

Motores y sus sistemas auxiliares

Tema 4. Motores de combustión interna: Termodinámica. Ciclos de funcionamiento

1

4.1 Termodinámica

- ❑ Rama de la física que trata de los efectos mecánicos debidos al calor, y del calor producido por los fenómenos de la naturaleza.
- ❑ Estudia las transformaciones del calor , del trabajo mecánico, y las leyes que obedece los gases en el transcurso de sus evoluciones
- ❑ La energía mecánica se disipa en forma de calor, no es por tanto un fenómeno dinámico, sino *termodinámico*.
- ❑ Joule descubrió la equivalencia entre calor y trabajo, descubrió que cuando se consume una energía mecánica, esta se transforma en forma de calor, dando lugar al 1er principio termodinámico
- ❑ *El calor se convierte en trabajo y viceversa, según una relación constante. Las energías térmicas y mecánicas no pueden destruirse, sino transformarse la una en la otra.*

2

4.1 Termodinámica

- Experimentalmente se calculó que con 1 Kcal se puede producir un trabajo de 427 kgf.m

$$Q = A \cdot W \Rightarrow A = Q / W$$

A=equivalente térmico del trabajo=1/427 kcal/Kgf.m

3

4.2 Sistema termodinámico

- Sistema es cualquier porción de materia que puede ser objeto de estudio. Límite es la superficie real o imaginaria que lo envuelve
- Dos sistemas están en equilibrio térmico, cuando están a la misma temperatura. Si el límite entre dos sistemas impide que se alcance el equilibrio térmico, se dice que es una pared adiabática. Si los límites de los sistemas permiten que se establezca el equilibrio inmediatamente, se dice que la pared es diatérmica.

4

4.2 Sistema termodinámico

□ Tipos de sistemas termodinámicos

- **Cerrado.** Su masa no varía en el transcurso del tiempo.
- **Abierto.** Se mueve en relación a un contorno. Los límites de este sistema se establecen delimitando un volumen denominado volumen de control.
- **Adiabático,** límites adiabáticos.
- **Aislado.** No permite ninguna influencia del exterior, ni térmica, ni calorífica.

□ Los sistemas se caracterizan por sus propiedades (temperatura, presión, volumen, entalpía, entropía). Si se modifica una de estas propiedades, las otras pueden alterarse también

5

4.2 Sistema termodinámico

□ El estado de un sistema, está determinado cuando se conoce el valor de dos de sus propiedades, pues cada tres se relacionan entre sí, por ejemplo, la Temperatura, presión y volumen están relacionadas entre sí. Conociendo el valor de dos propiedades, la tercera, se podrá deducir. La dependencia de estas tres propiedades se expresa mediante la ecuación de estado del sistema:

$$f(p, v, T) = 0$$

□ Cualquier expresión similar que relacione otras propiedades se denomina función de estado

$$f(u, v, T) = 0$$

□ Un sistema está en equilibrio cuando las propiedades del sistema son las mismas en todas las zonas del sistema.

6

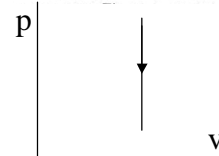
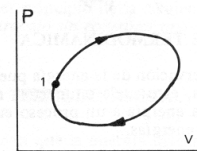
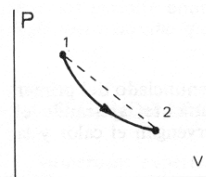
4.3 Transformaciones termodinámicas

- Transformación de un sistema es la sucesión de estados por los que pasa cuando se le somete a un cambio.
- Una transformación es reversible cuando una vez que se produce, se puede reproducir exactamente igual en sentido inverso. Su rendimiento es igual a la unidad
- Es irreversible si no se puede restituir exactamente en sentido inverso. En la práctica todas las transformaciones son irreversibles..

7

4.3 Transformaciones termodinámicas

- En las máquinas térmicas las transformaciones evolucionan en una línea cerrada, denominada ciclo.
- Las transformaciones se pueden representar por medio de un diagrama de estado en el cual se representan dos propiedades, presión y volumen
- Estas transformaciones pueden ser:
 - **Isócoras** o a volumen cte.,
Calentando o enfriando un sistema con paredes rígidas.

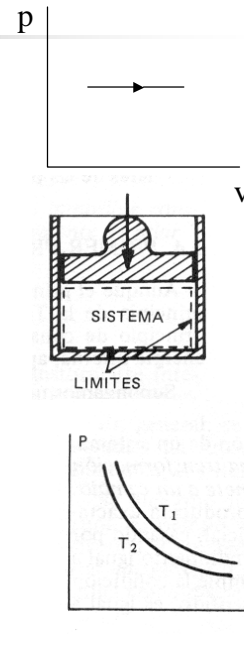


8

4.3 Transformaciones termodinámicas

- **Isóbaras** o a presión cte. Calentado o enfriando un sistema cerrado en el que una de las paredes sea móvil
- **Isotermas** o a temperatura cte. Cuando un gas se comprime o expande istérmicamente sigue la ley de Boyle_Mariotte, de acuerdo con la ecuación:

$$P \cdot V = \text{cte}$$



9

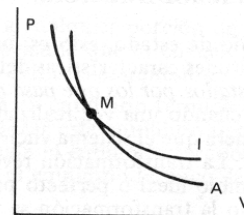
4.3 Transformaciones termodinámicas

- **Adiabática** o isoentrópicas. No hay intercambio de calor con el exterior. La ecuación para este tipo de gases es:

$$P \cdot V^\gamma = \text{cte}$$

- **Politrópicas**. Las transformaciones reales, que están entre las isotermas ($p \cdot v^1 = \text{cte}$) y las adiabáticas ($p \cdot v^\gamma = \text{cte}$). Su ecuación tiene la forma

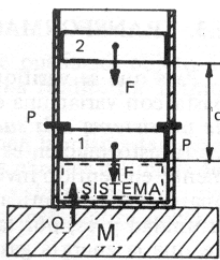
$$p \cdot v^n = \text{cte}$$



10

4.4 Primer principio de la termodinámica

- El primer principio es el llamado de conservación de la energía
- El calor es una energía de paso que atraviesa los límites de dos sistemas como consecuencia de una diferencia de temperaturas entre ambas



Inicialmente el sistema tiene una energía interna U_1

1) Colocamos el cilindro con los pasadores puestos sobre el sistema M mas caliente que le traspasa una cantidad de calor Q

2) Se retiran los pasadores, y el pistón se desplaza hasta 2, aumentando la energía potencial del émbolo, y realizando un trabajo $W=F \cdot d$.

La energía interna final será U_2

11

4.4 Primer principio de la termodinámica

- La energía interna inicial U_1 , mas el calor que recibió Q, menos la energía mecánica que cedió, es igual a la energía interna final U_2 . Lo cual constituye la expresión del primer principio de la termodinámica:

$$U_1 + Q - W = U_2 \implies \Delta U = U_1 - U_2 = Q - W$$

12

4.4 Primer principio de la termodinámica

- Se considera positivo el trabajo cuando se realiza por el sistema contra el medio ambiente (trabajo motor), y el calor es positivo cuando lo recibe el sistema.
- Si el sistema evoluciona de forma que su estado inicial coincide con el estado final (transformación cerrada)

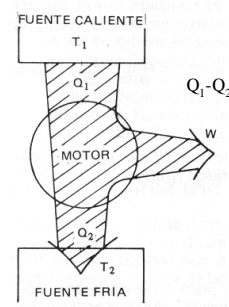
$$U_1 = U_2 \implies Q = W$$

- Es imposible construir una máquina que produzca trabajo sin consumir una cantidad equivalente de calor

13

4.5 Segundo principio de la termodinámica

- Experimentalmente se confirma que solo una parte de la energía calorífica se puede transformar en energía mecánica por una máquina. El resto del calor se queda en el ambiente. Para obtener trabajo del calor es necesario que existan dos fuentes a distintas temperaturas, el motor toma calor de la fuente caliente, cede una parte a la fuente fría, y el resto lo transforma en trabajo.

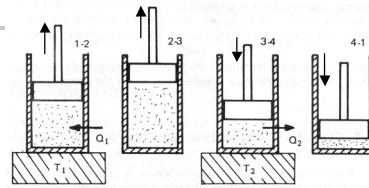


El segundo principio es el llamado de la degradación de la energía

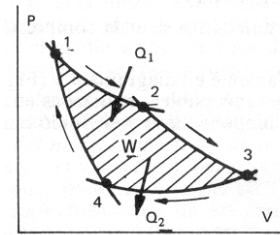
14

4.6 Ciclos térmicos

❑ Carnot diseñó un ciclo teórico que es el ideal a seguir para obtener el máximo rendimiento de una máquina. Comprende 4 fases:



- 1) **Expansión isoterma** de 1 a 2, absorbiendo Q_1 calorías y realizando un trabajo W
- 2) **Expansión adiabática** de 2 a 3, sufriendo un descenso de temperatura
- 3) **Compresión isoterma**, de 3 a 4, desprendiendo Q_2 calorías = al trabajo de compresión del gas
- 4) **Compresión adiabática**



1-2 EXPANSION ISOTERMICA
3-4 COMPRESION ISOTERMICA

15

4.6 Ciclos térmicos

❑ El rendimiento obtenido por este ciclo, suponiendo que no existen fricciones de ningún tipo es:

$$h = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}$$

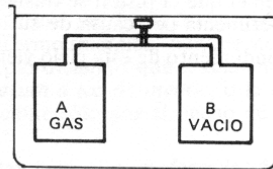
❑ Puede demostrarse que las cantidades de calor suministradas y cedidas son proporcionales a las temperaturas de las fuentes.

$$h = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

❑ Si el ciclo se recorre en sentido de las agujas del reloj, el sistema produce trabajo. El área limitada por las líneas de transformación, representa el trabajo realizado por el fluido.

16

4.7 Entropía



- Un gas perfecto. Si se sumergen en un recipiente y se expansiona el gas, el agua del recipiente no experimenta cambio de temperatura, con lo que el gas no intercambia calor con el agua, con lo que la energía interna del gas se mantiene

$$U_2 - U_1 = \text{cte} \quad \text{ya que } Q = W = 0 \quad \text{con lo que } U_1 = U_2$$

17

4.7 Entropía

- En una expansión isoterma sin trabajo externo, la energía interna no varia.
- Esto solo es cierto para los gases perfectos.
- Para volver al estado inicial, es preciso aportar trabajo, a pesar de que la energía interna (*Entalpía*) no ha variado.
- El gas a sufrido una degradación termodinámica ya que ha perdido capacidad de producir trabajo.
- La magnitud que mide el grado de degradación es la *Entropía*

18

4.7 Entropía

- Del primer principio se deduce que:

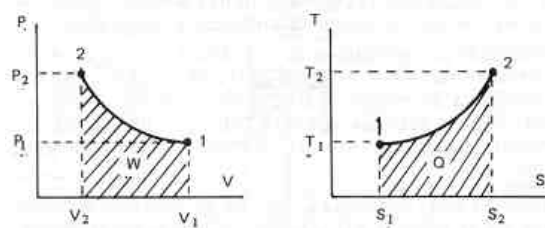
La energía total del universo se mantiene constante

- Del segundo principio :

La entropía del universo va en aumento

19

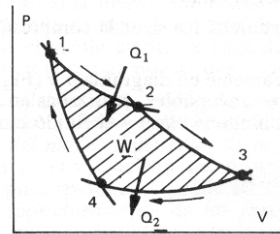
4.7 Entropía



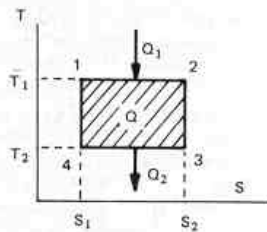
- El trabajo se representa en un diagrama P-V. El calor se representa en un diagrama T-S (temperatura-entropía). Para conocer el calor intercambiado solo es necesario conocer la variación de entropía.

20

4.7 Entropía



1-2 EXPANSION ISOTERMICA
3-4 COMPRESION ISOTERMICA



2-3 EXPANSION ADIABATICA
4-1 COMPRESION ADIABATICA

□ El diagrama de Carnot T-S es el de la figura, donde se aprecia que para el funcionamiento del motor es necesario que haya desnivel térmico

21

4.8 Definición de MCIA

□ Motor térmico: conjunto de elementos mecánicos del cual se obtiene energía mecánica a partir de la energía térmica contenida en un fluido y aportada generalmente por un proceso de combustión

▪ Ejemplos:

- Turbina de gas
- Turbina de vapor
- Motores de combustión interna alternativos (MCIA)

22

4.8 Definición de MCIA

- Alternativo
 - El fluido (aire) se comprime y expande en un volumen cerrado deformable formado por el cilindro el pistón y la culata.
- Combustión interna
 - El aporte de energía se hace en un proceso de combustión dentro del cilindro utilizando el propio fluido como combustible.
 - Existe por tanto una necesidad de un proceso de renovación de la carga

23

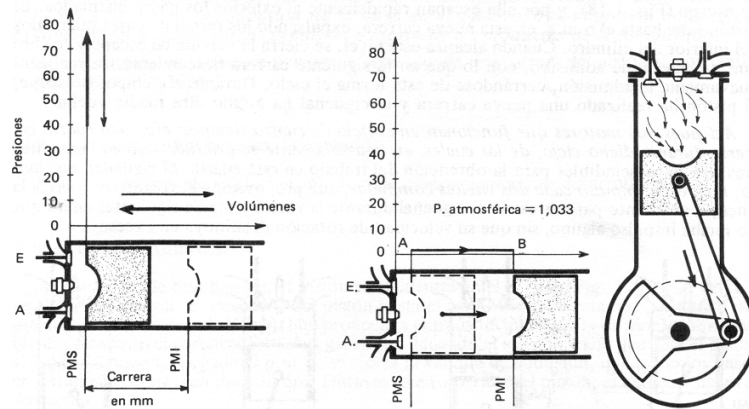
4.9 Tipos de MCIA

- En función del proceso de renovación de la carga:
 - Motores de 2 tiempos
 - Motores de 4 tiempos
- En función del proceso de combustión:
 - Motores de encendido provocado (MEP)
 - Motores de encendido por compresión (MEC).

24

4.10 Ciclos operativos

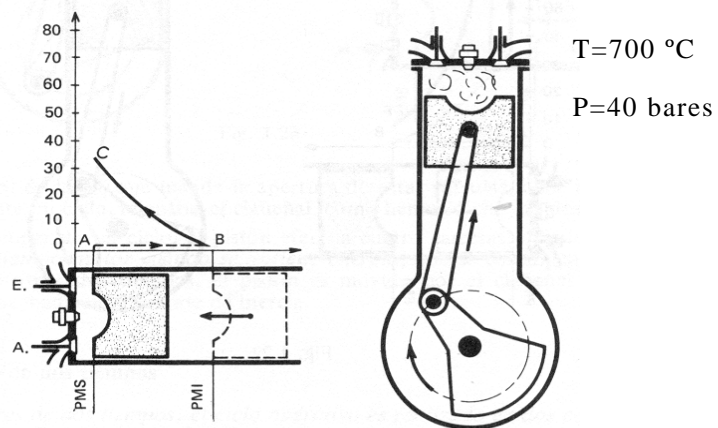
Admisión



25

4.10 Ciclos operativos

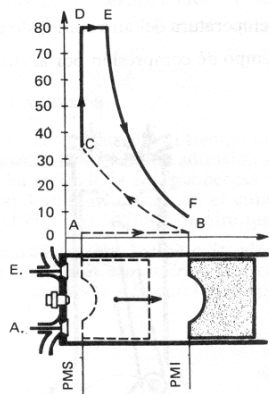
Compresión



26

4.10 Ciclos operativos

Combustión. (MEP)



Hay tres fases:

- 1) Elevación presión C-D
- 2) aumento de presión compensado por aumento de volumen D-E
- 3) Cesa la combustión, y el pistón sigue bajando E-F

27

4.10 Ciclos operativos

Escape

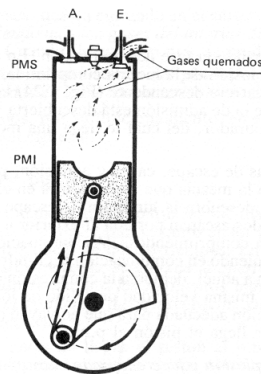


Fig. 1.23

Hay dos fases:

- 1) Al abrirse la válvula, la presión se iguala a la atmosférica F-B
- 2) Al subir el pistón, disminuye el volumen hasta llegar al volumen inicial B-A

28

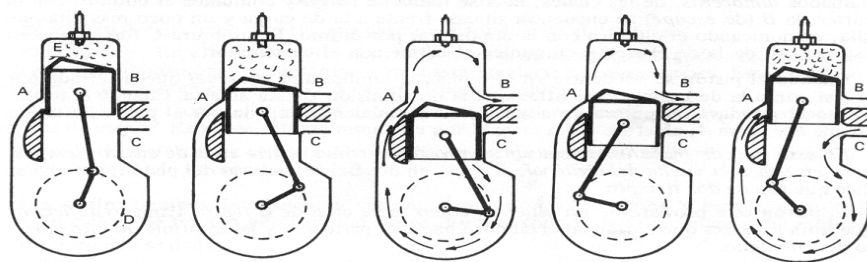
4.10 Ciclos operativos

Conclusiones

- ❑ El cigüeñal da dos vueltas y las válvulas se abren solo una vez cada una., con lo que el árbol de levas solo debe dar una vuelta.
- ❑ Solo se obtiene energía en la carrera de combustión, las otras es el volante de inercia quien debe de suministrar la energía

29

4.10 Ciclos operativos. Ciclo de dos tiempos



A=luz de carga

B=luz de escape

C=luz de admisión

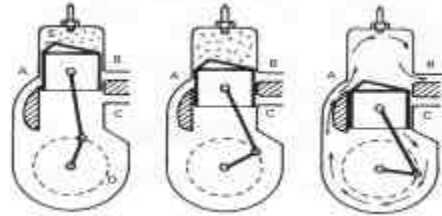
- Pistón en PMS =>A y B cerrada
C abierta

- Pistón en pmi=>C cerrada
A y B abiertas

Ciclo completo en 2 carreras=1 vuelta de cigüeñal. El pistón suele tener un deflector para crear un movimiento de torbellino en la entrada de gases.

30

4.10 Ciclos operativos. Ciclo de dos tiempos



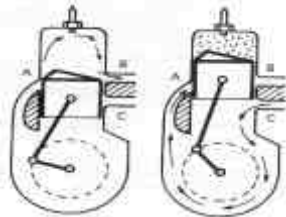
1er tiempo.

- Pistón en PMS terminando compresión. Salta la chispa. Lumbreras de escape y carga cerradas. Admisión abierta, carter recibe gases del carburador, pistón bajando.
- Pistón cierra admisión, comprime el carter
- Abre escape, salen gases y sigue comprimiendo en carter
- Abre carga. Gases del carter entran en cilindro y arrastran a los de escape

Explosión, comienzo de escape, admisión en cilindro

31

4.10 Ciclos operativos. Ciclo de dos tiempos



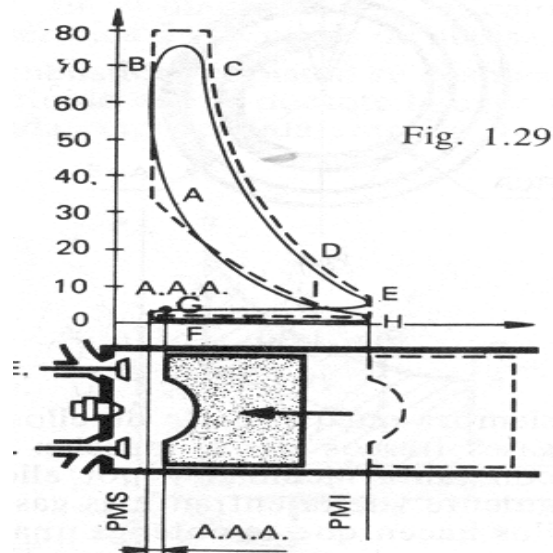
2º tiempo.

- Pistón en pmi terminando escape. Pistón empieza a subir.
- Cierra carga.. Termina admisión, sigue escape. Salen algunos gases frescos por escape. Se crea depresión en el carter.
- Cierra escape. Se comprimen los gases del cilindro, y aumenta la depresión del carter.
- Abre admisión y entran gases frescos en carter debido a la depresión existente en el carter

Admisión, terminado escape, compresión.

32

4.11 Ciclos prácticos

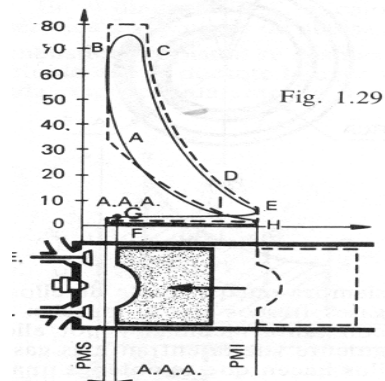


33

4.11 Ciclos prácticos

□ Para obtener mayor rendimiento y funcionamiento mas suave, se modifican los instantes de apertura y cierre de válvulas, así como los instantes de salto de chispa o comienzo de inyección.

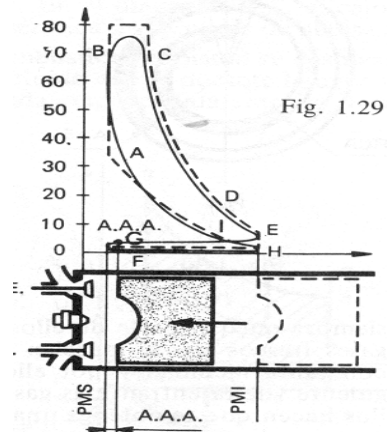
- A = comienza inyección(salta chispa) **AI(AE)**.
- D = apertura escape **AAE**. Favorece salida gases y subida cilindro.



34

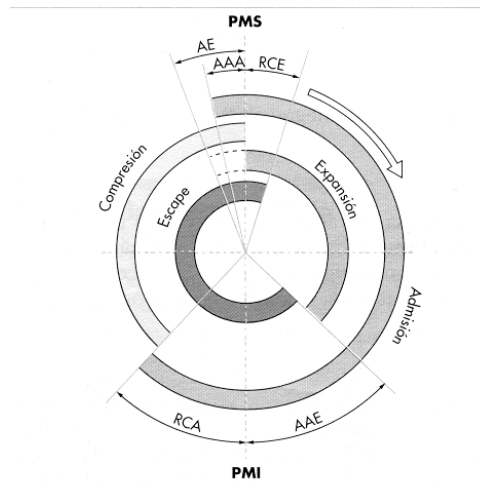
4.11 Ciclos prácticos

- G = Antes del PMS abre admisión
AAA estando aún abierta escape
(cruce de válvulas), gases de admisión
arrastran a los de escape.
- F = Después del PMS cierra escape
(RCE), para favorece salida gases
- I = después del PMI cierra admisión
(RCA), para favorecer entrada gases
por inercia.



35

4.11 Ciclos prácticos



1.7. Diagrama de distribución.

36

4.10 Análisis de ciclos. Diagramas

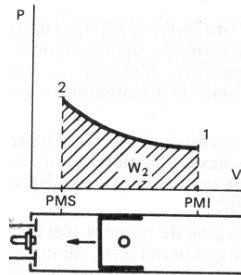
El examen del ciclo de un motor es muy complejo. Se recurre a aproximaciones que se comparan con los ciclos reales.

El trabajo útil es la diferencia entre el trabajo obtenido y el suministrado.

$$h = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}$$

- Tiempo de compresión 1-2

W_2 = trabajo realizado por el pistón durante la compresión 1-2 adiabática

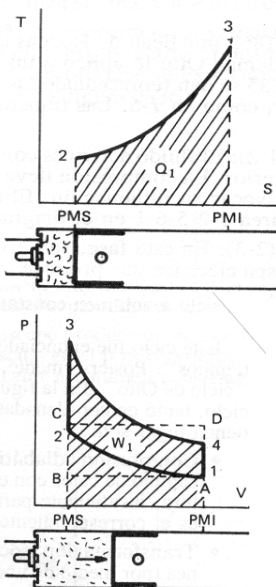


37

4.10 Análisis de ciclos. Diagramas

- Fase de explosión 2-3. El calor liberado en la explosión hace aumentar la temperatura, aumentando la entropía. A volumen constante. Isócara.. Q_1 = calor suministrado por la explosión.

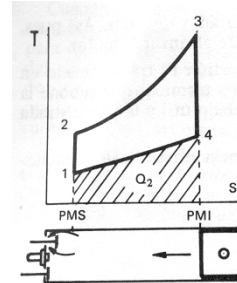
- Durante la expansión 3-4 se produce un trabajo W_1



38

4.10 Análisis de ciclos. Diagramas

Fase de escape 4.1, a volumen cte. Durante esa fase, se extrae el calor Q_2 .
 Línea 4-1 La presión ha descendido



$$\text{Trabajo útil} = W_1 - W_2$$

$$\text{Calor utilizado} = Q_1 - Q_2$$

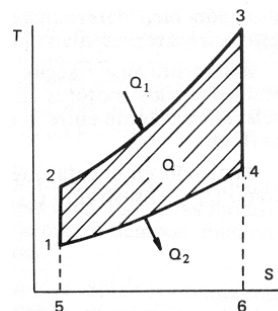
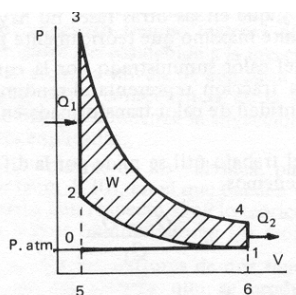
$$\text{Trabajo útil} = \text{calor utilizado } W_1 - W_2 = Q_1 - Q_2$$

Sustracción de calor en escape 1-0, y el fluido entra en admisión 1-0. Ambos efectos se anulan, sin ganancia ni pérdida de trabajo. No se consideran en los diagramas.

39

4.10 Análisis de ciclos. Diagramas

Ciclo a volumen constante. Ciclo Otto.MEP



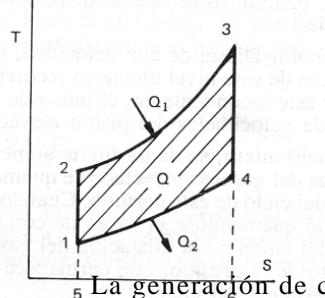
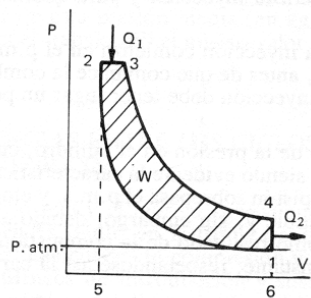
- Compresión adiabática 1-2
- Transformación isócara 2-3
- Expansión adiabática 3-4
- Expansión y transformación isócara 4-1

Supone que la combustión es instantánea en el PMS, limita la Relación de compresión

40

4.10 Análisis de ciclos. Diagramas

Ciclo a presión cte. Diesel.MEC



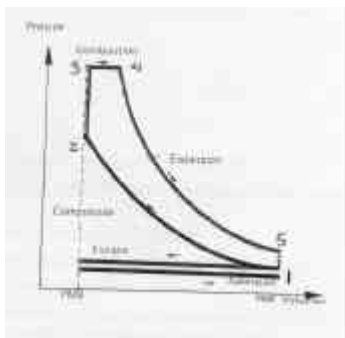
- Compresión adiabática 1-2
- Transformación isóbara 2-3
- Expansión adiabática 3-4
- Descenso de presión 4-1

La generación de calor se produce a presión cte. Llenado y vaciado a Patm. La Rc pueden ser mas elevadas. Se utiliza en diesel lentos.

41

4.10 Análisis de ciclos. Diagramas

Ciclo mixto.Sabatthe.MEC



- Compresión diabática 1-2
- Compresión isócara 2-3
- Expansión isóbara 3-4
- Expansión adiabática 4-5
- Descenso de presión 5-1

Se utiliza en diesel rápidos. En un primer instante hay un aumento brusco de la presión y cuando comienza a bajar el cilindro, esta se compensa con el aumento de volumen.

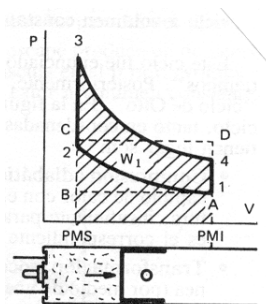
42

4.10 Análisis de ciclos. Diagramas

- El empuje que recibe el pistón es uniforme, en los motores con ciclo de $p=\text{cte}$, lo que supone que el par motor sea cte en todos los regímenes de giro, característica de los motores diesel
- Los rendimientos suben con la Rc.Diesel entre 14 y 25/1, gasolina 10/1
- Si comparamos a igualdad de Rc y de calor suministrado, el motor de gasolina alcanza mayores T y presiones, con lo que el rendimiento sería mayor.
- Si comparamos a igualdad de P_{max} y Cantidad de calor suministrado, el motor diesel tiene mayor rendimiento.
- En la figura anterior del Ciclo P-V $AD=P_{\text{media}}$, el trabajo útil sera: $W_{\text{util}}=P_{\text{med}}(\text{kg/cm}) \cdot V(\text{cm}^3)$ $V=\text{cilindrada}$

43

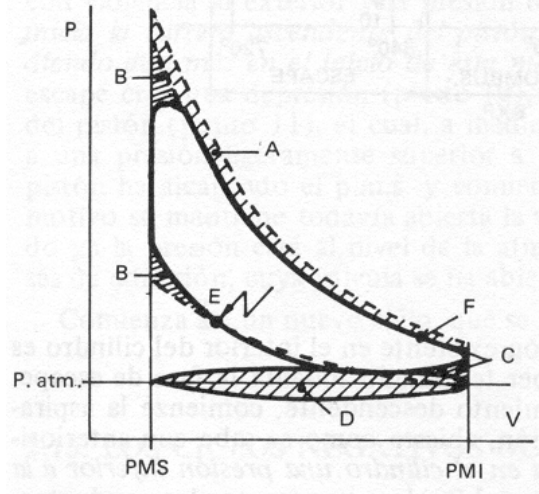
4.10 Análisis de ciclos. Diagramas



- En la figura anterior del Ciclo P-V $AD=P_{\text{media}}$, el trabajo útil sera: $W_{\text{util}}=P_{\text{med}}(\text{kg/cm}) \cdot V(\text{cm}^3)$ $V=\text{cilindrada}$

44

4.11 Diferencias entre ciclos teóricos y reales. Motores explosión



45

4.11 Diferencias entre ciclos teóricos y reales. Motores explosión

Pérdidas de calor. (A)

Lineas de compresión y expansión politrópicas, debido a perdidas de calor por las paredes del cilindro

Combustión no instantanea (B)

Debido a la pequeña duración del encendido, es necesario adelantar este.(E). Se redondea la línea teórica

Tiempo de apertura de escape(C)

La válvula de escape abre antes del pmi para que le de tiempo a descender la presión.

Carreras de escape y admisión(D)

Se realizan por encima y por debajo de la P_a , lo que ocasiona pérdidas por bombeo.

46

4.11 Diferencias entre ciclos teóricos y reales. Motores explosión

Disociación de la combustión

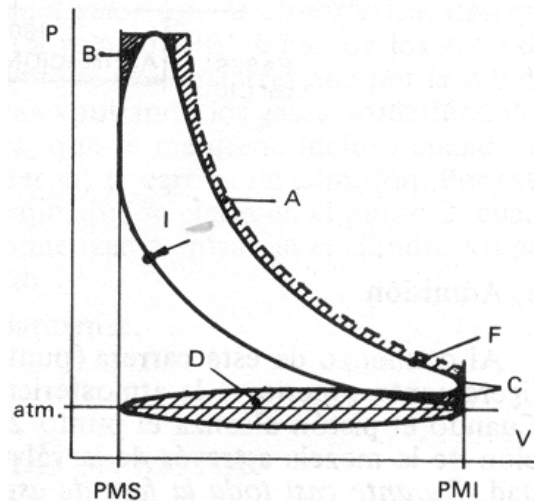
- En motores de explosión, además de CO_2 y de H_2O , se obtienen otros compuestos como CO , H y O_2 , debido a la escasez de aire, esto se realiza con absorción de calor

Aumento del calor específico del fluido con la temperatura

- Los calores específicos (cantidad de calor que hay que suministrar a un fluido para que su temperatura suba un grado) a presión y volumen cte aumentan con la temperatura, por tanto las temperaturas y presión que se obtienen con la combustión son menores que las del ciclo teórico.

47

4.11 Diferencias entre ciclos teóricos y reales. Motores diesel



48

4.11 Diferencias entre ciclos teóricos y reales. Motores diesel

Las diferencias entre los diagramas real y teórico son similares a las ya vistas para el motor de explosión, con algunas diferencias

Combustión a presión cte.

La combustión se realiza una parte a $V=cte$, y otra a $P=cte$. $I=$ comienzo de inyección.

Disociación de los productos de la combustión

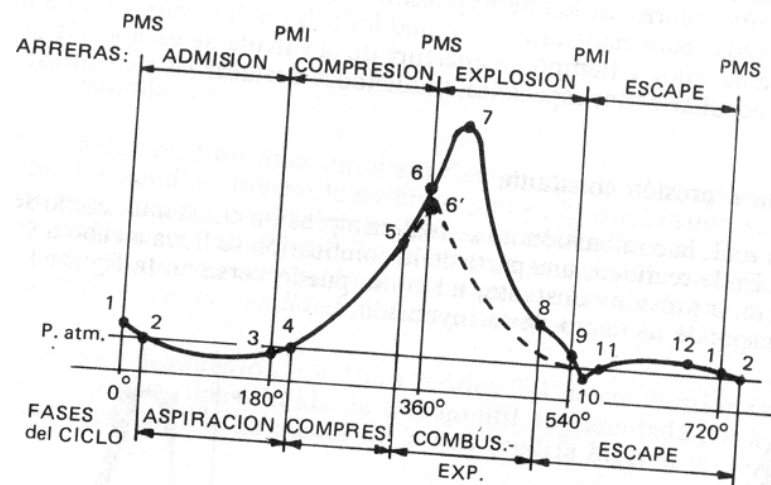
Su efecto es mucho menor, ya que la combustión se realiza en exceso de aire

Pérdidas por bombeo

Son menores, ya que no hay apenas dificultad para la entrada de aire en el cilindro.

49

4.12 Análisis de diagramas reales



50

4.12 Análisis de diagramas reales

Admisión

- 1=comienzo carrera
- 2=comienzo admisión.depresión prop. Velocidad gas. 3=comienzo carrera ascendente. Todavía en depresion
- 4=igual a presión a atmosferica(cierra admisión)

Compresión

- Desde 4 hasta 6'si no empezase la combustión en 5

Combustión y expansión

- combustión desde 5 hasta 7 (máxima presión)
- 8 apertura de escape

Escape

- En 8, descenso brusco de presión, que en 9 casi iguala a la atmosférica
- En 10 debido a al vel. de salida de los gases se crea depresión
- En 11 se iguala a la atmosférica. 12 apertura admisión. 2 cierre escape

4.13 Ciclo negativo de trabajo de un motor

