

CICLO TEÓRICO DE FUNCIONAMIENTO.

INTRODUCCIÓN

Los motores térmicos son máquinas que transforman la energía calorífica en energía mecánica directamente utilizable.

La energía calorífica normalmente es obtenida de la combustión de combustibles líquidos y gaseosos y el trabajo útil es conseguido por órganos unas veces con movimiento alternativo, otras con movimiento rotativo y otras por el empuje realizado por un chorro de gas.

Según su principio de funcionamiento los motores térmicos se clasifican en alternativos, rotativos y de chorro, y según el sitio donde se produzca la combustión se clasifican en de *combustión externa*, cuando ésta se verifica fuera de los mismos y de *combustión interna*, cuando el combustible es quemado en su interior.

La combustión se realiza en el denominado fluido operante, el cual está constituido por una mezcla de combustible y comburente. El combustible normalmente utilizado es gasolina y gasoil y el comburente que suministra el oxígeno necesario para la combustión es aire atmosférico.

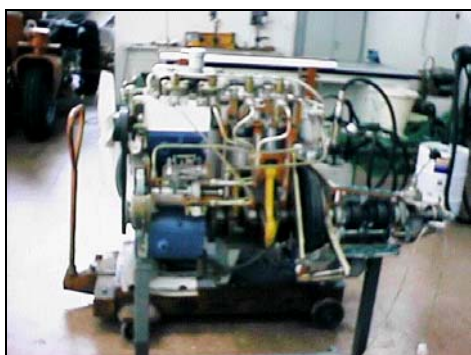


Figura 1.- Motor alternativo seccionado.

El motor endotérmico es una máquina compleja, cuyo estudio profundo exige el conocimiento de gran parte de las ramas de la ingeniería, pero para dominar sus principios básicos es suficiente con el estudio de los temas que en esta asignatura se desarrollan. Los temas que en ella se desarrollan están dedicados principalmente al estudio de los motores alternativos, que son, con gran diferencia, lo más

difundidos en la Agricultura, si bien, de forma somera, serán tratados los motores rotativos.

Los motores alternativos se dividen en dos grandes grupos: motores de *ciclo Otto* o de *encendido por chispa* y motores de *ciclo Diesel* o de *encendido por compresión*. Aunque sus principios de funcionamiento son diferentes, su esquema y la nomenclatura de sus partes esenciales son semejantes.

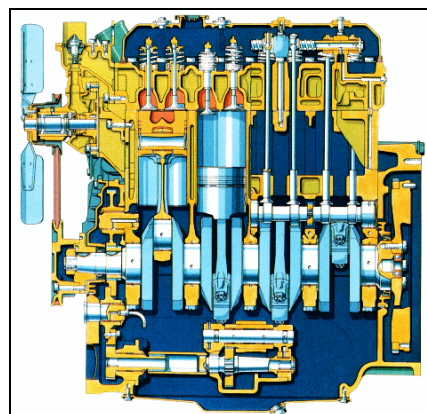


Figura 2.- Motor de combustión interna o endotérmico.

La figura anterior representa la sección longitudinal según un plano vertical de un motor alternativo, la cual sirve para conocer la nomenclatura de sus partes, cuyo conocimiento es necesario para explicar su funcionamiento. Éstas, en líneas generales, son:

- El *cilindro*, dentro del cual se mueve el *pistón* con movimiento rectilíneo alternativo, forma parte, en los motores pluricilíndricos, del *bloque de cilindros*. Este, que normalmente se fabrica unido a la bancada, se puede considerar como la estructura soporte del motor. En algunos modelos de motores el bloque de cilindros se fabrica separado de la bancada, a la cual se une mediante espárragos.

- La *culata* constituye la parte superior del cilindro, al cual cierra dejando un volumen comprendido entre ella y el pistón que se denomina *cámara de combustión* o de *compresión* en la cual se quema el *fluido activo*.

Antes, en el motor de encendido por bujía, esta mezcla se formaba en el *carburador* y entraba en el cilindro a través del *conducto de admisión* y de la *válvula de aspiración*. La *válvula de mariposa* del carburador servía para regular la cantidad de

mezcla entrante. Hoy el combustible es inyectado a baja presión en el conducto de admisión, y recientemente, algunas marcas inyectan a baja presión en el interior del cilindro.

En el motor de encendido por compresión, el combustible se introduce en el cilindro por medio de un *inyector*. La cantidad de combustible se regula por la *bomba de inyección*, mientras que no hay ninguna regulación para la cantidad de aire que entra en el cilindro. La combustión es consecuencia de la alta temperatura del aire, intensamente comprimido en el cilindro, por lo que no es necesaria la bujía.

En los motores de encendido por chispa se inicia la combustión al saltar la chispa entre los electrodos de la bujía, mientras que en los motores de encendido por compresión el encendido es espontáneo al entrar combustible finamente pulverizado por el *inyector* en el interior del cilindro cuando su presión es elevada.

- El *pistón*, dotado de *segmentos* que impiden la fuga de gas entre él y el cilindro, transmite el empuje de dicho gas, a través del *perno* o *bulón*, a la *biela*, y de ésta, a la *manivela* del cigüeñal.

- La *biela* y la *manivela* constituyen un sistema mecánico que transforma el movimiento lineal alternativo del pistón en movimiento de giro del cigüeñal, el cual para reducir el rozamiento gira sobre los *cojinetes de bancada*.



Figura 3.- Pistón con segmentos y bulón.

- Los *colectores de admisión* y el *de escape* son los conductos a través de los cuales se carga y se descarga el fluido operante del interior del cilindro.

- La *válvulas de aspiración* y de *escape*, accionadas por un sistema mecánico denominado *distribución*, que son mantenidas en su asiento por la acción de su correspondiente muelle, abren y cierran el cilindro permitiendo que los gases

frescos y quemados entren y salgan de él en los momentos oportunos.

Para el estudio de los motores endotérmicos es necesario conocer la terminología universalmente usada hoy para indicar algunas dimensiones y valores fundamentales.

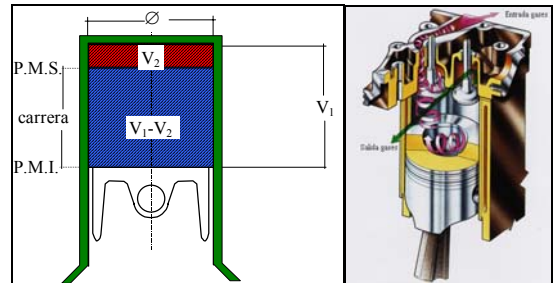


Figura 4.- Terminología universal.

- **Punto muerto superior (P.M.S.):** Posición del pistón más próxima a la culata.

- **Punto muerto inferior (P.M.I.):** Posición del pistón más alejada de la culata.

- **Calibre:** Diámetro interior del cilindro. Expresado generalmente en milímetros (mm.).

- **Carrera:** Distancia entre el **P.M.S.** y **P.M.I.**, es igual, salvo raras excepciones, al doble del radio de la manivela del eje de cigüeñales. Se expresa generalmente en mm.

- **Volumen total del cilindro (V₁):** Es el espacio comprendido entre la culata y el pistón cuando éste se halla en el **P.M.I.** Viene expresado, por lo general, en cm³.

- **Volumen de la cámara de compresión (V₂):** Es el volumen comprendido entre la culata y el pistón cuando éste se halla en el **P.M.S.** Suele expresarse en cm³.

- **Cilindrada (V₁-V₂):** Es el generado por el pistón en su movimiento alternativo desde el **P.M.S.** hasta el **P.M.I.** Se expresa, por lo común, en cm³.

- **Relación de compresión (ρ):** Se entiende por tal la relación que hay entre el volumen total del cilindro **V₁** y el volumen de la cámara de combustión **V₂**. Se representa por ρ y vale:

$$\rho = \frac{V_1}{V_2}$$

CICLO OTTO TEÓRICO

Este motor, también conocido como motor Otto, es el más empleado en la actualidad, y realiza la transformación de energía calorífica en mecánica fácilmente utilizable en cuatro fases, durante las cuales un pistón que se desplaza en el interior de un cilindro efectúa cuatro desplazamientos o carreras alternativas y, gracias a un sistema biela-manivela, transforma el movimiento lineal del pistón en movimiento de rotación del árbol cigüeñal, realizando este dos vueltas completas en cada ciclo de funcionamiento.

Como se ha dicho la entrada y salida de gases en el cilindro es controlada por dos válvulas situadas en la cámara de combustión, las cuales su apertura y cierre la realizan por el denominado sistema de distribución, sincronizado con el movimiento de giro del árbol.

El funcionamiento teórico de este tipo de motor, durante sus cuatro fases o tiempos de trabajo, es el siguiente:

- Primer tiempo: *Admisión*

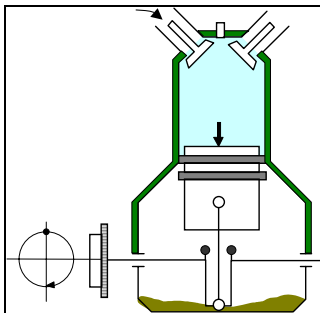


Figura 5.- Admisión

Durante este tiempo el pistón se desplaza desde el punto muerto superior (**PMS**) al punto muerto inferior (**PMI**) y efectúa su primera carrera o desplazamiento lineal. Durante este desplazamiento el cigüeñal realiza un giro de 180°.

Cuando comienza esta fase se supone que instantáneamente se abre la válvula de admisión y mientras se realiza este recorrido, la válvula de admisión permanece abierta y, debido a la depresión o vacío interno que crea el pistón en su desplazamiento, se aspira una mezcla de aire y combustible, que pasa a través del espacio libre que deja la válvula de aspiración para llenar, en teoría, la totalidad del cilindro.

El recorrido **C** que efectúa el pistón entre el **PMS** y el **PMI** definido como carrera, multiplicada por la superficie **S** del pistón determina el volumen o cilindrada unitaria del motor $V_1 - V_2$ y

corresponde al volumen de mezcla teórica aspirada durante la admisión.

$$V_1 - V_2 = S \cdot L = \frac{\pi \cdot \phi^2}{4} \cdot L$$

Se supone que la válvula de admisión se abre instantáneamente al comienzo de la carrera y que se cierra también, de forma instantánea, al final de dicho recorrido.

Total girado por el cigüeñal 180°.

- Segundo tiempo: *Compresión*

En este tiempo el pistón efectúa su segunda carrera y se desplaza desde el punto muerto inferior **PMI** al punto muerto superior **PMS**. Durante este recorrido la muñequilla del cigüeñal efectúa otro giro de 180°.

Total girado por el cigüeñal 360°.

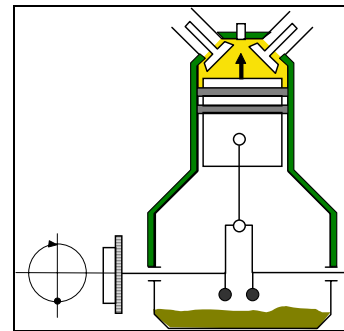


Figura 6.- Compresión

Durante esta fase las válvulas permanecen cerradas. El pistón comprime la mezcla, la cual queda alojada en el volumen de la *cámara de combustión*, también llamada de *compresión*, situada por encima del **PMS**, ocupando un volumen V_2 .

- Tercer tiempo: *Trabajo*

Cuando el pistón llega al final de la compresión, entre los electrodos de una bujía, salta una chispa eléctrica en el interior de la cámara de combustión que produce la ignición de la mezcla, con lo cual se origina la inflamación y combustión de la misma. Durante este proceso se libera la energía calorífica del combustible, lo que produce una elevada temperatura en el interior del cilindro, con lo que la energía cinética de las moléculas aumenta considerablemente y, al chocar éstas contra la cabeza del pistón, generan la fuerza de empuje que hace que el pistón se desplace hacia el **P.M.I.**

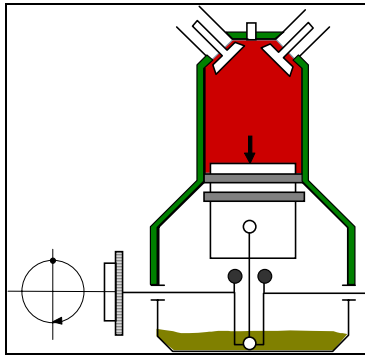


Figura 7.- Trabajo

Durante esta carrera, que es la única que realiza trabajo, se produce la buscada transformación de energía. La presión baja rápidamente por efecto del aumento de volumen y disminuye la temperatura interna debido a la expansión.

Al llegar el pistón al **PMI** se supone que instantáneamente se abre la válvula de escape.

Total girado por el cigüeñal 540°.

• Cuarto tiempo: *Escape*

En este tiempo el pistón realiza su cuarta carrera o desplazamiento desde el **PMI** al **PMS**, y el cigüeñal gira otros 180°.

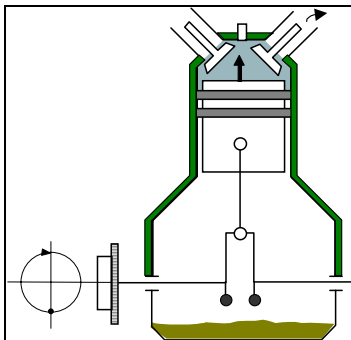


Figura 8.- Escape.

Durante este recorrido del pistón, la válvula de escape permanece abierta. A través de ella, los gases quemados procedentes de la combustión salen a la atmósfera, al principio en "estampida" por estar a elevada presión en el interior del cilindro, y el resto empujado por el pistón en su desplazamiento hacia el **PMS**.

Cuando el pistón llega al **PMS** se supone que instantáneamente se cierra la válvula de escape y simultáneamente se abre la válvula de admisión.

Total girado por el cigüeñal 720°.

El conjunto de las fases de funcionamiento de un motor se presenta en la figura siguiente:

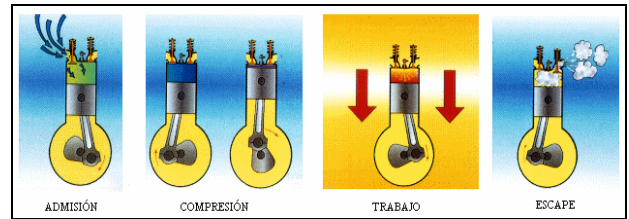


Figura 9.- Fases del ciclo de cuatro tiempos.

El ciclo Otto teórico representado gráficamente en un diagrama **P-V**, se puede considerar ejecutado según las transformaciones termodinámicas que se presentan a continuación:

0-1.- Admisión (*Isobara*): Se supone que la circulación de los gases desde la atmósfera al interior del cilindro se realiza sin rozamiento, con lo que no hay pérdida de carga y, por tanto, la presión en el interior del cilindro durante toda esta carrera se mantiene constante e igual a la atmosférica.

1-2.- Compresión (*Adiabática*): Se supone que, como se realiza muy rápidamente, el fluido operante no intercambia calor con el medio exterior, por lo que la transformación puede ser considerada a calor constante.

2-3.- Combustión (*Isócara*): Se supone que salta la chispa y se produce una combustión instantánea del combustible, produciendo una cantidad de calor Q_1 . Al ser tan rápida se puede suponer que el pistón no se ha desplazado, por lo que el volumen durante la transformación se mantiene constante.

3-4.- Trabajo (*Adiabática*): Se supone que debido a la rapidez de giro del motor los gases quemados no tienen tiempo para intercambiar calor con el medio exterior, por lo que se puede considerar que sufren una transformación a calor constante.

4-1.- Primera fase del escape (*Isócara*): Se supone una apertura instantánea de la válvula de escape, lo que genera una salida tan súbita de gases del interior del cilindro y una pérdida

de calor Q_2 que permite considerar una transformación a volumen constante.

1-0.- Segunda fase del escape (*Isobara*): El pistón al desplazarse hacia el **PMS** provoca la expulsión de gases remanentes en el interior del cilindro, y se supone que los gases quemados no ofrecen resistencia alguna para salir a la atmósfera, por lo que la presión en el interior del cilindro se mantiene constante e igual a la atmosférica.

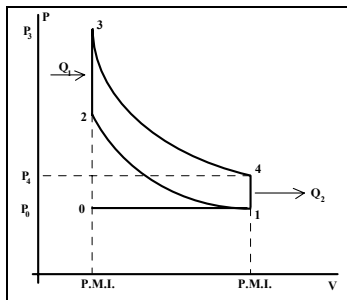


Figura 10.- Diagrama P-V de un ciclo Otto teórico.

CICLO DIESEL TEÓRICO

El motor Diesel de cuatro tiempos tiene una estructura semejante a los motores de explosión, salvo ciertas características particulares. El pistón desarrolla cuatro carreras alternativas mientras el cigüeñal gira 720° . Como el motor de ciclo Otto realiza el llenado y evacuación de gases a través de dos válvulas situadas en la culata, cuyo movimiento de apertura y cierre está sincronizado con el cigüeñal a través del sistema de distribución por el árbol de levas.

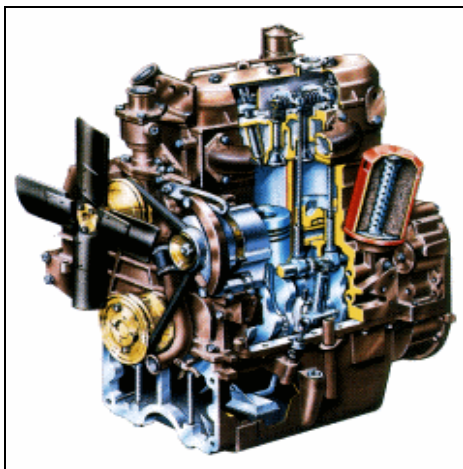


Figura 11.- Motor Diesel de cuatro tiempos.

El funcionamiento de este motor durante su ciclo es el siguiente:

- Primer tiempo: *Admisión*

En este primer tiempo el pistón efectúa su primera carrera o desplazamiento desde el **PMS** al **PMI**, aspirando sólo aire de la atmósfera, debidamente purificado a través del filtro. El aire pasa por el colector y la válvula de admisión, que se supone se abre instantáneamente y que permanece abierta, con objeto de llenar todo el volumen del cilindro. Durante este tiempo, la muñequilla del cigüeñal gira 180° .

Al llegar al **PMI** se supone que la válvula de admisión se cierra instantáneamente.

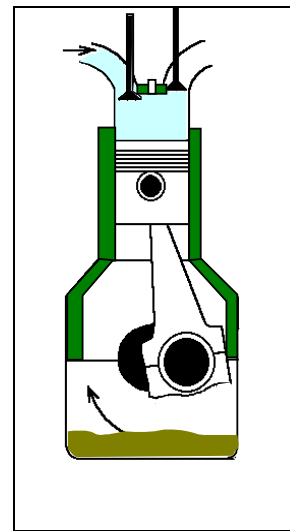


Figura 12.- Admisión.

- Segundo tiempo: *Compresión*

En este segundo tiempo y con las dos válvulas completamente cerradas el pistón comprime el aire a gran presión, quedando sólo aire alojado en la cámara de combustión. La muñequilla del cigüeñal gira otros 180° y completa la primera vuelta del árbol motor.

La presión alcanzada en el interior de la cámara de combustión mantiene la temperatura del aire por encima de los 600°C , superior al punto de inflamación del combustible, para lo cual la relación de compresión tiene que ser del orden de 22.

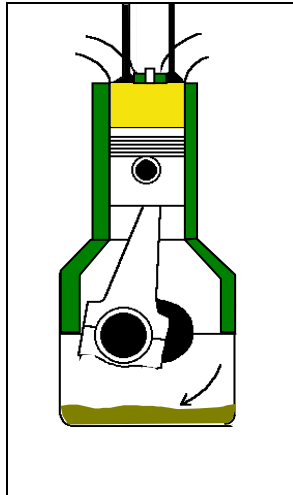


Figura 13.- Compresión.

• Tercer tiempo: *Trabajo*

Al final de la compresión con el pistón en el **PMS** se inyecta el combustible en el interior del cilindro, en una cantidad que es regulada por la bomba de inyección. Como la presión en el interior del cilindro es muy elevada, para que el combustible pueda entrar la inyección debe realizarse a una presión muy superior, entre 150 y 300 atmósferas.

El combustible, que debido a la alta presión de inyección sale finalmente pulverizado, se inflama en contacto con el aire caliente, produciéndose la combustión del mismo. Se eleva entonces la temperatura interna, la presión mientras dura la inyección o aportación de calor se supone constante y, a continuación, se realiza la expansión y desplazamiento del pistón hacia el **PMI**. Durante este tiempo, o carrera de trabajo, el pistón efectúa su tercer recorrido y la muñequilla del cigüeñal gira otros 180°.

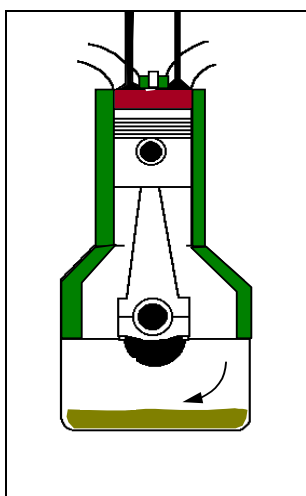


Figura 14.- Trabajo.

• Cuarto tiempo: *Escape*:

Durante este cuarto tiempo se supone que la válvula de escape se abre instantáneamente permanece abierta. El pistón, durante su recorrido ascendente, expulsa a la atmósfera los gases remanentes que no han salido, efectuando el barrido de gases quemados lanzándolos al exterior.

La muñequilla del cigüeñal efectúa otro giro de 180°, completando las dos vueltas del árbol motor que corresponde al ciclo completo de trabajo. El diagrama de distribución correspondiente a esta carrera se presenta en la siguiente figura:

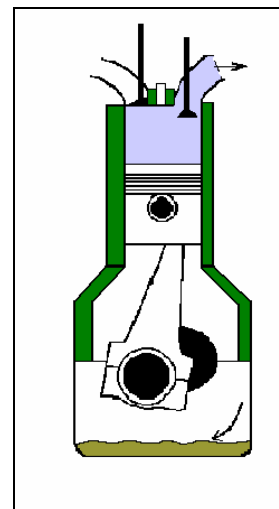


Figura 15.- Escape.

Representando en un sistema de ejes coordinados **P-V** el funcionamiento teórico de estos motores queda determinado por el diagrama de la siguiente figura:

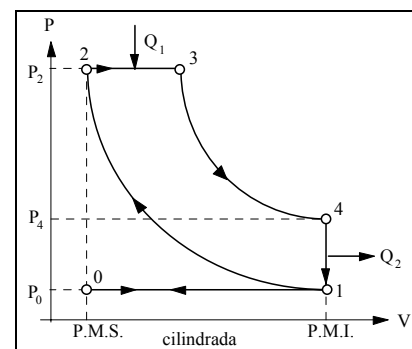


Figura 16.- Diagrama P-V del ciclo Diesel teórico.

0-1.- Admisión (*Isóbara*): Durante la admisión se supone que el cilindro se llena totalmente de aire que circula sin rozamiento por los conductos de admisión, por lo que se puede considerar que la presión se mantiene constante e igual a la presión atmosférica. Es por lo que esta carrera

puede ser representada por una *transformación isóbara*. ($P = K$).

1-2.- Compresión (*Adiabática*): Durante esta carrera el aire es comprimido hasta ocupar el volumen correspondiente a la cámara de combustión y alcanza en el punto (2) presiones del orden de 50 kp/cm². Se supone que por hacerse muy rápidamente no hay que considerar pérdidas de calor, por lo que esta transformación puede considerarse *adiabática*. La temperatura alcanzada al finalizar la compresión supera los 600 °C, que es la temperatura necesaria para producir la autoinflamación del combustible sin necesidad de chispa eléctrica

2-3.- Inyección y combustión (*Isóbara*): Durante el tiempo que dura la inyección, el pistón inicia su descenso, pero la presión del interior del cilindro se supone que se mantiene constante, *transformación isóbara*, debido a que el combustible que entra se quema progresivamente a medida que entra en el cilindro, compensando el aumento de volumen que genera el desplazamiento del pistón. Esto se conoce como *retraso de combustión*

3-4.- Terminada la inyección se produce una expansión (3-4), la cual como la compresión se supone que se realiza sin intercambio de calor con el medio exterior, por lo que se considera una *transformación adiabática*. La presión interna desciende a medida que el cilindro aumenta de volumen.

4-1.- Primera fase del escape (*Isócora*): En el punto (4) se supone que se abre instantáneamente la válvula de escape y se supone que los gases quemados salen tan rápidamente al exterior, que el pistón no se mueve, por lo que se puede considerar que la transformación que experimentan es una *isócora*. La presión en el cilindro baja hasta la presión atmosférica y una cantidad de calor Q_2 no transformado en trabajo es cedido a la atmósfera.

1-0.- Segunda fase del escape (*Isóbara*): Los gases residuales que quedan en el interior del cilindro son expulsados al exterior por el pistón durante su recorrido (1-0) hasta el PMS. Al llegar a él se supone que de forma instantánea se cierra la válvula de escape y se abre la de admisión para iniciar un nuevo ciclo. Como se supone que no hay pérdida de carga debida al rozamiento de los gases quemados al circular por los conductos de escape, la transformación (1-0) puede ser considerada como *isóbara*.

Como se puede observar, este ciclo difiere del ciclo Otto en que la aportación de calor se realiza

a presión constante, con una carrera de trabajo menos efectiva debido al retraso de la combustión.

RENDIMIENTO TÉRMICO DE LOS MOTORES ALTERNATIVOS

El rendimiento térmico representa el mayor o menor grado de aprovechamiento de la energía del combustible que hace un motor.

• En los motores de ciclo Otto, como el calor Q_1 se introduce a volumen constante y el fluido operante se supone un gas perfecto, la cantidad de calor puesta en juego se puede calcular mediante la variación de la energía interna, por lo que:

$$Q_1 = C_v \cdot (T_3 - T_2)$$

Análogamente, como el calor Q_2 es sustraído también a volumen constante, se puede decir que:

$$Q_2 = C_v \cdot (T_4 - T_1)$$

Por consiguiente, el rendimiento térmico ideal par el ciclo Otto teórico resulta:

$$\eta_t = \frac{\text{calor suministrado} - \text{calor sustraído}}{\text{calor suministrado}} \Rightarrow$$

$$\eta_t = \frac{C_v \cdot (T_3 - T_2) - C_v \cdot (T_4 - T_1)}{C_v \cdot (T_3 - T_2)} \Rightarrow$$

$$\eta_t = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} = 1 - \frac{T_1 \cdot \left(\frac{T_4}{T_1} - 1 \right)}{T_2 \cdot \left(\frac{T_3}{T_2} - 1 \right)} \quad (1)$$

Para las transformaciones adiabáticas de compresión 1-2, y de expansión 3-4 se obtiene:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1} ; \frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{V_4}{V_3} \right)^{\gamma-1} \quad (2)$$

y como es $V_1 = V_4$ y $V_2 = V_3$, se tiene que:

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{T_3}{T_4} \Rightarrow \frac{T_4}{T_1} = \frac{T_3}{T_2}$$

Introduciendo esta relación en la expresión del rendimiento η_t (así como la que existe entre las temperaturas T_1 y T_2 de la fase 1-2 de compresión adiabática), resulta:

$$\eta_t = 1 - \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{\gamma-1}$$

Como se vio, la relación entre los volúmenes V_1 y V_2 del principio y final de la carrera de compresión es ρ , y se le llamó *relación de compresión*, por lo que se obtiene como expresión final del rendimiento térmico del ciclo Otto:

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\rho^{\gamma-1}}$$

La evolución del rendimiento térmico en función de la relación de compresión es como se indica en la siguiente figura:

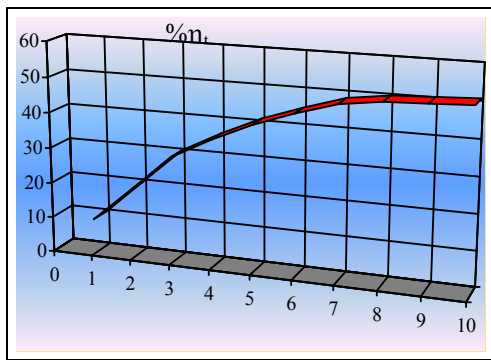


Figura 17.- Evolución del η_t en función de ρ .

- En los motores de ciclo Diesel el calor introducido, por ser una transformación a presión constante, se puede calcular mediante la variación de entalpía del fluido operante considerado como gas perfecto, por lo que:

$$Q_1 = C_p \cdot (T_3 - T_2)$$

Es interesante recordar que en una transformación a presión constante el calor puesto en juego se calcula mediante la variación de la entalpía del fluido activo, mientras que en el caso de una transformación a volumen constante se calcula mediante la variación de la energía interna del fluido.

Como la sustracción del calor Q_2 se realiza como en el ciclo Otto a volumen constante, se puede expresar que::

$$Q_2 = C_v \cdot (T_4 - T_1)$$

Como el rendimiento térmico ideal del ciclo Diesel teórico vale:

$$\eta_t = \frac{\text{calor suministrado} - \text{calor sustraído}}{\text{calor suministrado}} \Rightarrow$$

$$\eta_t = \frac{C_p \cdot (T_3 - T_2) - C_v \cdot (T_4 - T_1)}{C_p \cdot (T_3 - T_2)} = 1 - \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} \Rightarrow$$

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\gamma} \frac{T_1 \cdot \left(\frac{T_4}{T_1} - 1 \right)}{T_2 \cdot \left(\frac{T_3}{T_2} - 1 \right)}$$

expresión análoga a la encontrada para el rendimiento térmico ideal del ciclo teórico Otto.

Para la transformación 2-3 de combustión a presión constante se tiene:

$$\frac{V_3}{V_2} = \frac{T_3}{T_2}$$

Para las transformaciones adiabáticas 1-2 de compresión y 3-4 de expansión se tiene, respectivamente:

$$T_1 = T_2 \cdot \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{\gamma-1} ; T_4 = T_3 \cdot \left(\frac{V_3}{V_4} \right)^{\gamma-1}$$

De donde:

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{\gamma-1} \Rightarrow \frac{T_4}{T_1} = \frac{T_3}{T_2} \cdot \frac{\left(\frac{V_3}{V_4} \right)^{\gamma-1}}{\left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{\gamma-1}}$$

Y como son $V_4 = V_1$ y $\frac{T_3}{T_2} = \frac{V_3}{V_2}$, se tiene que:

$$\frac{T_4}{T_1} = \frac{V_3}{V_2} \cdot \left(\frac{V_3}{V_2} \right)^{\gamma-1} = \left(\frac{V_3}{V_2} \right)^{\gamma}$$

Sustituyendo esta expresión en la del rendimiento, térmico, ideal, resulta:

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\gamma} \cdot \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{\gamma-1} \cdot \frac{\left(\frac{V_3}{V_2} \right)^{\gamma} - 1}{\frac{V_3}{V_2} - 1}$$

Representando con τ la relación entre los volúmenes V_3 y V_2 al final y al comienzo respectivamente, de la fase de combustión a presión constante, a la cual se denomina como

relación de combustión a presión constante, y recordando que:

$$\frac{V_1}{V_2} = \rho$$

Se obtiene finalmente la expresión del rendimiento térmico ideal del ciclo teórico Diesel:

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{1}{\rho^{\gamma-1}} \cdot \frac{\tau^\gamma - 1}{\tau - 1}$$

En esta expresión se observa que η_t es, para el ciclo Diesel, función de la relación de compresión, de la relación de combustión a presión constante y de la relación γ entre los calores específicos.

Las expresiones de los rendimientos térmicos de los ciclos Otto y Diesel difieren solamente en un término que en todos los casos es mayor que 1, y, por ello, es claro que a igualdad de relación de compresión el η_t es mayor para el ciclo Otto que para el ciclo Diesel. Reduciendo τ , el rendimiento térmico del ciclo Diesel se incrementa con lo que supera aún más al del ciclo Otto.

COMPARACIÓN DE LOS MOTORES OTTO Y DIESEL TEÓRICOS.

Los motores Otto y Diesel, que tienen una forma constructiva, una disposición de elementos y un funcionamiento semejantes, se diferencian esencialmente por su sistema de alimentación y por su combustión.

- La alimentación en los motores de tipo Otto se realiza introduciendo una mezcla aire - combustible en el interior del cilindro durante la admisión. Esta mezcla, una vez comprimida, se incendia por medio de una chispa eléctrica, lo que origina una combustión suave y progresiva.

En los motores Diesel el llenado de los cilindros se realiza solamente con aire, introduciendo el combustible a alta presión el cual arde espontáneamente al ponerse en contacto con el aire previamente comprimido, cuya temperatura está por encima del punto de inflamación del combustible, haciéndolo bruscamente, lo que produce la trepidación característica de estos motores, la cual es cada vez más reducida por los nuevos sistemas de inyección a muy alta presión y multipunto.

- Los motores Otto no pueden trabajar con grandes relaciones de compresión. El valor máximo queda limitado a una relación de 9/1 a 10/1 para que la temperatura alcanzada en la compresión no rebase el punto de inflamación de la mezcla y se produzca el autoencendido.

En los motores Diesel es necesaria una elevada relación de compresión, del orden de 22/1 a 24/1, para conseguir las temperaturas adecuadas en el interior del cilindro, con objeto de que se produzca la autoinflamación del combustible al ser inyectado.

Este grado de compresión hace que las presiones de trabajo sean muy elevadas por lo que deben estar constituidos por elementos muy resistentes que soporten grandes cargas, lo que hace que sean más pesados y lentos.

Como se vio el rendimiento térmico en ambos motores es función de la relación de compresión y, al ser más alto en los motores diesel, el aprovechamiento de la energía del combustible es mayor en ellos que en los de ciclo Otto.

- Debido a la forma de realizar la mezcla, los motores de tipo Otto necesitan utilizar combustibles ligeros y fácilmente vaporizables con el objeto de obtener una buena mezcla aire - combustible.

Estos motores están condicionados en cuanto al tipo de combustible empleado, siendo el de mayor uso la gasolina.

En los motores Diesel, como la mezcla aire - combustible se realiza al pulverizar este a alta presión en el interior de los cilindros, la volatilidad del combustible no tiene gran importancia y se pueden utilizar, en consecuencia, combustibles más pesados y de menor calidad. El más utilizado es el gasoil.

Una ventaja no desdeñable es que al no usar combustibles vaporizables no existe peligro de incendio, cualidad que se aprovecha sobre todo en motores para usos agrícolas.

Hasta la aparición de los motores Otto de inyección, el sistema de alimentación Diesel tenía la ventaja de que al suministrar en cada momento la cantidad justa de combustibles según las necesidades de marcha, no se producía derroche en los mismos por mezclas excesivamente ricas ni pobres.

Además, como en los Diesel en el interior del cilindro se quema todo el combustible, no hay producción de gases tóxicos y, como consecuencia, la contaminación atmosférica es

menor. Sin embargo necesitan una gran precisión en la construcción de la bomba de inyección y un filtrado muy riguroso del combustible para que no se obstruyan los inyectores.

Un inconveniente del motor Diesel es el arranque en frío. En invierno cuando el aire y las paredes del cilindro están a temperaturas muy bajas, la temperatura alcanzada en la compresión puede no ser suficiente para inflamar el combustible. Por esto necesitan usar calentadores que se colocan en las cámaras de combustión, lo que hace más lenta su puesta en marcha.

Estos calentadores son puestos en funcionamiento bien por el conductor, bien de forma automática durante unos instantes antes de arrancar el motor. Así se calienta el aire y las paredes de la cámara. El calor generado se transmite al pistón y al cilindro, lo que favorece el calentamiento del aire que penetra en su interior. Con ello se consigue una mayor temperatura del aire al finalizar la compresión. Estos calentadores se desconectan automáticamente al accionar el arranque.

- El consumo de combustible en los motores depende esencialmente de la relación de compresión, de la forma de realizar la carburación y del llenado de los cilindros. Estos factores varían notablemente en ambos tipos de motores y determinan la diferencia de consumo existente entre ellos.

Cuanto más elevada sea la relación de compresión, mayor es el rendimiento térmico y, por tanto, también lo es el aprovechamiento de la energía calorífica del combustible. Esto significa que, a igualdad de potencia, el consumo de combustible es menor cuanto mayor sea la relación de compresión.

En los motores Diesel el bajo consumo de combustible se debe, fundamentalmente, al alto grado de compresión con que trabajan.

En los motores Otto la relación de compresión está muy por debajo del límite crítico, porque está limitado por la temperatura de la cámara de combustión al término de la compresión, que no debe superar el valor de autoinflamación de la mezcla. Para incrementar el grado de compresión, los constructores trabajan en la aplicación de nuevas tecnologías que permitan elevarlo y reducir, por tanto, el consumo del motor. Los estudios en cuestión se encaminan a conseguir culatas de material de mayor conductividad térmica, para facilitar la evacuación del calor, a la mejora del diseño de las cámaras de combustión y

al empleo de combustibles capaces de soportar mayores temperaturas sin autoencenderse.

Por otra parte, se tiende a la fabricación de motores Diesel de nueva tecnología, cuya velocidad de régimen sea superior y a reducir el coste de fabricación para aprovechar las ventajas que proporciona el menor consumo y el menor precio del combustible empleado.

Como en los motores de gasolina, la preparación de la mezcla se efectúa de forma que la riqueza obtenida está muy próxima a la teórica, lo que no ocurre en los motores Diesel que, por su particular forma de alimentación, necesitan una sobreaportación de aire para obtener una buena combustión, es por lo que la riqueza en combustible de la mezcla es mayor en los motores de gasolina.

Otro de los factores que inciden sobre el consumo de combustible es la forma de funcionamiento de ambos motores.

En los motores Otto la regulación de la potencia se realiza admitiendo mayor o menor cantidad de mezcla en el cilindro según las necesidades de potencia solicitada. Esta disposición presenta el inconveniente de que, a menor carga, el grado de compresión es más bajo, lo que hace que el rendimiento térmico sea menor, y es por lo que el menor consumo corresponde a las zonas de trabajo próximas a la plena carga.

En los motores Diesel la regulación de potencia se realiza variando la cantidad de combustible inyectado en función de la potencia solicitada. Como la mayor o menor cantidad de combustible inyectado no influye en el llenado del cilindro con el aire, la relación de compresión no disminuye, es por lo que el rendimiento térmico se mantiene constante a cualquier régimen de carga.

- Debido al tiempo disponible para realizar la mezcla, unos 360° de giro del cigüeñal, y al poco peso de sus elementos móviles, los motores de tipo Otto no tienen grandes limitaciones para alcanzar un elevado número de revoluciones. En la práctica están limitados por las fuerzas de inercia y por los rozamientos, que crecen con el cuadrado de la velocidad.

La velocidad de régimen alcanzada por los motores de encendido por chispa, puede llegar a alcanzar incluso 17000 r.p.m.

En los motores Diesel, sin embargo, la velocidad de régimen está limitada por el corto tiempo de que disponen para la formación de la mezcla en el interior de sus cilindros, unos 30°

máximo, lo cual limita la velocidad de los mismos, llegándose en los motores más rápidos a un régimen que aún hoy no supera las 6000 r.p.m.

Esta característica representa una gran ventaja de los motores Otto sobre los Diesel pues, debido a su alto régimen de funcionamiento, se pueden obtener grandes potencias aun con pequeñas cilindradas por ser la potencia función de estas dos variables.

Además, como los motores Otto tienen un menor peso muerto, son más ligeros y más económicos.

Haciendo un resumen de todo lo expuesto en este apartado, se pueden considerar las siguientes ventajas e inconvenientes de los motores Diesel con respecto a los de ciclo Otto:

• **Ventajas:**

- Mayor rendimiento térmico con mayor potencia útil.
- Menor consumo de combustible aproximadamente el 30% menos.
- Empleo de combustible más económico.
- Menor contaminación atmosférica.
- No existe peligro de incendio.
- Motor más robusto y apto para trabajos duros, con una mayor duración de uso.
- Menor costo de entretenimiento.
- Mayor rentabilidad.

• **Inconvenientes:**

- Mayor peso del motor.
- Necesitan soportes más fuertes.
- Elementos de suspensión de mayor capacidad.
- Costo más elevado del motor.
- Menor régimen de revoluciones.
- Motor más ruidoso y con mayores vibraciones.
- Reparaciones más costosas.
- Arranque más difícil.
- Requieren mayor calidad en los aceites de engrase.

Debido a las ventajas de los motores Diesel con respecto a los de explosión, sobre todo en el empleo de combustibles más económicos y al mejor aprovechamiento de la energía, el campo de aplicación de estos motores crece constantemente, incluso para vehículos de turismo. Son por estas razones los más empleados en la Agricultura.

OTROS TIPOS DE MOTORES

- El *motor de dos tiempos* funciona con un ciclo durante el cual el pistón efectúa dos carreras y el cigüeñal da sólo una vuelta o giro de 360°.

La característica principal de este tipo de motor es que no lleva válvulas, sino que es el propio pistón el que, en su desplazamiento en el interior del cilindro, hace que el fluido operante entre y salga a través de las denominadas *lumbreras* u *orificios* tallados en el cilindro.

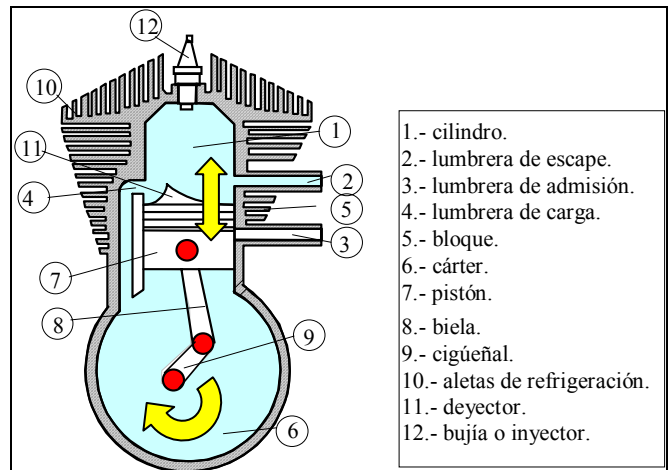


Figura 18.- Motor de dos tiempos.

En este motor, se realiza una preadmisión de los gases frescos en el cárter, el cual con respecto al de los motores de cuatro tiempos es más reducido y estanco. En él son sometidos a una precompresión, pasando luego al interior del cilindro por una conducción denominada conducto de carga que lo comunica con el cárter.

Se refrigeran generalmente por aire a través de una serie de aletas que rodean todo el cilindro y cámara de combustión, y como tampoco llevan circuito de engrase, el cual se realiza por mezcla de aceite con el combustible en una proporción del 3-5%, son ligeros, resistentes y necesitan muy poco entretenimiento.

El funcionamiento de estos es como sigue:

- Durante su carrera desde el **PMI** al **PMS** el pistón hace salir a la atmósfera los gases quemados que ocupan el cilindro y abre la lumbreira de admisión por lo que los gases frescos de la atmósfera pasan al interior del cárter, aspirados por la depresión creada al desplazarse. Desde este momento hasta el final de su recorrido se produce la compresión del aire o de la mezcla en el interior del cilindro, mientras continúa la preadmisión de gases frescos en el interior del cárter.

Durante esta carrera la muñequilla del cigüeñal ha girado 180° y se han realizado las siguientes fases:

- Barrido de gases residuales.
- Compresión de la mezcla.
- Preadmisión o llenado del cárter.

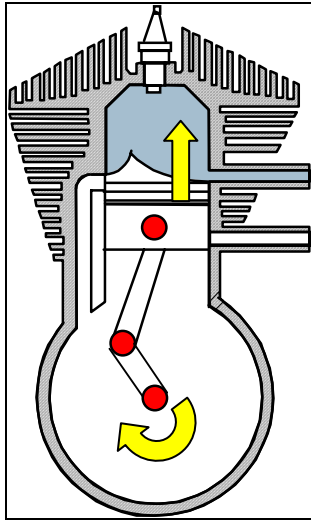


Figura 19.- Primer tiempo.

• Durante la segunda carrera, que comienza cuando el pistón llega al **PMS** al final de la compresión, instante en el cual salta la chispa eléctrica o se inyecta el combustible, se inicia la combustión y se elevan la presión y la temperatura en el interior del cilindro, generándose una fuerza que empuja al pistón con lo que se produce trabajo útil.

Durante el descenso del pistón, se cierra en primer lugar la lumbrera de admisión y se comprime el aire o la mezcla en el interior del cárter (precompresión).

Poco antes de llegar al **PMI** el pistón abre las lumbreras de carga y escape, a través de las cuales se produce el escape de gases quemados y el llenado del cilindro con los gases frescos que a cierta presión ocupan el cárter, los cuales, por el conducto de carga, favorecidos por la presión a que se encuentran sometidos, entran en el cilindro incidiendo en la superficie del devector con lo que se impide al desviar su trayectoria que salgan sin quemarse directamente por la lumbrera de escape. A la vez empujan a los gases quemados que quedan a la presión atmosférica en el interior del cilindro y los hacen salir a la atmósfera.

En esta segunda carrera la muñequilla del cigüeñal ha girado otros 180°, completando una

vuelta del cigüeñal y se han realizado las siguientes fases:

- Combustión y trabajo.
- Precompresión de la mezcla en el cárter.
- Escape.
- Admisión.

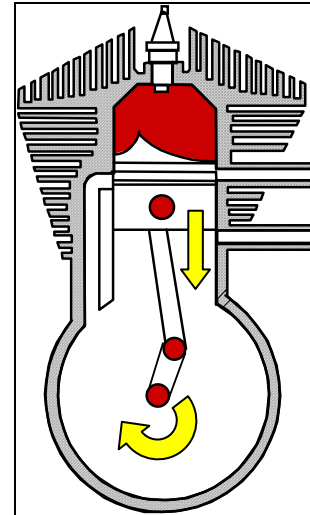


Figura 20.- Segundo tiempo.

Como se puede observar, el ciclo completo se realiza en estos motores en tan sólo dos carreras del pistón y una vuelta del cigüeñal.

En la práctica el trabajo producido por estos motores, resulta inferior al previsto, debido a la forma de llenado y barrido de los gases en el cilindro, ya que si en los motores de cuatro tiempos, la admisión y el escape se realizan durante dos carreras completas del pistón y el trabajo durante toda la carrera útil del mismo, en los de dos tiempos, la admisión y el escape de gases se realizan durante un corto recorrido del pistón que depende de la posición de las lumbreras. De tal forma que su posición es fundamental en el funcionamiento de estos motores, ya que cuanto más próximas estén del **PMI**, el trabajo teórico desarrollado será mayor, si bien el llenado y vaciado de gases es insuficiente, obteniéndose una menor potencia real del motor. Por el contrario, si las lumbreras se sitúan muy alejadas del **PMI**, aunque el llenado y evacuado de gases se efectúa en mejores condiciones, se acorta la carrera de trabajo y se obtiene un trabajo desarrollado inferior dando lugar, además, a una mayor pérdida de gases frescos que aumenta el consumo del motor.

El rendimiento térmico η_t de los motores de dos tiempos, al igual que en los de cuatro tiempos, es función de la relación de compresión.

Comparando los motores de dos con los de cuatro tiempos, se pueden considerar las siguientes ventajas e inconvenientes de los motores de dos tiempos, con respecto a los de cuatro:

- Más reducidos y con menor peso.
- Menor coste de fabricación.
- Mayor rendimiento mecánico.
- Menor coste de entretenimiento.
- Mayor número de revoluciones.
- Menor rendimiento térmico.
- Menor potencia efectiva.
- Mayor consumo específico.

Todo esto hace que los motores de dos tiempos sean particularmente interesantes cuando se requieren pequeñas cilindradas.

• El *motor rotativo Wankel* difiere del motor alternativo en que no tiene ni cilindros ni pistones, sino que está formado por una *carcasa* con forma geométrica de *epitrocoide*, alrededor de la cual hay *cámaras* por donde circula el agua que sirve de refrigeración, la cual está cerrada herméticamente por ambos lados con dos tapas en las que van instalados los cojinetes de apoyo de un eje motor del que se toma el trabajo producido.

La carcasa lleva tallados dos orificios que se denominan *lumberras* de admisión y escape, a través de las cuales se realiza el llenado con gases frescos y la expulsión de gases quemados, y tiene además un orificio roscado en el que va situada la *bujía* o el *inyector* de combustible.

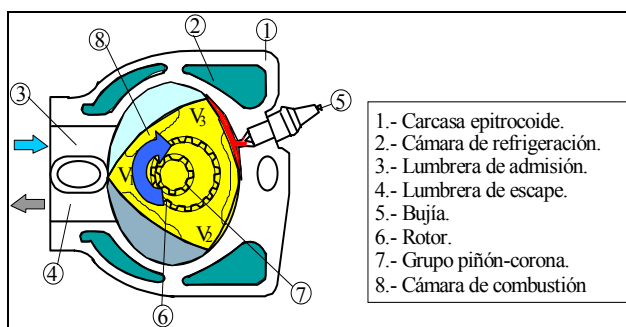


Figura 21.- Esquema y nomenclatura de un motor rotativo Wankel.

En el interior de la carcasa se mueve un *rotor* en forma de triángulo equilátero curvilíneo, que gira excéntricamente con sus vértices en continuo contacto con la carcasa, manteniendo la hermeticidad gracias a unos *patines* que hacen el mismo efecto que los *segmentos* en los motores alternativos. El rotor lleva una *corona dentada*

interiormente, que engrana con un piñón del árbol motor.

En cada una de las tres se practica un *rebaje* que constituye la *cámara de combustión*, por lo que se puede considerar que este motor está constituido por tres cilindros independientes, ya que cada uno de ellos realiza un ciclo de trabajo completo para cada revolución del rotor.

Las características constructivas de este motor, recuerdan por su simplicidad al motor de dos tiempos, y además de compacto y ligero, porque dispone de menor número de piezas o elementos mecánicos en movimiento, puede alcanzar una elevada velocidad de giro, al no tener que soportar la inercia de las masas oscilantes. También elimina todo el sistema de distribución ya que realiza la admisión y escape a través de lumberras sin necesidad de válvulas.

El engrase, refrigeración, alimentación y encendido se efectúan como en los motores alternativos, con el inconveniente de que en este motor las explosiones se realizan siempre en el mismo lado de la carcasa, razón por la que el calentamiento en dicha zona es mucho mayor y, en consecuencia, se necesita una refrigeración eficiente, lo que exige una bomba de mayor caudal.

La estanqueidad entre el rotor y la carcasa se consigue por medio de unos *paletas* situados en los vértices del rotor y la estanqueidad entre el rotor y las tapas se obtiene mediante la colocación de unas *láminas* que se alojan en unos canales laterales tallados a ambos lados del rotor.

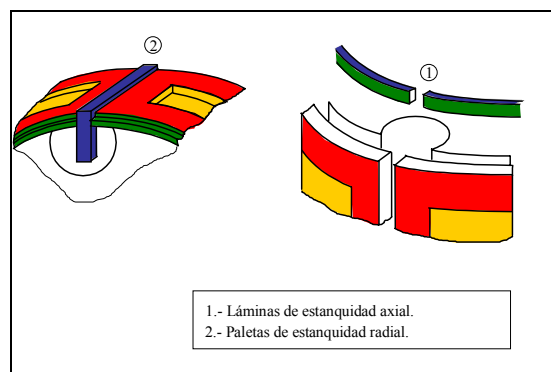


Figura 22.- Segmentos de estanqueidad.

Los patines y las láminas van provistos de expansores elásticos, situados por debajo de ellos en las ranuras del rotor, que aseguran su salida incluso cuando el motor está parado.

Estos motores funcionan en un ciclo de cuatro tiempos y producen tres ciclos de trabajo en cada

vuelta completa del mismo, por lo que equivalen a un motor de tres cilindros.

Considerando uno de los lados del rotor como un motor monocilíndrico, su ciclo de funcionamiento se desarrolla como sigue:

- Primer tiempo :Admisión

Cuando el vértice V_1 rebasa la lumbrera de admisión, el aire o la mezcla es aspirada por la succión que provoca el rotor en su giro y entra en la carcasa. Mientras, el vértice V_2 realiza la expulsión a la atmósfera de los gases quemados a través de la lumbrera de escape.. La admisión continúa hasta que el vértice V_2 ha rebasado la lumbrera de admisión.

- Segundo tiempo: Compresión

Este tiempo comienza cuando el vértice correspondiente ha rebasado la lumbrera de admisión y la mezcla ocupa todo el volumen entre la carcasa y el rotor. El volumen disminuye por la forma de la carcasa, a medida que sigue girando el rotor hasta que los gases frescos ocupan el mínimo correspondiente en los motores alternativos a la cámara de compresión.

- Tercer tiempo: Trabajo

Cuando el fluido operante se encuentra en su máxima compresión salta la chispa eléctrica o se inyecta el combustible y se produce la combustión. De esta forma aumenta la presión interna que se ejerce sobre el rotor, que lo hace girar en el mismo sentido de rotación. El espacio ocupado por los gases aumenta de volumen, disminuye la presión interna, y el motor produce trabajo hasta que el vértice correspondiente descubre la lumbrera de escape.

- Cuarto tiempo: Escape

Cuando el vértice correspondiente rebasa la lumbrera de escape, los gases comienzan a salir, primero en estampida, debido a la presión interna, y a continuación son arrastrados y obligados a salir hasta que dicho vértice rebasa la lumbrera de escape, con lo cual empieza la admisión y un nuevo ciclo.