

TD. T5.- Ciclos de Potencia

Las transparencias son el material de apoyo del profesor para impartir la clase. No son apuntes de la asignatura. Al alumno le pueden servir como guía para recopilar información (libros, ...) y elaborar sus propios apuntes

Departamento: Ingeniería Eléctrica y Energética
Area: Máquinas y Motores Térmicos

CARLOS J RENEDO renedoc@unican.es
Despachos: ETSN 236 / ETSIIT S-3 28
<http://personales.unican.es/renedoc/index.htm>
Tlfn: ETSN 942 20 13 44 / ETSIIT 942 20 13 82

1

TD. T5.- Ciclos de Potencia

Objetivos:

Este tema es el más extenso del bloque, en él se estudian los ciclos termodinámicos, destinados a la obtención de potencia o trabajo. En primer lugar se abordan los ciclos de vapor, para finalizar con los ciclos de gas. Se estudiarán tanto los ciclos simples como los mejorados con recalentamiento, regeneración, extracción, o refrigeración intermedia

El tema se complementa con una práctica de laboratorio sobre la simulación por ordenador de ciclos termodinámicos de potencia

2

1.- Introducción

2.- Ciclos de Vapor

- 2.1.- Ciclo de Carnot
- 2.2.- Ciclo Rankine
- 2.3.- Ciclo Rankine con recalentamiento
- 2.4.- Ciclo Rankine con regeneración
- 2.5.- Ciclo Rankine con regeneración y recalentamiento
- 2.6.- Ciclo Rankine supercrítico
- 2.7.- Pérdidas en el ciclo Rankine

3.- Ciclos de Aire

- 3.1.- Compresores
- 3.2.- Ciclo de aire estándar
- 3.3.- Ciclo de Carnot
- 3.4.- Ciclo Otto
- 3.5.- Ciclo Diesel
- 3.6.- Ciclo Dual
- 3.7.- Ciclos Ericson y Stirling
- 3.8.- Ciclo Brayton
- 3.9.- Ciclo Brayton regenerativo
- 3.10.-Ciclo Brayton con recalentamiento
- 3.11.- Ciclo Brayton regenerativo con recalentamiento y refrigeración

4.- Ciclo Combinado

5.- Cogeneración

6.- Máquinas Térmicas

- 6.1.- Turbinas de vapor
- 6.2.- Motores de combustión
- 6.3.- Turbinas de gas
- 6.4.- Motor Stirling

3.- Ciclos de Gas (I)

3.1.- Compresores (I)

Comprimen, mediante el empleo de un trabajo exterior, un gas (aire, o mezcla) o un vapor, elevando su T^a

El trabajo aplicado al compresor es:

$$W_{\text{compS}} = h_{\text{Salida}} - h_{\text{Entrada}}$$

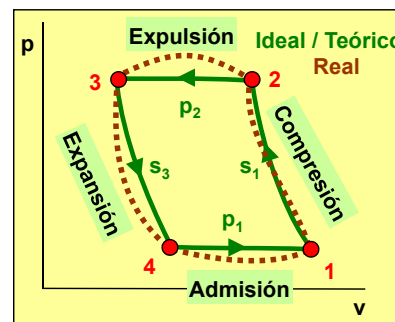
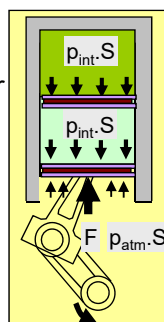
Por unidad de masa

Los **compresores volumétricos**:

- Para bajos caudales
- Las válvulas hacen que el ciclo real sea mayor

Las etapas del ciclo de compresión son:

- 1-2 compresión (s cte)
- 2-3 expulsión (p cte) (abre val. de escape)
- 3-4 expansión (s cte)
- 4-1 admisión (p cte) (abre val. de adm.)



$$\eta_{\text{Vol}} = \frac{V_1 - V_4}{V_1 - V_3}$$

$\eta \uparrow$ al \downarrow el espacio muerto (V_3)
(al modificar V_3 también lo hace V_4)

técnicamente es necesario por las válvulas y las tolerancias mecánicas

3.- Ciclos de Gas (II)

3.1.- Compresores (II)

W_{comp} se puede \downarrow si se extrae Q, (refrigerando)

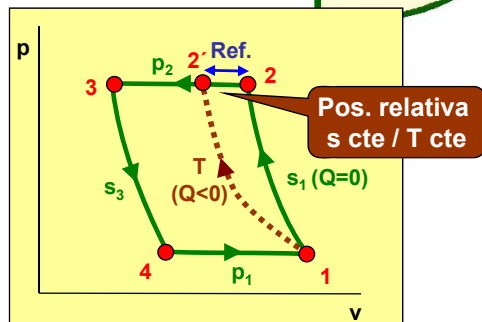
Suponiendo la compresión adiabática es:

$$W_{comp} = h_2 - h_1$$

$$[T2] \quad c_p = \frac{\Delta h}{\Delta T} \quad W_{comp} = c_p \cdot (T_2 - T_1)$$

Si la capacidad térmica es cte, en una compresión con $s = cte$:

$$[T1] \quad T_2 = T_1 \cdot \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$



De esta manera se puede expresar el trabajo como:

$$W_{comp} = \frac{\gamma \cdot R}{\gamma - 1} \cdot T_1 \cdot \left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right]$$

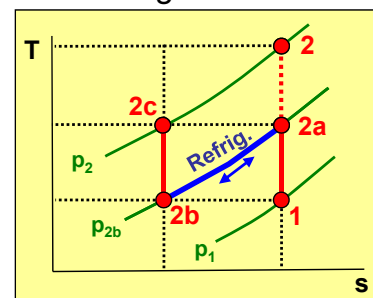
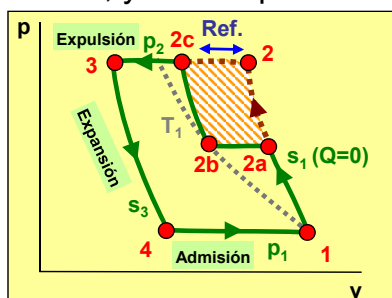
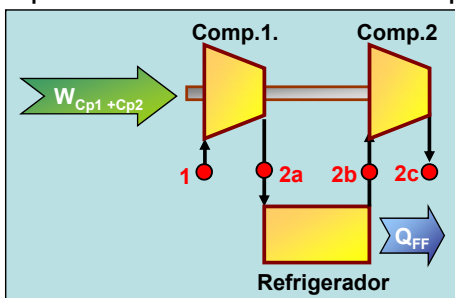
Por unidad de masa

Interesa T_1 baja

3.- Ciclos de Gas (III)

3.1.- Compresores (III)

Constructivamente es difícil refrigerar en el interior del compresor; en la práctica se instalan dos compresores, y una etapa intermedia de refrigeración



W_{comp} es suma de dos etapas

$$W_{comp} = \frac{\gamma \cdot R}{\gamma - 1} \cdot T_1 \cdot \left[\left(\frac{p_{2a}}{p_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] + \frac{\gamma \cdot R}{\gamma - 1} \cdot T_{2b} \cdot \left[\left(\frac{p_2}{p_{2b}}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right]$$

La refrigeración ideal es la que iguala la T de entrada a la segunda etapa a la de entrada a la primera; además será ideal si no se pierde presión

$$T_1 = T_{2b} ; p_{2a} = p_{2b}$$

3.- Ciclos de Gas (IV)

3.1.- Compresores (IV)

$$W_{\text{comp}} = \frac{\gamma \cdot R}{\gamma - 1} \cdot T_1 \cdot \left[\left(\frac{p_{2a}}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] + \frac{\gamma \cdot R}{\gamma - 1} \cdot T_{2b} \cdot \left[\left(\frac{p_2}{p_{2b}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right]$$

Para optimizar la presión intermedia, p_c : $\frac{dw}{dp_c} = 0$

Se obtiene: $p_c = \sqrt{p_1 \cdot p_2}$ $\frac{p_c}{p_1} = \frac{p_2}{p_d}$

Es decir, la relación de presiones es la misma en cada etapa

Si la compresión se realizara en más etapas esta regla se mantendría

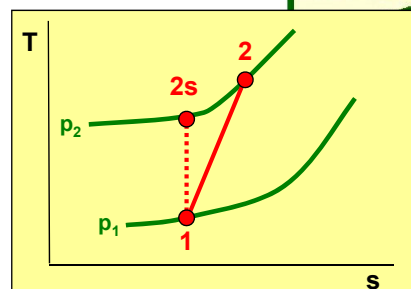
$$\frac{p_c}{p_1} = \frac{p_e}{p_d} = \frac{p_2}{p_f} \quad p_c = \sqrt[3]{p_1^2 \cdot p_2} \quad p_e = \sqrt[3]{p_1 \cdot p_2^2}$$

Los **compresores centrífugos y axiales**

- aptos para grandes caudales de gas
- proporcionan pequeñas relaciones de compresión
- si se desea alcanzar grandes presiones es necesario colocar varias etapas

3.- Ciclos de Gas (V)

3.1.- Compresores (V)



El Compresor tiene un rendimiento isoentrópico

$$\eta_{s \text{ comp}} = \frac{W_{s \text{ comp}}}{W_{\text{comp}}}$$

$$\begin{cases} W_{s \text{ comp}} = h_{2s} - h_1 \\ W_{\text{comp}} = h_2 - h_1 \end{cases}$$

$$\eta_{s \text{ comp}} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1}$$

$$h_2 = h_1 + \frac{h_{2s} - h_1}{\eta_{s \text{ comp}}}$$

[T2] $c_p = \frac{\Delta h}{\Delta T} \Rightarrow \Delta h = c_p \cdot \Delta T$

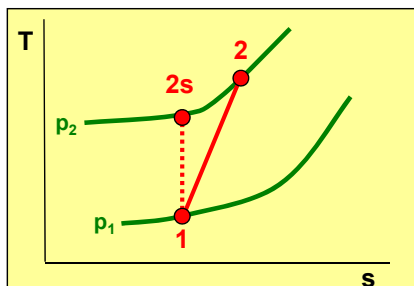
$$\begin{cases} W_{s \text{ comp}} = c_p \cdot (T_{2s} - T_1) \\ W_{\text{comp}} = c_p \cdot (T_2 - T_1) \end{cases}$$

$$\eta_{s \text{ comp}} = \frac{T_{2s} - T_1}{T_2 - T_1}$$

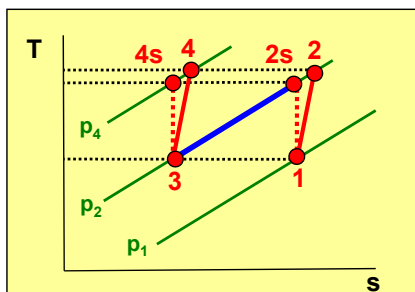
• con $s = \text{cte}$: [T1] $T_{2s} = T_1 \cdot \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$

$$T_2 = T_1 + \frac{T_{2s} - T_1}{\eta_{s \text{ comp}}}$$

Un compresor volumétrico debe proporcionar 20 kg/min de aire a 1.600 kPa. Al compresor le entra aire atmosférico a 20°C. Determinar el trabajo necesario si se supone que el compresor tiene un rendimiento del 90%



Si para realizar la compresión anterior se utilizan dos compresores, de rendimiento del 90%, con una refrigeración intermedia. Determinar el trabajo necesario



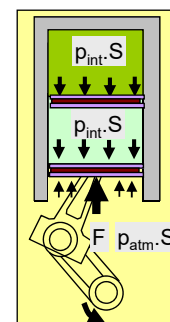
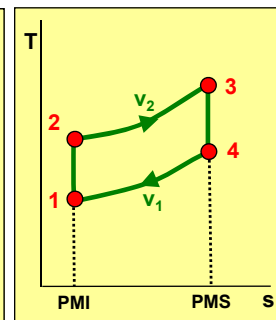
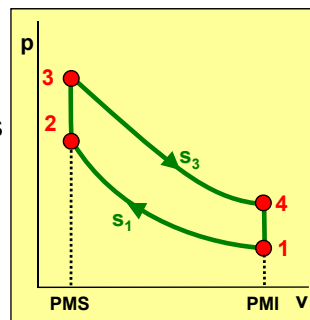
3.- Ciclos de Gas (VI)

3.2.- Ciclo de Aire Estándar

Formado por dos adiabáticas y dos isócoras

Se supone:

- un ciclo de trabajo
- todo es aire, el combustible es “despreciable”
- gas ideal, capacidades caloríficas constantes
- no existe proceso de admisión
- el escape es una transferencia de calor al exterior a volumen constante
- los PMS y PMI son los volúmenes mínimo y máximo, (V_{PMS} y V_{PMI})
- el volumen correspondiente al PMS es el espacio muerto



$$\text{Cilindrada} = V_{PMI} - V_{PMS} = V_1 - V_2$$

$$\text{Relación de compresión} : r_{cmp} = \frac{V_{PMI}}{V_{PMS}} = \frac{V_1}{V_2}$$

$$\% \text{ de volumen muerto} : c = \frac{V_{PMS}}{\text{Cilindrada}} = \frac{V_{PMS}}{V_{PMI} - V_{PMS}} = \frac{V_2}{V_1 - V_2}$$

Inicio y final de la combustión

$$P \text{ media efectiva} : PME = \frac{W_{ciclo}}{\text{Cilindrada}} = \frac{W_{ciclo}}{V_1 - V_2}$$

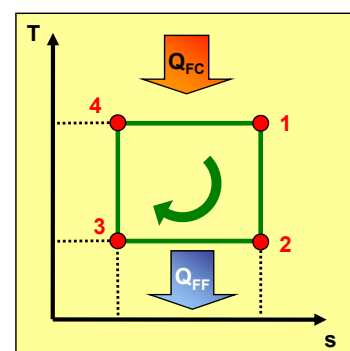
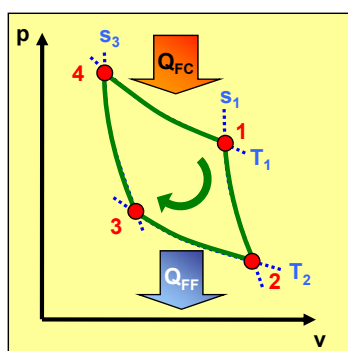
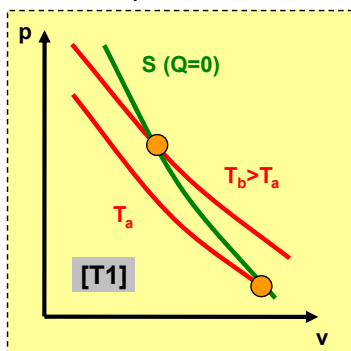
$$\text{Relación de corte} : r_{crt} = \frac{V_{Inicio \text{ Comb}}}{V_{Fin \text{ Comb}}} = \frac{V_3}{V_2}$$

3.- Ciclos de Gas (VII)

3.3.- Ciclo de Carnot

Formado por dos adiabáticas y dos isotermas

- 4 a 1 expansión a T cte en la que se transfiere calor, Q_{FC} , de un foco caliente a T_{FC}
- 1 a 2 expansión a s cte
- 2 a 3 compresión a T cte en la que se transfiere calor, Q_{FF} , a un foco frío a T_{FF}
- 3 a 4 compresión a s cte



$$W = Q_{FC} - Q_{FF}$$

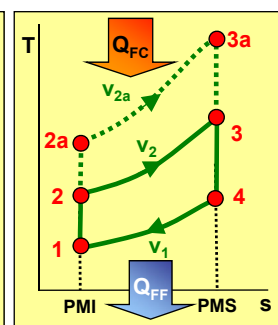
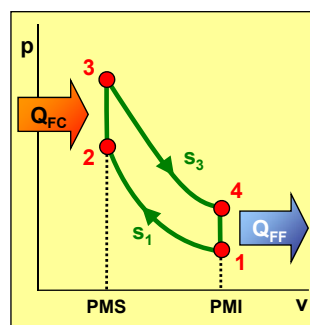
$$\eta = \frac{W}{Q_{FC}} = \frac{Q_{FC} - Q_{FF}}{Q_{FC}} = 1 - \frac{Q_{FF}}{Q_{FC}} = 1 - \frac{T_{FF}}{T_{FC}}$$

3.- Ciclos de Gas (VIII)

3.4.- Ciclo Otto (I)

Formado por dos adiabáticas y dos isócoras

- Se comprime el aire a s cte (1-2)
- Se realiza la combustión brusca, necesita una chispa que la inicie; el calor generado eleva la presión interior (2-3) a v cte
- Se produce una expansión a s cte (3-4)
- Finalmente se comunica a v cte el calor al exterior (4-1)



$$Q_{FC} = m_{\text{aire}} \cdot c_v \cdot (T_3 - T_2)$$

$$Q_{FF} = m_{\text{aire}} \cdot c_v \cdot (T_4 - T_1)$$

Isoentrópicas ($p \cdot v^\gamma = \text{cte}$)
(1-2, y 3-4)

Isocoras ($v = \text{cte}$), (2-3, y 4-1):

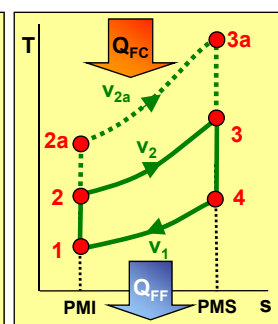
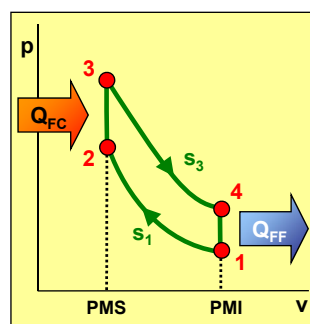
$$\eta_{\text{Otto}} = 1 - \frac{1}{r_{\text{cmp}}^{\gamma-1}}$$

13

3.- Ciclos de Gas (IX)

3.4.- Ciclo Otto (II)

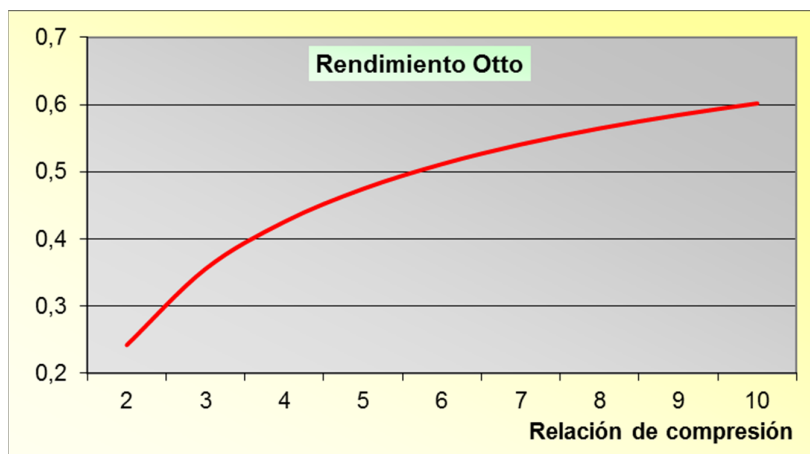
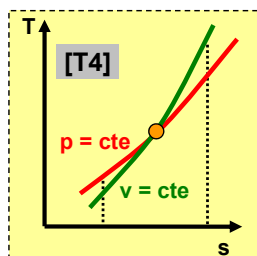
$$\eta_{\text{Otto}} = 1 - \frac{1}{r_{\text{cmp}}^{\gamma-1}}$$



En el ciclo Otto, al $\uparrow r_{\text{cmp}}$ $\uparrow \eta$

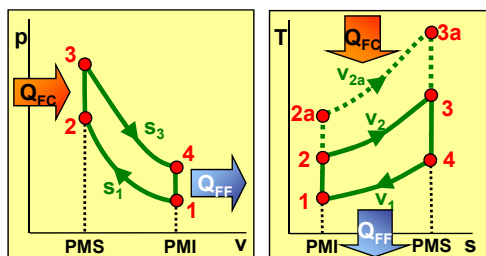
Si $\uparrow T_3$ y V_3 , $\eta \uparrow$, la isóbara y la isócora divergen;

($Q_{FC} \uparrow$ pero $W \uparrow \uparrow$)



4

Un motor de ignición forzada tiene una relación de compresión de 10, mientras funciona con T^a mínima de 200°C y presión de mínima de 200 kPa. Si el trabajo que debe proporcionar es 1.000 kJ/kg. Calcular el rendimiento térmico máximo posible y comparar con un ciclo de Carnot. Calcular la PME



15

3.- Ciclos de Gas (X)

3.5.- Ciclo Diesel (I)

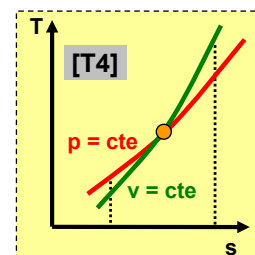
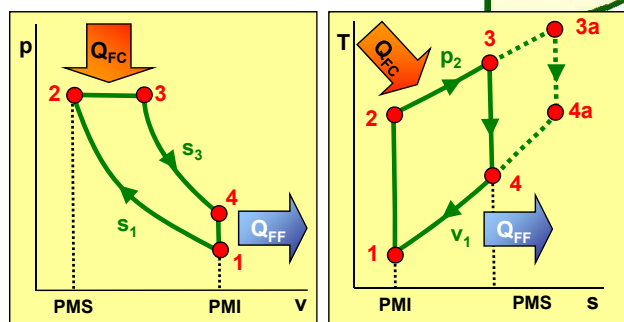
Si r_{cmp} es grande (>14) autodetona el combustible sin necesidad de chispa

- Se comprime el aire a s cte (1-2)
- La p hace que detone, el calor provoca una expansión con p cte (2-3)
- Se produce una expansión a s cte (3-4)
- Se comunica el calor al exterior a v cte (4-1)

Isóbara ($p = \text{cte}$): (2-3)

Adiabáticas: ($p \cdot v^{\gamma} = \text{cte}$)

Isocora ($v = \text{cte}$): (4-1)



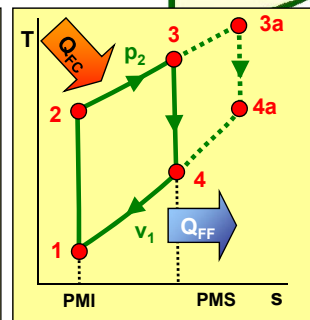
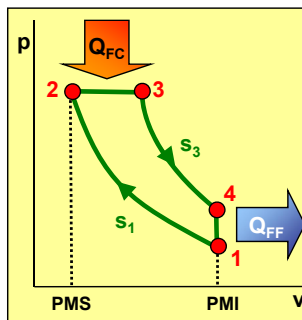
16

3.- Ciclos de Gas (XI)

3.5.- Ciclo Diesel (II)

$$Q_{FC} = m_{aire} \cdot c_p \cdot (T_3 - T_2)$$

$$Q_{FF} = m_{aire} \cdot c_v \cdot (T_4 - T_1)$$



$$\eta_{Diesel} = 1 - \frac{1}{\gamma \cdot r_{cmp}^{\gamma-1}} \cdot \frac{r_{crt}^{\gamma} - 1}{(r_{crt} - 1)}$$

En el ciclo Diesel, al $\uparrow r_{cmp} \uparrow \eta$ (al igual que en el ciclo Otto)

Para una $r_{cmp} \eta_{Otto} > \eta_{Diesel}$

En la práctica $r_{cmp \text{ Diesel}} > r_{cmp \text{ Otto}}$ y $\eta_{Otto} < \eta_{Diesel}$

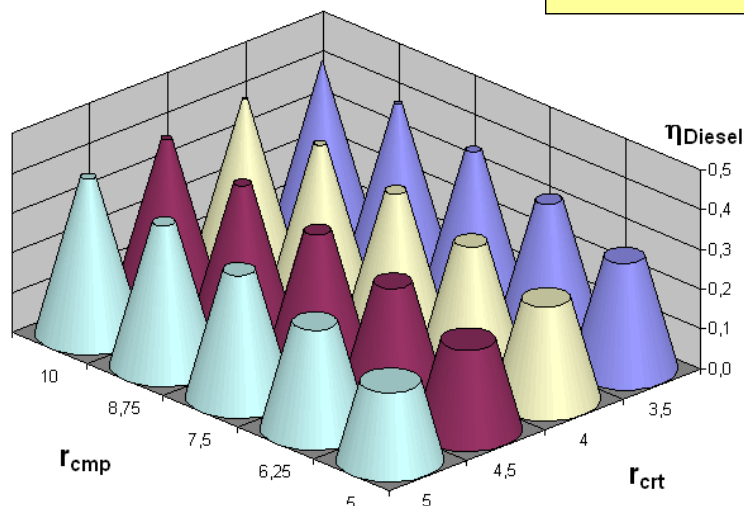
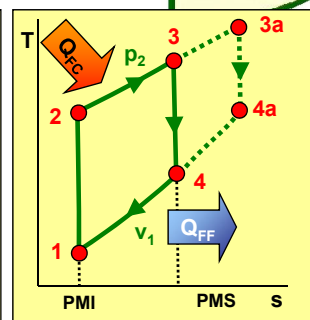
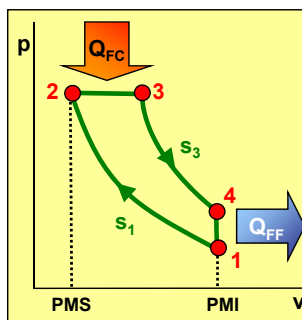
Si $\uparrow T_3$ y V_3 , $\eta \downarrow$, la isóbara y la isócara convergen; $W \uparrow$ pero $Q_{FC} \uparrow \uparrow$

(En el ciclo Otto este efecto es contrario)

3.- Ciclos de Gas (XII)

3.5.- Ciclo Diesel (III)

$$\eta_{Diesel} = 1 - \frac{1}{\gamma \cdot r_{cmp}^{\gamma-1}} \cdot \frac{r_{crt}^{\gamma} - 1}{(r_{crt} - 1)}$$

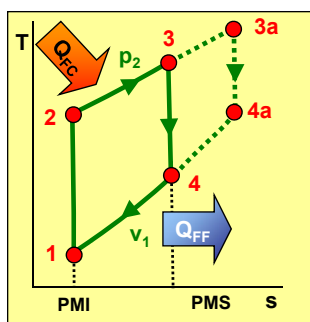
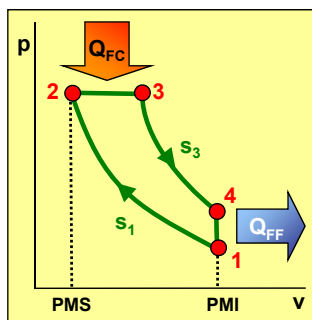


En el ciclo Diesel:

- al $\uparrow r_{cmp} \uparrow \eta$
- al $\uparrow r_{crt} \downarrow \eta$

$$r_{cmp} = \frac{V_1}{V_2} \quad r_{crt} = \frac{V_3}{V_2}$$

Un ciclo diesel con una relación de compresión de 18 funciona con aire y presión de mínima de 200 kPa y Tª mínima de 200°C. Si el trabajo producido es de 1.000 kJ/kg. Calcular el rendimiento térmico máximo posible y compara con un ciclo de Carnot. Calcular la PME, y comparar con un ciclo Otto funcionando con la misma presión máxima



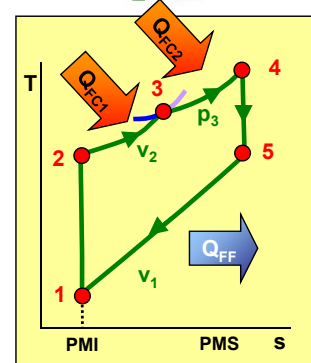
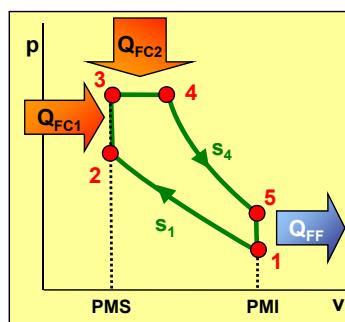
19

3.- Ciclos de Gas (XIII)

3.6.- Ciclo Dual (I)

Modela la combustión en dos etapas:

- una primera a v cte (Otto)
- otra segunda a p cte (Diesel)
- Se inicia comprimiendo a s cte (1-2)
- Se suministra calor a v cte (2-3) [Otto]
- Se sigue comunicando calor, pero a p cte (3-4) [Diesel]
- Se produce una expansión a s cte (4-5)
- Finalmente se comunica el calor al exterior a v cte (5-1)



$$r_{\text{crt}} = \frac{V_4}{V_2} = \frac{V_4}{V_3}$$

Final e inicio de la combustión

Si el motor es Otto el punto 3 es coincidente con el 4, y si el Diesel el 2 con el 3

$$Q_{\text{FC}} = m_{\text{aire}} \cdot [c_v \cdot (T_3 - T_2) + c_p \cdot (T_4 - T_3)]$$

$$Q_{\text{FF}} = m_{\text{aire}} \cdot c_v \cdot (T_5 - T_1)$$

Relación de presiones: $r_p = \frac{p_4}{p_2} = \frac{p_3}{p_2}$

Final e inicio de la combustión

$$\eta_{\text{Dual}} = 1 - \frac{T_5 - T_1}{T_3 - T_2 + \gamma \cdot (T_4 - T_3)}$$

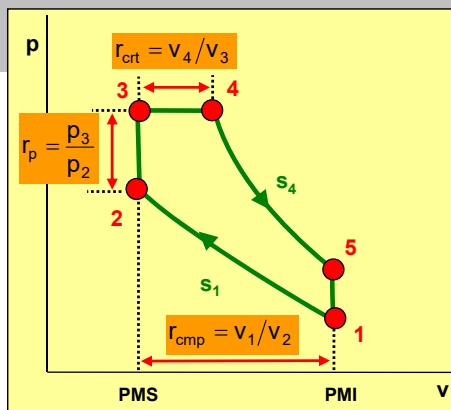
$$\eta_{\text{Dual}} = 1 - \frac{1}{r_{\text{cmp}}^{\gamma-1}} \cdot \frac{r_p \cdot r_{\text{crt}}^{\gamma} - 1}{\gamma \cdot r_p \cdot (r_{\text{crt}} - 1) + r_p - 1}$$

20

3.- Ciclos de Gas (XIV)

3.6.- Ciclo Dual (II)

$$\eta_{\text{Dual}} = 1 - \frac{1}{r_{\text{cmp}}^{\gamma-1}} \cdot \frac{r_p \cdot r_{\text{crt}}^{\gamma} - 1}{\gamma \cdot r_p \cdot (r_{\text{crt}} - 1) + r_p - 1}$$

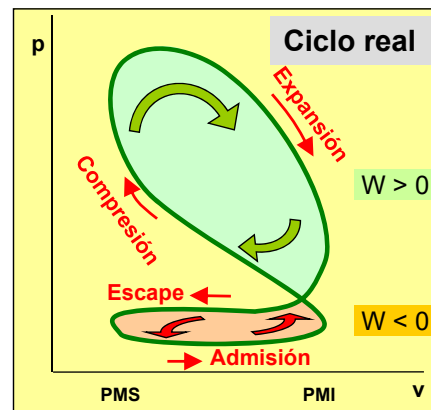


En el ciclo Otto $r_{\text{crt}} = 1$ $r_{\text{crt}} = V_4/V_3$

$$\eta_{\text{Dual}} \Big|_{r_{\text{crt}} = 1} = 1 - \frac{1}{r_{\text{cmp}}^{\gamma-1}} \cdot \frac{r_p - 1}{0 + r_p - 1} = 1 - \frac{1}{r_{\text{cmp}}^{\gamma-1}} = \eta_{\text{Otto}}$$

En el ciclo Diesel $r_p = 1$ $r_p = p_3/p_2$

$$\eta_{\text{Dual}} \Big|_{r_p = 1} = 1 - \frac{1}{r_{\text{cmp}}^{\gamma-1}} \cdot \frac{r_{\text{crt}}^{\gamma} - 1}{\gamma \cdot (r_{\text{crt}} - 1) + 0} = 1 - \frac{1}{\gamma \cdot r_{\text{cmp}}^{\gamma-1}} \cdot \frac{r_{\text{crt}}^{\gamma} - 1}{(r_{\text{crt}} - 1)} = \eta_{\text{Diesel}}$$



← 4 carreras / 4 tiempos →