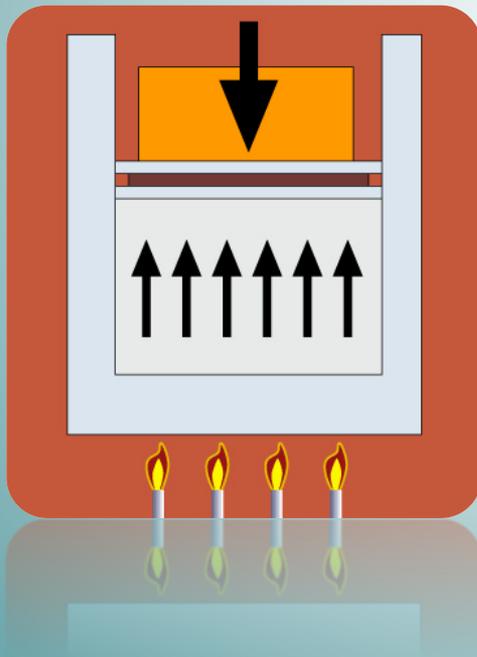


Termodinámica y Termotecnia

Tema 06. Ciclos de Potencia



Inmaculada Fernández Diego
Severiano F. Pérez Remesal
Carlos J. Renedo Estébanez

DPTO. DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ENERGÉTICA

Este tema se publica bajo Licencia:

[Creative Commons BY-NC-SA 3.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/)

T 06.- Ciclos de Potencia

Objetivos:

Este tema es el más extenso, 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

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

1.- Introducción (I)

Los ciclos termodinámicos son la base de la utilización energética

En los ciclos de potencia:

- Se extrae calor (combustible), Q_{FC} , de un foco a alta temperatura, T_{FC}
- Se obtiene trabajo útil, W
- Se cede calor residual Q_{FF} , a un foco a baja temperatura, T_{FF} (aire ambiente, o agua de mar, de un río, ...)

Se cumple la condición de equilibrio de la energía:

[T2] Sist. Ab.

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

$$w = \int_1^2 v dp \quad \text{En bombas (liq) } v \approx \text{cte} \Rightarrow w = v (p_2 - p_1)$$

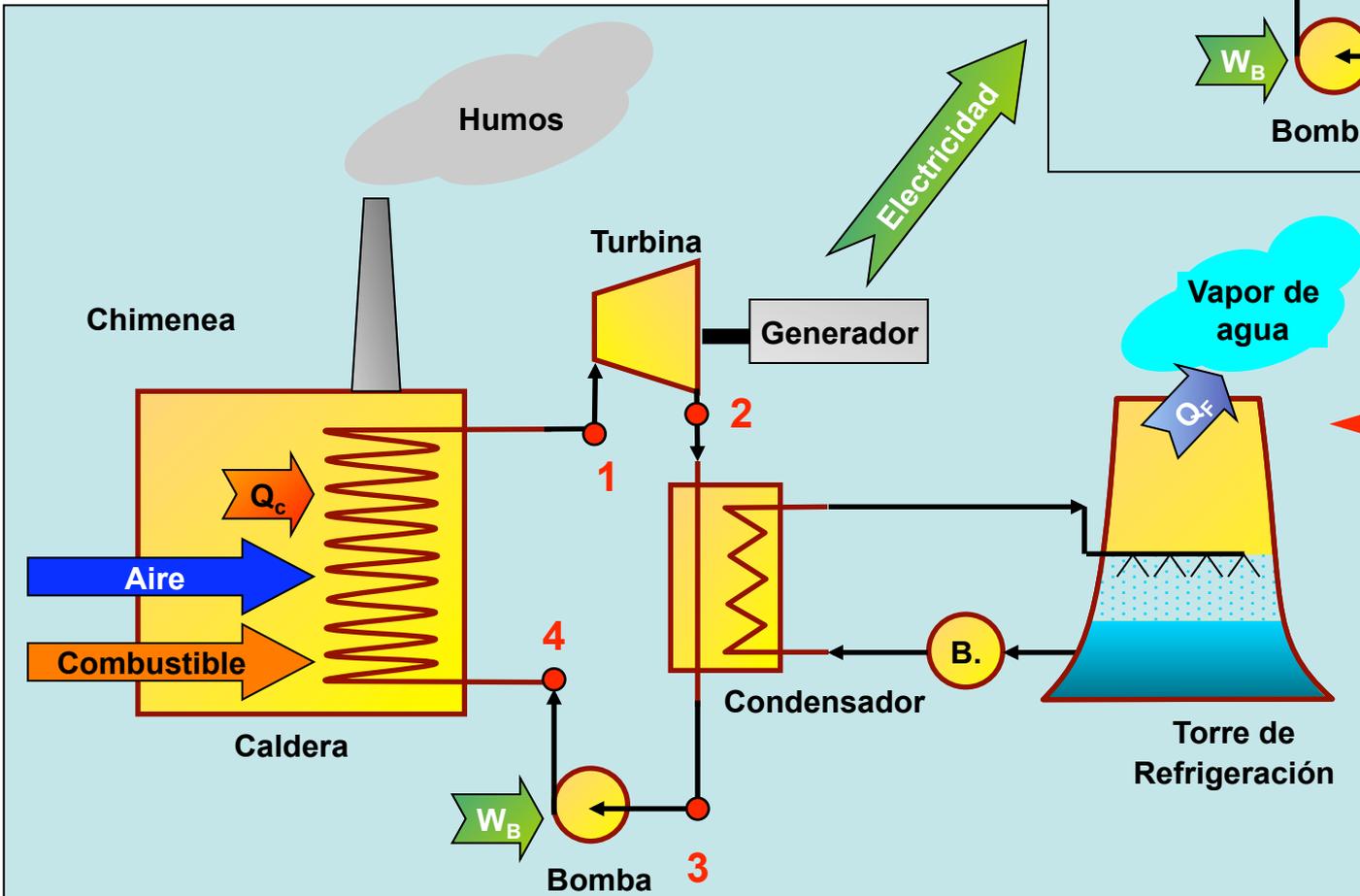
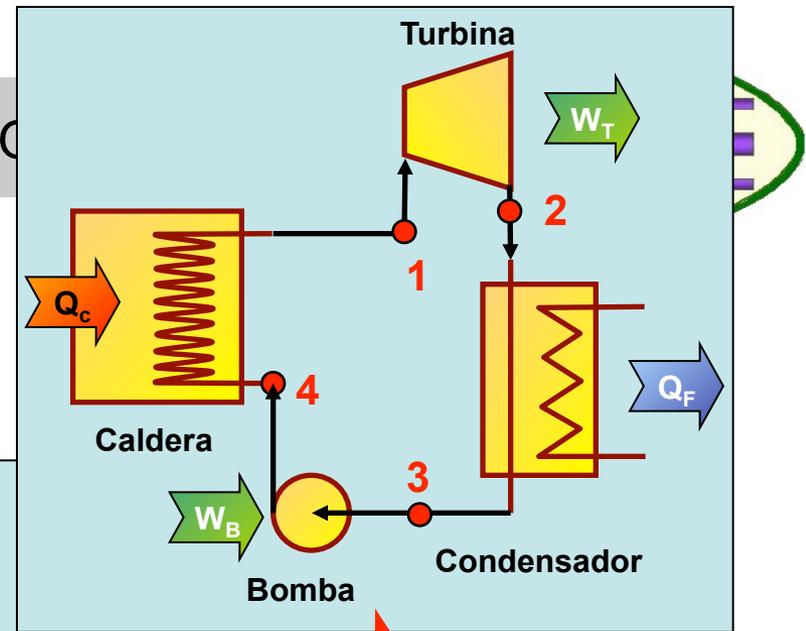
$$dq + |dw_r| = dh - v dp \quad \text{En cald/cond (p = cte)} \Rightarrow dq = dh$$

$$Q = M \left(h_2 - h_1 + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} \right) + W_t$$

$$\text{En las Turbinas } Q = 0, \text{ y } \Delta E_{cin} = 0 \Rightarrow W_t = M (h_1 - h_2)$$

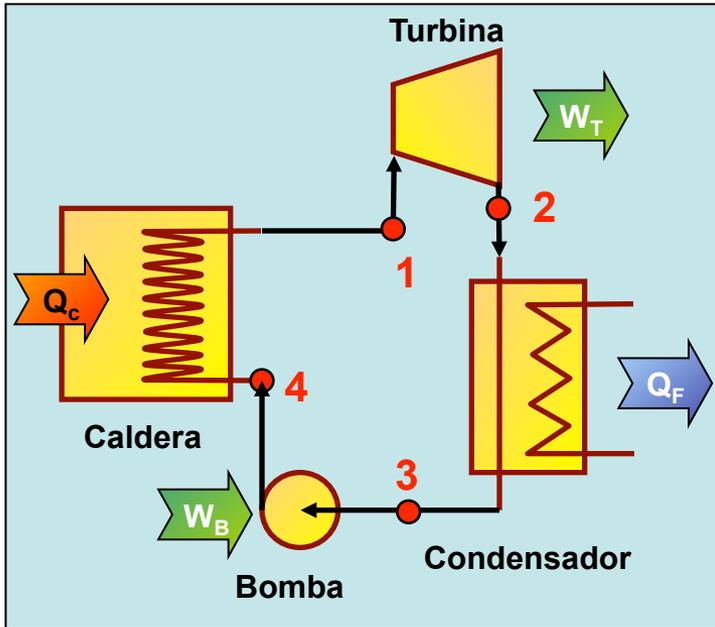
$$c = \frac{dq + |w_r|}{dT} \quad \text{gas perfecto} \quad h_2 - h_1 = c_p (T_2 - T_1)$$

2.- Ciclos de vapor (I)



Identificación de puntos

2.- Ciclos de vapor (II)



Identificación de puntos

$$w_{\text{Turb}} = h_1 - h_2$$

$$w_{\text{bomb}} = v_L (p_4 - p_3) \quad v_L = 1/\rho_L$$

$$q_{\text{FC}} = q_{\text{Cald}} = h_1 - h_4$$

$$q_{\text{FF}} = q_{\text{Cond}} = h_2 - h_3$$

Por unidad de masa

$$W = W_{\text{Turbina}} - W_{\text{Bomba}} \approx W_{\text{Turbina}}$$

$$\eta = \frac{W}{Q_{\text{FC}}} = \frac{M w}{M q_{\text{FC}}} = \frac{w}{q_{\text{FC}}} = \frac{(h_1 - h_2) - (h_4 - h_3)}{h_1 - h_4} \approx \frac{(h_1 - h_2)}{h_1 - h_4} = 1 - \frac{Q_{\text{FF}}}{Q_{\text{FC}}} = 1 - \frac{h_2 - h_3}{h_1 - h_4} \approx 1 - \frac{h_2 - h_4}{h_1 - h_4}$$

2.- Ciclos de vapor (III)

Dos ciclos termodinámicos básicos de vapor, el ciclo de Carnot (ideal), y el ciclo de Rankine (real), que tiene diferentes variantes

2.1.- Ciclo de Carnot (I)

Es el ideal

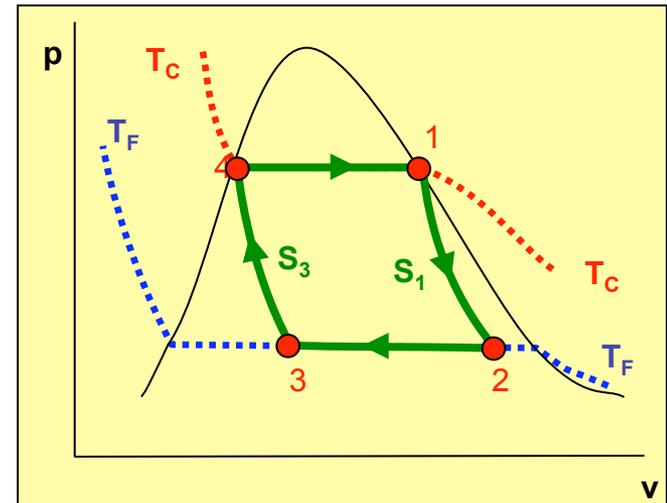
Limitado por dos isothermas y dos adiabáticas (s cte)

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

$$q = \int_a^b T ds \Big|_{T=cte} = T (s_b - s_a) \quad [T4]$$

$$\left. \begin{array}{l} \eta = 1 - \frac{Q_{FF}}{Q_{FC}} \\ q = \int_a^b T ds \Big|_{T=cte} = T (s_b - s_a) \quad [T4] \end{array} \right\} \eta = 1 - \frac{T_{FF} (s_2 - s_3)}{T_{FC} (s_1 - s_4)}$$

$$\eta_C = 1 - \frac{T_{FF}}{T_{FC}}$$



El foco frío es el medio ambiente, su temperatura es conocida, y W_{max} es:

$$W = \eta_C Q_{FC} = \left(1 - \frac{T_{amb}}{T_{FC}} \right) Q_{FC}$$

El calor cedido al medio ambiente en ciclos reales es superior al 55%, y se expresa:

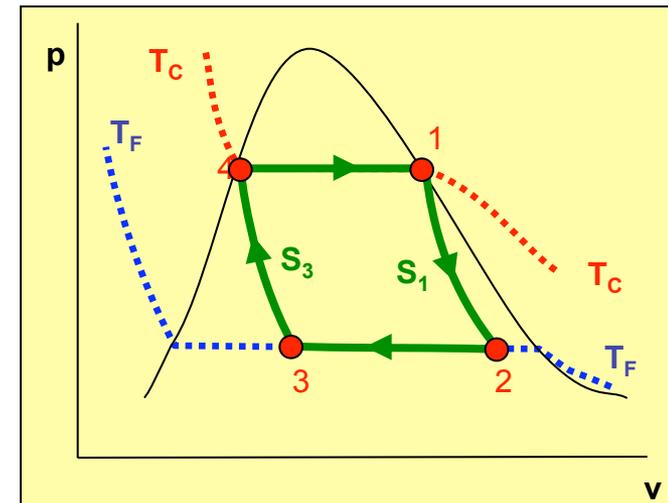
$$Q_{FF} = Q_{FC} \frac{T_{amb}}{T_{FC}}$$

2.- Ciclos de vapor (IV)

2.1.- Ciclo de Carnot (II)

Los elementos esenciales del ciclo son:

- **la turbina** de vapor, (1-2) el vapor se expande con s cte, obteniendo W
- **un condensador**, (2-3) condensa el vapor saliente de la turbina a T (y p) ctes
- **una bomba**, (3-4) en la que se eleva la presión isoentrópicamente
- **una caldera**, (4-1) a T (y p) ctes se vaporiza el agua



El trabajo absorbido en la bomba, en primera aproximación, se desprecia, ya que el obtenido en la turbina es mucho mayor

2.- Ciclos de vapor (V)

2.2.- *Ciclo Rankine (I)*

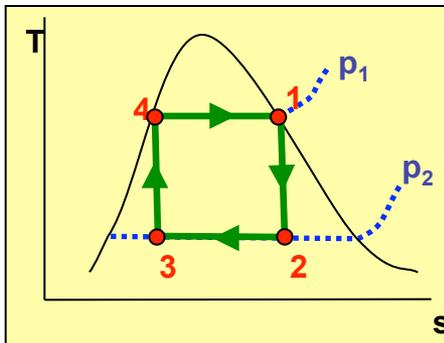
El ciclo de *Carnot* presenta dos problemas prácticos:

La bomba trabaja mal si lo hace con vapor

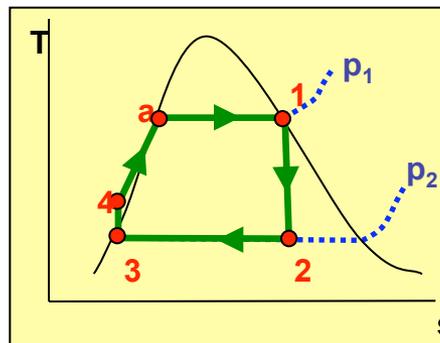
Si la expansión se realiza en la zona de vapor saturado corren peligro los álabes de la turbina, hay que limitar formación de agua líquida

El ciclo real trabaja con cambio de fase, el ciclo *Rankine*

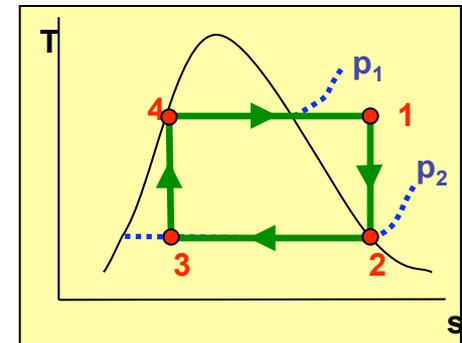
Este ciclo, también lo describen dos isoentrópicas y dos isobaras



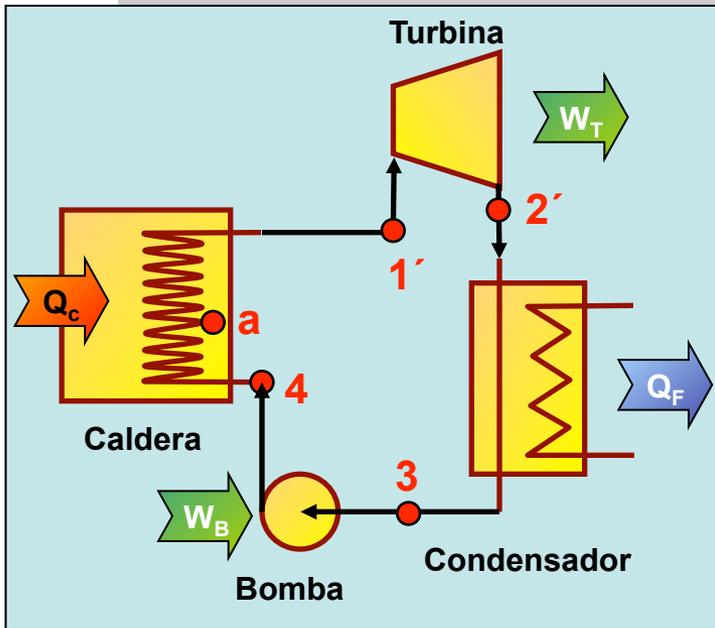
Ciclo de Carnot



Ciclo de Rankine evitando vapor en la bomba



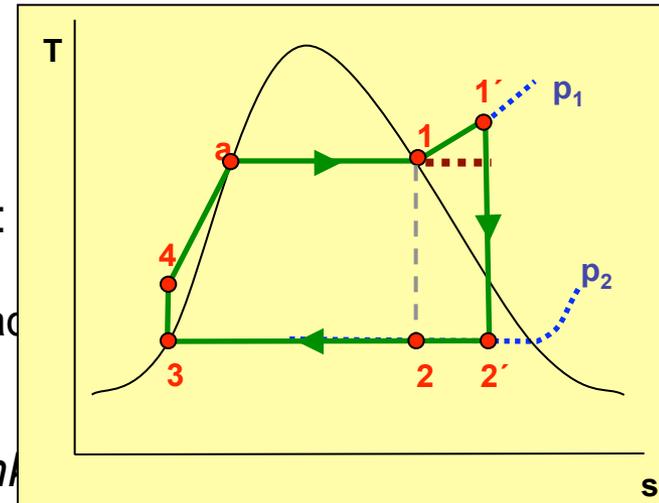
Ciclo de Rankine evitando vapor en la turbina (teórico)



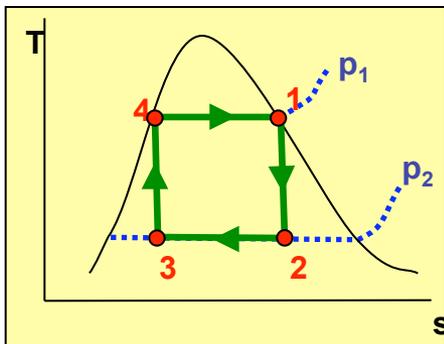
problemas prácticos:
 e con vapor
 a zona de vapor saturada
 ación de agua líquida

de fase, el ciclo *Rankine*

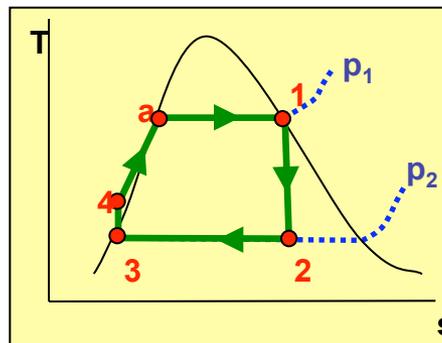
dos isoentrópicas y dos isobaras



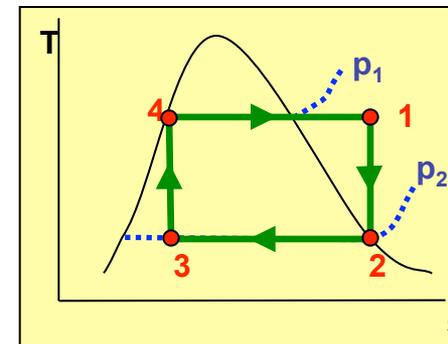
Este ciclo, también se describe



Ciclo de Carnot



Ciclo de Rankine evitando vapor en la bomba



Ciclo de Rankine evitando vapor en la turbina (teórico)

2.- Ciclos de vapor (VII)

2.2.- Ciclo Rankine (II)

Para evitar líquido en la turbina, se aumenta la T de entrada, **sobrecalentamiento**

El aumento de T_{\max} del ciclo ($T_{1'} > T_1$) $\downarrow \eta$

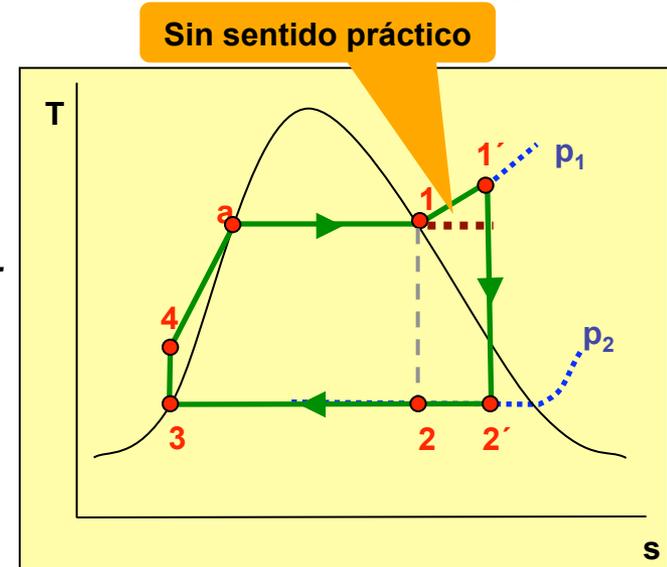
$$\eta_C > \eta_R$$

Para que ($T_{1'} = T_1$) debería $\downarrow p$ a medida que se evapora el agua
esto no tiene sentido práctico

En primera aproximación se desprecia el trabajo absorbido por la bomba

$$\left. \begin{aligned} w_{\text{Turb}} &= h_1 - h_2 \\ w_{\text{bomb}} &= v_L (p_4 - p_3) \\ q_{\text{FC}} &= q_{\text{cald}} = h_{1'} - h_4 \\ q_{\text{FF}} &= q_{\text{cond}} = h_{2'} - h_3 \end{aligned} \right\}$$

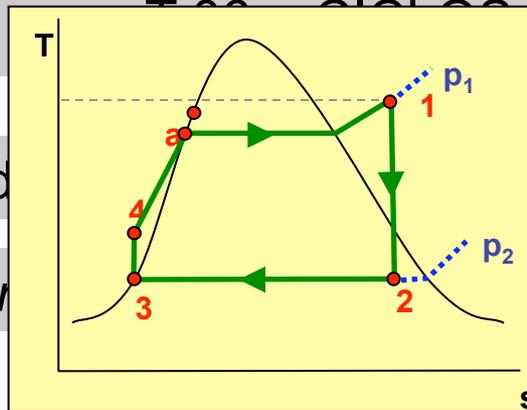
$$\eta_R = \frac{W_{\text{Turb}} - W_{\text{Bomb}}}{Q_{\text{Cald}}} \approx \frac{W_{\text{Turb}}}{Q_{\text{Cald}}} = \frac{h_{1'} - h_{2'}}{h_{1'} - h_4}$$



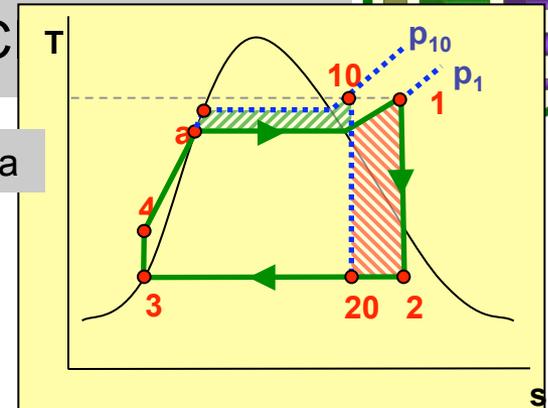
TERCER CICLO DE POTENCIA

2.- Ciclos de potencia

2.2.- Ciclo Rankine



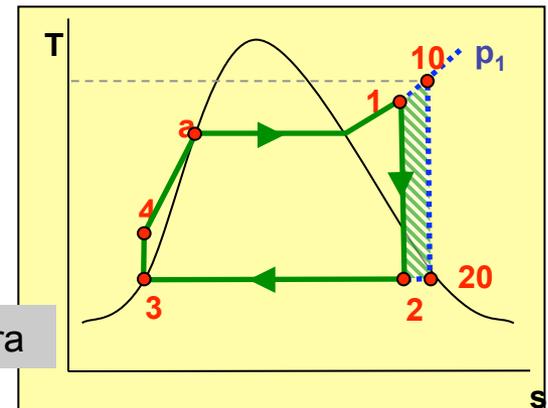
↑ p caldera



Para mejorar el rendimiento hay que: ↑W y/o ↓Q₁:

- aumentar la presión en la caldera (?¿)
- aumentar la temperatura en la caldera
- disminuir la temperatura de salida de la turbina

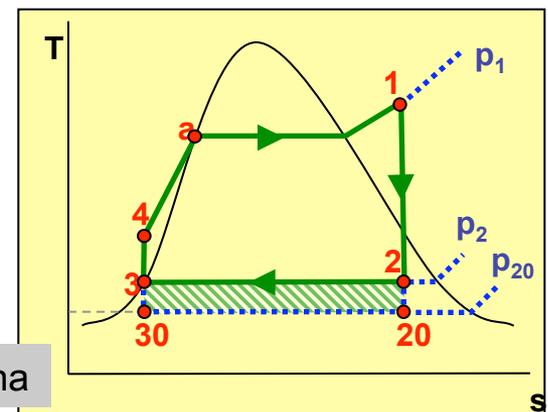
↑ T caldera



Se debe:

- respetar la T_{max} de la caldera, limitada por los materiales, del orden de 600°C
- evitar trabajar en la zona de vapor saturado
- considerar la T_{min} que se dispone para condensar

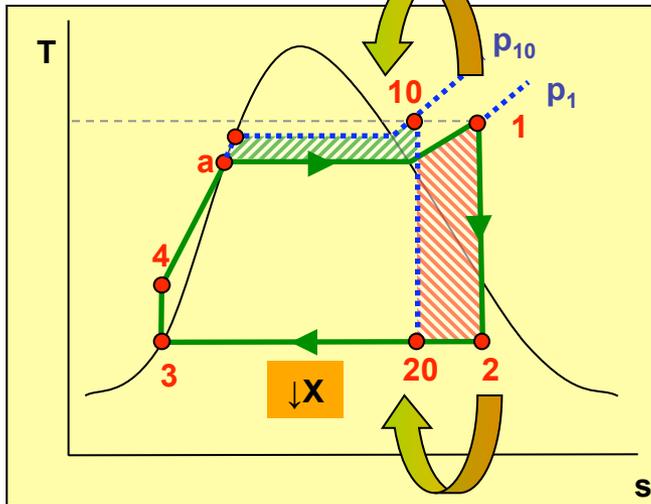
↓ T salida Turbina



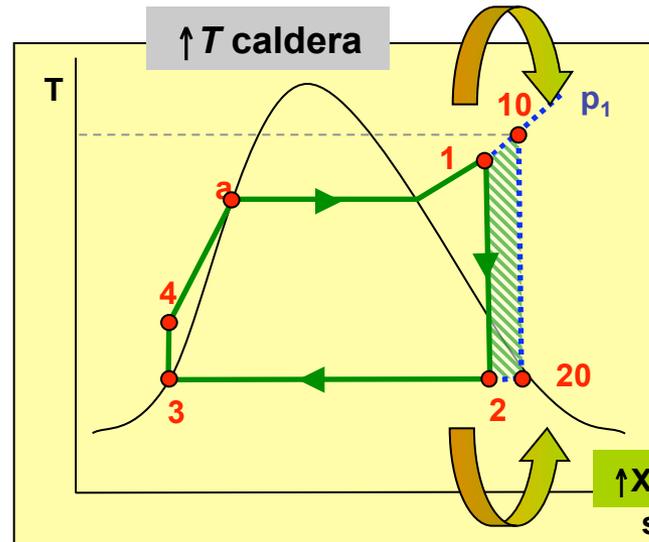
2.- Ciclos de vapor (VI)

2.2.- *Ciclo Rankine* (III)

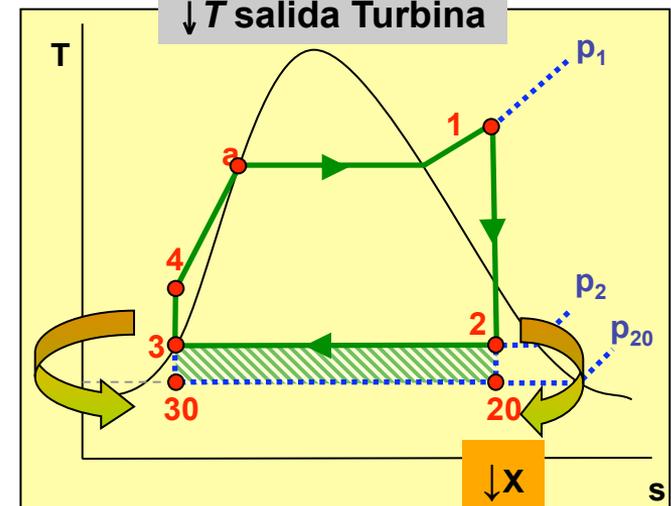
$\uparrow p$ caldera



$\uparrow T$ caldera



$\downarrow T$ salida Turbina

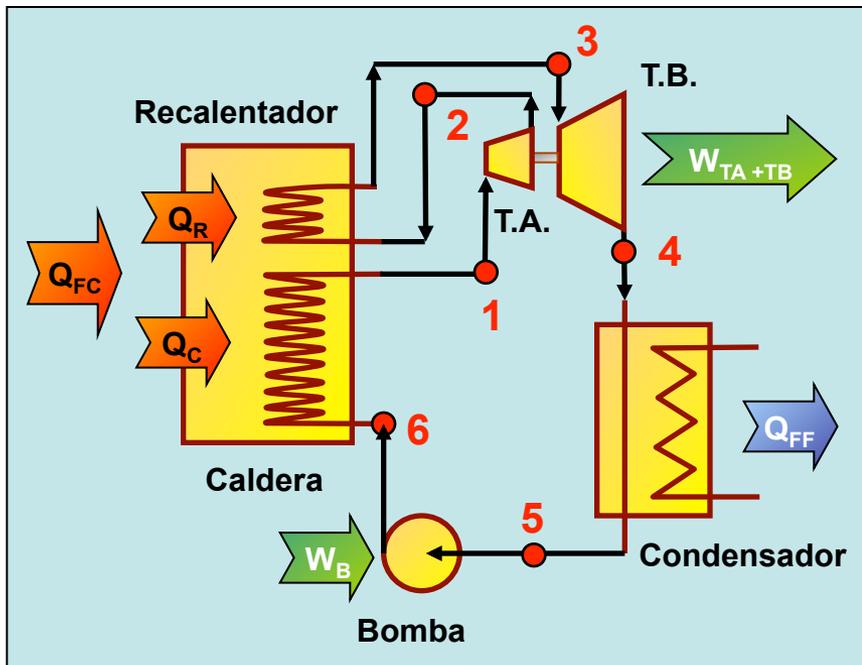


2.- Ciclos de vapor (VIII)

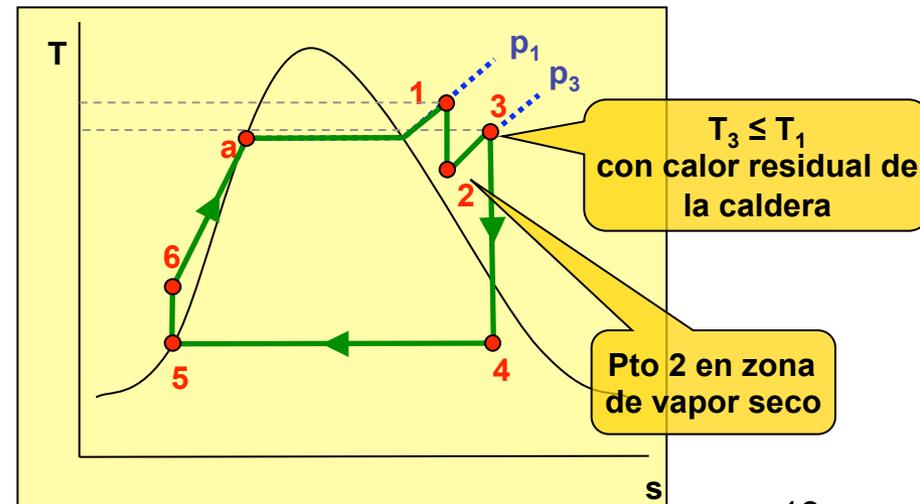
2.3.- Ciclo Rankine con recalentamiento

Tras expandir el vapor en una turbina de alta presión (T.A./T.H.P) se recalienta para volver a ser expandido en una turbina de baja (T.B./T.L.P.)

Es posible encontrar turbinas que incluyan las dos etapas



$$\eta_{R \text{ Recal}} \approx \frac{W_{T_{HP}} + W_{T_{LP}}}{Q_{\text{Cald+Rec}}} = \frac{(h_1 - h_2) + (h_3 - h_4)}{(h_1 - h_6) + (h_3 - h_2)}$$

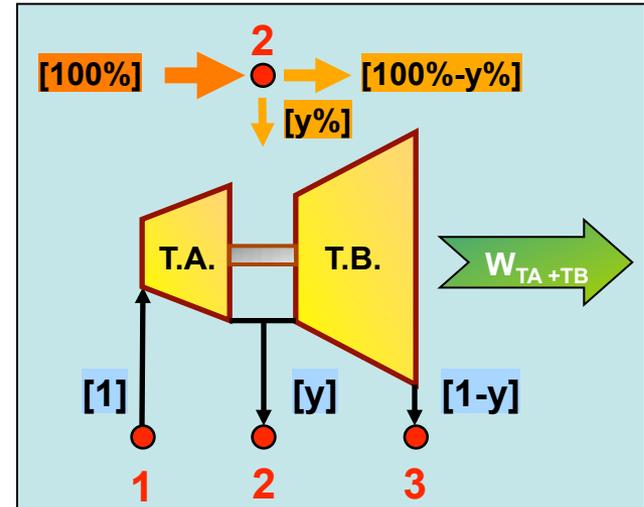


↑ W, pero no η, ya que también ↑ Q_{FC}

2.- Ciclos de vapor (IX)

2.4.- Ciclo Rankine con regeneración (I)

Para $\downarrow Q_1$ se puede precalentar el agua que entra en la caldera con un sangrado o extracción de vapor de la turbina



La p del sangrado debe ser tal que su T de saturación sea la intermedia entre la de condensación y la de saturación en la caldera

Si hay varios sangrados, las temperaturas deben ser “equidistantes”

$$\Delta T_{\text{Sat Sangrado}} = \frac{T_{\text{Sat Caldera}} + T_{\text{Sat Condensador}}}{n^{\circ} \text{ Sangrados} + 1}$$

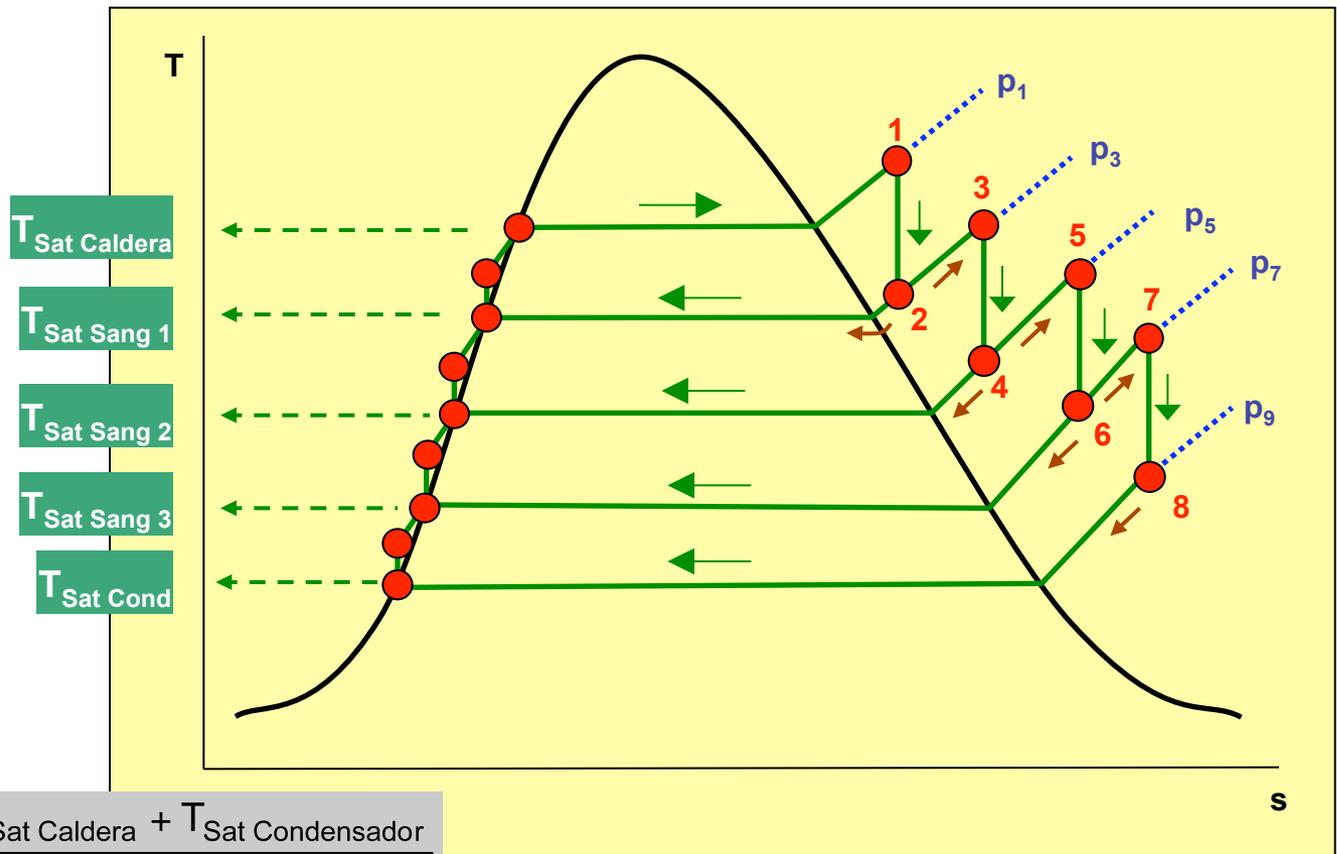
La unión del sangrado con el condensado se realiza en un elemento calentador, que puede ser abierto (mezcla) o cerrado (intercambio térmico)

$$m_{\text{alim}} = m_{\text{sv}} + m_{\text{c}}$$

$$[1] = [y] + [1 - y]$$

2.- Ciclos de vapor (X)

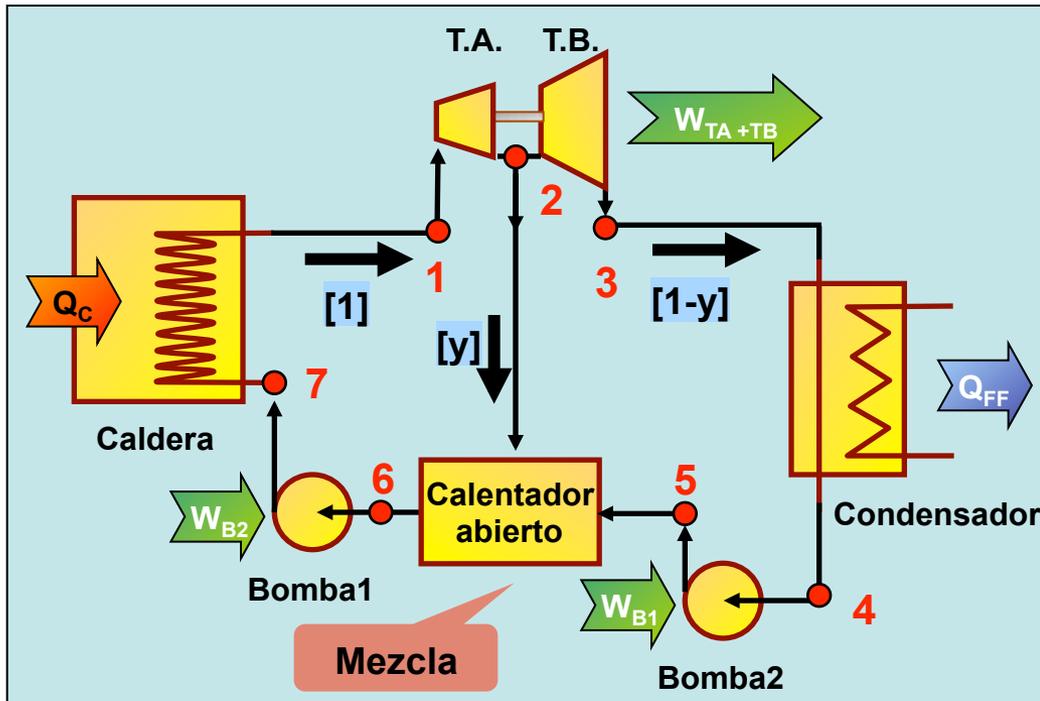
2.4.- Ciclo Rankine con regeneración (II)



$$\Delta T_{\text{Sat Sangrado}} = \frac{T_{\text{Sat Caldera}} + T_{\text{Sat Condensador}}}{n^{\circ} \text{ Sangrados} + 1}$$

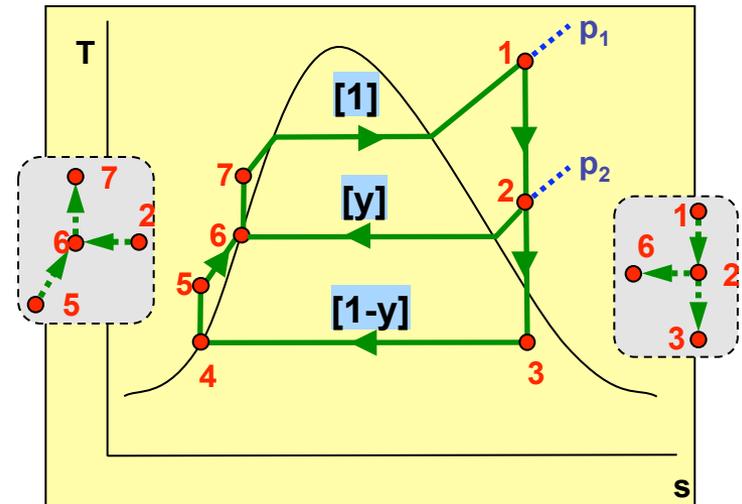
2.- Ciclos de vapor (XI)

2.4.- Ciclo Rankine con regeneración (III)



Ec. Masa
(Prop agua)

$$m_{alim} = m_{sv} + m_c$$



$$\eta_{RRegen} \approx \frac{W_{THP} + W_{TLP}}{Q_{Cald}} = \frac{1(h_1 - h_2) + [1-y](h_2 - h_3)}{1(h_1 - h_7)} \quad 16$$

2.- Ciclos de vapor (XII)

2.4.- *Ciclo Rankine con regeneración (IV)*

Ec. Masa
(Prop agua)

$$m_{alim} = m_{sv} + m_c \quad \longrightarrow \quad [1] = [y] + [1-y]$$

$$1 = \frac{m_{sv}}{m_{alim}} + \frac{m_c}{m_{alim}} \quad y = \frac{m_{sv}}{m_{alim}} \quad 1-y = \frac{m_c}{m_{alim}}$$

Ec. Energía
(Prop agua)

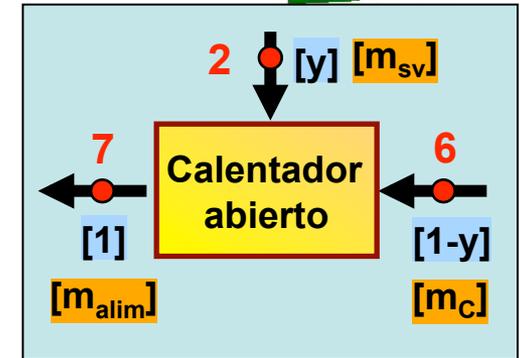
$$h_{alim} m_{alim} = h_{sv} m_{sv} + h_c m_c$$

$$h_{alim} = h_{sv} \frac{m_{sv}}{m_{alim}} + h_c \frac{m_c}{m_{alim}}$$

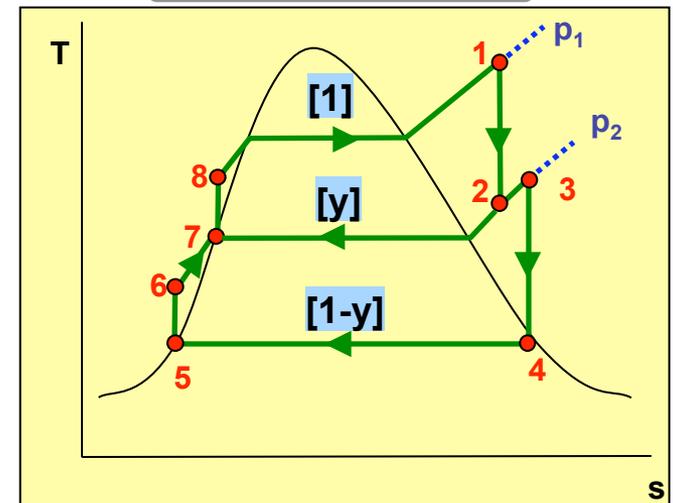
$$h_{alim} = h_{sv} y + h_c (1-y)$$

$$h_{alim} = y h_{sv} + h_c - y h_c$$

$$h_{alim} - h_c = y (h_{sv} - h_c) \quad y = \frac{h_{alim} - h_c}{h_{sv} - h_c}$$



con Recal. y Regen.



2.- Ciclos de vapor (XIV)

2.4.- *Ciclo Rankine con regeneración (VI)*

**Ec. Masa
(Prop agua)**

$$m_{alim} = m_{sv} + m_c \quad \longrightarrow \quad [1] = [y] + [1 - y]$$

$$1 = \frac{m_{sv}}{m_{alim}} + \frac{m_c}{m_{alim}} \quad y = \frac{m_{sv}}{m_{alim}} \quad 1 - y = \frac{m_c}{m_{alim}}$$

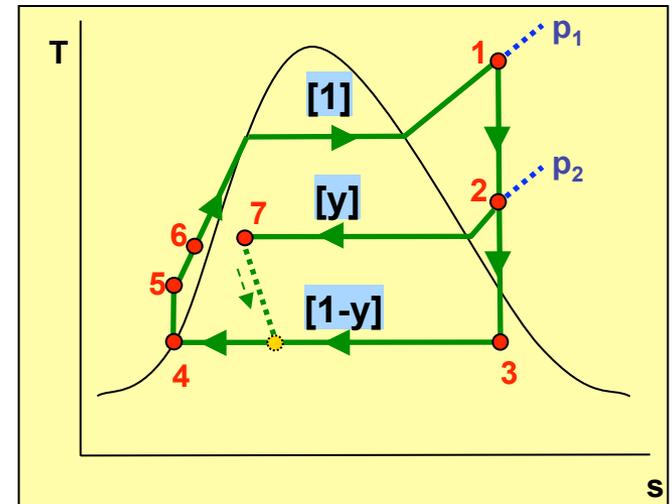
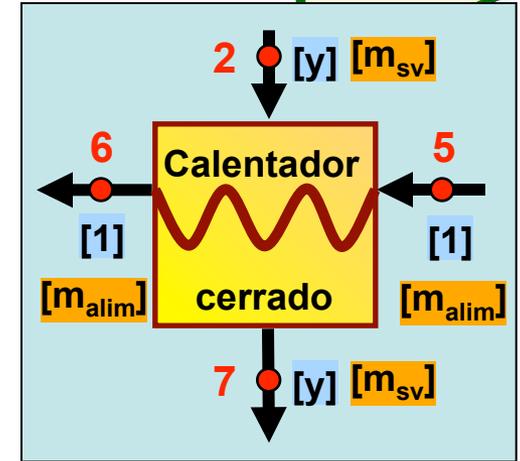
**Ec. Energía
(Prop agua)**

$$m_{alim} (h_6 - h_5) = m_{sv} (h_2 - h_7)$$

$$(h_6 - h_5) = \frac{m_{sv}}{m_{alim}} (h_2 - h_7)$$

$$(h_6 - h_5) = y (h_2 - h_7)$$

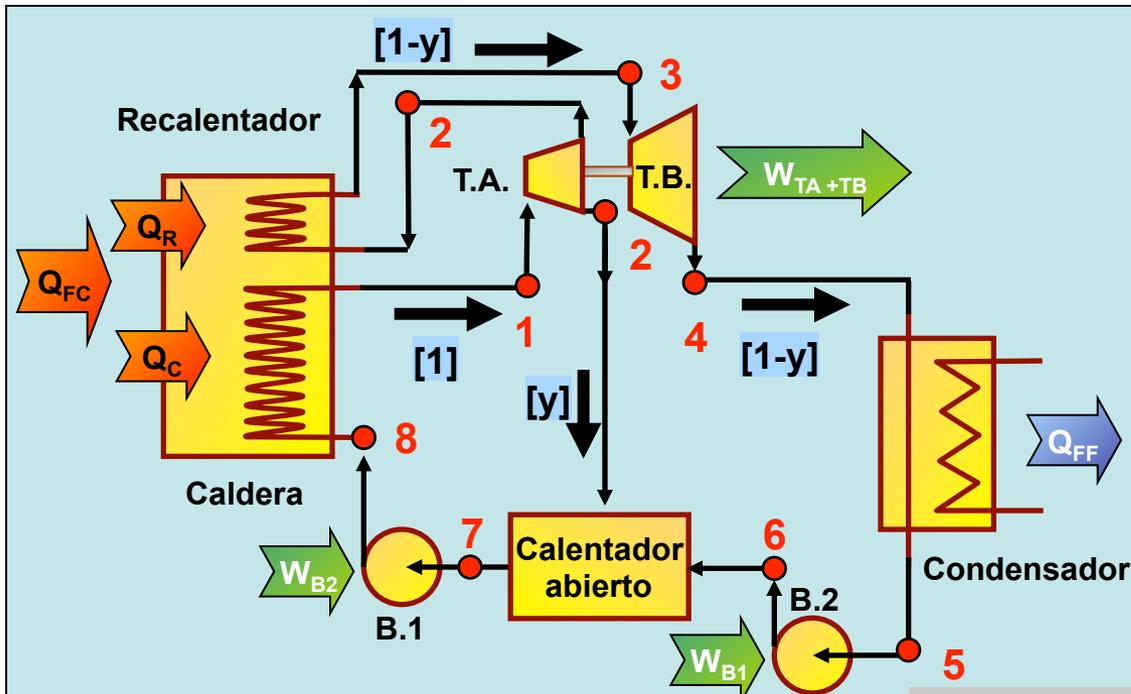
$$y = \frac{h_6 - h_5}{h_2 - h_7}$$



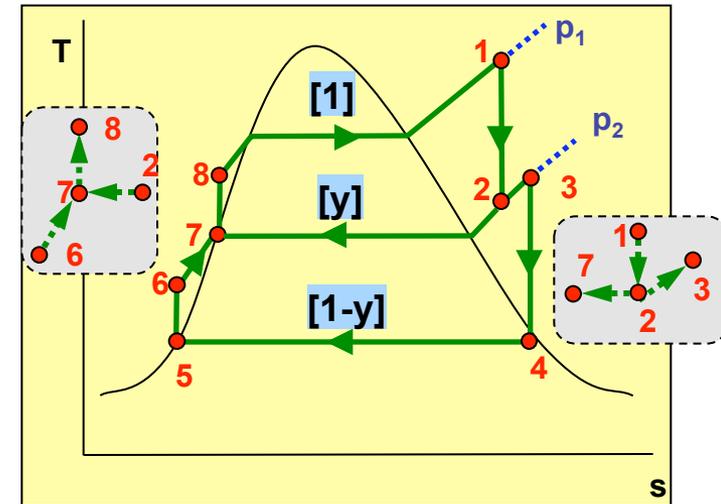
2.- Ciclos de vapor (XV)

2.5.- *Ciclo Rankine con regeneración y recalentamiento*

El ciclo con regeneración $\uparrow \eta$, pero puede presentar problemas de vapor en la turbina, se suele combinar con el ciclo con recalentamiento



Posible con
Regenerador cerrado



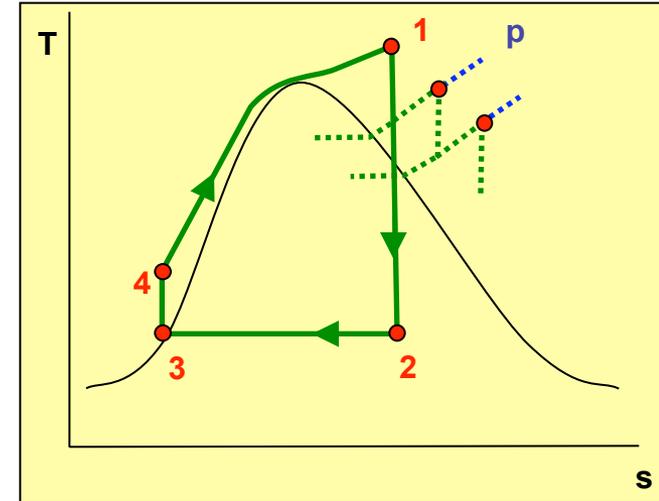
$$\eta_{R\text{RegRec}} \approx \frac{W_{\text{THP}} + W_{\text{TLP}}}{Q_{\text{Cald}}} = \frac{1(h_1 - h_2) + [1-y](h_3 - h_4)}{1(h_1 - h_8) + [1-y](h_3 - h_2)}$$

2.- Ciclos de vapor (XVI)

2.6.- Ciclo Rankine supercrítico

En los ciclos vistos hasta ahora, la mayor parte de la transferencia de calor se realiza a T igual o inferior a la de vaporización (del orden de 250°C)

Pero la T de los gases en la caldera puede ser mucho mayor



Para mejorar el rendimiento hay que intentar que $T_{\text{vapor}} = T_{\text{humos caldera}}$, para lo que se intenta que la transferencia térmica se haga a $T \uparrow$

Este ciclo trata de evitar la zona bifásica

Implica $\uparrow p$ de trabajo, y por lo tanto mayor coste de instalación

Para evitar la formación de agua en la turbina es necesario que este ciclo se combine con etapas de regeneración y de recalentamiento.

2.- Ciclos de vapor (XVII)

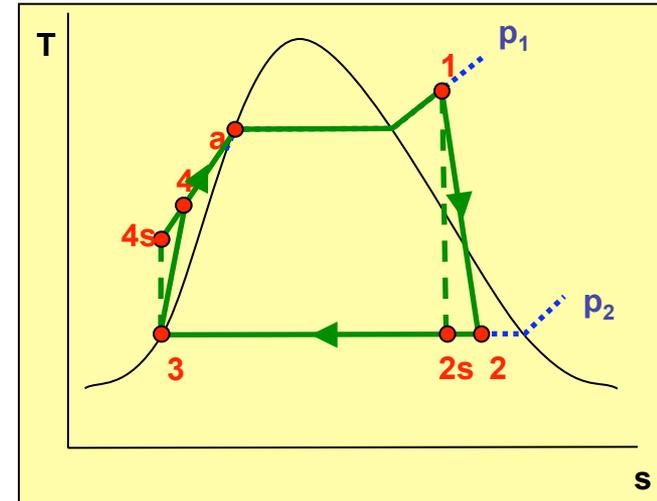
2.7.- Pérdidas en el Ciclo Rankine

Los ciclos reales tienen pérdidas, debidas a enfriamientos, pérdidas de carga en conductos, en la bomba, etc

El mayor porcentaje se produce en la etapa de expansión, que tiene un rendimiento entre el 80 y el 90%

Este efecto $\downarrow \eta$, pero reduce la posibilidad de encontrar agua en la turbina

$$\left\{ \begin{array}{l} \eta_{\text{Bomb}} = \frac{W_{s=\text{cte}}}{W_{\text{real}}} = \frac{h_3 - h_{4s}}{h_3 - h_4} \\ h_4 = h_3 - \frac{h_3 - h_{4s}}{\eta_{\text{Bomb}}} \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} \eta_{\text{Turb}} = \frac{W_{\text{real}}}{W_{s=\text{cte}}} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}} \\ h_2 = h_1 - \eta_{\text{Turb}} (h_1 - h_{2s}) \end{array} \right.$$



Existen otras pérdidas, como las de la caldera, del orden del 15% del calor suministrado en el rendimiento de la planta térmica ..., por ello el η de los ciclos ronda el 35%

3.- Ciclos de gas (I)

3.1.- Compresores (I)

Comprimen, mediante el empleo de un trabajo exterior, un gas, (aire, o mezcla)
Elevan su temperatura

El trabajo aplicado al compresor es: $w_{compS} = h_{Salida} - h_{Entrada}$

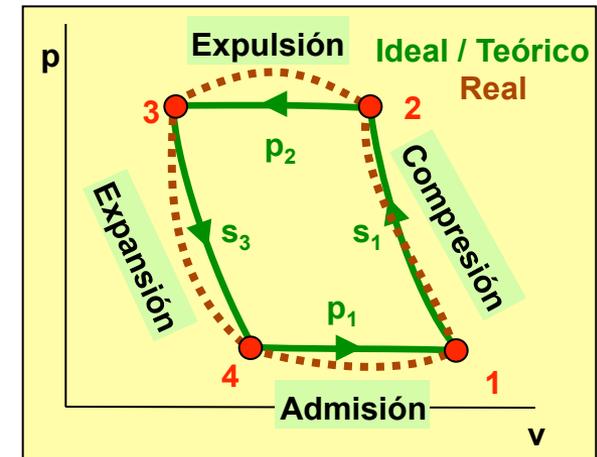
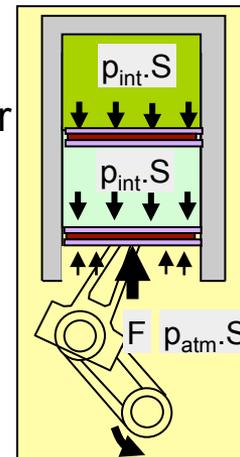
Por unidad de masa

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.)



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

$\eta \uparrow$ 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:

$$w_{\text{comp}} = h_2 - h_1 \quad [T2] \quad c_p = \frac{\Delta h}{\Delta T} \quad w_{\text{comp}} = c_p (T_2 - T_1)$$

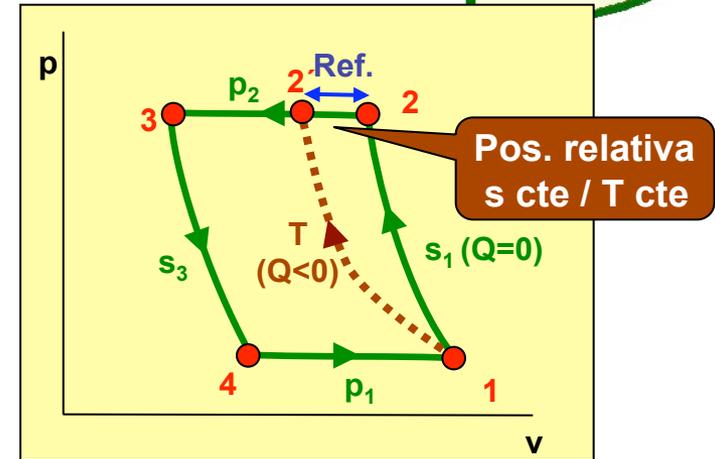
Si la capacidad térmica es cte, en una compresión con $s = \text{cte}$:

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

De esta manera se puede expresar el trabajo como:

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

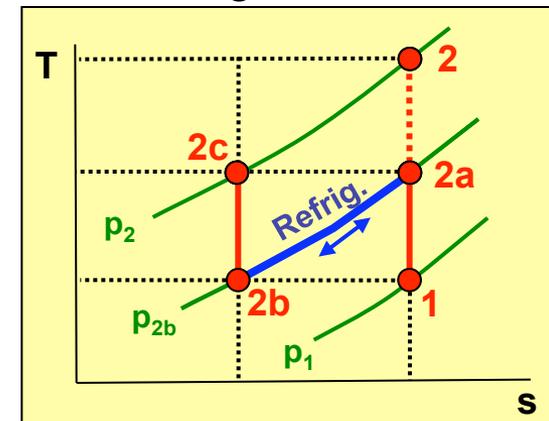
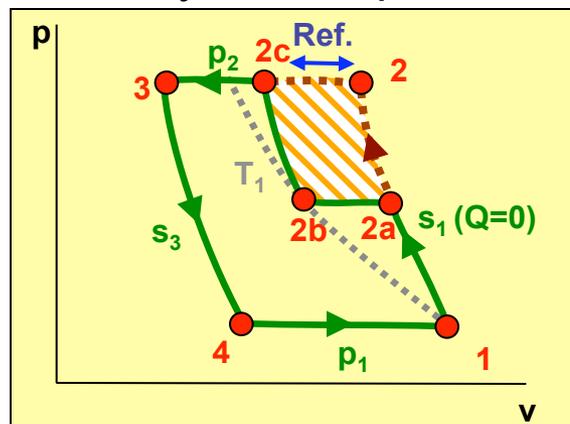
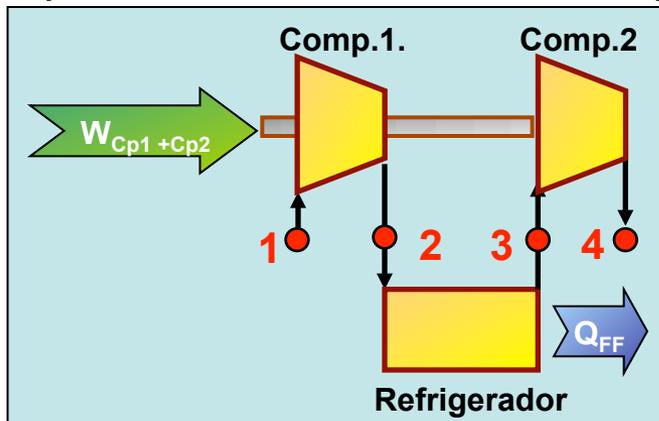
Interesa T_1 baja



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

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

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)

$$w_{\text{comp}} = \frac{\gamma R}{\gamma - 1} T_1 \left[\left(\frac{p_c}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] + \frac{\gamma R}{\gamma - 1} T_d \left[\left(\frac{p_2}{p_c} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right]$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

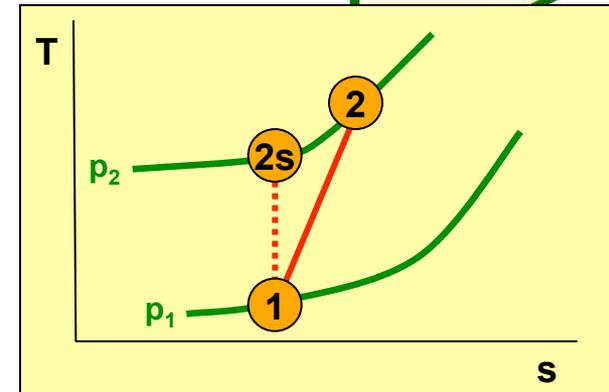
$$h_2 = h_1 + \frac{h_{2s} - h_1}{\eta_{s \text{ comp}}}$$

$$c_p = \frac{\Delta h}{\Delta T} \Rightarrow \Delta h = c_p \Delta T \quad \begin{cases} w_{s \text{ comp}} = c_p (T_{2s} - T_1) \\ w_{\text{comp}} = c_p (T_2 - T_1) \end{cases}$$

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

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

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



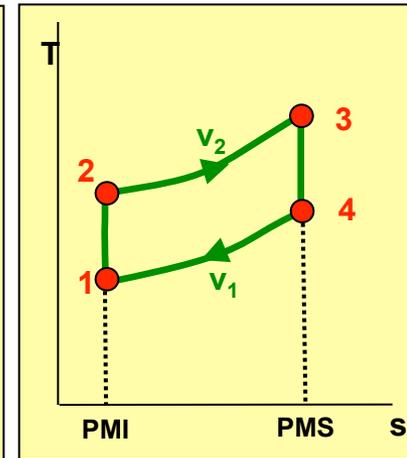
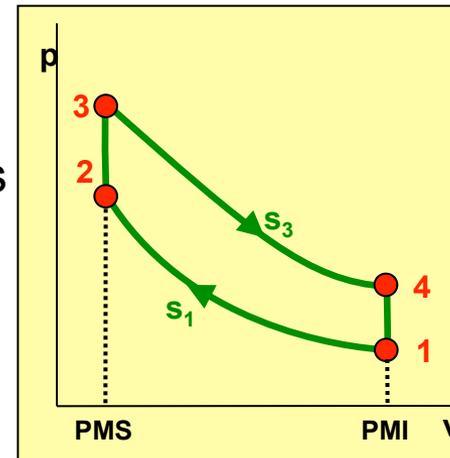
3.- Ciclos de gas (VI)

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_2 y V_1)
- el volumen correspondiente al PMS es el espacio muerto



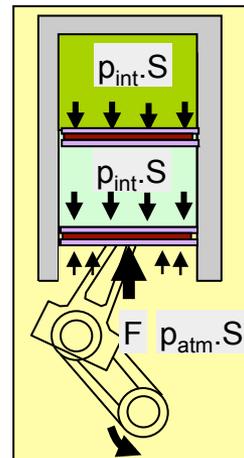
$$\text{Cilindrada} = V_1 - V_2$$

$$\text{Relación de compresión} : r_{\text{cmp}} = V_1 / V_2$$

$$\text{Porcentaje de volumen muerto} : c = \frac{V_2}{\text{Cilindrada}} = \frac{V_2}{V_1 - V_2}$$

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

$$\text{relación de corte} : r_{\text{crt}} = \frac{V_3}{V_2}$$

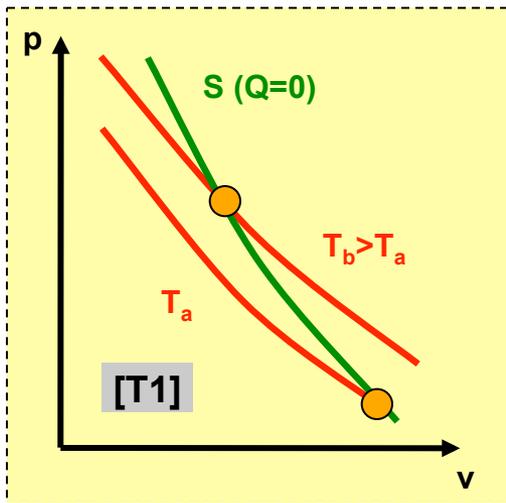


3.- Ciclos de gas (VII)

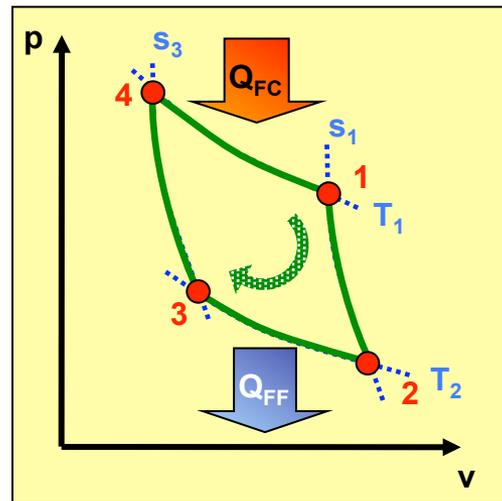
3.3.- Ciclo de Carnot

Formado por dos adiabáticas y dos isotermas

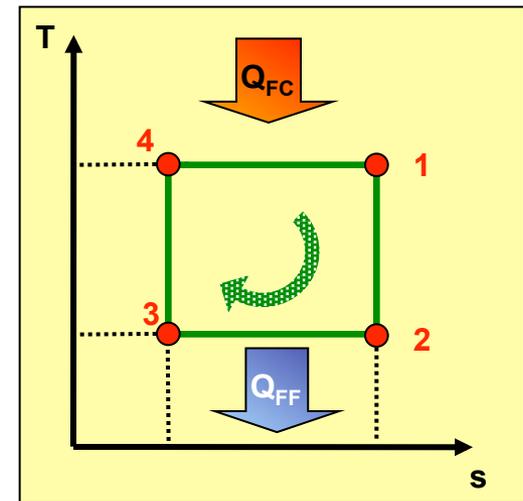
- 4 a 1 expansión a T cte en la que se transfiere calor, Q_{FC} , de un foco caliente a T_{FC}
- 1 a 2 expansión a s cte
- 2 a 3 compresión a T cte en la que se transfiere calor, Q_{FF} , a un foco frío a T_{FF}
- 3 a 4 compresión a s cte



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



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

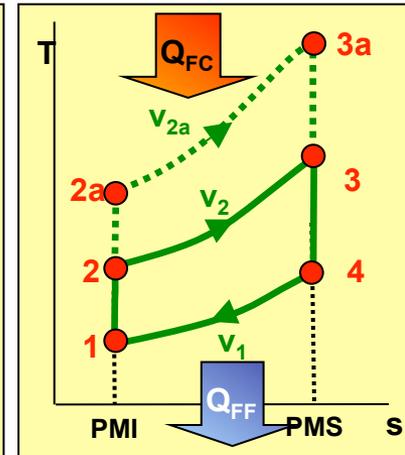
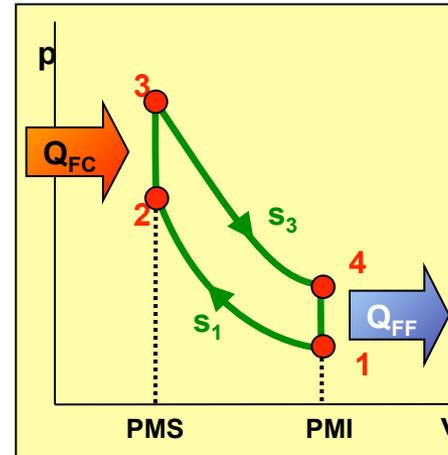


3.- Ciclos de gas (VIII)

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)



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

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

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

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

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

3.- Ciclos de gas (IX)

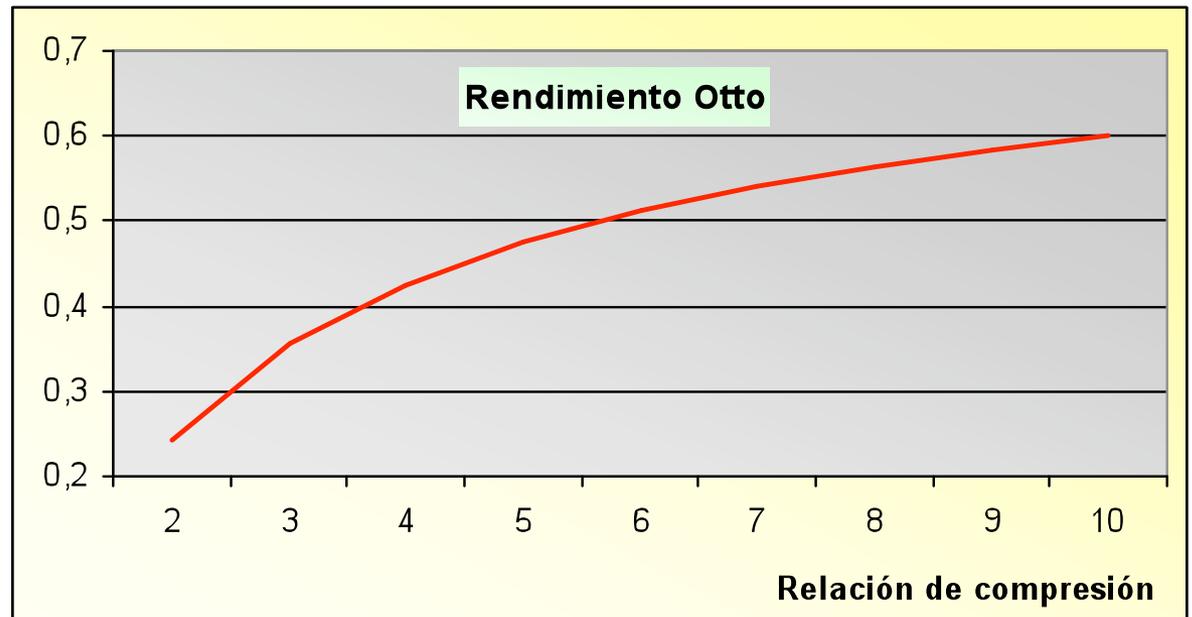
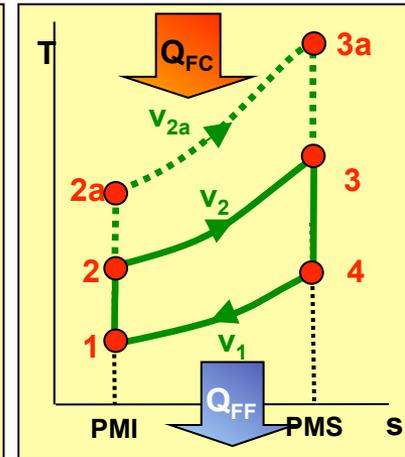
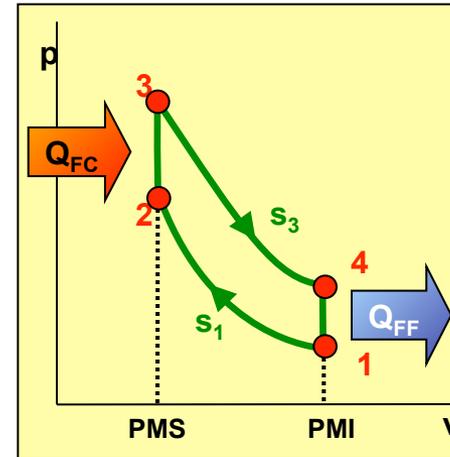
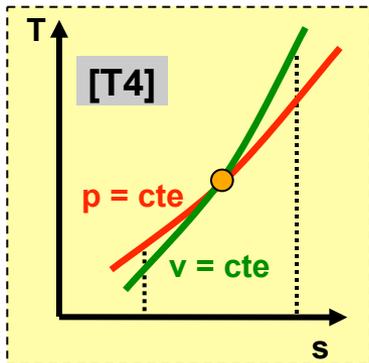
3.4.- Ciclo Otto (II)

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

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

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

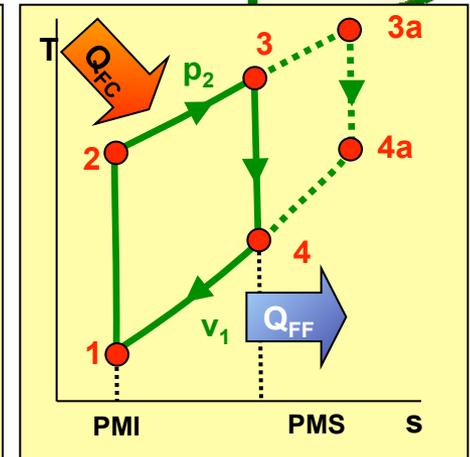
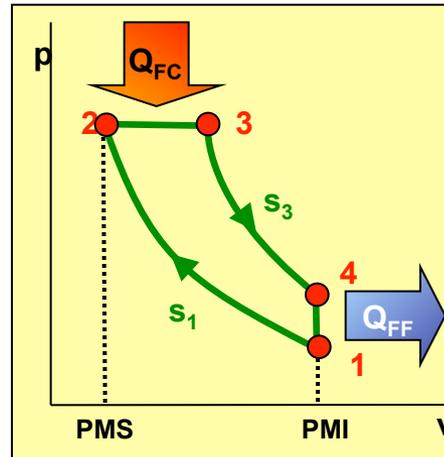
($Q_{FC} \uparrow$ pero $W \uparrow \uparrow$)



3.- Ciclos de gas (X)

3.5.- Ciclo Diesel (I)

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

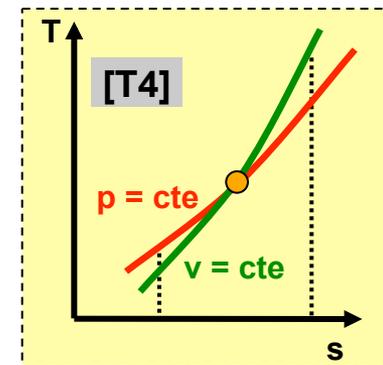


- Se comprime el aire a s cte (1-2)
- La p hace que detone, el calor provoca una expansión con p cte (2-3)
- Se produce una expansión a s cte (3-4)
- Se comunica el calor al exterior a v cte (4-1)

Isóbara ($p = cte$): (2-3)

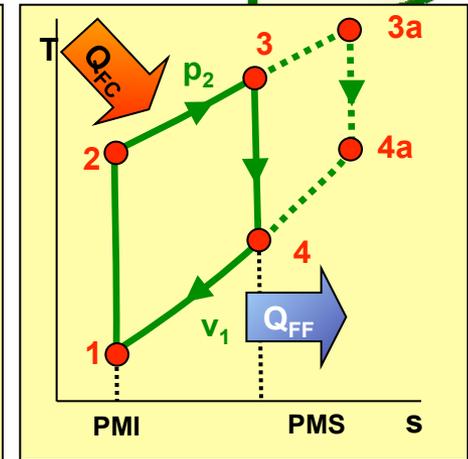
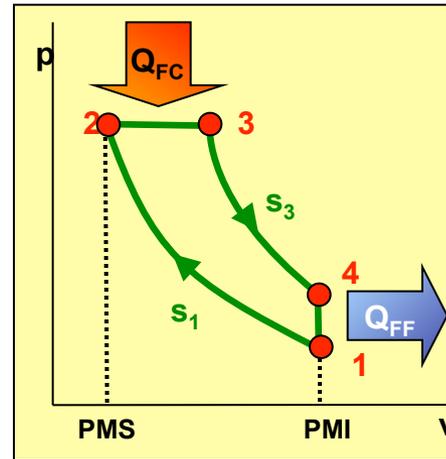
Adiabáticas: ($p v^\gamma = cte$)

Isocora ($v = cte$): (4-1)



3.- Ciclos de gas (XI)

3.5.- Ciclo Diesel (II)



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

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

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

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

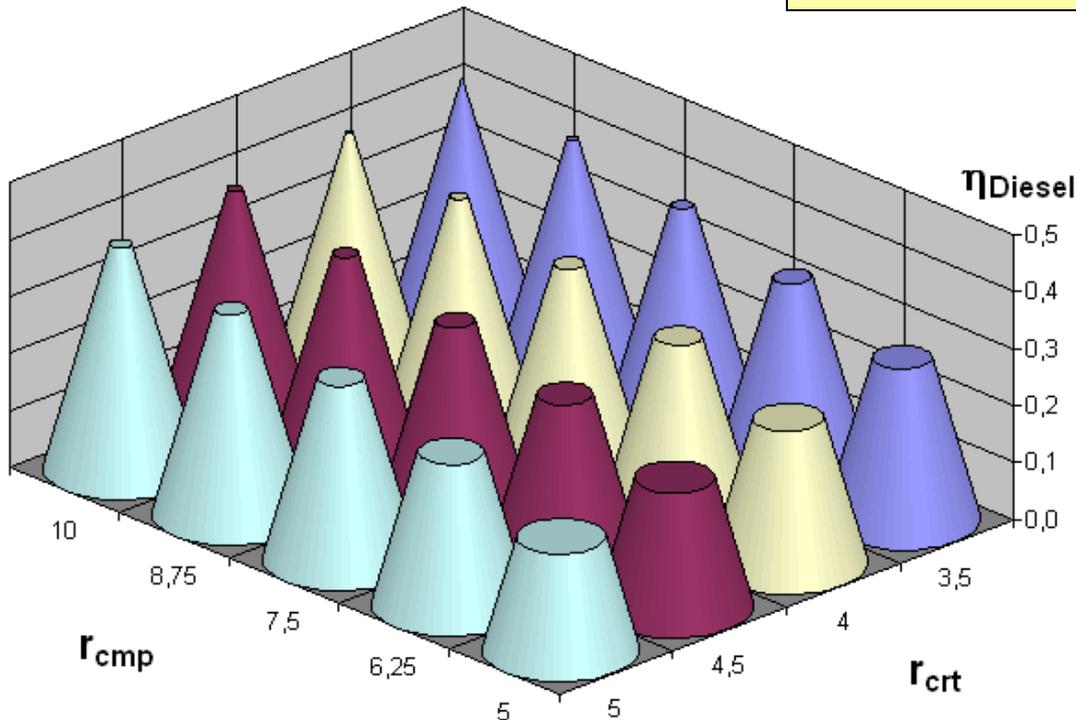
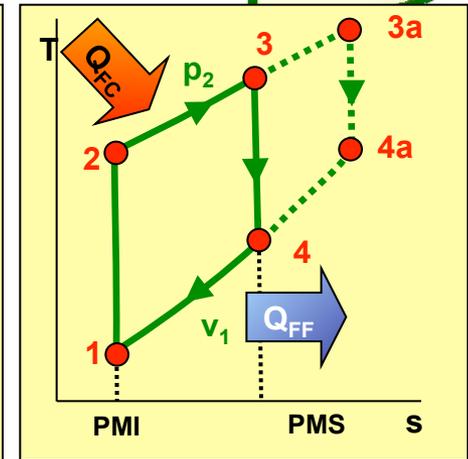
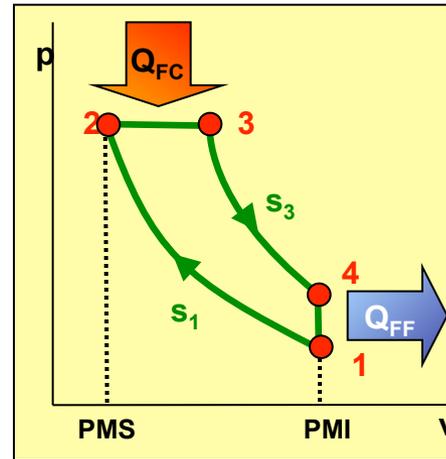
Si $\uparrow T_3$ y V_3 , $\eta \downarrow$, la isóbara y la isócara convergen; $W \uparrow$ pero $Q_{\text{FC}} \uparrow \uparrow$

(En el ciclo Otto este efecto es contrario)

3.- Ciclos de gas (XII)

3.5.- *Ciclo Diesel* (III)

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



En el ciclo Diesel:

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

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

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)

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

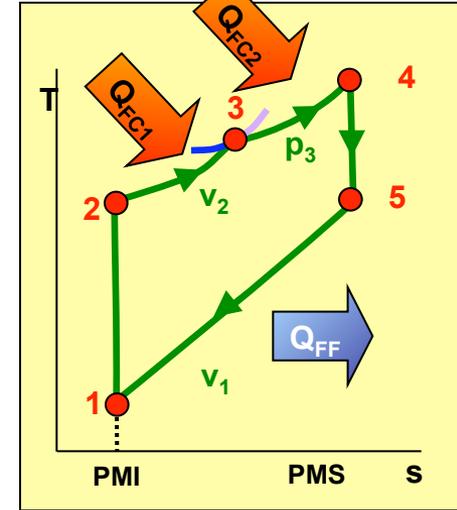
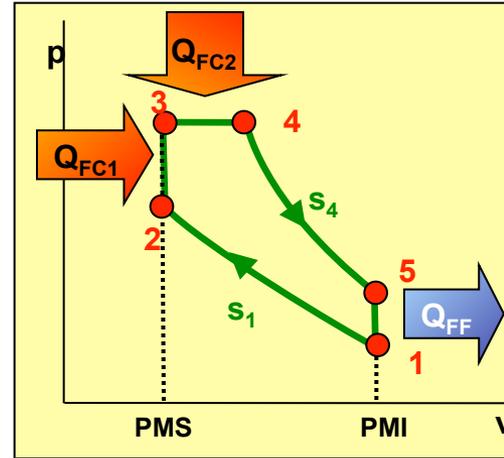
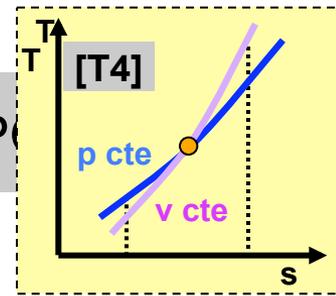
Si el motor es Otto el punto 3 es coincidente con el 4, y si el Diesel el 2 con el 3

$$\left. \begin{aligned} Q_{FC} &= m_{aire} [c_v(T_3 - T_2) + c_p(T_4 - T_3)] \\ Q_{FF} &= m_{aire} c_v(T_5 - T_1) \end{aligned} \right\}$$

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

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

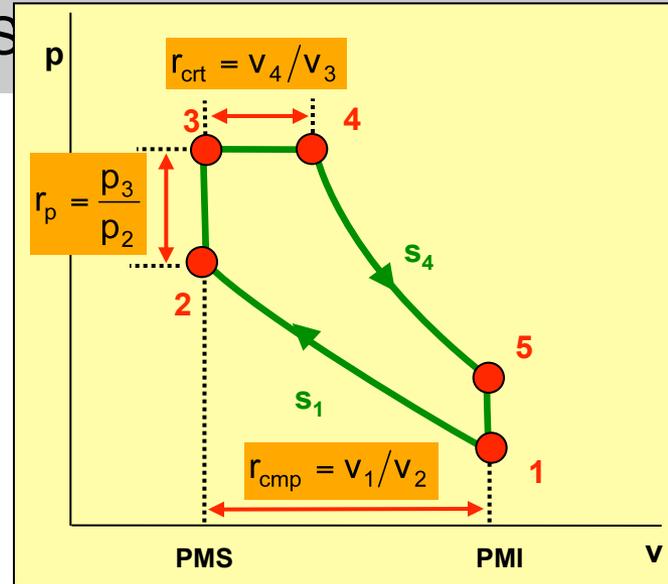
Relación de presiones: $r_p = p_3 / p_2$



3.- Ciclos de gas (XIV)

3.6.- Ciclo Dual (II)

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

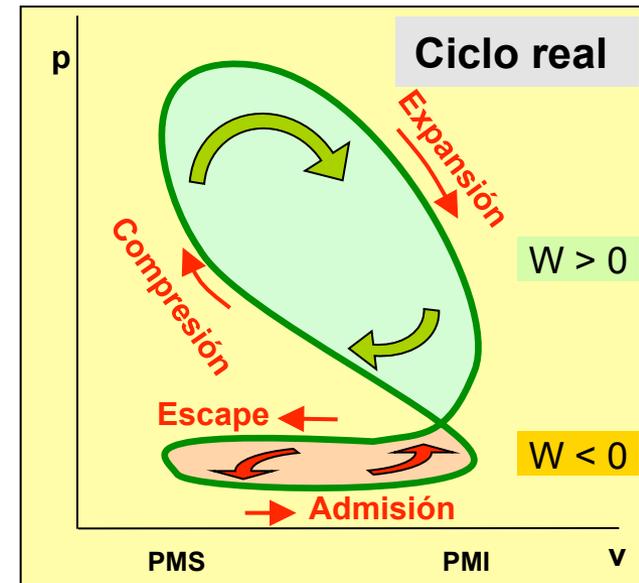


En el ciclo Otto $r_{\text{crt}} = 1$ $r_{\text{crt}} = V_4/V_3$

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

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

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



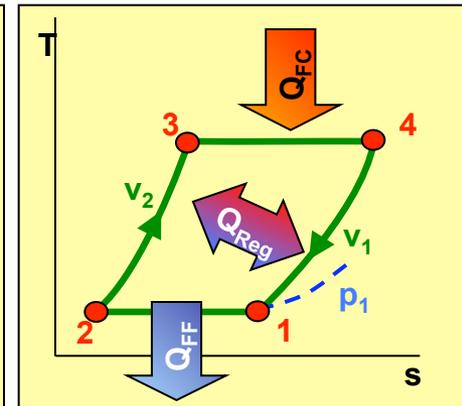
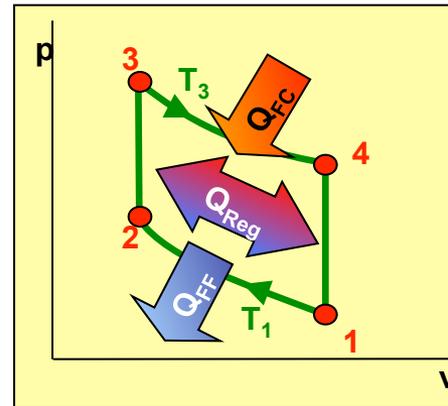
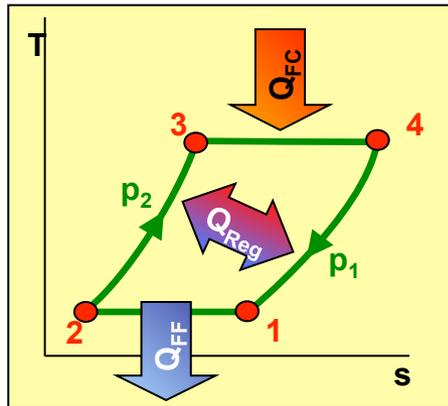
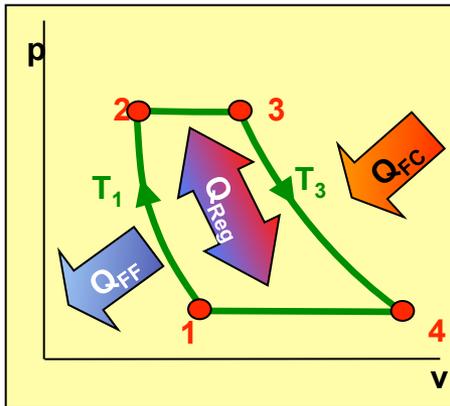
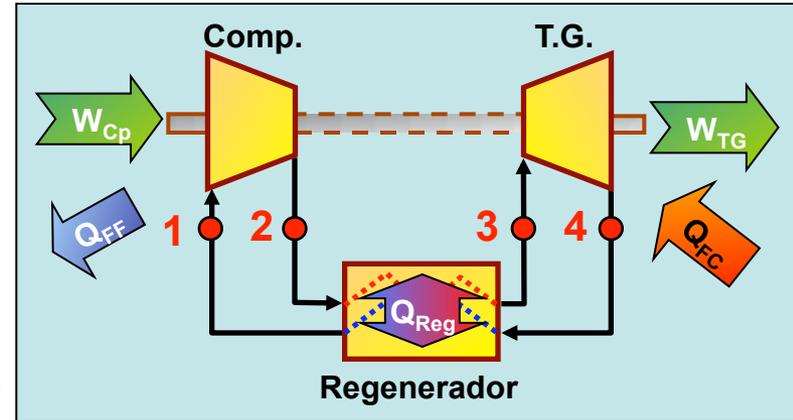
3.- Ciclos de gas (XV)

3.7.- Ciclos Ericson y Stirling

Ericsson: dos isotermas y dos isobaras
Stirling: por dos isotermas y dos isócoras

El suministro de Q se realiza a T cte ($Q_{23} = Q_{41}$)

En el regenerador, el aire de escape precalienta el aire de entrada



Q_{FC} a T cte, $\eta = \eta_{Carnot}$

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

Problemas constructivos $\eta_{real} < \eta_{teórico}$

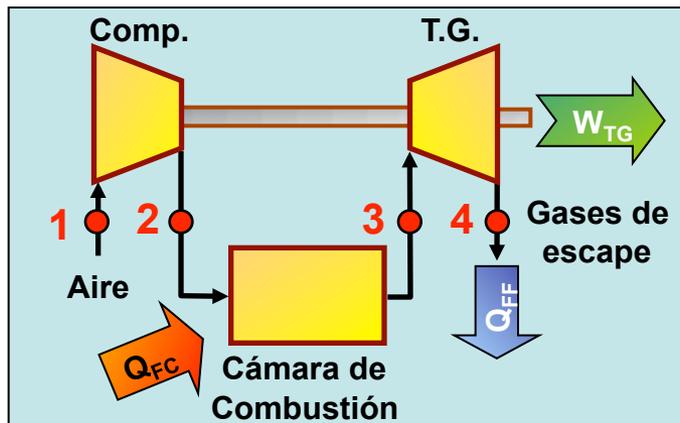
El calor se puede obtener mediante **combustión externa** (malos combustibles)

3.- Ciclos de gas (XVI)

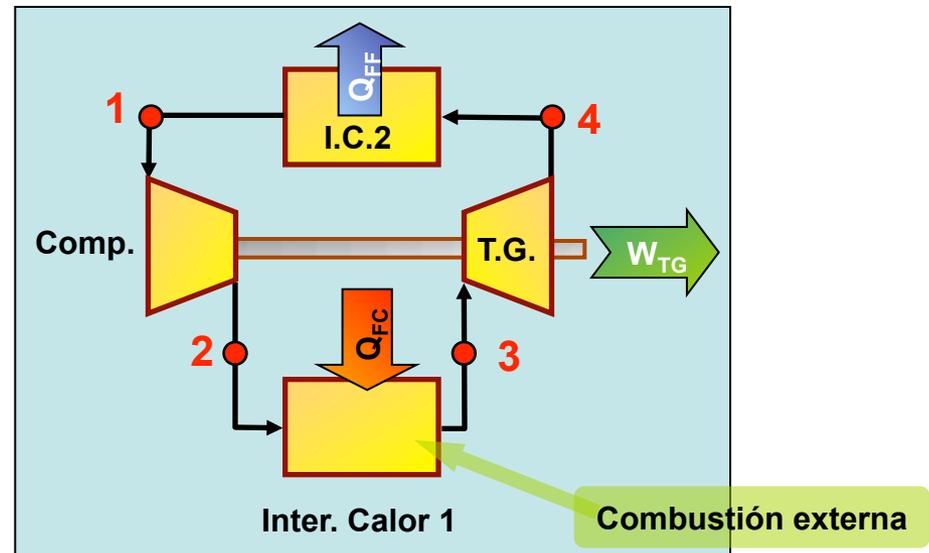
3.8.- Ciclo Brayton (I)

La turbina de gas puede funcionar:

- Con un ciclo abierto, con una cámara de combustión
- Con uno cerrado, con dos intercambiadores de calor



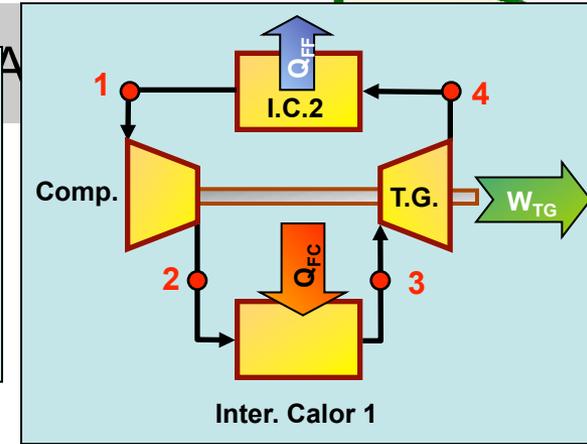
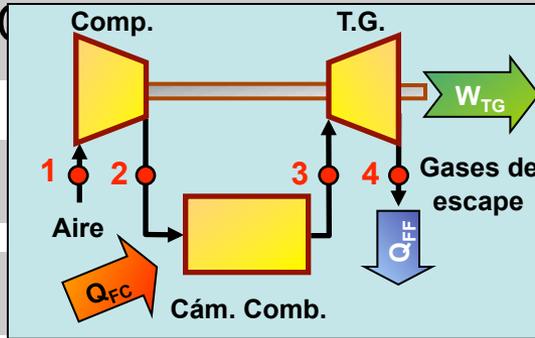
$$\text{Relación de acoplamiento} = \frac{W_{\text{compresor}}}{W_{\text{turbina}}}$$



puede alcanzar el 80%

3.- Ciclos de gas (XVII)

3.8.- *Ciclo Brayton (II)*

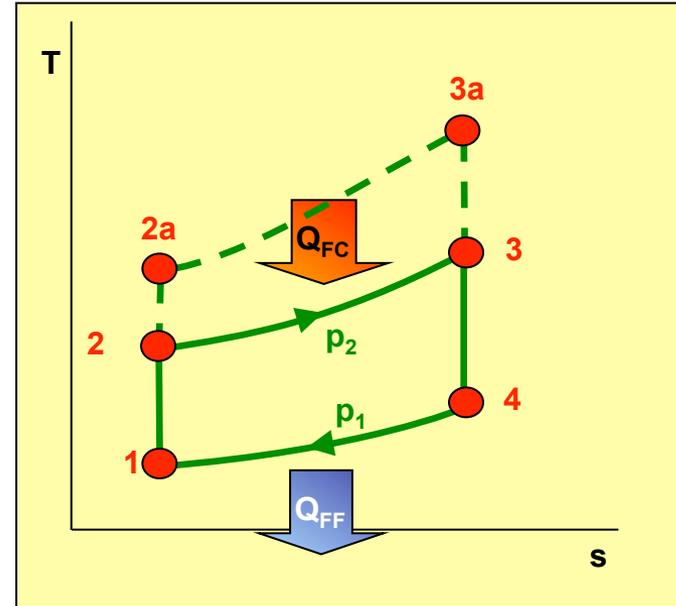
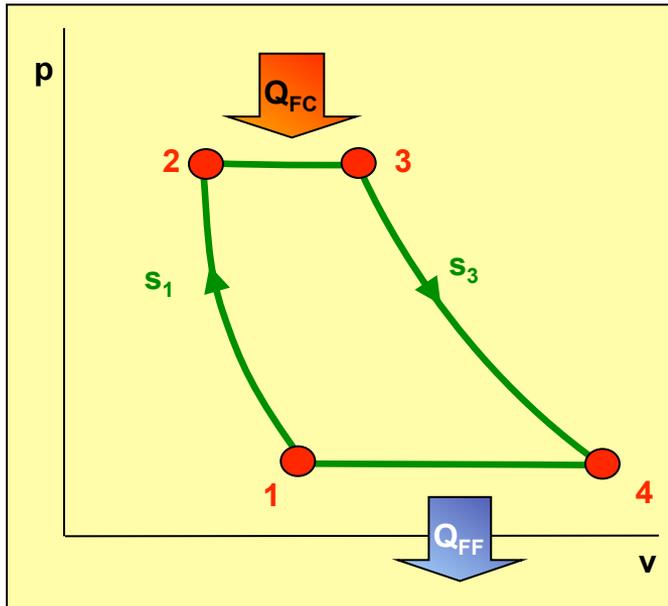


El ciclo Brayton es:

con dos adiabáticas y dos isobaras

- La compresión y expansión son isoentrópicas
- El calor se comunica y extrae con p cte

Relación de presiones : $r_p = \frac{p_2}{p_1}$



3.- Ciclos de gas (XVIII)

3.8.- Ciclo Brayton (III)

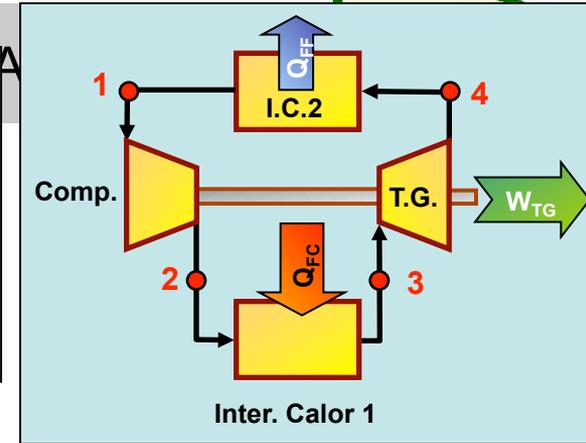
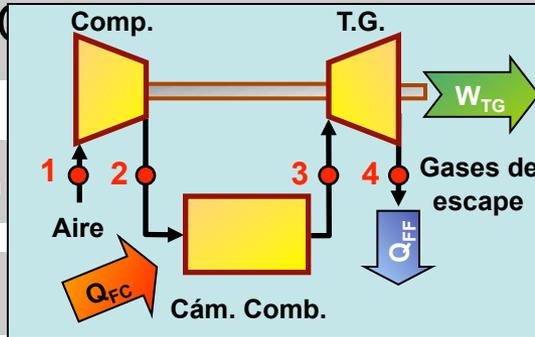
Se supone c_p cte

Cálculos precisos deben tener en cuenta su variación

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

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

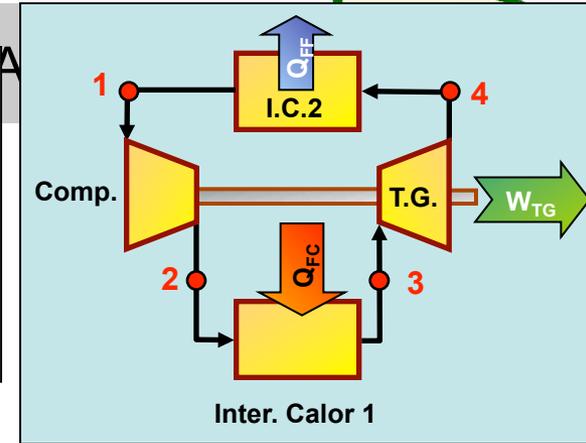
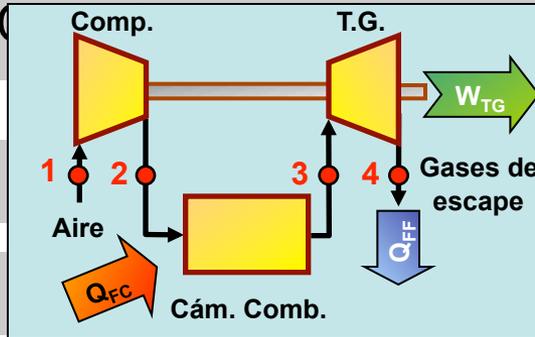
$$\eta = 1 - \frac{Q_{FF}}{Q_{FC}} = 1 - \frac{c_p (T_4 - T_1)}{c_p (T_3 - T_2)}$$



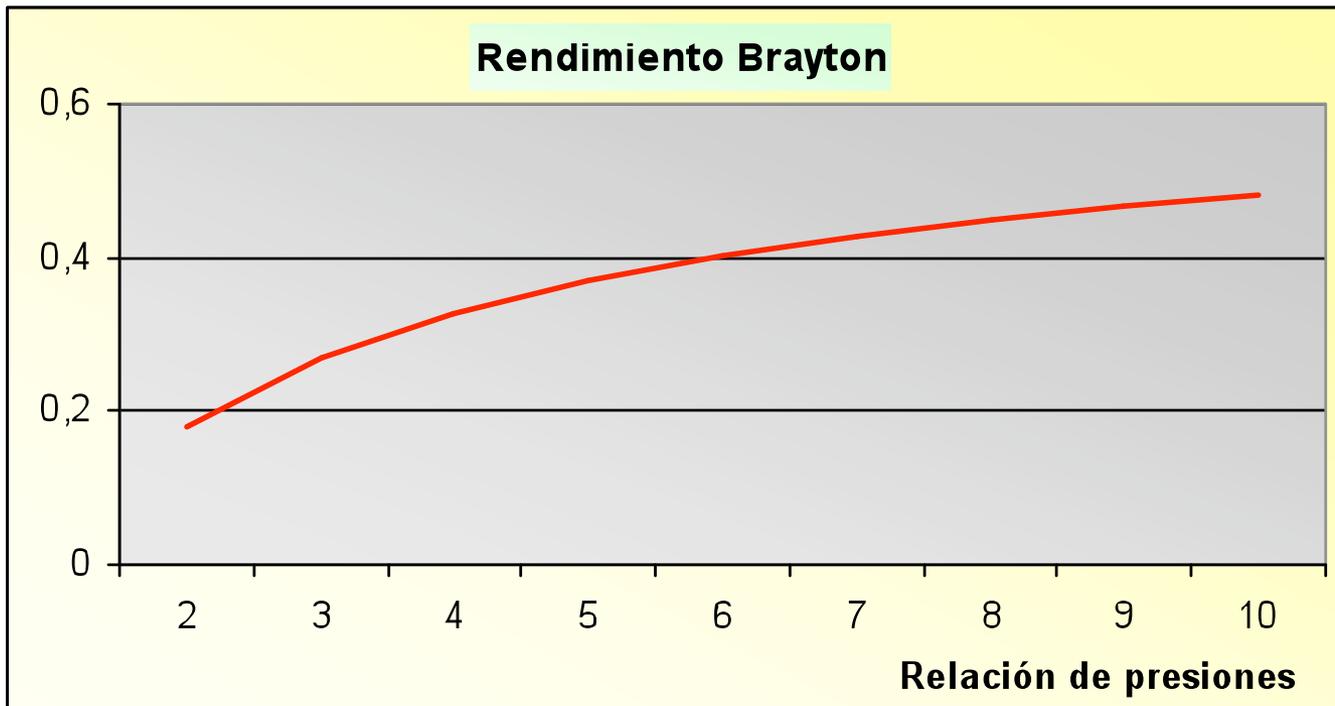
$$\eta_{\text{Brayton}} = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = \left| \begin{array}{l} r_p = p_2 / p_1 \end{array} \right| = 1 - r_p^{-(\gamma-1/\gamma)}$$

3.- Ciclos de gas (XIX)

3.8.- *Ciclo Brayton (IV)*



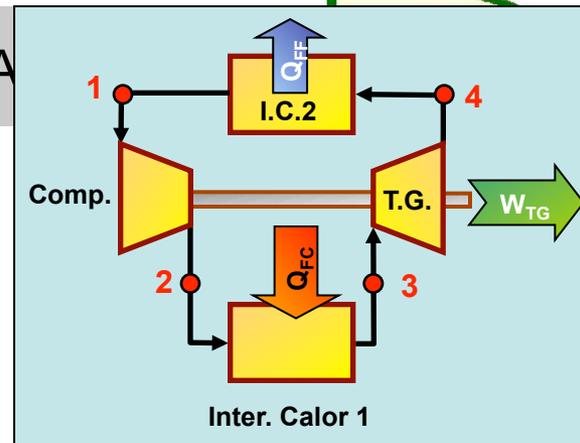
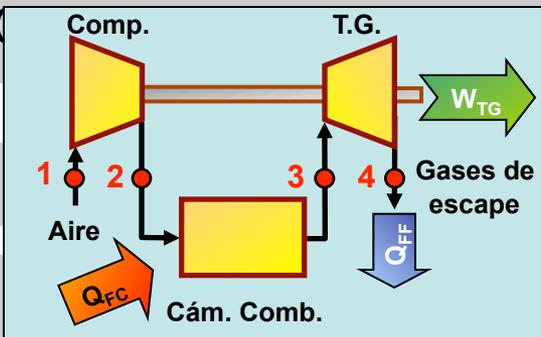
$$\eta_{\text{Brayton}} = 1 - r_p^{-(\gamma-1/\gamma)}$$



3.- Ciclos de gas (XX)

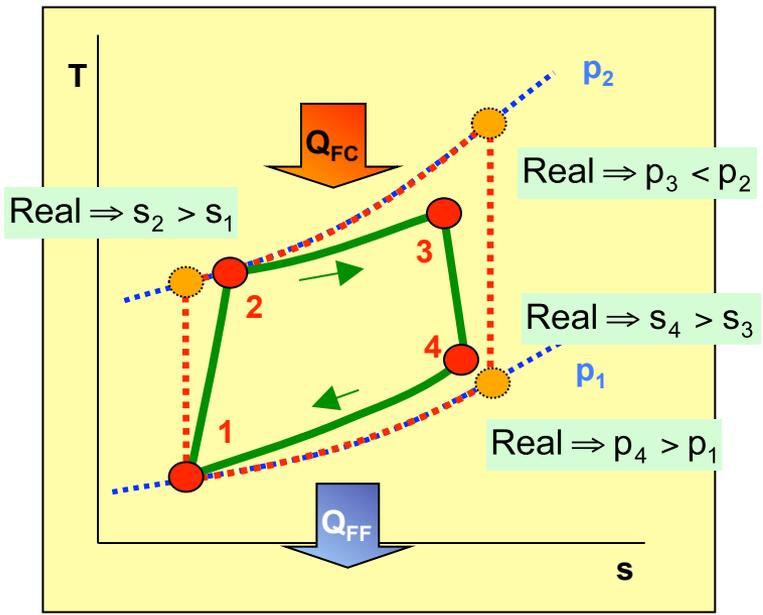
3.8.- Ciclo Brayton (III)

s no cte $\Rightarrow \downarrow \eta$ aprox. 15%

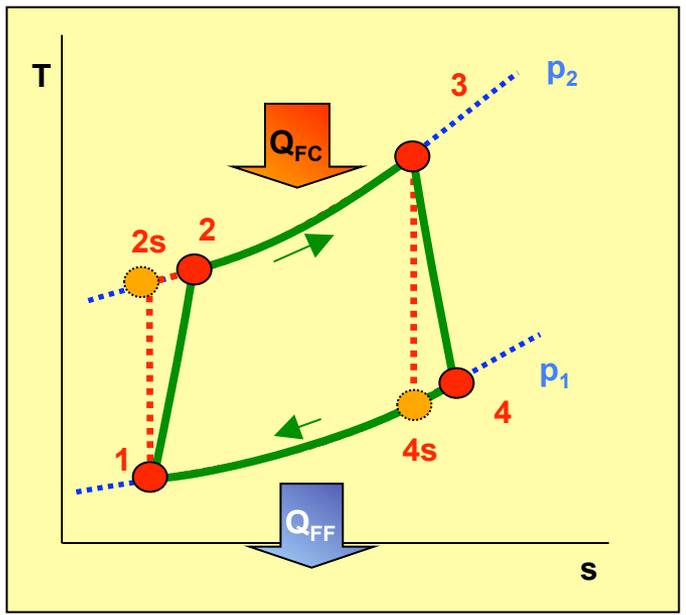


$$\eta_{\text{isoent Turb}} = \frac{W_{\text{real}}}{W_{s=\text{cte}}} = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4s}}$$

$$\eta_{\text{isoent Comp}} = \frac{W_{s=\text{cte}}}{W_{\text{real}}} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1}$$



Sólo se considera s K cte



3.- Ciclos de gas (XXI)

3.9.- Ciclo Brayton regenerativo (I)

El calor cedido al exterior se aprovecha con un regenerador (interc. de calor)

El ideal iguala T^{as} entrada y salida

$$T_x = T_4; T_y = T_2$$

Real: $Q_{FC} = m_{\text{aire}} c_p (T_3 - T_x)$

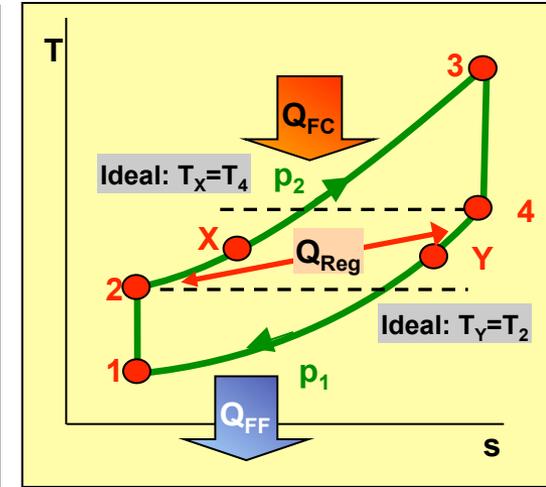
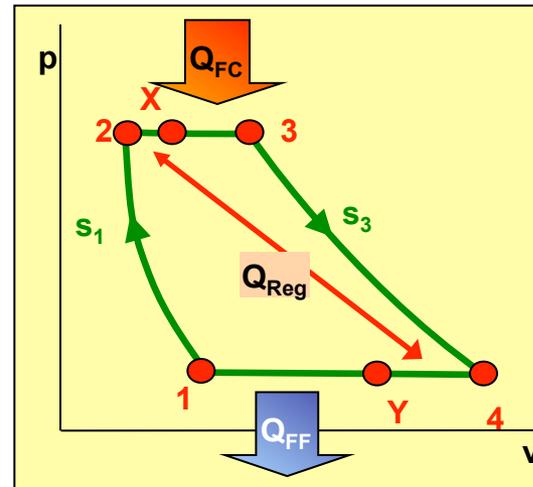
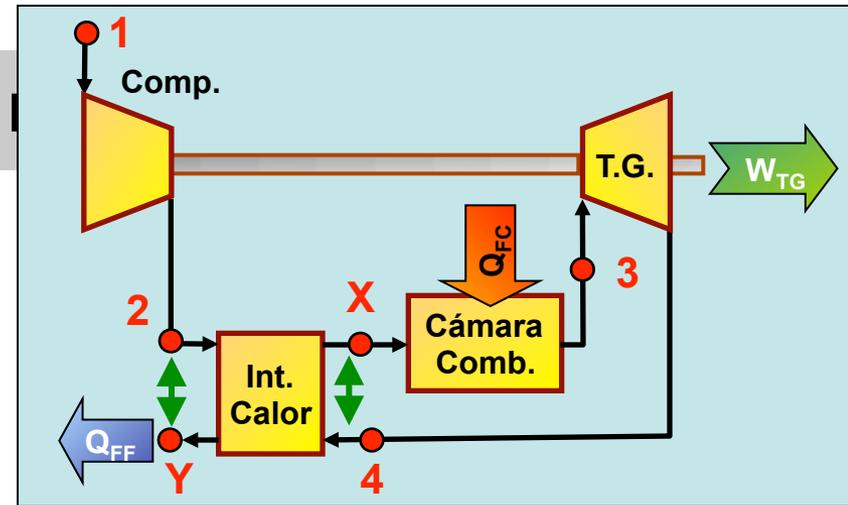
Ideal: $Q_{FC} = m_{\text{aire}} c_p (T_3 - T_4)$

[T2] $s = \text{cte} \Rightarrow$

$$h_a - h_b = c_p (T_a - T_b) \Rightarrow \begin{cases} W_{\text{turb}} = m_{\text{aire}} c_p (T_3 - T_4) \\ W_{\text{comp}} = m_{\text{aire}} c_p (T_2 - T_1) \end{cases}$$

$$\Rightarrow Q_{FC} = W_{\text{turb}}$$

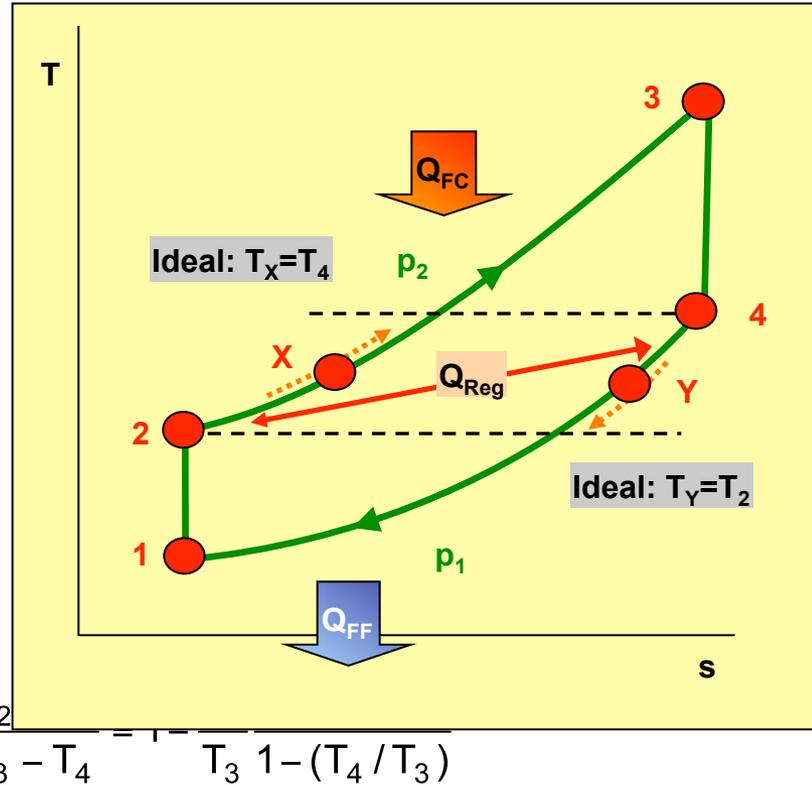
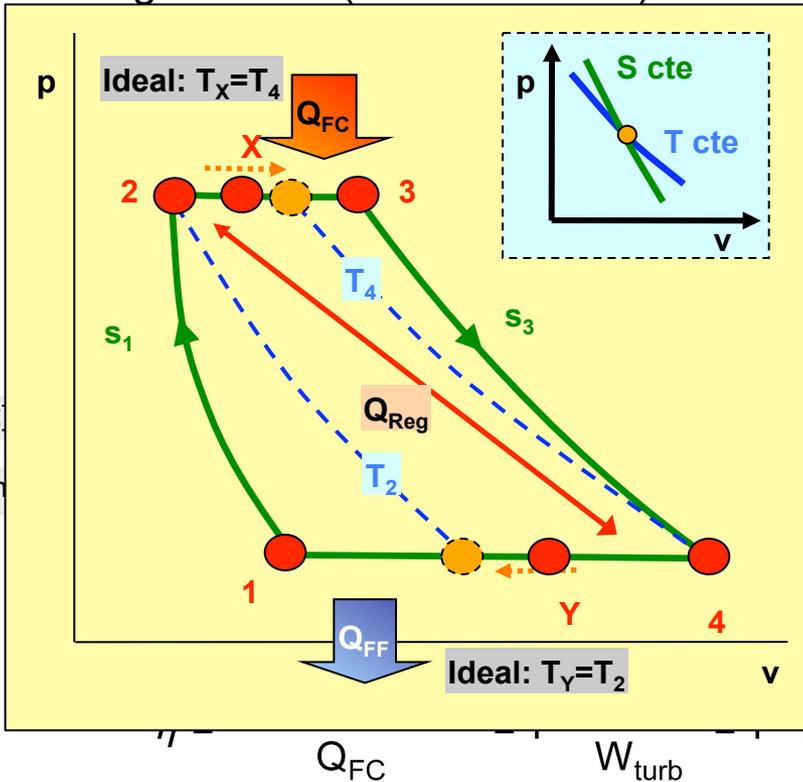
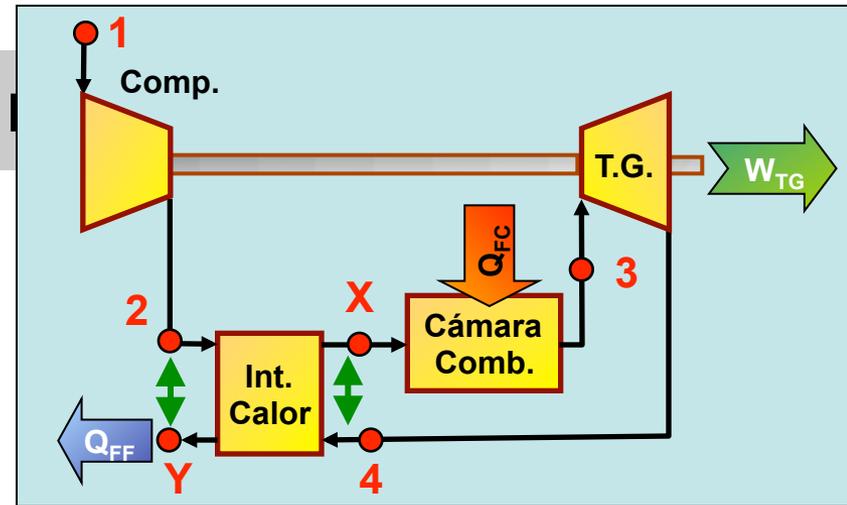
$$\eta = \frac{W_{\text{turb}} - W_{\text{comp}}}{Q_{FC}} = 1 - \frac{W_{\text{comp}}}{W_{\text{turb}}} = 1 - \frac{T_2 - T_1}{T_3 - T_4} = 1 - \frac{T_1}{T_3} \frac{(T_2/T_1) - 1}{1 - (T_4/T_3)}$$



3.- Ciclos de gas (XXI)

3.9.- Ciclo Brayton regenerativo (I)

El calor cedido al exterior se aprovecha con un regenerador (interc. de calor)



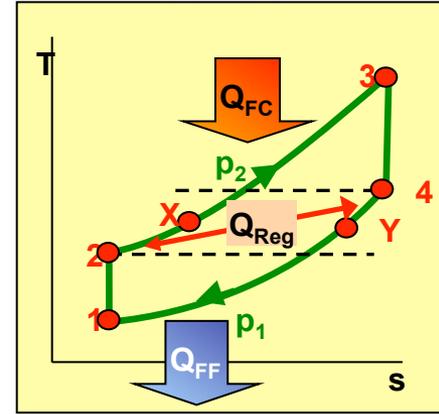
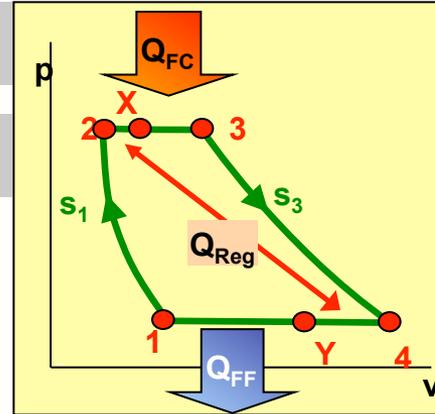
3.- Ciclos de gas (XXII)

3.9.- Ciclo Brayton regenerativo (II)

$$\eta = 1 - \frac{T_1}{T_3} \frac{(T_2/T_1) - 1}{1 - (T_4/T_3)}$$

Adiabáticas: $\left\{ \begin{array}{l} (3-4) \\ (1-2) \end{array} \right.$

Isobaras: (2-3) y (4-1):



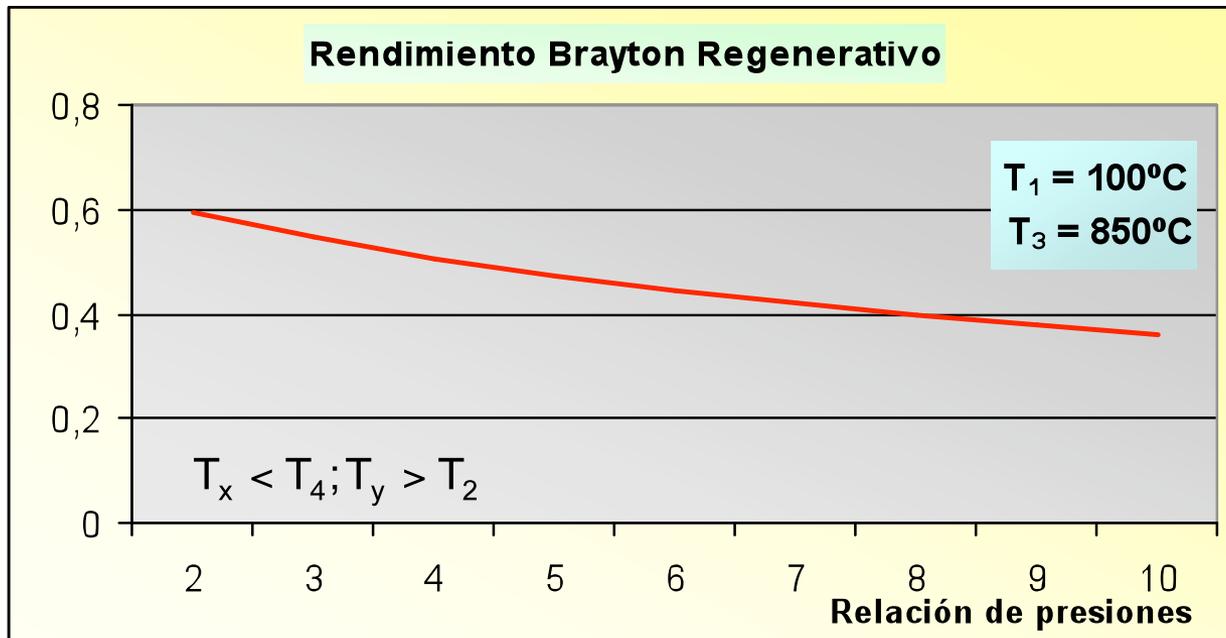
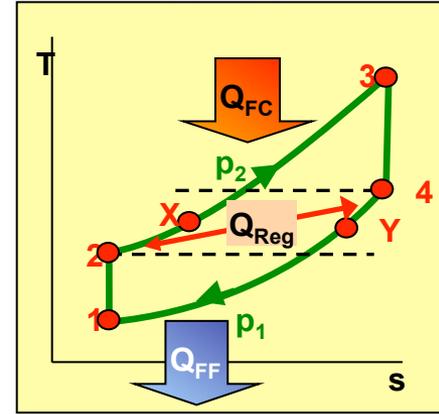
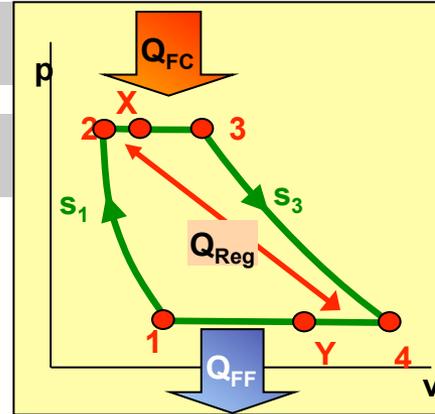
$$\eta_{BReg} = 1 - \frac{T_1}{T_3} r_p^{(\gamma-1)/\gamma}$$

3.- Ciclos de gas (XXIII)

3.9.- Ciclo Brayton regenerativo (III)

$$\eta_{BReg} = 1 - \frac{T_1}{T_3} r_p^{(\gamma-1)/\gamma}$$

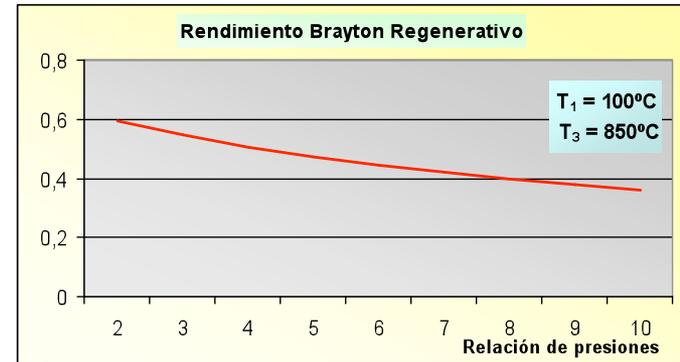
$\eta_{BReg} \downarrow$ al $\uparrow r_p$



3.- Ciclos de gas (XXIV)

3.9.- Ciclo Brayton regenerativo (IV)

$$\eta_{BReg} = 1 - \frac{T_1}{T_3} r_p^{(\gamma-1)/\gamma} \quad \eta_{BReg} \downarrow \text{ al } \uparrow r_p$$



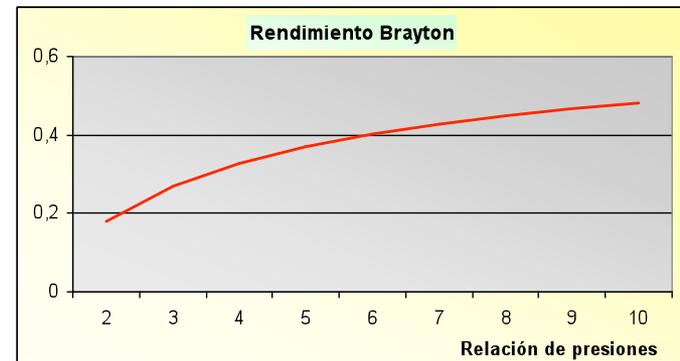
En el regenerador no se pueden igualar las T^{as}

$$T_x < T_4; T_y > T_2$$

$$\eta_{reg} = \frac{h_x - h_2}{h_4 - h_2} = \frac{T_x - T_2}{T_4 - T_2}$$

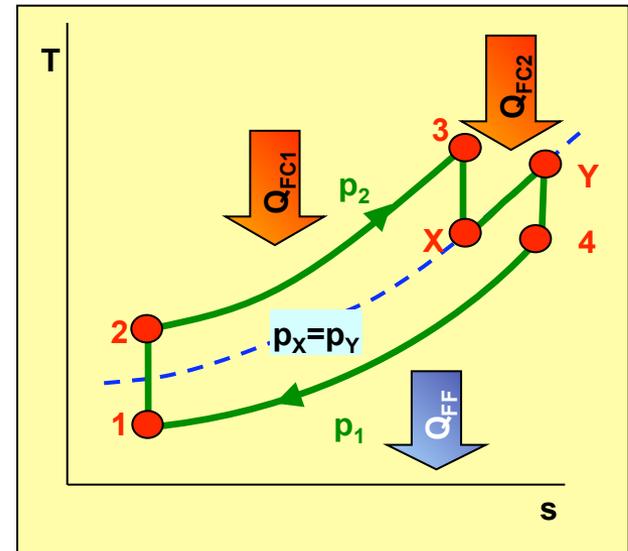
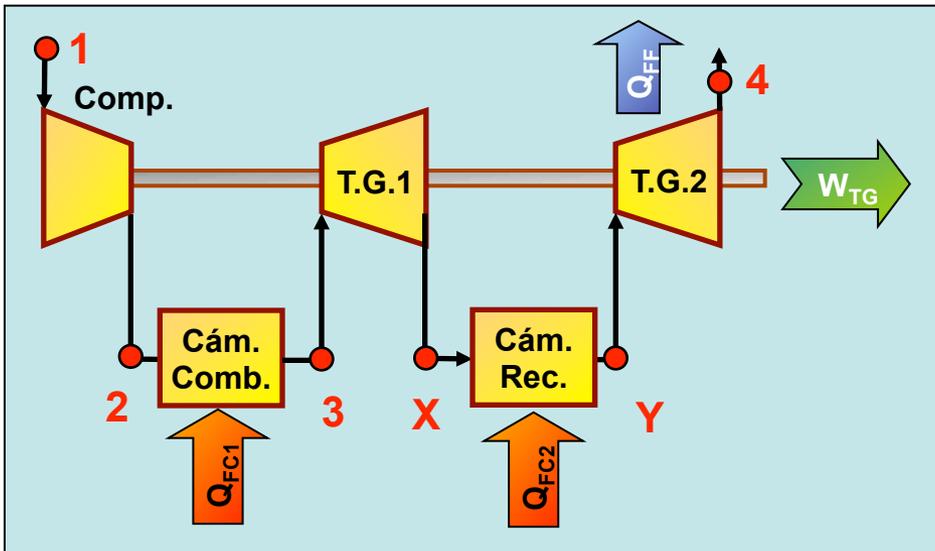
$$\eta_{Br} = 1 - r_p^{(1-\gamma/\gamma)} = 1 - r_p^{-(\gamma-1/\gamma)} \quad \eta_B \uparrow \text{ al } \uparrow r_p$$

- Para r_p bajas $\eta_{BReg} > \eta_B$
- Para r_p altas $\eta_{BReg} < \eta_B$



3.- Ciclos de gas (XXV)

3.10.- Ciclo Brayton con recalentamiento



T_{max} limitada por los álabes de la turbina

El recalentamiento \uparrow el área del ciclo sin $\uparrow T_{max}$

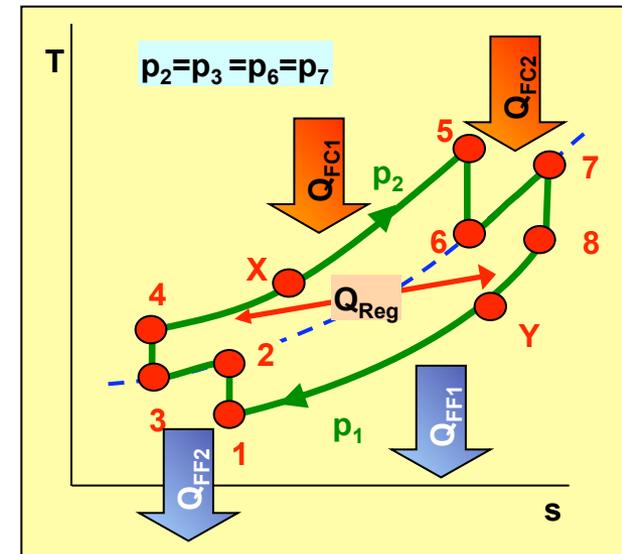
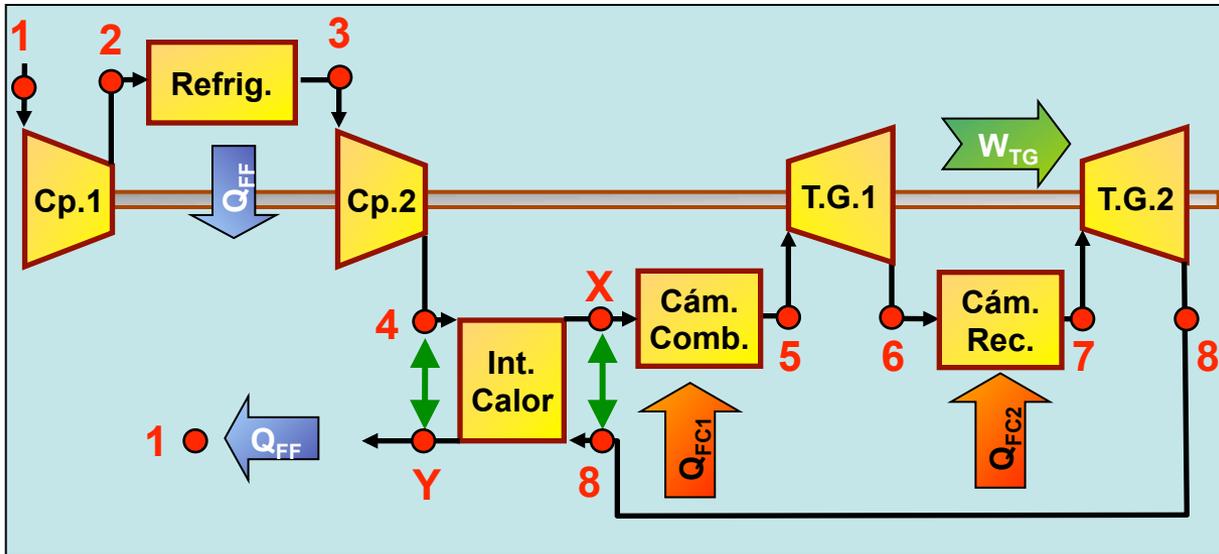
Se necesitan dos turbinas y una segunda cámara de combustión (recalentador)

La presión intermedia debe hacer que las relaciones de presiones sean iguales

$$\frac{p_2}{p_X} = \frac{p_X}{p_1}$$

3.- Ciclos de gas (XXVI)

3.10.- Ciclo Brayton regenerativo con recalentamiento y refrigeración



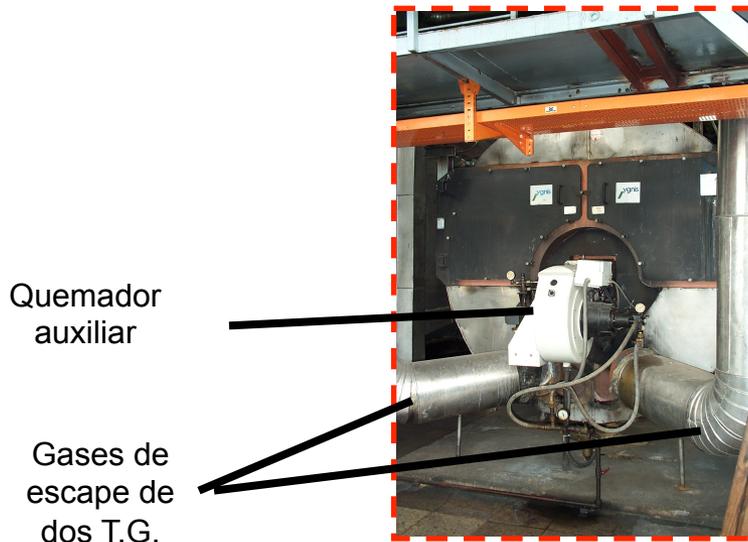
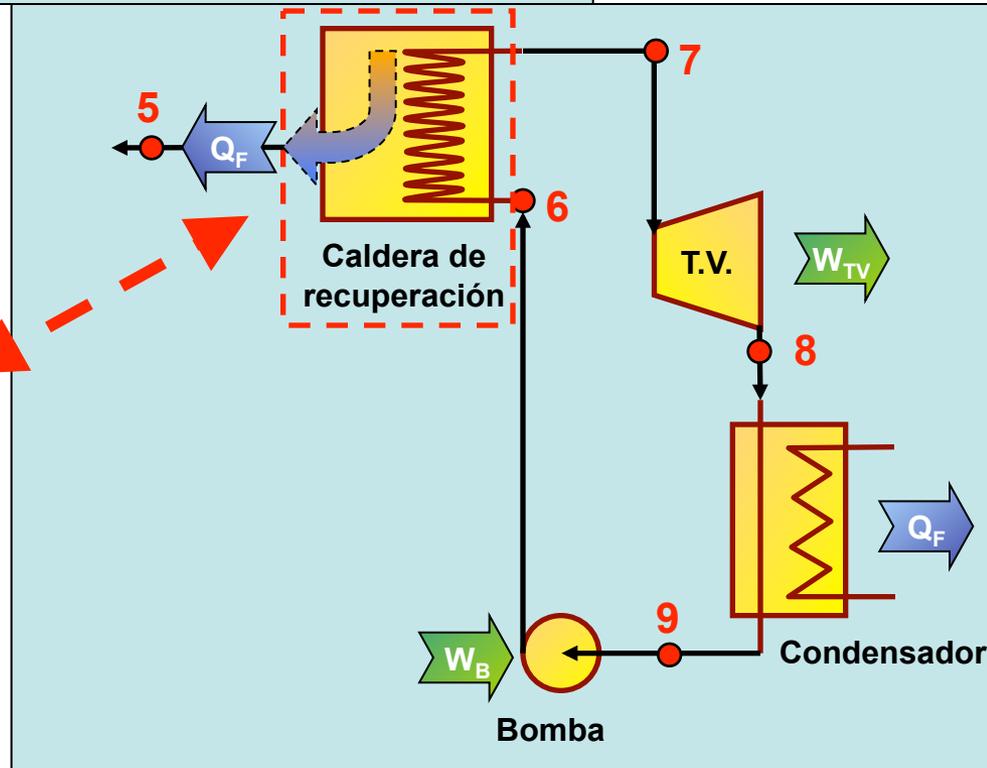
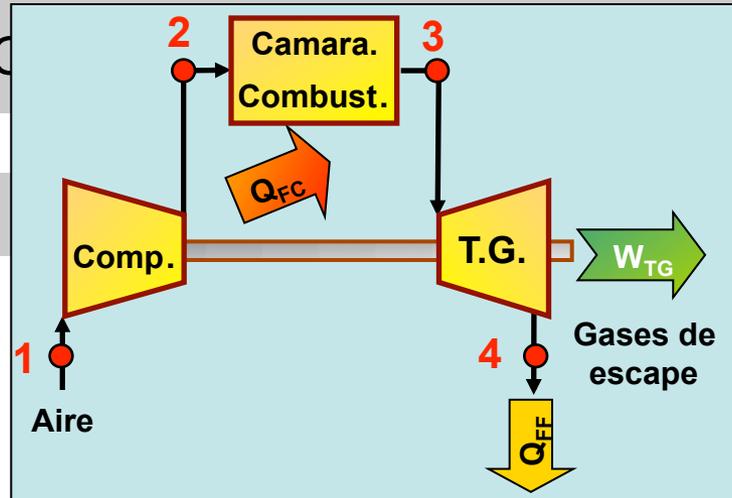
Para mejorar el funcionamiento se puede introducir una refrigeración intermedia entre dos etapas de compresión complementado con un recalentamiento y un regenerador

La presión intermedia en el recalentamiento debe ser la misma que en la refrigeración

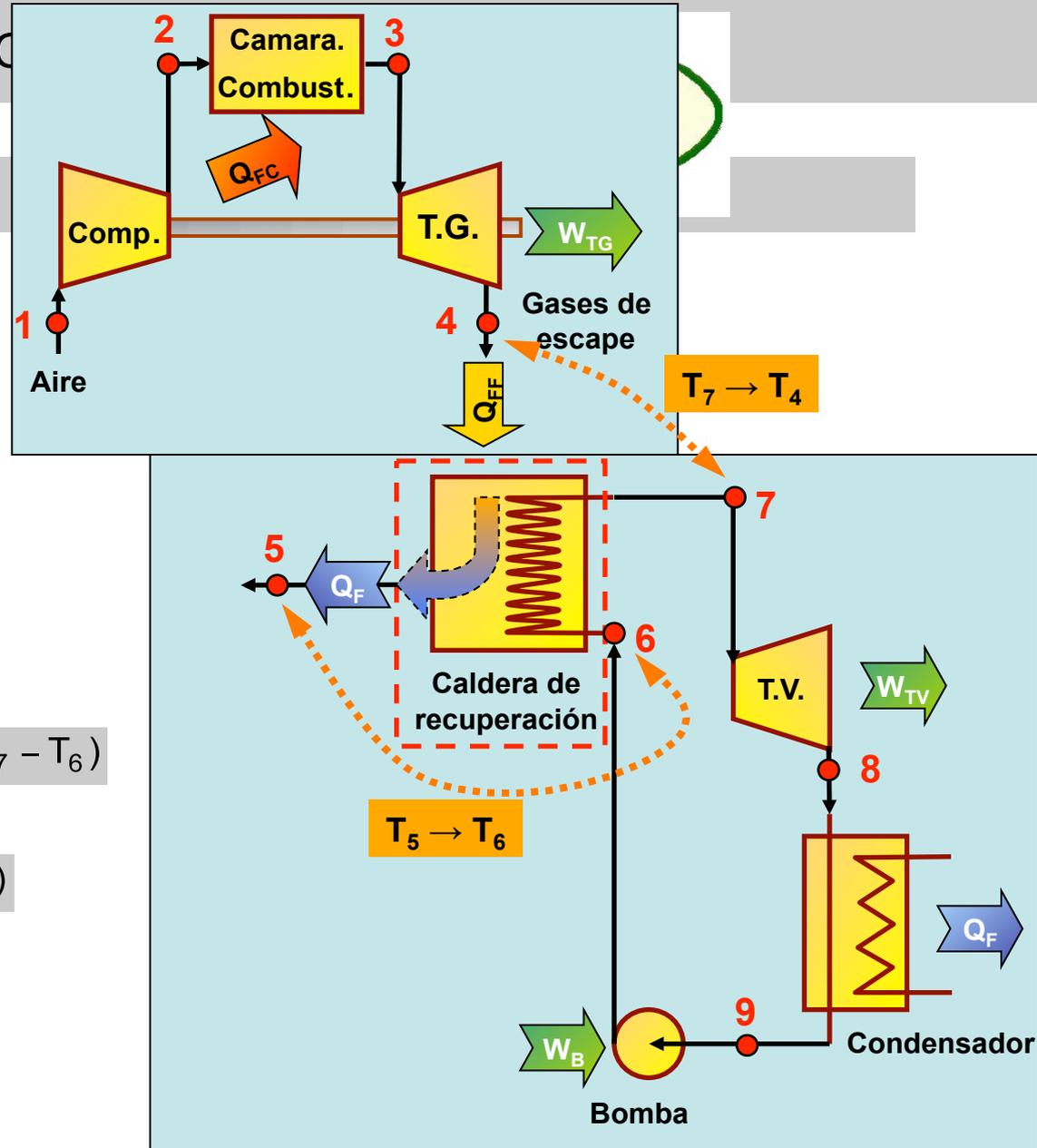
$$\frac{p_4}{p_2} = \frac{p_2}{p_1}$$

4.- Ciclo Combinado (I)

Los gases de escape de una turbina de gas o un motor de combustión se emplean para alimentar térmicamente una caldera de recuperación de un ciclo de vapor



4.- Ciclo Combinado (II)



Ideal:

$$T_5 = T_6 \text{ y } T_7 = T_4$$

$$p_4 = p_5 \text{ y } p_7 = p_4$$

$$m_{\text{aire}} c_{\text{paire}} (T_4 - T_5) = m_{\text{vapor}} c_{\text{pvapor}} (T_7 - T_6)$$

$$m_{\text{aire}} (h_4 - h_5) = m_{\text{vapor}} (h_7 - h_6)$$

$$\eta_{\text{Ciclo Comb}} = \frac{(W_{\text{TG}} - W_{\text{cmp}}) + W_{\text{TV}}}{Q_{\text{FC}}}$$

*Central Térmica de Ciclo Combinado (I)
Arrubal, La Rioja (2 x 400 MW)*

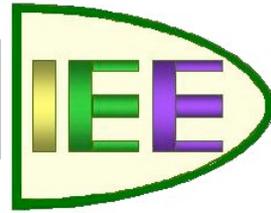


*Central Térmica de Ciclo Combinado (II)
Arrubal, La Rioja (2 x 400 MW)*



Central Térmica de Ciclo Combinado (III) Arrubal, La Rioja (2 x 400 MW)





5.- Cogeneración (I)

Aprovechamiento térmico del calor residual de un ciclo de potencia

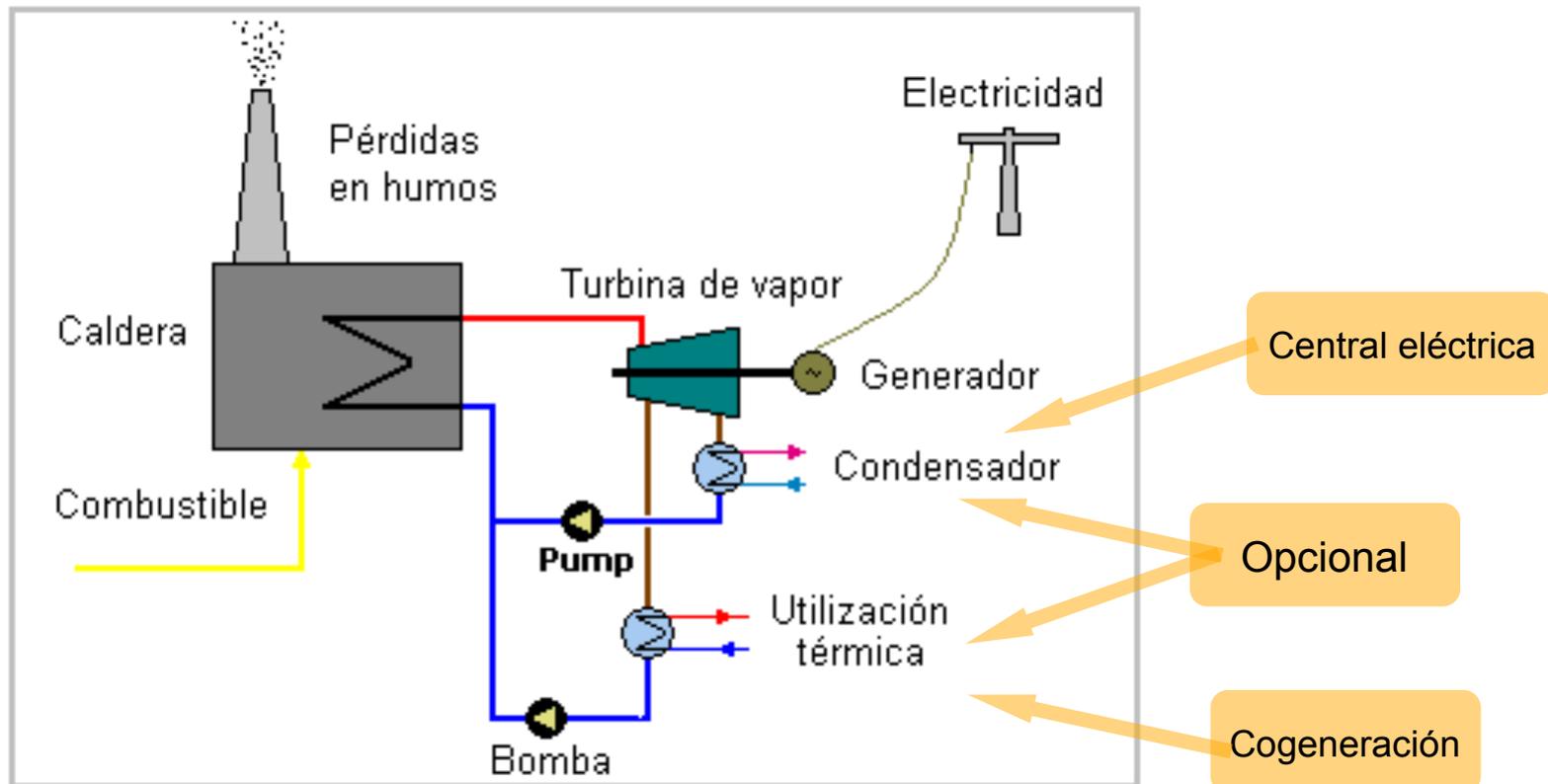
- Del calor cedido en el condensador
- De los gases de escape de un motor o turbina
- De la refrigeración de la lubricación de un motor

TRIGENERACION:

Aprovechamiento del calor de calor de cogeneración para producir frío con un sistema de absorción (T6)

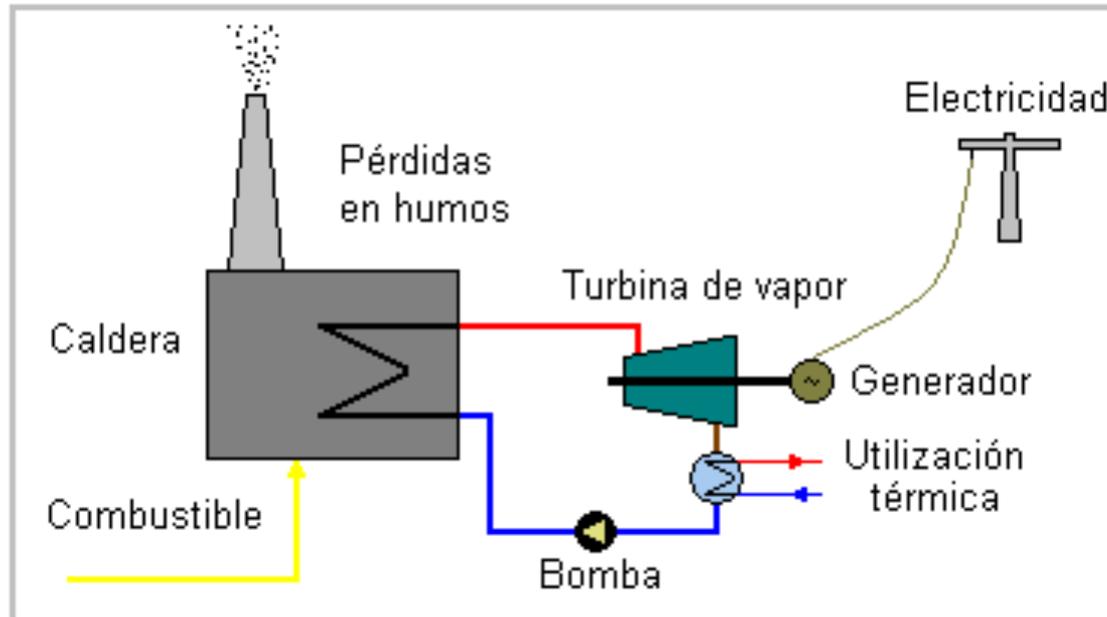
5.- Cogeneración (II)

Centrales de extracción



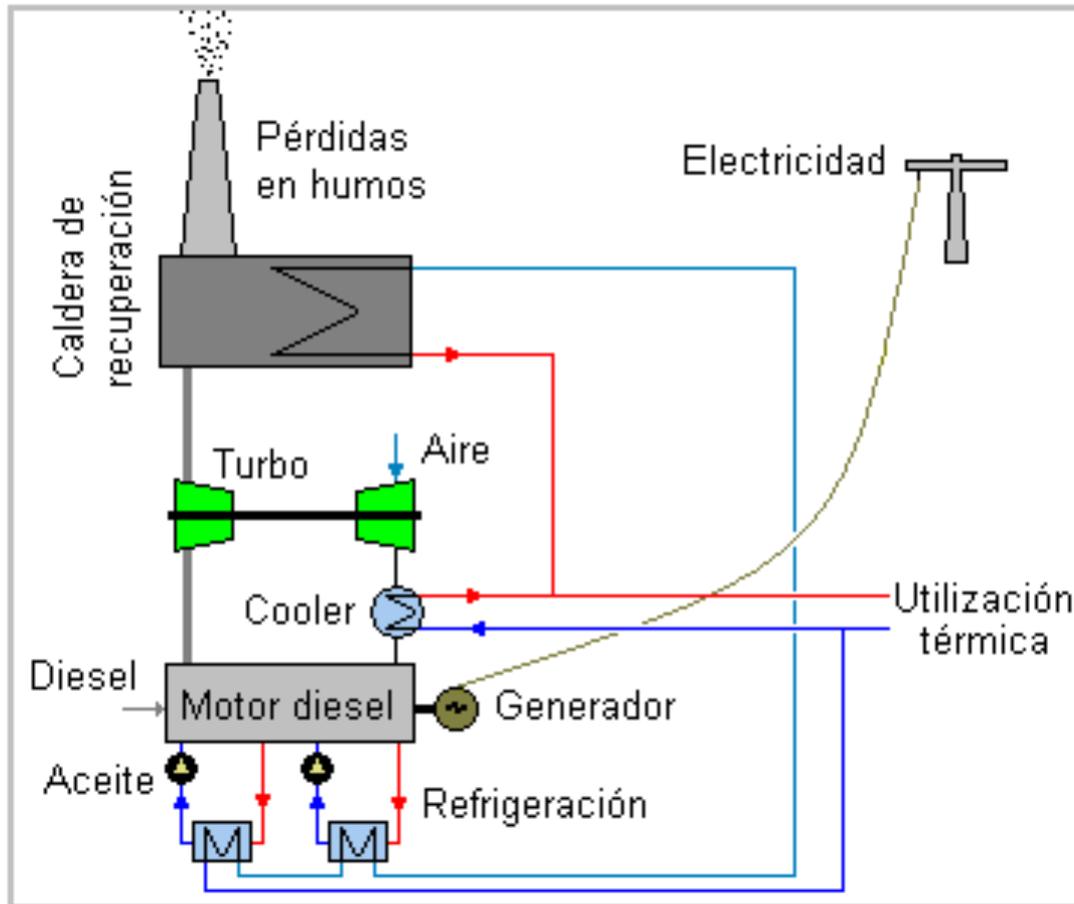
5.- Cogeneración (III)

Central Back-Pressure o Contrapesión



5.- Cogeneración (IV)

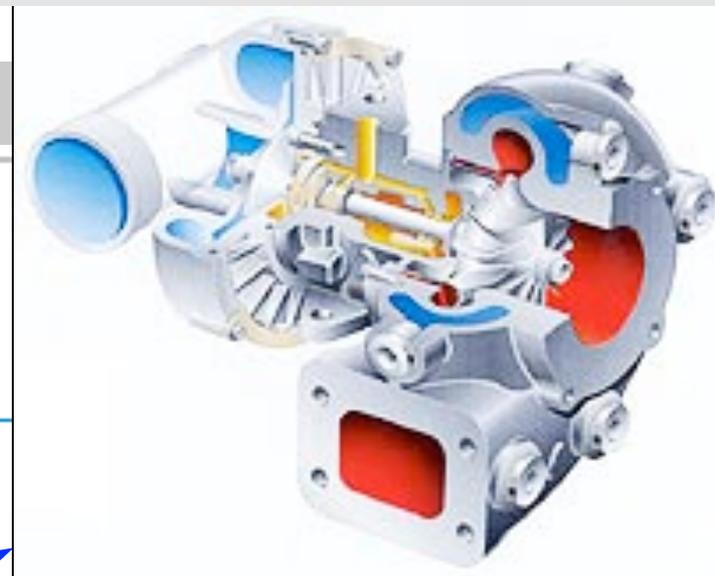
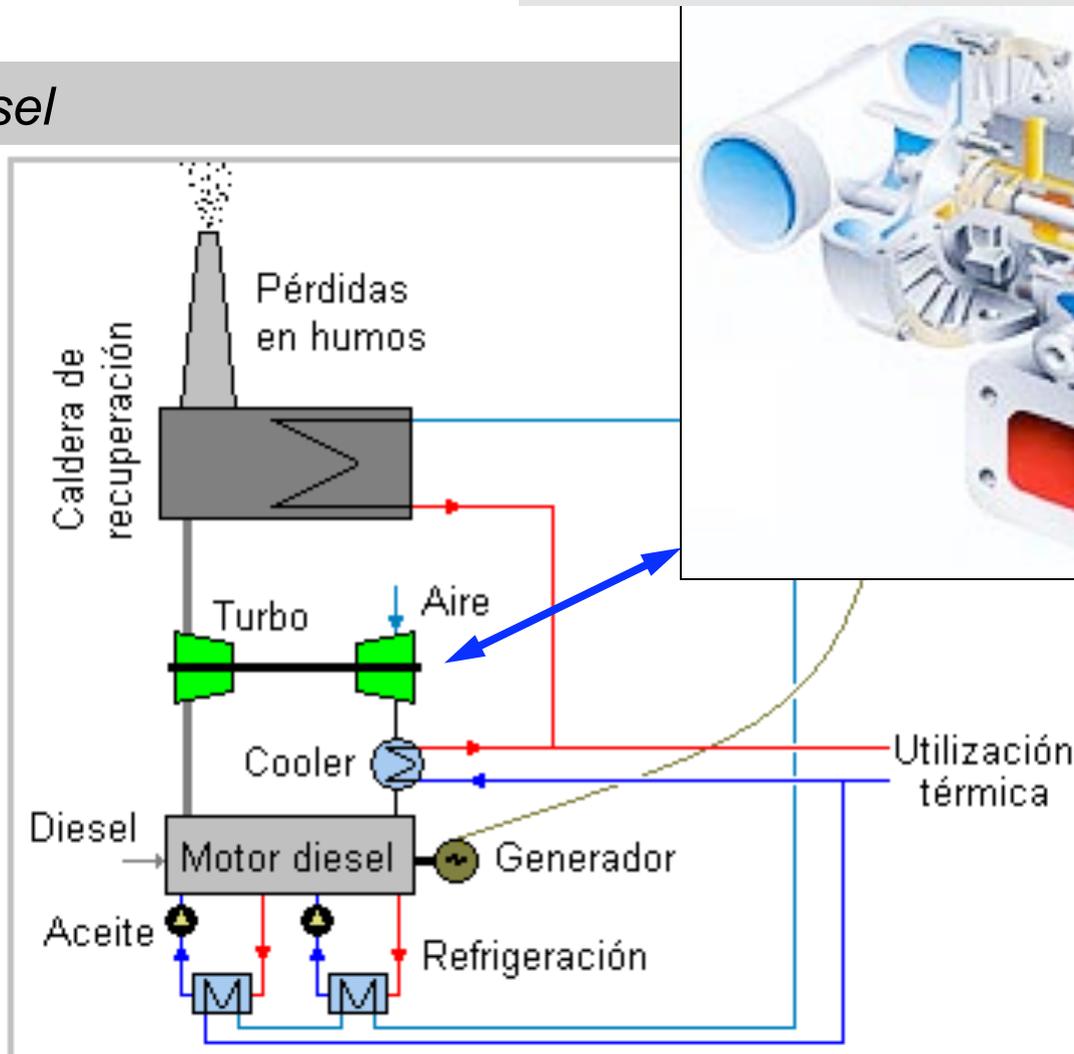
Motores diesel



5.- Cogeneración (IV)

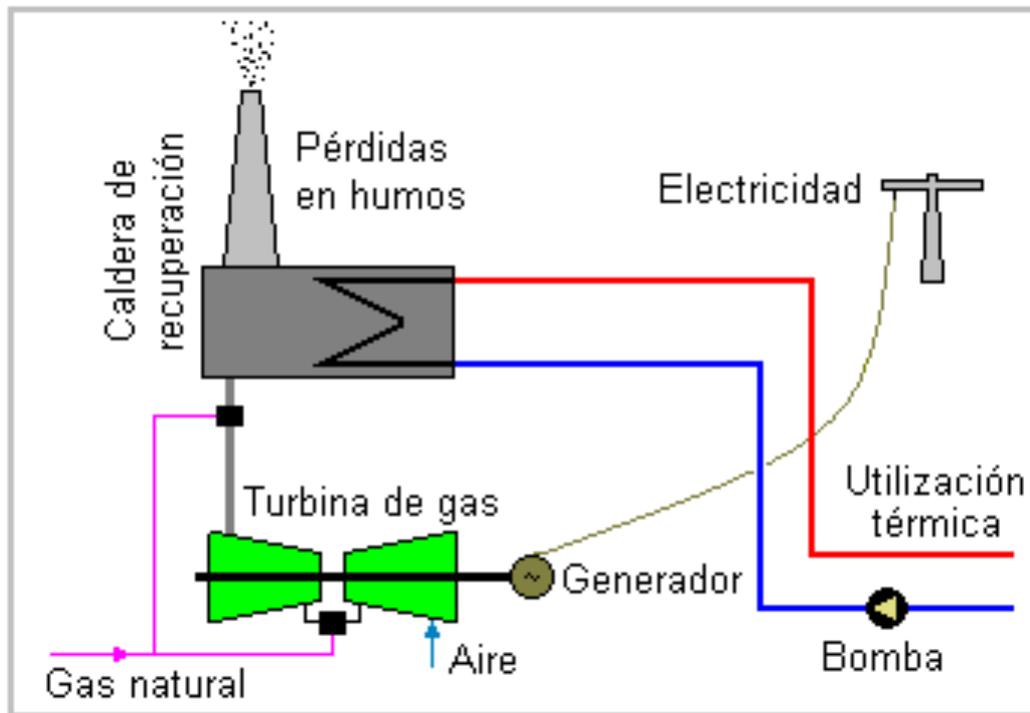
<http://www.turbodrive.com/es/turbofacts/designTurbine.aspx>

Motores diesel



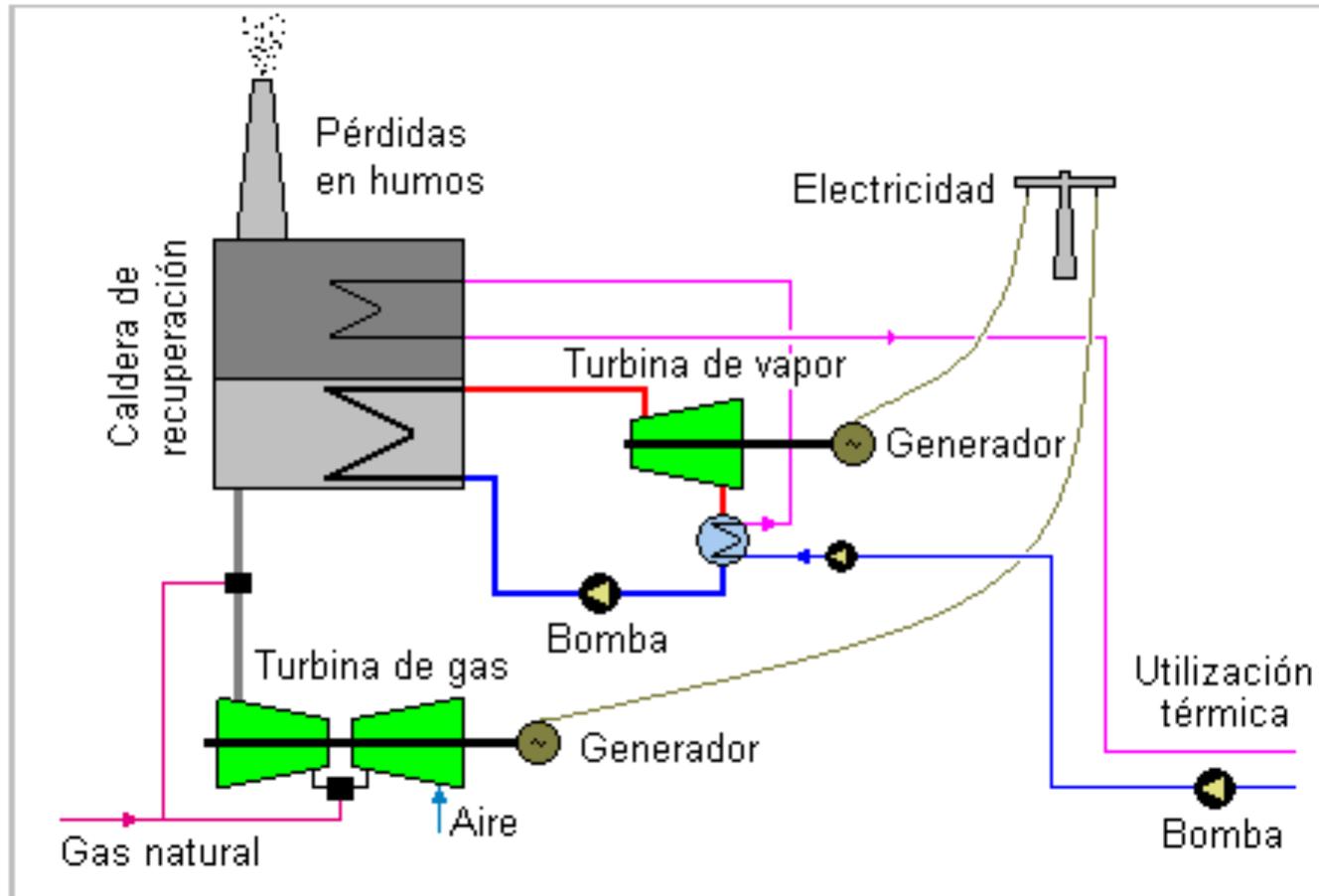
5.- Cogeneración (V)

Con turbinas de gas



5.- Cogeneración (VI)

Centrales de ciclo combinado



5.- Cogeneración (VII)

| | T. Gas | Motor Diesel |
|---|---------------|--|
| Rendimiento mecánico | 35% | 40% |
| O₂ en los gases de escape | 14% | 1-2% |
| Nivel entálpico de la energía térmica | Alto | Alto en gases de escape Bajo en refriger. del motor |
| Coste económico | Alto | Medio |
| Costes de mantenimiento | Alto | Medio |
| Respuesta a los cambios de potencia solicitada | Mala | Buena |
| Ruidos y vibraciones | Alto | Medio |
| Contaminación atmosférica | Similar | |

5.- Cogeneración (VIII)

| | Rendimiento anual | | Ratio Electricidad/ Calor | |
|--|--------------------------|-----------------------|------------------------------|------------|
| | Combustible líq o gas | Combustible sólido | District Heating | Industrial |
| Turbina de vapor de contrapresión | 85 % | 84 % | 0,45 | 0,30 |
| Turbina de vapor de condensación y extracción | 85 % | 84 % | 0,45 | 0,30 |
| Turbina de gas | 86 % | | 0,55 | 0,40 |
| Ciclo combinado | 88 % | | 0,95 | 0,75 |
| Motor de combustión | 84 % | | 0,75 | 0,60 |

5.- Cogeneración (IX)

| Presión salida (bar) | Ratio Electricidad / Calor para turbinas de vapor | | | | | | |
|---|---|------|------|------|------|--------|--------|
| | 0,33 | 0,41 | 0,45 | 0,48 | 0,50 | 0,5 | 0,62 |
| 0,4 | 0,33 | 0,41 | 0,45 | 0,48 | 0,50 | 0,5 | 0,62 |
| 0,4 a 0,8 | 0,31 | 0,38 | 0,42 | 0,45 | 0,47 | 0,55 | 0,58 |
| 0,8 | 0,3 | 0,35 | 0,40 | 0,43 | 0,45 | 0,52 | 0,55 |
| 1,5 | 0,26 | 0,32 | 0,35 | 0,38 | 0,41 | 0,47 | 0,49 |
| 2 | 0,24 | 0,29 | 0,32 | 0,36 | 0,40 | 0,44 | 0,47 |
| 3 | 0,21 | 0,26 | 0,30 | 0,33 | 0,38 | 0,40 | 0,43 |
| 4 | 0,19 | 0,24 | 0,28 | 0,30 | 0,35 | 0,37 | 0,40 |
| 5 | | 0,22 | 0,26 | 0,29 | 0,32 | 0,35 | 0,38 |
| 6 | | 0,21 | 0,24 | 0,26 | 0,29 | 0,33 | 0,36 |
| 8 | | 0,18 | 0,22 | 0,24 | 0,27 | 0,31 | 0,33 |
| 10 | | | 0,20 | 0,22 | 0,25 | 0,27 | 0,30 |
| 12 | | | 0,18 | 0,21 | 0,23 | 0,26 | 0,28 |
| 14 | | | 0,17 | 0,19 | 0,22 | 0,24 | 0,26 |
| 16 | | | | 0,18 | 0,21 | 0,23 | 0,24 |
| Presión vapor (bar) vivo / reinyectado | 40 | 60 | 80 | 100 | 120 | 140/40 | 180/45 |
| Tª vapor (°C) | 450 | 480 | 500 | 520 | 530 | 535 | 535 |
| Tª agua alimentación (°C) | 140 | 180 | 200 | 210 | 225 | 240 | 260 |
| Potencia entregada (MW) | 10 | 20 | 30 | 35 | 40 | 100 | 150 |