

Tecnología de los Combustibles

Tema 2. Combustibles. Combustión y Trabajo



José Ramón Berasategui Moreno

Beatriz Malagón Picón

DEPARTAMENTO DE TRANSPORTES Y
TECNOLOGÍA DE PROYECTOS Y PROCESOS

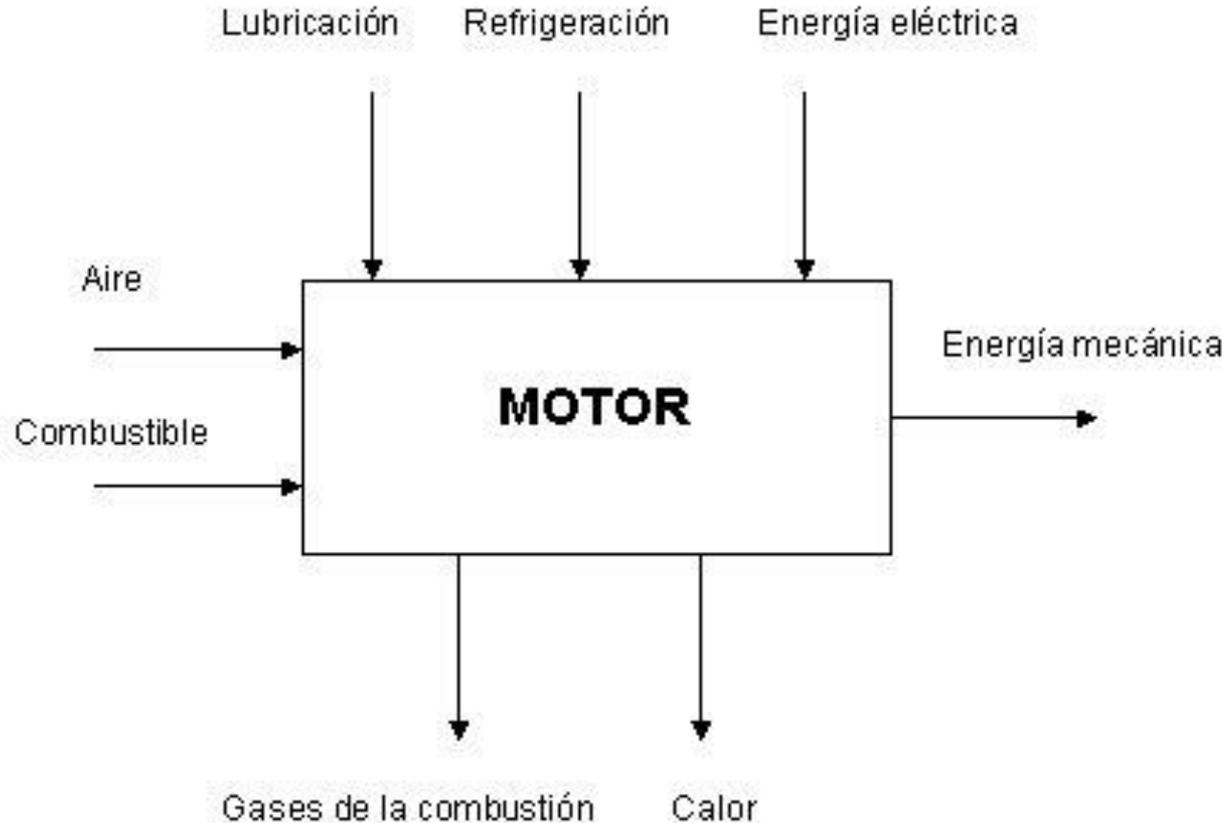
Este material se publica bajo licencia:

[Creative Commons BY-NC-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)



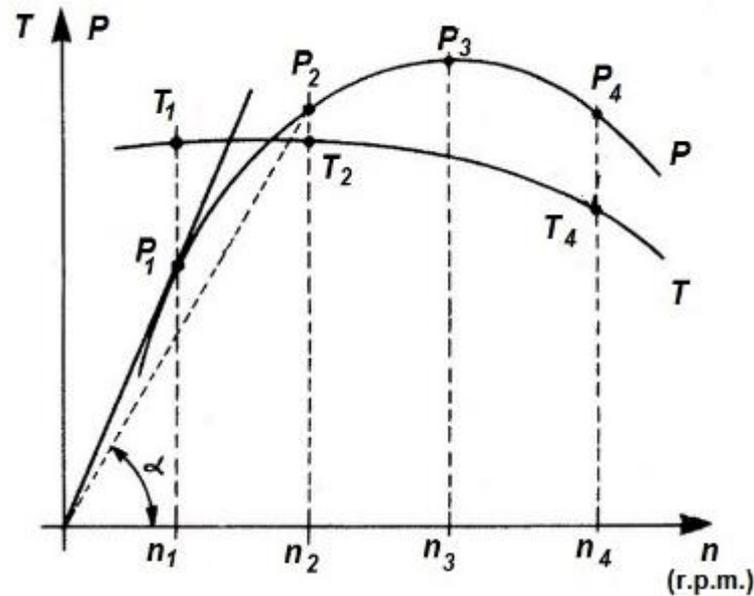
MÁQUINA TRANSFORMADORA DE ENERGÍA

- MOTOR:** máquina que transforma energía química de los carburantes en energía mecánica.



PAR MOTOR Y POTENCIA EFECTIVA

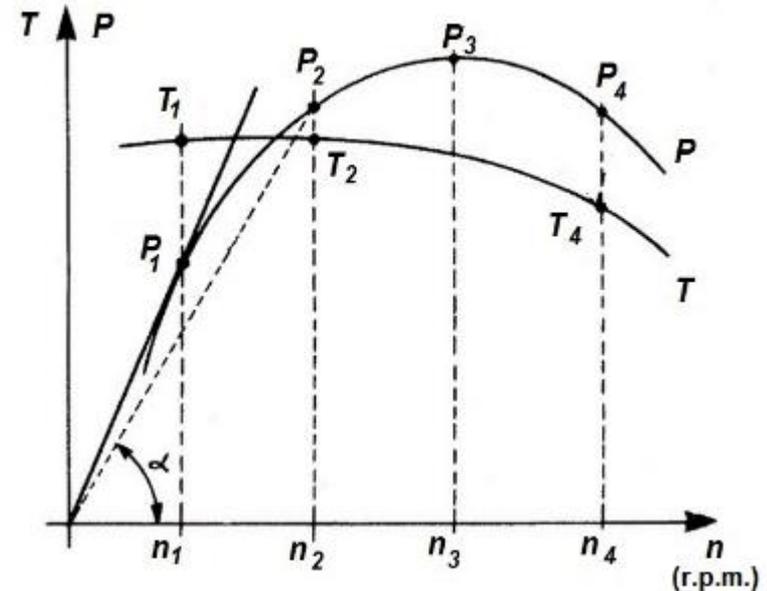
- Para saber la potencia efectiva de un motor, es decir, la **potencia real** que nos da en el eje motor o cigüeñal, hemos de recurrir a un principio físico muy sencillo.



- La curva de par empieza siendo ascendente hasta llegar a las revoluciones donde el motor rinde el **par máximo (T1)**, que es el punto de diseño óptimo. A partir de ese momento, el par comienza a disminuir progresivamente.

PAR MOTOR Y POTENCIA EFECTIVA

- A partir del punto óptimo de revoluciones del motor empiezan a aparecer dificultades, y que están relacionadas fundamentalmente con los siguientes factores:
 - Una inadecuada evacuación de gases quemados.
 - Insuficiente llenado de aire en cada ciclo.
 - La combustión empieza a no ser óptima.
 - La fracción de tiempo para cada combustión se reduce.
 - La mezcla de aire-combustible no se acaba de completar.



PAR MOTOR Y POTENCIA EFECTIVA

- la **Potencia es proporcional a la fuerza empleada en recorrer una distancia en un tiempo determinado**, es decir, por unidad de tiempo.

$$\text{Potencia} = \text{Fuerza} \times \text{Espacio} / \text{Tiempo}$$

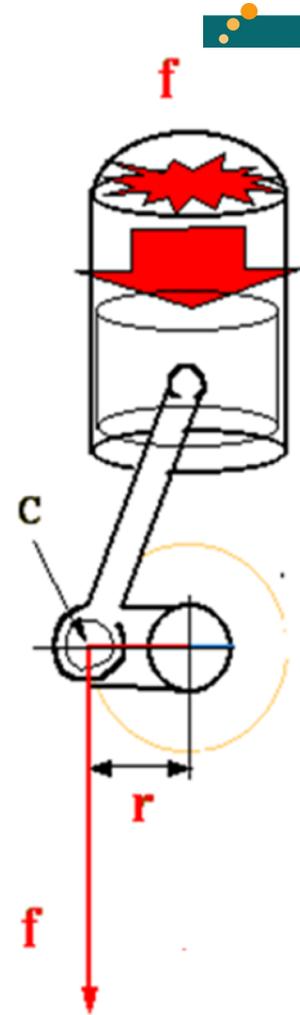
- Experimentalmente se calculó que una caloría puede producir 4,18 Julios. Por lo tanto $1 \text{ Kcal} = 4.180 \text{ Julios}$.
- 1 Julio (Cantidad de trabajo realizado por una F cte de 1 N durante 1 m en la misma dirección) = $1 \text{ N} \times \text{metro} = \text{Kgm} \times 9,8$
- $1 \text{ CV} = 75 \text{ kgm/seg} = 75 \times 9,8 \text{ Nm/seg} = 736 \text{ Julios/seg} = 736 \text{ Watios}$

PAR MOTOR Y POTENCIA EFECTIVA

- En el motor, el espacio recorrido por la manivela **C** en una vuelta es de $2\pi r$, pues es el desarrollo geométrico de la longitud de la circunferencia de radio r que cubre la vuelta completa.
- Si el motor gira a n revoluciones por minuto, el espacio total que recorrerá **C** en un minuto será igual a $2\pi r n$, y en un segundo será $2\pi r n / 60$.
 - Si el par motor **M** lo expresamos en kilogrametros, la potencia P nos saldrá en kilogrametros por segundo.
 - Si introducimos como unidad de potencia el Caballo de Vapor (CV), que equivale a 75 Kilogrametros por segundo, la potencia efectiva nos dará en CV:

$$P(\text{CV}) = M \cdot 2\pi r n / 60 \cdot 75$$

- **M** en kilogrametros (kgm)
- **n** en revoluciones por minuto (rev./min.)

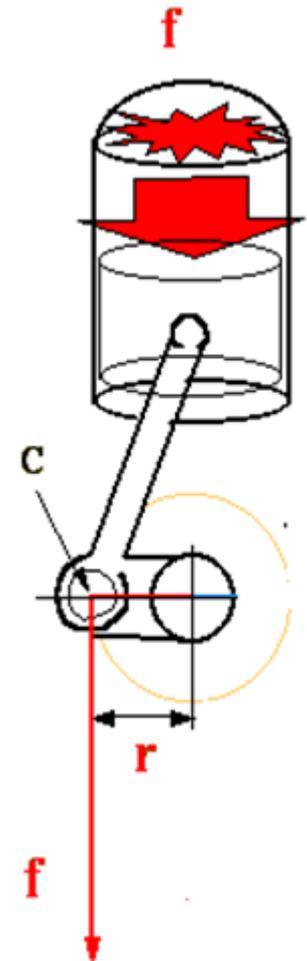


PAR MOTOR Y POTENCIA EFECTIVA

- Al subir el pistón hasta el PMS (punto muerto superior), todo el volumen unitario queda comprimido dentro de la cámara de combustión, que es un pequeño espacio en la parte superior del cilindro.
- Se llama **Relación de Compresión** a la relación que hay entre el volumen total que hay dentro del cilindro (volumen desplazado y el volumen de la cámara de combustión o compresión V_c) y el volumen mínimo (el volumen de la cámara de compresión V_c).
 - La relación de compresión es el número de veces que cabe el volumen de la cámara de compresión en el volumen formado por el pistón en el PMI (punto muerto inferior) más el volumen de la propia cámara de compresión.
 - Se demuestra que la **relación de compresión** define el **rendimiento térmico**. En los motores de ciclo diésel (21:1) es mayor, ya que normalmente trabajan en un rango doble del motor Otto (12:1).
 - En estos últimos tiempos la relación de compresión en un motor de combustión interna, tipo Diésel, llega hasta 22:1, superando una presión de 3500 bar durante la combustión

PAR MOTOR Y POTENCIA EFECTIVA

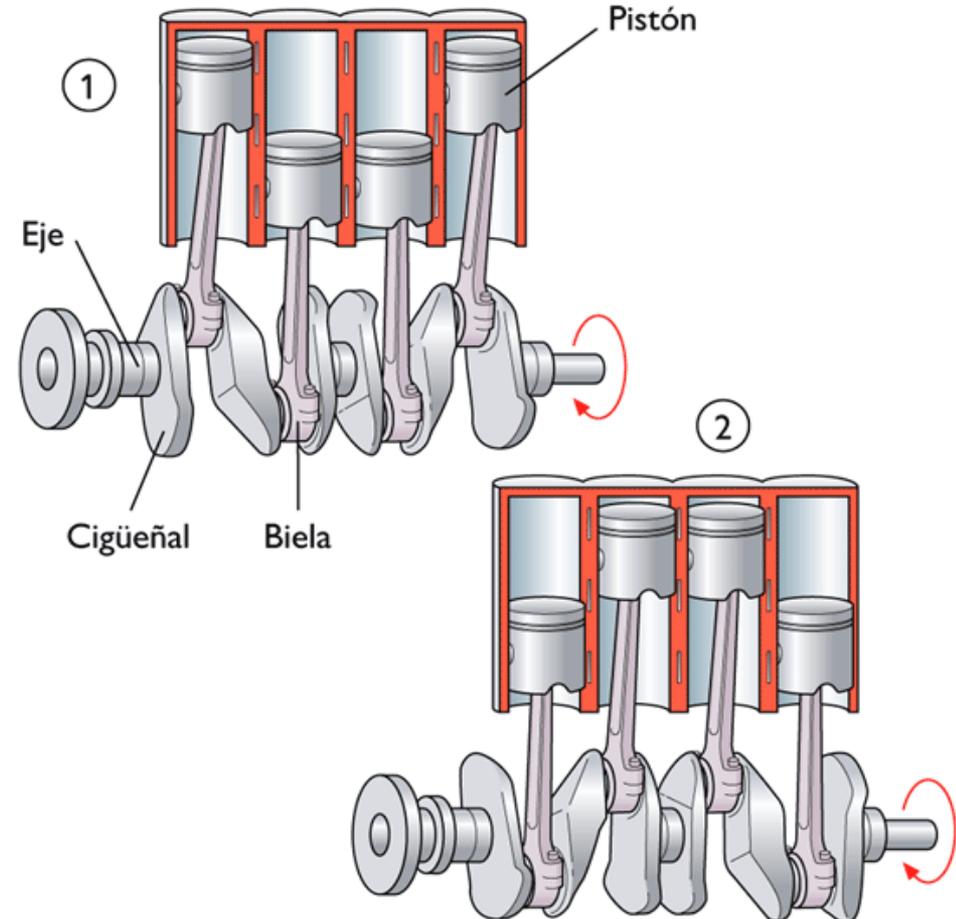
- Para aumentar la potencia de un motor de combustión interna es necesario conseguir aumentar el consumo de aire mezclado debidamente con el combustible.
- Podemos aumentar la potencia solamente llevando a cabo alguna -o todas- de las siguientes posibilidades:
 - Aumentar la cilindrada.
 - Aumentar la presión de compresión.
 - Aumentar las revoluciones del motor.
- Cuanto mayor sea la capacidad volumétrica de un motor, mayor será la cantidad de aire y combustible que llenará las cámaras de combustión. Para aumentar la cilindrada existen 3 caminos:
 - Aumentar el diámetro del cilindro.
 - Aumentar la carrera del pistón.
 - Aumentar el número de cilindros.



PAR MOTOR Y POTENCIA EFECTIVA

✓ Motor de cuatro cilindros:

- Un motor de cuatro cilindros en línea es una configuración de las más utilizadas de motor de combustión interna en la que 4 cilindros están dispuestos en 1 fila.
- Puede ser montado longitudinalmente o transversalmente, con cilindros y pistones verticales, o incluso parcialmente inclinado o en posición horizontal.
- Hoy es la configuración de motor utilizada en la mayoría de los automóviles de hasta 2,5 litros de cilindrada.



PAR MOTOR Y POTENCIA EFECTIVA

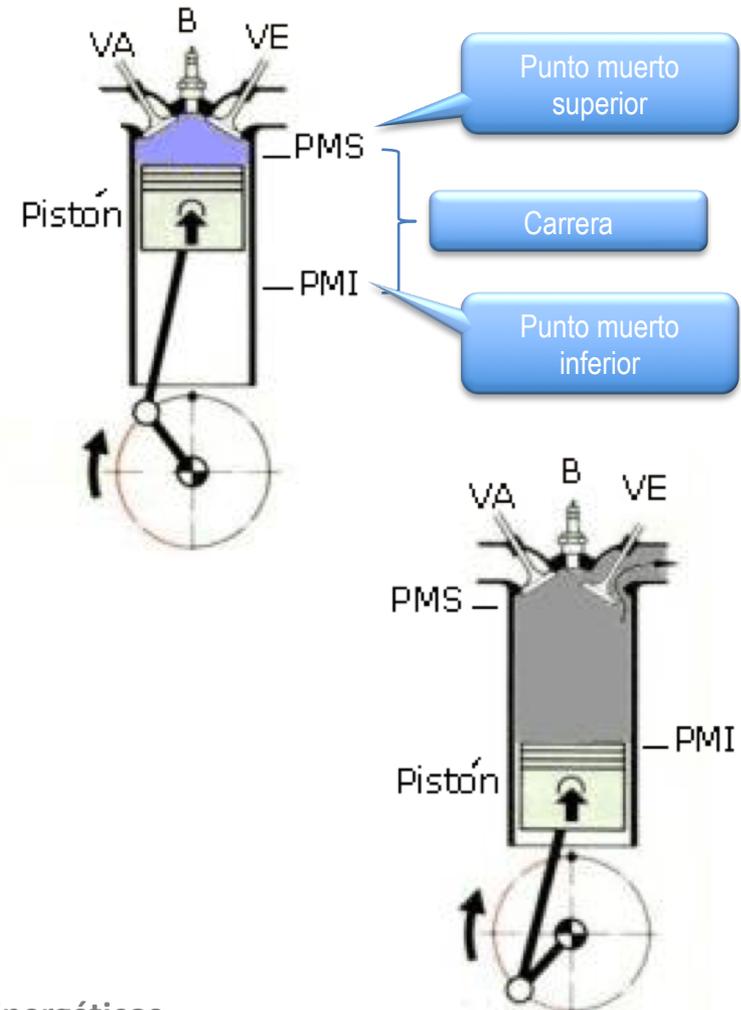
✓ **Motores de ciclo Otto:**

- La idea básica de los motores de explosión es aprovechar la energía generada por el combustible, al quemarse dentro de un cilindro.
- La energía que se libera de esta forma se transmite a un pistón móvil, así se produce trabajo mecánico que puede usarse para mover un vehículo.
- En los motores de ciclo Otto, la combustión se inicia mediante el salto de una chispa eléctrica proveniente de una bujía.
- Los combustibles de estos motores deben tener capacidad antidetonante, o sea, que no se enciendan antes de recibir la chispa, fenómeno conocido como autoencendido.
- Los combustibles más usados son las gasolinas y gases.

PAR MOTOR Y POTENCIA EFECTIVA

✓ Motores de ciclo Otto:

- El ciclo completo del motor consta de cuatro tiempos.
- El 1º recorrido del pistón (desde la cámara de combustión hasta el final de la carrera) es la **admisión**, cuando entra al cilindro la mezcla integrada por combustible y aire.
- El 2º tiempo es la **compresión**: el pistón se mueve ahora en sentido contrario, comprimiendo la mezcla.
- El 3º tiempo es la **expansión**: se trata de la única carrera útil dentro del ciclo: al recibir la **chispa**, los gases se inflaman y ejercen una fuerte presión sobre el pistón, empujándolo hasta el extremo de carrera.
- El 4º tiempo es el del **escape**: tiene un recorrido igual a la compresión pero, al estar la válvula de escape abierta, se produce la expulsión de los gases ya quemados.

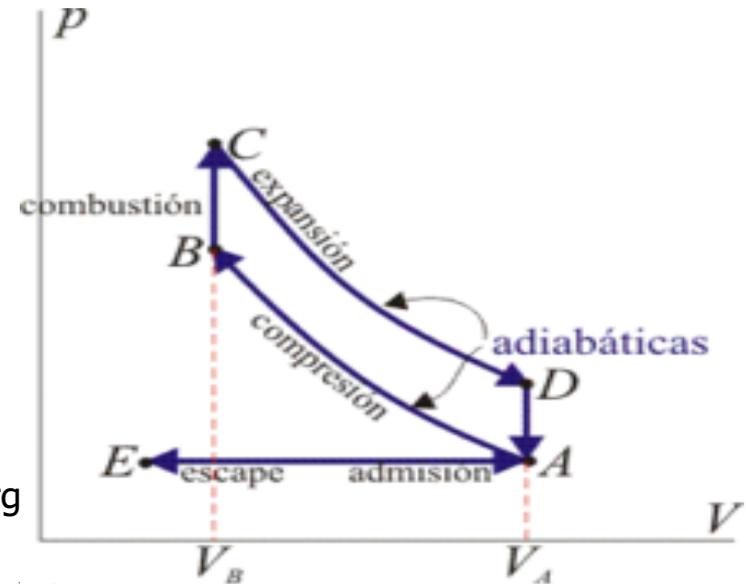


PAR MOTOR Y POTENCIA EFECTIVA

✓ Ciclo Otto en los motores de combustión:

El ciclo consta de 6 etapas, dos de los cuales no participan en el ciclo termodinámico del fluido operante pero son fundamentales para la renovación de la carga del mismo:

- **E-A:** admisión a presión constante (renovación de la carga)
- **A-B:** compresión isentrópica (sin transferencia de energía).
- **B-C:** combustión, aporte de calor a volumen constante. La presión se eleva rápidamente antes de comenzar el tiempo útil.
- **C-D:** fuerza, expansión isentrópica o parte del ciclo que entrega trabajo.
- **D-A:** Escape, cesión del calor residual al ambiente a volumen constante.
- **A-E:** Escape, vaciado de la cámara a presión constante (renovación de la carga).



PAR MOTOR Y POTENCIA EFECTIVA

✓ Motores de Ciclo Otto:

- Hay dos tipos de motores que se rigen por el ciclo de Otto: los **motores de 2 y 4 tiempos**.
- Estos últimos, junto con el **motor diésel**, son los **más utilizado en los automóviles** ya que tiene un buen rendimiento y contaminan mucho menos que el motor de dos tiempos.
- Durante la primera fase el pistón se desplaza hasta el PMI y la válvula de admisión permanece abierta, permitiendo que se aspire la mezcla de combustible y aire hacia dentro del cilindro.
- Durante la segunda fase las válvulas permanecen cerradas y el pistón se mueve hacia el PMS, comprimiendo la mezcla de aire y combustible.
- Cuando el pistón llega al final de esta fase, la bujía se activa y enciende la mezcla.

PAR MOTOR Y POTENCIA EFECTIVA

✓ Motores de Ciclo Otto:

- Durante la tercera fase se produce la combustión de la mezcla, liberando energía que provoca la expansión de los gases y el movimiento del pistón hacia el PMI.
- Se produce la transformación de la energía química contenida en el combustible en energía mecánica transmitida al pistón.
- Éste la trasmite a la biela, y de ahí al cigüeñal.
- En la cuarta fase se abre la válvula de escape y el pistón se mueve hacia el PMS, expulsando los gases producidos durante la combustión y quedando preparado para empezar un nuevo ciclo (renovación de la carga).

PAR MOTOR Y POTENCIA EFECTIVA

✓ Motores de Ciclo Diésel:

- Los motores Diésel actuales han evolucionado de una combinación de las ideas de Diésel y de su contemporáneo Herbert Stuart.
- A diferencia de los motores de ciclo Otto, en los motores Diésel el cilindro no aspira una mezcla de aire y combustible, sino sólo aire.
- El pistón comprime este aire a una presión alta (20 – 50 bar), elevando mucho su temperatura (hasta 500°C).
- En ese instante se inyecta el combustible, que, al encontrarse con el aire caliente, se enciende y va quemándose a medida que entra en el cilindro.
- Los combustibles que se utilizan deben tener una velocidad de autoignición adecuada al régimen de operación de cada motor.

PAR MOTOR Y POTENCIA EFECTIVA

✓ **Motores de Ciclo Diésel:**

- De acuerdo a su tipo, se los clasifica en veloces, medios y lentos, que corresponden al gasoil, diésel, bunker y fuel oil, en ese orden.
- Las primeras aplicaciones de los motores Diésel fueron en motores marinos y ferroviarios.
- Estos motores son de bajas revoluciones, e inicialmente no requirieron gran desarrollo cualitativo de combustibles, ya que usaban subproductos de la destilación directa del petróleo crudo.

PAR MOTOR Y POTENCIA EFECTIVA

✓ Motores de Ciclo Diésel:

- Cuando se comprime mecánicamente aire se cumplen las leyes de la termodinámica.
- Un incremento en la presión supone un aumento de la temperatura.
- La ley de Boyle explica que, si un volumen de gas (aire) se reduce a la mitad, durante la compresión, se duplica la presión.

Ley de Boyle-Mariotte (a "T" constante).
 $p \cdot V = \text{constante}; \quad p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2$

- La ley de Charles establece que el volumen de un gas cambia en proporción directa a la temperatura.

Ley de Charles Gay-Lussac
 (a "p" constante).

- Estas leyes explican que la presión, volumen y temperatura son proporcionales, si cambia una variable, y también cambian las otras dos, de acuerdo con esta ecuación:

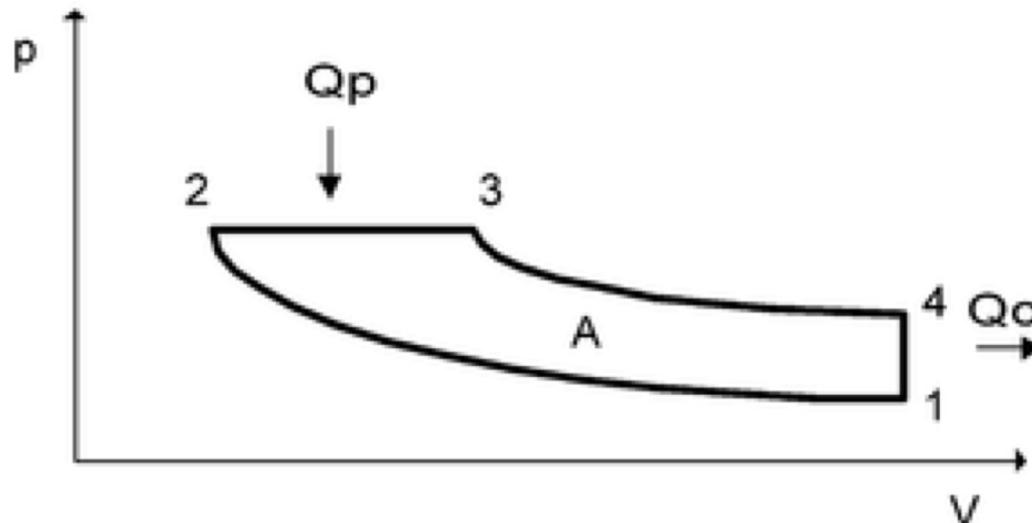
$$(P_1 \cdot V_1) / T_1 = (P_2 \cdot V_2) / T_2$$

$$\frac{V}{T} = \text{constante}; \quad \frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$

PAR MOTOR Y POTENCIA EFECTIVA

✓ Motores de Ciclo Diésel:

- Para avanzar en el diseño de los motores Diésel fue necesaria aumentar la compresión y las revoluciones del motor.
- Se originó la necesidad de contar con nuevos combustibles más refinados.
- En los últimos años el incremento de carburante diésel ha sido espectacular al mismo tiempo que se desarrollaba una nueva tecnología de motores Diésel.



PAR MOTOR Y POTENCIA EFECTIVA

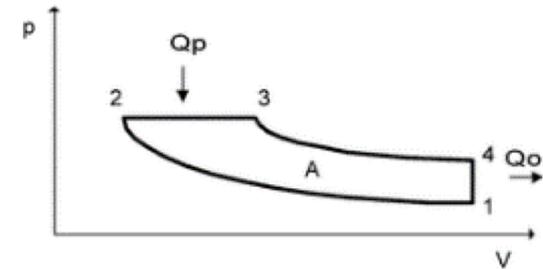
✓ Motores de Ciclo Diésel:

1.- Compresión, proceso 1-2: es un proceso de compresión adiabática reversible (isentrópica), es decir sin intercambio de calor con el exterior.

- Viene a simbolizar el proceso de compresión de la masa fresca en el motor real, en el que en el pistón, estando en el punto muerto inferior (PMI), empieza su carrera de ascenso, comprimiendo el aire contenido en el cilindro.
- Ello eleva el estado termodinámico del fluido, aumentando su presión, su temperatura y disminuyendo su volumen específico, en virtud del efecto adiabático (sin intercambio de calor con el exterior).
- En la idealización, el proceso viene gobernado por la ecuación isentrópica:

$$P \cdot v^k = cte$$

- (k coeficiente adiabático = C_p/C_v (calor específico a presión y volumen constante)).

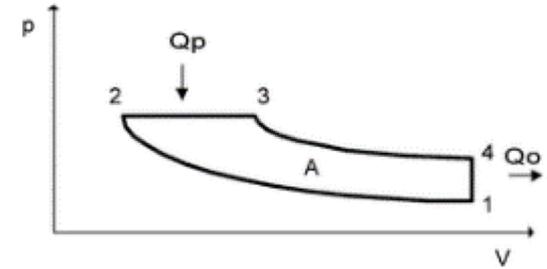


PAR MOTOR Y POTENCIA EFECTIVA

✓ Motores de Ciclo Diésel:

2.- Combustión, proceso 2-3: el aporte de calor Q_p se simplifica por un proceso isóbaro (a presión constante).

- Sin embargo, la combustión es mucho más compleja: en el entorno del punto muerto superior (PMS) (en general un poco antes de alcanzarlo debido a problemas relacionados con la inercia térmica de los fluidos, es decir el retraso que hay entre la inyección y la inflamación espontánea), se inicia la inyección del combustible (en motores de automóviles, gasóleo, aunque basta con que el combustible sea lo suficientemente autoinflamable).
- El inyector pulveriza y "atomiza" el combustible, que, en contacto con la atmósfera interior del cilindro, comienza la evaporación.

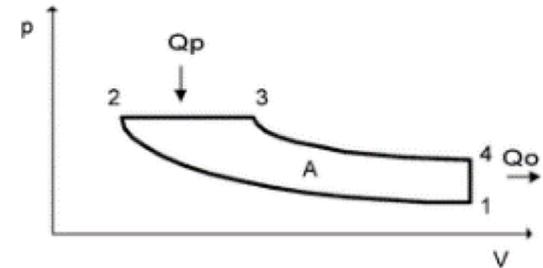


PAR MOTOR Y POTENCIA EFECTIVA

✓ Motores de Ciclo Diésel:

3.- Expansión, proceso 3-4: Expansión isentrópica (adiabática) del fluido termodinámico, hasta el volumen específico que se tenía al inicio de la compresión.

- En la realidad, la expansión se produce a consecuencia del elevado estado termodinámico de los gases tras la combustión, que empujan al pistón desde el PMS hacia el PMI, produciendo un trabajo.
- Como en todo ciclo de motor de cuatro tiempos o dos tiempos, sólo en esta carrera, en la de expansión, se produce un trabajo.



PAR MOTOR Y POTENCIA EFECTIVA

✓ Motores de Ciclo Diésel:

- La relación de compresión define el rendimiento térmico del motor de combustión interna, es decir el grado de aprovechamiento de la energía del combustible.
- En los motores de ciclo Otto el rendimiento aumenta al aumentar la compresión, ventaja cuya aplicación se ve limitada por el encendido espontáneo de la mezcla.
- En los motores de ciclo diésel, permitiendo una mayor relación de compresión, el rendimiento térmico es mayor por este motivo.

$$RC = \frac{\frac{\pi}{4} * d^2 * s + V_c}{V_c}$$

donde

- d = diámetro del cilindro.
- s = carrera del pistón desde el punto muerto superior hasta el punto muerto inferior
- V_c = volumen de la cámara de combustión.
- RC = es la relación de compresión y es adimensional.

PAR MOTOR Y POTENCIA EFECTIVA

✓ Motores de Ciclo Diésel:

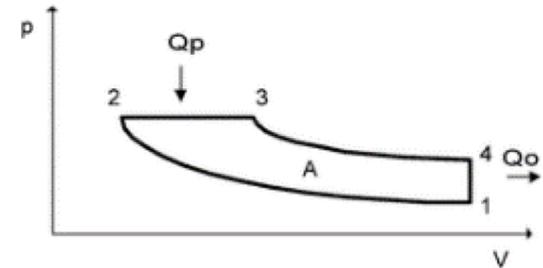
- El ciclo del motor diésel ideal de 4 tiempos es una idealización del diagrama del indicador de un motor Diésel, en el que se omiten las fases de renovación de la carga y se asume que el fluido termodinámico que evoluciona es un gas perfecto, en general aire.
- Se acepta que todos los procesos son ideales y reversibles, y que se realizan sobre el mismo fluido.
- Aunque todo ello lleva a un modelo muy aproximado del comportamiento real del motor, permite al menos extraer una serie de conclusiones cualitativas con respecto a este tipo de motores.
- No hay que olvidar que los grandes motores marinos y de tracción ferroviaria son del ciclo de 2 tiempos.

PAR MOTOR Y POTENCIA EFECTIVA

✓ Motores de Ciclo Diésel:

4.- Última etapa, proceso 4-1: esta etapa es un proceso isocórico (escape) es decir a volumen constante.

- Desde la presión final de expansión hasta la presión inicial de compresión.
- Carece de cualquier significado físico y simplemente se emplea para poder cerrar el ciclo ideal.
- Es importante notar cómo, en el ciclo Diésel, no se deben confundir nunca los cuatro tiempos del motor con el ciclo termodinámico que lo idealiza, que sólo se refiere a dos de los tiempos: la carrera de compresión y la de expansión.
- El proceso de renovación de la carga cae fuera de los procesos del ciclo Diésel, y ni tan siquiera es un proceso termodinámico en el sentido estricto.



PAR MOTOR Y POTENCIA EFECTIVA

✓ Motores de Ciclo Diésel:

- Como quiera que el combustible de un motor Diésel tiene que ser muy autoinflamable (gran poder detonante, índice de Cetano alto), ocurre que, mucho antes de que haya terminado la inyección de todo el combustible, las primeras gotas de combustible inyectado se autoinflaman y dan comienzo a una primera combustión caracterizada por ser muy turbulenta e imperfecta, al no haber tenido la mezcla de aire y combustible tiempo suficiente como para homogeneizarse.
- Esta etapa es muy rápida, y en el presente ciclo se obvia.
- Posteriormente, se da, sobre la masa fresca que no ha sido quemada, una segunda combustión, llamada combustión por difusión, mucho más pausada y perfecta, que es la que aquí se simplifica por un proceso isóbaro.
- En esta combustión por difusión se suele quemar en torno al 80% de la masa fresca, de ahí que la etapa anterior se suele obviar.

PAR MOTOR Y POTENCIA EFECTIVA

✓ **Motores de Ciclo Diésel:**

- Sin embargo, también es cierto que la inmensa mayoría del trabajo de presión y de las pérdidas e irreversibilidades del ciclo se dan en la combustión inicial, por lo que omitirla sin más sólo conducirá a un modelo imperfecto del ciclo Diésel.
- Consecuencia de la combustión es el elevamiento súbito del estado termodinámico del fluido, en realidad debido a la energía química liberada en la combustión, y que en este modelo ha de interpretarse como un calor que el fluido termodinámico recibe, y a consecuencia del cual se expande en un proceso adiabático.

COMBUSTIÓN DE UN CARBURANTE

- La forma más habitual de producir calor es mediante una reacción exotérmica de un combustible con oxígeno (reacción de oxidación).
- En la mayoría de los casos, esta reacción se produce de forma rápida y con llama.
- La llama se debe a las altas temperaturas que ocasiona el desprendimiento de calor, el cual produce la incandescencia de los productos de la reacción.
- El aporte del oxígeno necesario para la combustión se puede llevar a cabo de distintas formas: directamente con oxígeno puro, con aire atmosférico que tiene un 21 % en volumen de oxígeno, o bien con aire enriquecido con oxígeno.

COMBUSTIÓN DE UN CARBURANTE

✓ **La combustión de la gasolina:**

Es una reacción química de oxidación:

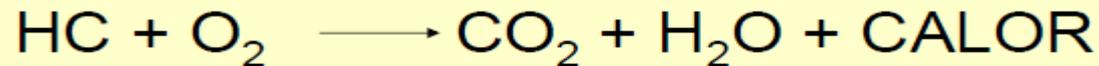


El calor producido es lo que mueve el motor

COMBUSTIÓN DE UN CARBURANTE

✓ Combustión completa e incompleta de un hidrocarburo:

- combustión completa:



- combustión incompleta:



- El NITRÓGENO es INERTE (no reacciona químicamente a no ser que se alcancen temperaturas muy elevadas en las cámaras de combustión)