocidad que llevábamos. A cualquier régimen de velocidad del motor, digamos 3.500 r.p.m., en 4ª transmitimos más fuerza que en 5ª, pero a menos velocidad. Siendo por lo tanto la clave de todo el proceso la expresión:

$$P = M\omega$$

Donde:

- P es la potencia expresada en watios.
- M es el par expresado en Newton x metro.
- ω es la velocidad de giro expresada en radianes/segundo.

Por lo tanto en la caja de cambios se transforma la velocidad del movimiento, pero también la fuerza de giro, de forma que el producto de ambas magnitudes se mantiene constante. Por eso cuando vamos cambiando hacia marchas superiores, la velocidad va aumentando, pero el par disminuye en la misma proporción que la velocidad aumenta.

Por este motivo un automóvil en 5ª acelera muchísimo menos que en 1ª, pero corre mucho más.

Curiosidad

este caso, lo que importa es únicamente la potencia, ya que esta se transmite íntegramente al suelo, mientras que el par puede ser transformado y degradado (por la caja de cambios) antes de llegar a él. En particular, un motor que tenga un elevado par motor, pero potencia reducida por girar a una velocidad relativamente baja, si necesita elevar la velocidad para conseguir aceleración, lo logrará a través de la caja de cambios, y esa elevación de la velocidad lleva aparejado una degradación del par en la misma proporción.

¿Es cierto que un coche con más par que otro, recupera mejor?

Igual que no es verdad que un coche con más par acelere más, tampoco lo es que recupere mejor, la recuperación es en si misma una aceleración como cualquier otra. Para una buena recuperación lo que es preciso es seleccionar la secuencia de marchas adecuada.

Ejercicio resuelto

Un motor de gasolina consume 8 l/h de gasolina, cuya densidad es de 0,75 Kg/l y cuyo poder calorífico es de 9.900 Kcal/Kg. Si el rendimiento global del motor es del 35% y gira a 3.800 r.p.m., determinar el par motor que suministra.

Mostrar retroalimentación

Solución

Un motor diesel de dos tiempos y cuatro cilindros con un rendimiento térmico del 39%, con un rendimiento mecánico del 94%, debe impulsar a un vehículo de 10 toneladas a velocidad constante de 110 km/h por un puerto del 12% de pendiente. Si, además, debe vencer unas resistencias de rodadura y aerodinámicas de valor constante de 550 N, ¿qué consumo de combustible en litros realiza cada 100 km? El vehículo utiliza gasóleo de $\rho=0.8$ kg/l y poder calorífico 42 MJ/kg.

Mostrar retroalimentación

Solución

2.4. Curvas características



El par y la potencia son dos indicadores del funcionamiento del motor, dándonos información de cuanta fuerza puede generar y con qué rapidez puede trabajar un motor.

El par máximo es la máxima fuerza de giro que puede desarrollar el motor a una determinada velocidad de giro.

El fabricante de automóviles suele dar las cifras de potencia y par máximos del motor, y a que velocidad de régimen se producen, aunque lo que realmente interesa es su curva característica. En esta curva, se relacionan el par y la potencia que consigue el motor en función del régimen de velocidad de giro.

En la figura adjunta se puede observar las curvas de par y potencia que acompañan a la publicidad de un modelo de Audi.

regímenes.

Así el motor del ejemplo da un par máximo de 440 Nm a 5.300 r.p.m. significa que es capaz de generar una fuerza de giro (par) de hasta 440 Newton metro, cuando está acelerado al máximo y mientras gira a 25.300 r.p.m.

Respecto a la potencia máxima obtenemos un valor de 310 kW a una velocidad de régimen de casi 8.000 r.p.m.

Ejercicio resuelto

Un motor de dos cilindros con $D \times C = 79 \times 76$ mm, tiene una relación de compresión de 9:1. De su ficha técnica se obtiene la potencia máxima que es de 32 KW a 5250 r.p.m. y el par máximo que es de 61,7 Nm a 3000 r.p.m. Se pide:

- Calcular el PMS y PMI.
- Calcular el volumen unitario, la cilindrada y el volumen de la cámara de combustión.
- Calcular el par para la potencia máxima y la potencia cuando el par es máximo.
- Si se tiene un rendimiento de la transmisiones exteriores del 90 %, ¿qué potencia máxima se podría obtener de dichas transformaciones?

Mostrar retroalimentación

[Solución](#)

Importante

El rendimiento térmico del motor indica la eficacia del motor, se expresa como la relación entre el trabajo mecánico que obtenemos del motor y la cantidad de calor producida en la combustión.

Los motores Diesel alcanzan un rendimiento que en ningún caso supera el 45% en condiciones de trabajo óptimas, mientras que los de gasolina tienen un rendimiento aún más pobre, no alcanzando valores del 35%.

Las condiciones óptimas de funcionamiento suelen ser, un poco por debajo del régimen de par máximo y con una carga algo menor que la máxima, el rendimiento del motor desciende en cualquier otro régimen, siendo prácticamente nulo cuando está al ralentí.

Curiosidad

En los automóviles de ciclo Otto antiguos, la mezcla de aire y gasolina se producía en el carburador, aunque en la actualidad, un inyector colocado inmediatamente antes de la válvula de admisión es el encargado de suministrar la mezcla antes de que la válvula se abra.

Ejercicio resuelto

El motor de un autobús consume 20 l/h, cuando circula a una velocidad media de 90 Km/h, el rendimiento total del motor es del 20%, el poder calorífico del combustible es $P_c = 11000 \text{ Kcal/Kg}$ y su densidad $\rho = 0,8 \text{ Kg/l}$. Calcula:

- a) Potencia útil en las ruedas.
- b) Par motor en las ruedas si el diámetro de éstas es de 80 cm.

Mostrar retroalimentación

El conjunto de la moto y el conductor tienen una masa de 150Kg, la potencia que entrega el motor es de 20C.V.

a) De esa potencia se transmite a las ruedas el 80%, el efecto del rozamiento del suelo y del aire es equivalente a una fuerza de 150 N y las ruedas tienen un diámetro de 60 cm. Calcular la velocidad con que asciende la motocicleta.

b) Si el rendimiento térmico del motor es del 20% y el poder calorífico del combustible es de 10000 Kcal/Kg. Calcular el consumo de combustible cuando se desarrolla la potencia máxima, considerar la densidad del combustible 1g/c.c.

Mostrar retroalimentación

[Solución](#)

3. Motor de cuatro tiempos. Ciclo Diesel

Importante

Una de las principales características de este tipo de motores es carecer de sistema de encendido. Es decir no tienen bujías, ya que el combustible, gasoil, se inflama espontáneamente al ser inyectado a presión en el cilindro lleno de aire a muy alta temperatura, superior a la de autoignición del gasoil, tras haber sido comprimido.

Como solo se comprime aire, la relación de compresión puede ser muy superior a la de los motores de gasolina, alcanzando valores de entre 12 y 24, mientras que en los motores de ciclo Otto los valores normales son entorno a 8.

Un **ciclo Diesel** es una aproximación teórica al comportamiento de un motor de encendido por compresión. Se representa en un diagrama p-V como en la figura adjunta. Siendo sus fases las siguientes:

- **Admisión E-A.** El pistón desciende mientras la válvula de admisión permanece abierta, absorbiendo aire a presión constante de la atmósfera. Se representa como una línea horizontal.

- **Compresión A-B.** Ascende el pistón estando cerradas las válvulas de admisión y de escape, se produce la compresión del aire sin intercambio de calor, es decir es una transformación adiabática.

- **Combustión B-C.** Un instante antes de que el pistón alcance el PMS y hasta un poco después de que comience la carrera descendente, el inyector introduce gasoil en el cilindro produciéndose la combustión a presión constante durante un instante de tiempo mayor que en el motor de encendido por chispa (es la diferencia más notable con el ciclo de Otto, estudiado anteriormente). Ambas válvulas se mantienen cerradas.

- **Expansión C-D.** La reacción química exotérmica producida en la combustión genera energía que impulsa el pistón hacia abajo, aportando trabajo al ciclo, correspondiendo esta transformación a una curva adiabática, las válvulas de admisión y de escape permanecen cerradas.

- **Escape D-A y A-E.** La válvula de escape se abre, el pistón prosigue su movimiento ascendente y va barriendo y expulsando los gases de la combustión, cerrándose el ciclo al producirse una nueva admisión de aire cuando se cierra la válvula de escape, a continuación se abre la de admisión y el pistón continúa su carrera descendente.

Como la cantidad de aire que sale y la que entra en el cilindro es idéntica podemos considerar que es el mismo que ha sufrido un proceso de enfriamiento que se produce en dos fases, cuando alcanza el pistón el PMI, el volumen se mantiene aproximadamente constante y se representa en el diagrama como la isócara D-A, para posteriormente ser expulsado al exterior a presión constante (la de la atmósfera), representándose por la isóbara A-E. Con lo que se cierra el ciclo, tras dos movimientos de subida y

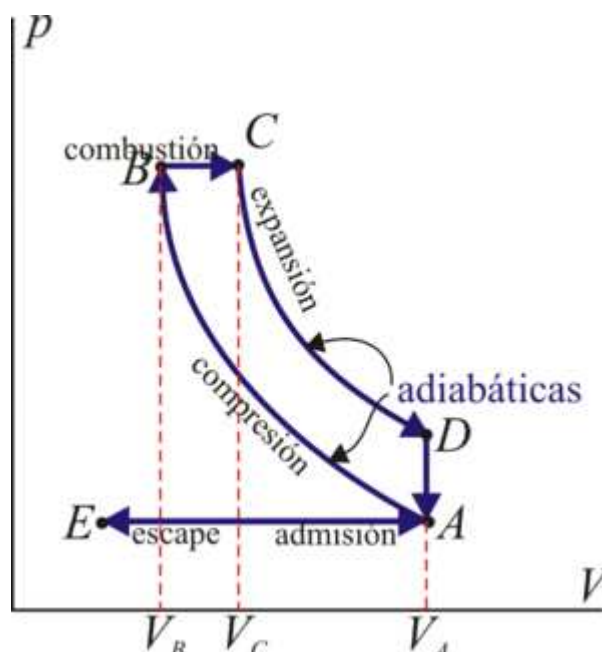


Imagen en [laplace](#). Licencia [CC](#)

bajada del pistón, tras dos vueltas del cigüeñal, que corresponden con los cuatro tiempos del motor.

Observando el ciclo Diesel ideal, podemos considerar despreciables los procesos de admisión y de escape a presión constante A-E y E-A, puesto que son idénticos en la gráfica y de sentido opuesto, por lo que el calor y el trabajo intercambiados entre ellos se anulan mutuamente.

Ejercicio resuelto

Determinar las dimensiones (carrera y diámetro) de los cilindros de un motor Diesel de 6 cilindros y 4 tiempos con el que queremos obtener una potencia máxima de 800 CV cuando gira a 800 r.p.m., sabiendo que se prevé obtener una presión media efectiva de 12 Kg/cm², si la relación carrera/diámetro es de 1,5.

Mostrar retroalimentación

[Solución](#)

Intercambio de calor producido en el ciclo

Durante las transformaciones adiabáticas A-B y C-D, no se intercambia calor. Mientras que en el proceso isobárico B-C, se absorbe una cantidad externa de calor Q_c (procedente de la energía interna del combustible) Dado que el proceso sucede a volumen constante, el calor coincide con el aumento de la energía interna, calculándose según la expresión:

$$Q_c = \Delta U - W = n \cdot c_p \cdot \Delta T = n \cdot c_p \cdot (T_C - T_B)$$

Durante la expulsión de los gases D-A, el aire escapa a una temperatura mayor a la de entrada, entregando un calor Q_f al ambiente, de signo negativo porque es expulsado hacia el exterior, siendo su valor:

$$Q_f = \Delta U - W = n \cdot c_v \cdot \Delta T = n \cdot c_v \cdot (T_D - T_A)$$

Por lo que el rendimiento del ciclo será:

$$\eta = 1 - \frac{Q_f}{Q_c} = 1 - \frac{c_v \cdot (T_D - T_A)}{c_p \cdot (T_C - T_B)} = 1 - \frac{T_D - T_A}{\gamma \cdot (T_C - T_B)}$$

Donde:

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v}$$

Si no se conocen las temperaturas en los cuatro vértices del ciclo, se puede proceder del siguiente modo:

La expansión adiabática A-B, cumple:

$$T_A \cdot V_A^{\gamma-1} = T_B \cdot V_B^{\gamma-1}$$

Teniendo en cuenta que:

$$r = \frac{V_A}{V_B}$$

Obtenemos:

$$T_B = T_A \cdot r^{\gamma-1}$$

Durante el proceso isobárico:

$$p_B = p_C$$

Aplicando la ecuación de los gases perfectos:

$$\frac{V_B}{T_B} = \frac{V_C}{T_C}$$

Teniendo en cuenta que:

$$r_C = \frac{V_C}{V_B}$$

Se obtiene:

$$T_C = T_B r_C = T_A r_C r^{\gamma-1}$$

Repetimos el procedimiento durante el proceso, a volumen constante:

$$V_D = V_A$$

Para obtener T_D :

$$T_C V_C^{\gamma-1} = T_D V_D^{\gamma-1}$$

Por lo que:

$$T_D = T_C \left(\frac{V_C}{V_A} \right)^{\gamma-1}$$

Multiplicando y dividiendo por V_B aplicando el valor de la temperatura en C.

$$T_D = T_A r_c r^{\gamma-1} \left(\frac{r_c}{r} \right)^{\gamma-1} = T_A r_c^\gamma$$

Operando con los datos anteriores se obtiene:

$$T_D - T_A = T_A r_c^\gamma - T_A = T_A (r_c^\gamma - 1)$$

$$T_C - T_B = T_A r_c r^{\gamma-1} - T_A r^{\gamma-1} = T_A r^{\gamma-1} (r_c - 1)$$

Y Sustituyendo en la expresión del rendimiento se obtiene:

$$\eta = 1 - \frac{(T_D - T_A)}{\gamma(T_C - T_B)} = 1 - \frac{r_c^\gamma - 1}{\gamma r^{\gamma-1} (r_c - 1)}$$

Curiosidad

En el caso de los motores diesel siempre se produce la entrada de combustible en el cilindro por medio de inyectores. Estos están compuestos por pequeñas bombas de inyección para cada cilindro, o bien por una bomba de gran potencia que introduce el gasoil por un conducto que alimenta a todos los cilindros, abriéndose el inyector para cada cilindro en el momento preciso, por medio de una electroválvula.

A continuación puedes ver el funcionamiento de un inyector:



Video de L. Núñez alojado en [Youtube](#)

Ejercicio resuelto

Dibuja, en un diagrama p-V, el ciclo termodinámico de un motor de cuatro tiempos de encendido por compresión y explica sus fases.

El motor consume 6 l/h de gasoil ($P_c=9000$ Kcal/Kg, $\rho=0,75$ Kg/dm³), suministra un par motor de 45 Nm, cuando gira a 3.000 r.p.m. Calcula su rendimiento global.

Mostrar retroalimentación

[Solución](#)

4. Comparación entre los motores Otto y Diesel



El mayor problema en los motores de encendido por chispa es evitar que se produzca autodetonación por compresión. Por su parte en los motores diesel se procura provocarla anticipadamente. Por ello en los motores de gasolina la relación de compresión no debe sobrepasar ciertos valores (8:1), mientras que en los motores diesel se alcanzan valores mucho más elevados, de hasta 22:1, para garantizar un arranque satisfactorio.

Debido a que los motores diesel alcanzan estos valores de presión tan elevados, son más pesados, más robustos y de mayores dimensiones que los de gasolina. Ello hace que su vida media sea significativamente más larga, aunque también son más caros.

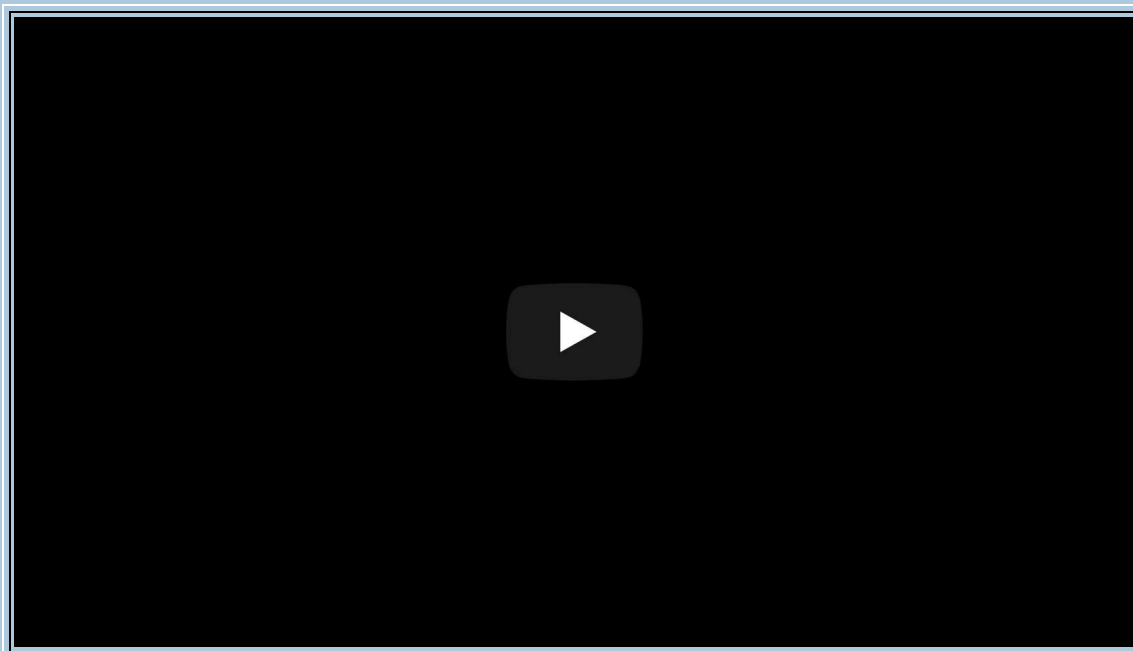
Los motores diesel precisan una mayor cantidad de aire en la combustión, para compensar posibles malas condiciones de la mezcla, siendo la combustión mucho mejor, dentro de ciertos límites, cuanto mayor es el exceso de aire. Por esta razón no es necesario regular en ellos la entrada de aire al modificar el régimen del motor y su carga. Cuando se necesita variar el régimen de carga se actúa solamente sobre la cantidad de combustible que se inyecta, por lo que se tiene la ventaja de que para cargas bajas, al no tener válvula mariposa, se disminuye la resistencia a la entrada de aire, lo que se mejora el rendimiento al disminuir las pérdidas por bombeo.

Por todo esto los motores diesel proporcionan un par prácticamente constante para casi cualquier régimen de velocidad de giro, dando lugar a una curva característica de par prácticamente plana.

Debido a que alcanzan elevados valores de presión y al método de introducción de combustible en el cilindro, los motores diesel son más ruidosos que los motores de gasolina, produciendo un sonido muy característico.

Los motores diesel presentan un rendimiento térmico mucho más elevado que los de gasolina.

Curiosidad

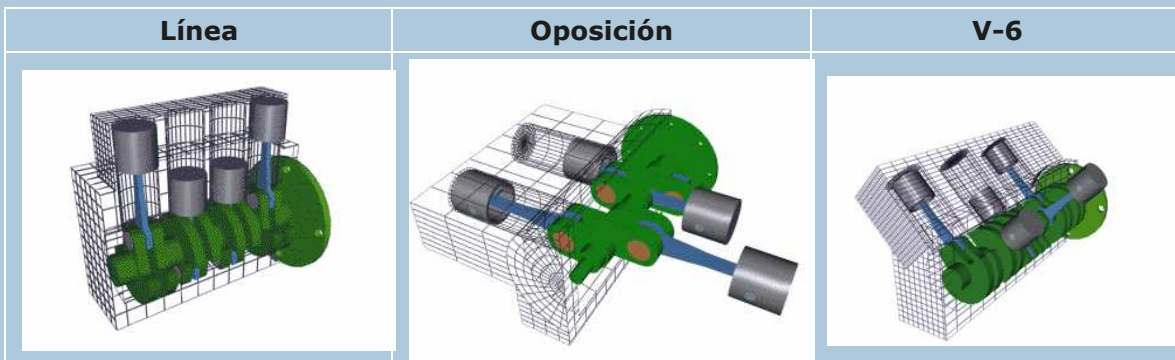


salen por el tubo de escape. Este gas se utiliza para arrastrar una turbina que mueve un compresor, de este modo se introduce aire comprimido en la cámara de combustión, aumentando la cantidad de comburente en el interior del cilindro, y que de este modo la combustión sea más rica. Son los motores turboalimentados.

En el esquema tienes el caso de un motor de cuatro cilindros. Observa como el colector de escape tiene salidas separadas para los cilindros 1 y 4, por una parte, y para los cilindros 2 y 3 por otra. De esta manera, no ocurre nunca que las válvulas de escape de dos cilindros que comparten el canal en el colector de escape están abiertas simultáneamente. Cuando uno de los cilindros hace la carretera de escape, su pareja hace la de compresión.

Curiosidad

El número de cilindros en un motor suele ser cuatro (o por lo menos un número par). Con ello se pretende que cada uno de ellos se encuentre en un tiempo diferente durante cada media vuelta. El posicionamiento de los cilindros sobre el cigüeñal puede ser muy variado y así se suelen montar en línea, en V, en oposición...tal y como se observa en las animaciones siguientes:



5. Motor de dos tiempos

Estos motores se caracterizan por su ligereza y bajo coste, lo que los hace muy útiles en aquellas aplicaciones que no precisan mucha potencia, como cortadoras de césped, motosierras, ciclomotores, karts, motores fueraborda, etc.

También se emplea el motor de ciclo de dos tiempos en grandes motores diésel para la generación de electricidad y la navegación marítima.

Importante

El ciclo termodinámico se desarrolla en una sola vuelta de cigüeñal, mientras el pistón hace un movimiento de subida y otro de bajada.

Estos motores son mucho más sencillos y reducidos que los de ciclo de cuatro tiempos, fundamentalmente porque no tienen válvulas de admisión y escape y con ello no necesitan de elementos de regulación y control de válvulas.

Durante su funcionamiento se pueden distinguir las siguientes fases:

● **Fase de admisión-compresión.** El pistón se desplaza hacia arriba desde su PMI, durante su recorrido ascendente va abriendo la lumbrera de admisión entrando la mezcla (color azul claro azul claro) y comienza la compresión en la parte superior del pistón (azul oscuro) mientras que la cara inferior succiona la mezcla de aire y combustible a través de la lumbrera. Para que este proceso sea eficaz es necesario que el cárter esté sellado.

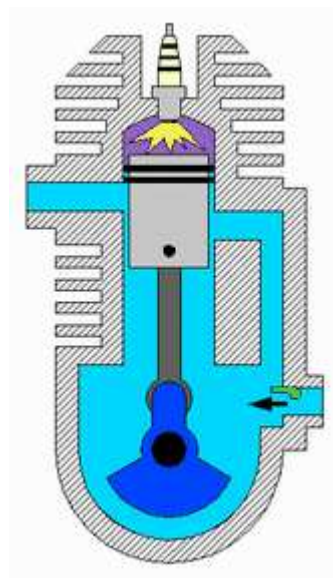


Imagen en [Wikimedia. CC](#)

● **Fase de explosión-escape.** Cuando el pistón alcanza el PMS concluye la fase de compresión y la bujía lanza una chispa eléctrica que inicia el proceso de combustión, generándose una gran cantidad de energía térmica que impulsa hacia abajo el pistón, produciendo energía cinética, transmitiendo movimiento al cigüeñal a través de la biela. Durante la carrera descendente del pistón, se libera la lumbrera de escape, por donde se expulsan los gases de la combustión al exterior. Tras alcanzar el

pistón el PMI vuelve a iniciar el movimiento ascendente repitiéndose el ciclo.

Combustible

Utilizan gasolina sin plomo, con una proporción (1:40) de un aceite especial convenientemente agitada para homogeneizar la mezcla.

Durante la combustión el aceite se deposita en las paredes interiores del cilindro, sobre el pistón y el resto de los elementos, con lo que lubrica los órganos móviles del motor.

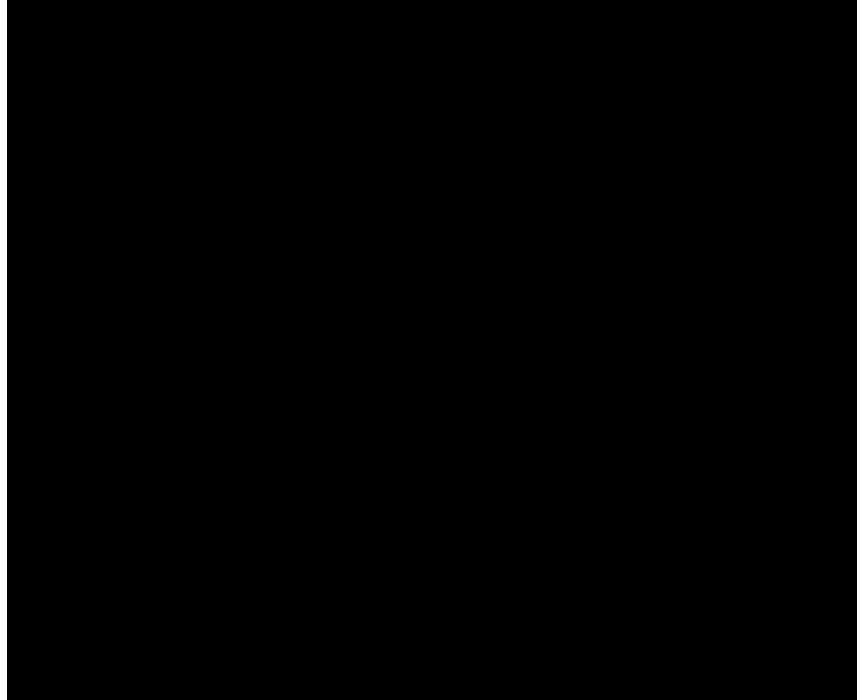
Una mezcla demasiado rica en aceite provoca la aparición de carbonilla en la cámara de combustión, y si la mezcla es pobre en aceite la lubricación será deficiente pudiendo ser el origen de gripaje del motor.

Ventajas

- Al no tener válvulas ni las cadenas cinemáticas que las controlen, estos motores son mucho más livianos, sencillos y económicos que los de cuatro tiempos.
- Al ser más simples a nivel mecánico su mantenimiento es mucho más sencillo y presentan menos averías.
- Como solo necesita una vuelta de cigüeñal para cerrar el ciclo termodinámico, desarrolla una potencia mayor para la misma cilindrada, siendo su marcha mucho más uniforme y regular.
- Pueden trabajar en cualquier posición, ya que no precisa almacenar lubricante en el cárter.

Inconvenientes

- Al mezclar aceite con el combustible, se puede concentrar suciedad sobre los electrodos de la bujía (perlado), impidiendo su correcto funcionamiento.
- Por la propia construcción del motor sin válvulas, que son sustituidas por lumbreras, la compresión no es tan eficaz como en los motores de cuatro tiempos, esta pérdida de compresión, también supone una ligera merma de potencia.
- Por el mismo motivo, por la lumbrera de escape suele expulsarse combustible inquemado junto a los gases de combustión, lo que conlleva una pérdida de rendimiento y la evacuación de emisiones más contaminantes.



Video de danielme91 alojado en [Youtube](#)

Ejercicio resuelto

Un motor de un cilindro de encendido por chispa y de dos tiempos, tiene una cilindrada de 101,3 cm³ con un diámetro de 51 mm y una relación de compresión de 10:1. Su potencia máxima es de 6 KW, correspondiéndole un par de 9,55 Nm. El par máximo lo

c) ¿Qué trabajo realiza el motor en 20 minutos girando a las revoluciones de par máximo?

Mostrar retroalimentación

[Solución](#)

Uf. Tenemos problemas para encontrar ese sitio.



No podemos conectar al servidor en adistancia.ced.junta-andalucia.es.

Si esa dirección es correcta, aquí hay otras tres cosas que puede probar:

- Vuelva a intentarlo más tarde.
- Compruebe su conexión de red.
- Si está conectado a través de un cortafuegos, compruebe que Firefox tiene permiso para acceder a la web.

Reintentar