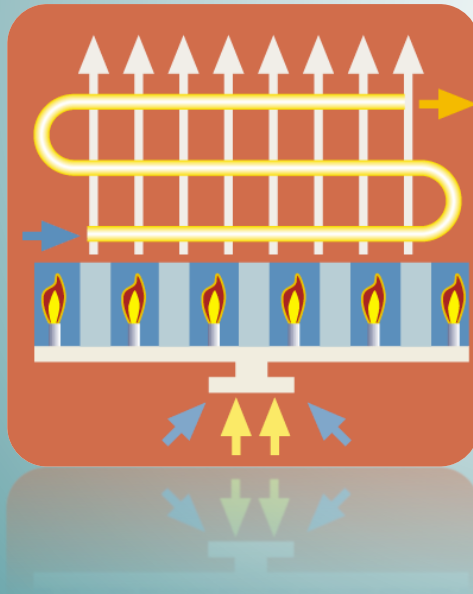


Termodinámica y Máquinas Térmicas

Tema 05. 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 05.- 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.- Máquinas Térmicas

- 4.1.- Turbinas de vapor
- 4.2.- Motores de combustión
- 4.3.- Turbinas de gas
- 4.4.- 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.

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

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

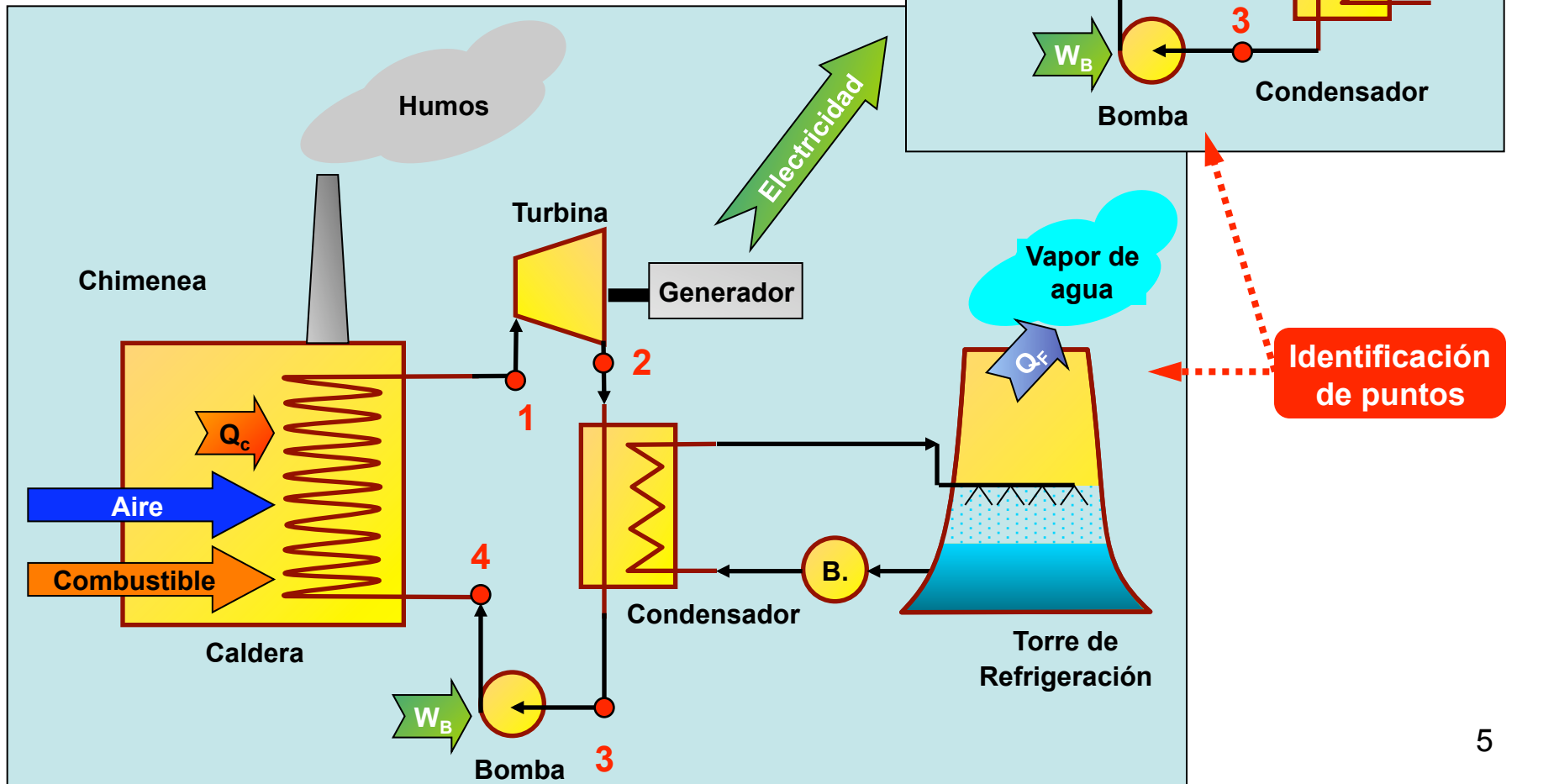
$$dq + |dw_r| = dh - v \, dp \quad \text{En cald/cond (p = cte)} \Rightarrow dq = dh$$

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

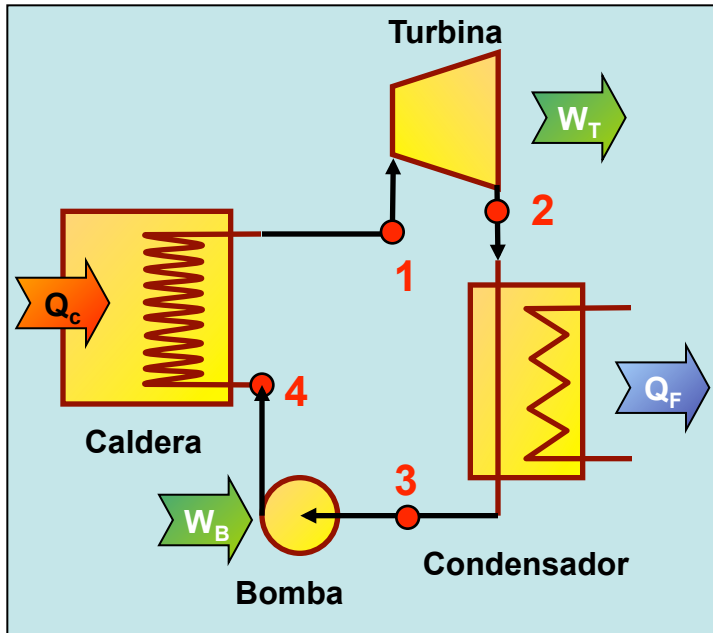
$$\text{En las Turbinas } Q = 0, \text{ y } \Delta E_{\text{cin}} = 0 \Rightarrow W_t = M (h_1 - h_2)$$

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

2.- Ciclos de vapor (I)



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)

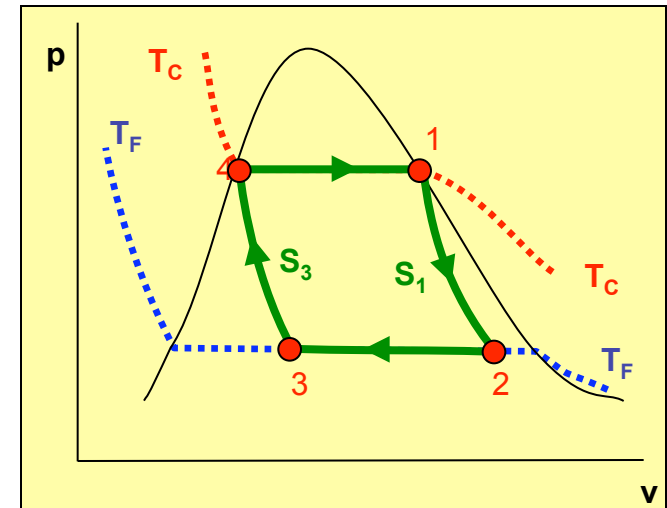
Dos ciclos termodinámicos básicos de vapor, el ciclo de Carnot (ideal), y el ciclo de Rankine (real), que tiene diferentes variantes

2.1.- Ciclo de Carnot (I)

Es el ideal

Limitado por dos isothermas y dos adiabáticas (s cte)

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



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

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

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

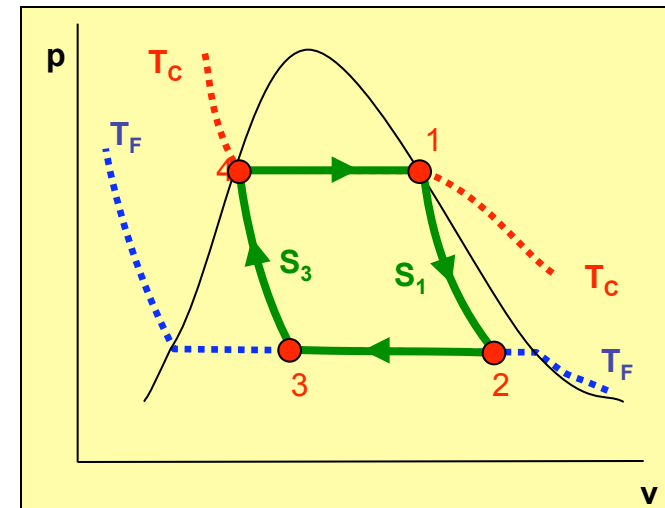
$$Q_{FF} = Q_{FC} \frac{T_{\text{amb}}}{T_{FC}}$$

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)

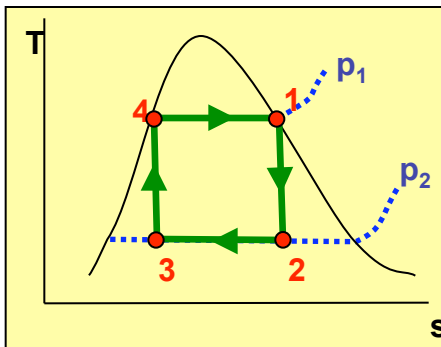
El ciclo de *Carnot* presenta dos problemas prácticos:

La bomba trabaja mal si lo hace con vapor

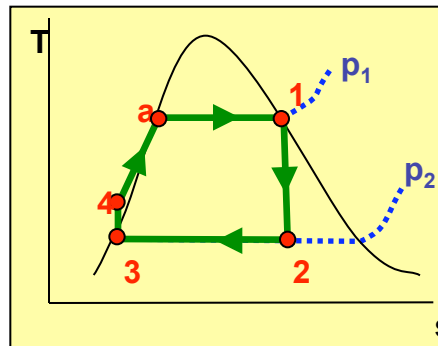
Si la expansión se realiza en la zona de vapor saturado corren peligro los álabes de la turbina, hay que limitar formación de agua líquida

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

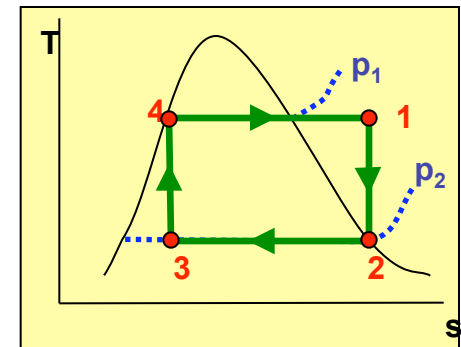
Este ciclo, también lo describen dos isoentrópicas y dos isobaras



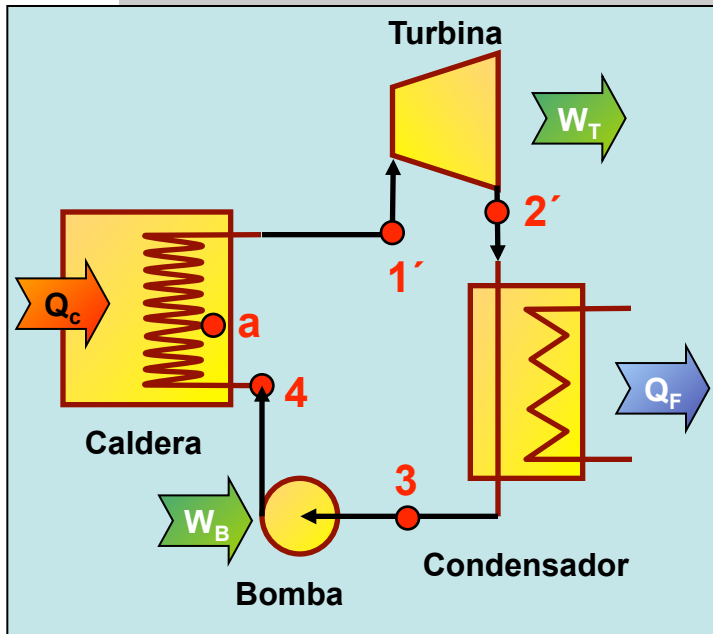
Ciclo de Carnot



Ciclo de Rankine evitando vapor en la bomba

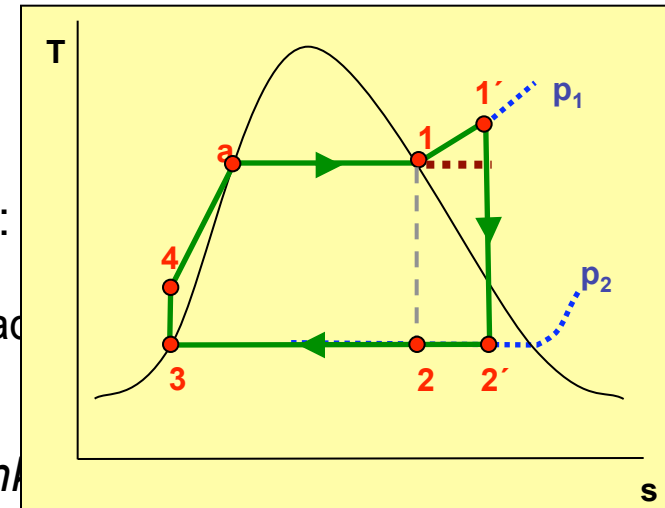


Ciclo de Rankine evitando vapor en la turbina (teórico)

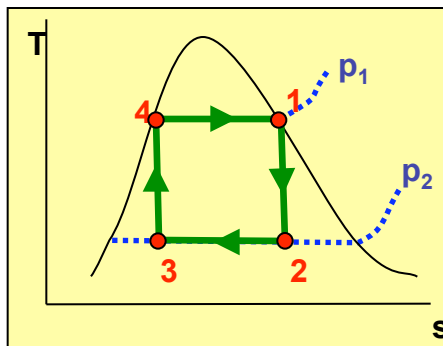


problemas prácticos:
- se con vapor
- a zona de vapor saturada
- acción de agua líquida

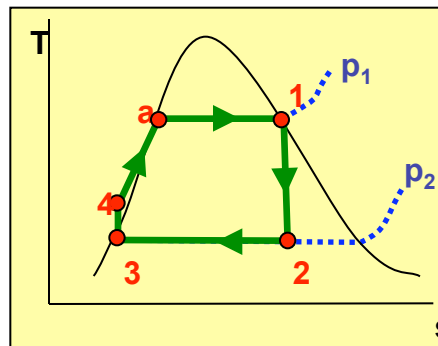
de fase, el ciclo *Rankine*



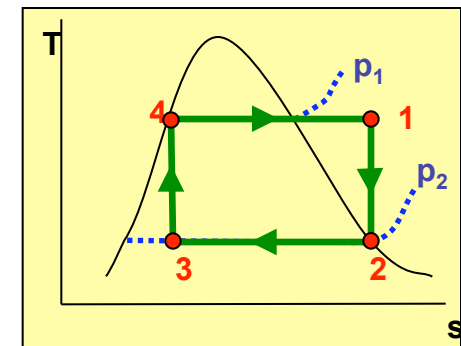
dos isoentrópicas y dos isobaras



Ciclo de Carnot



Ciclo de Rankine evitando
vapor en la bomba



Ciclo de Rankine evitando 10
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 ($T_{1'} > T_1$) $\downarrow \eta$

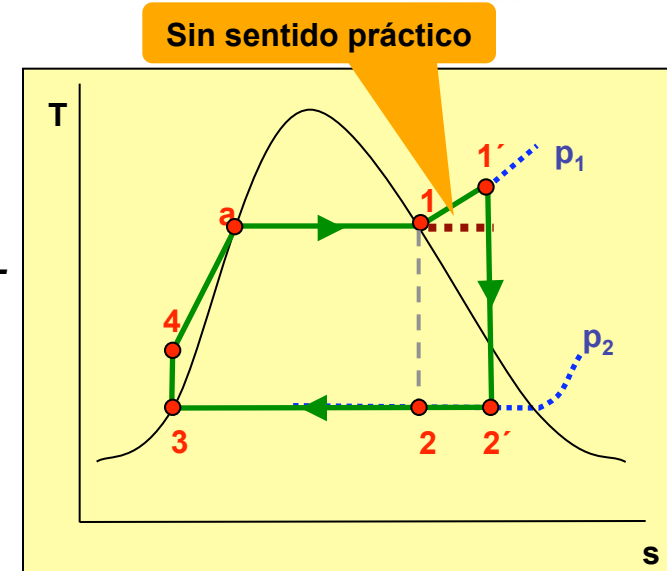
$$\eta_C > \eta_R$$

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

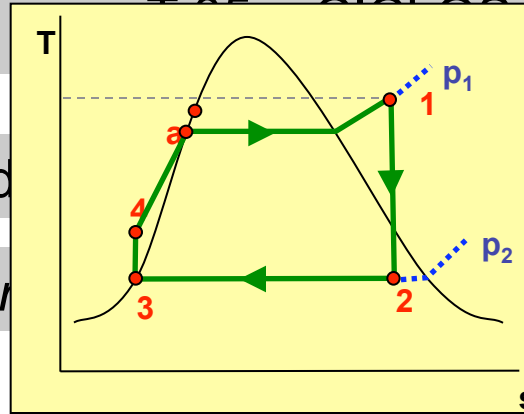
$$\left. \begin{aligned} w_{\text{Turb}} &= h_1 - h_2 \\ w_{\text{bomb}} &= v_L (p_4 - p_3) \\ q_{\text{FC}} &= q_{\text{cald}} = h_{1'} - h_4 \\ q_{\text{FF}} &= q_{\text{cond}} = h_{2'} - h_3 \end{aligned} \right\}$$

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

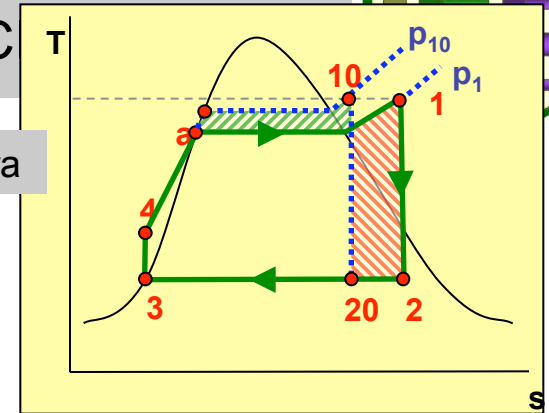


2.- Ciclos de potencia

2.2.- Ciclo Rankine



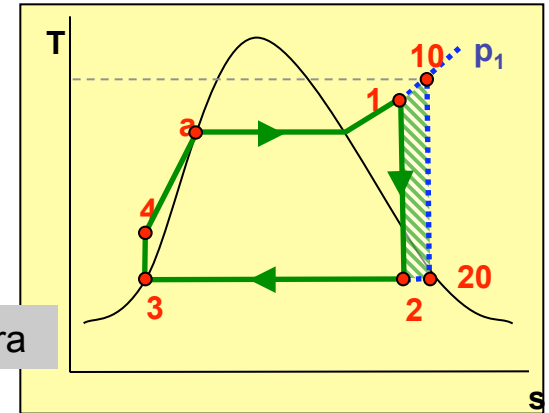
↑ p caldera



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

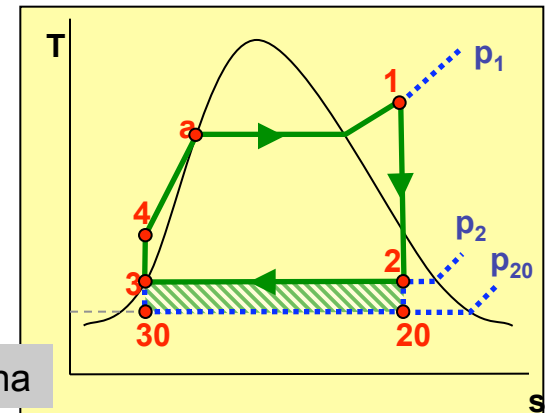
↑ T caldera



Se debe:

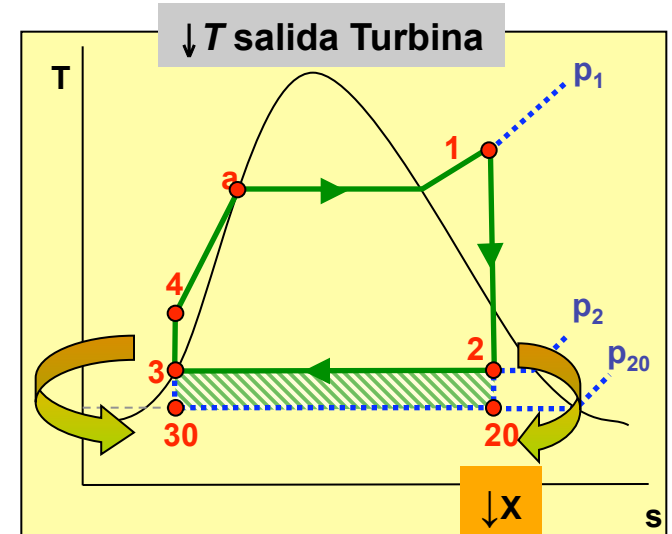
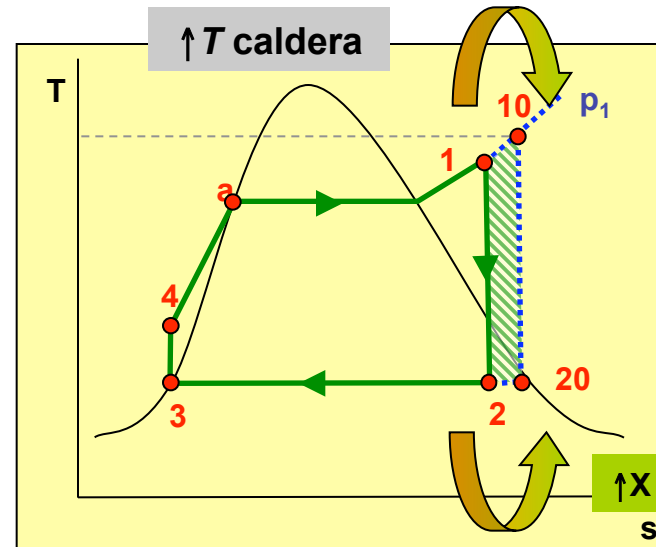
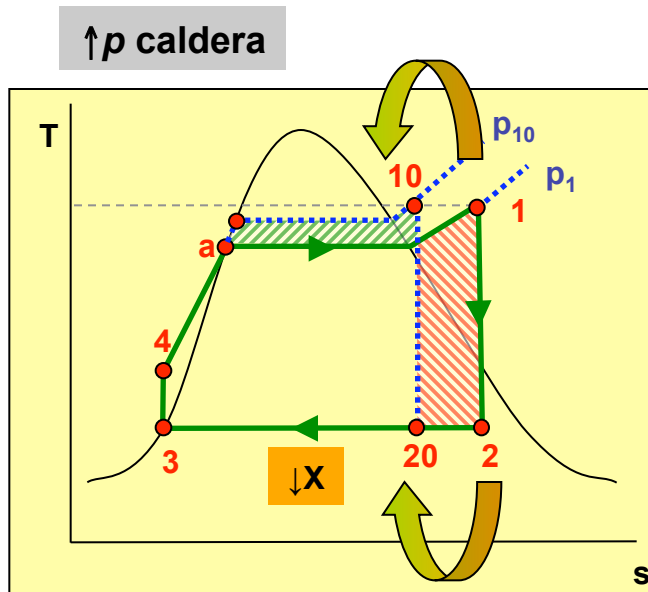
- respetar la $T_{\max}$ de la caldera, limitada por los materiales, del orden de 600°C
- evitar trabajar en la zona de vapor saturado
- considerar la $T_{\min}$ que se dispone para condensar

↓ T salida Turbina



2.- Ciclos de vapor (VI)

2.2.- *Ciclo Rankine* (III)

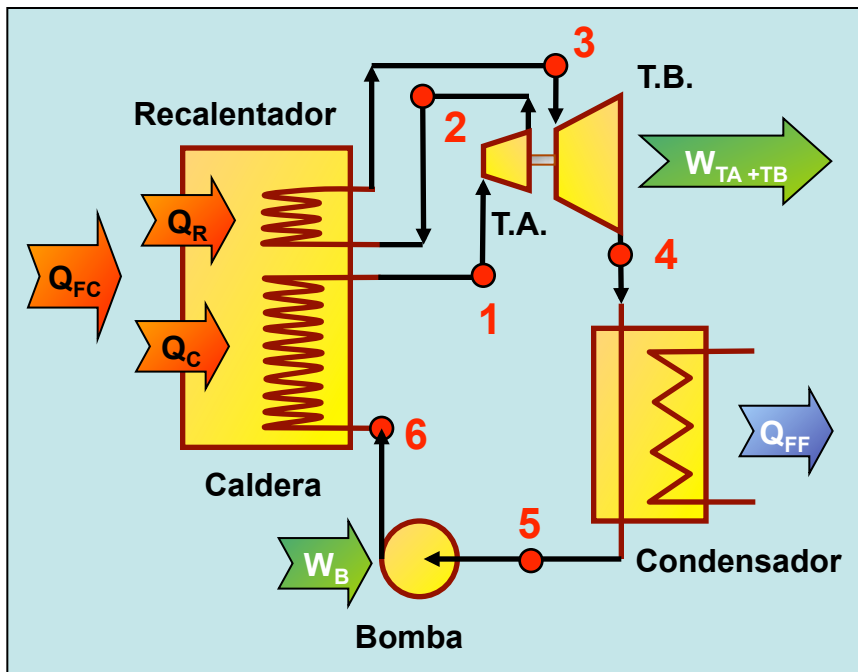


2.- Ciclos de vapor (VIII)

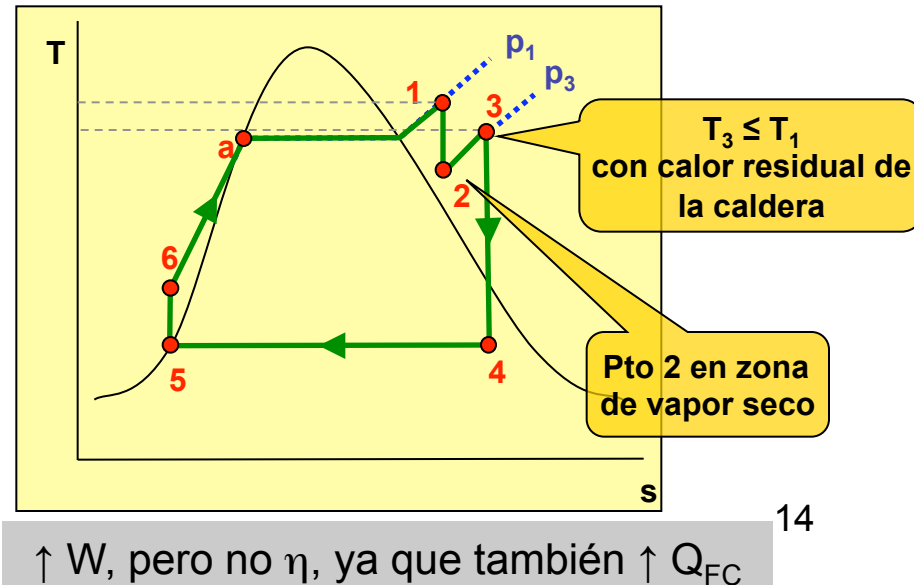
2.3.- Ciclo Rankine con recalentamiento

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



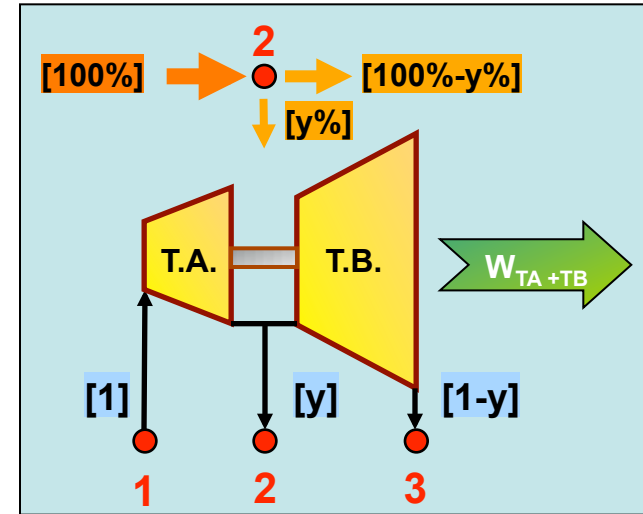
$$\eta_{R \text{ Recal}} \approx \frac{W_{THP} + W_{TLP}}{Q_{Cald+Rec}} = \frac{(h_1 - h_2) + (h_3 - h_4)}{(h_1 - h_6) + (h_3 - h_2)}$$



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”

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

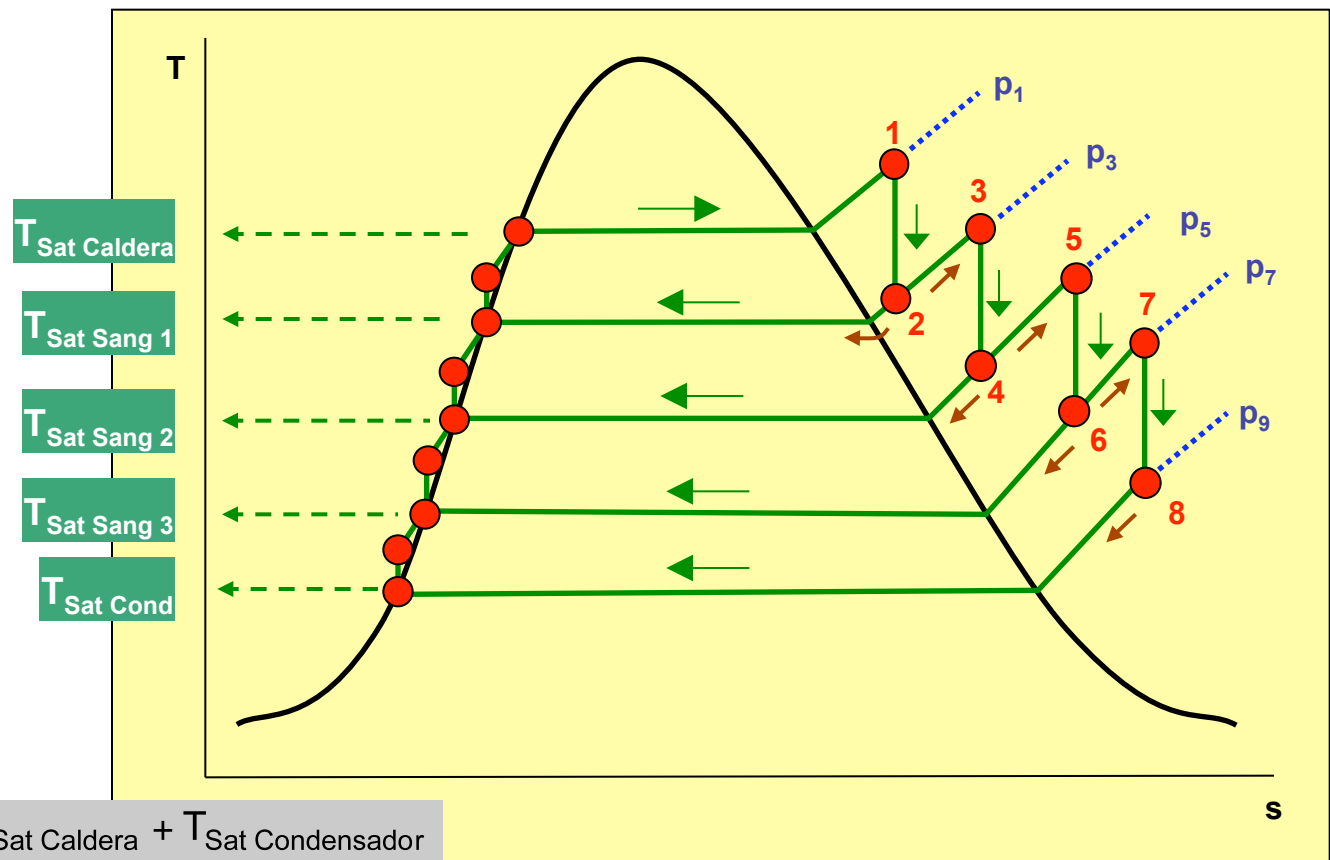
La unión del sangrado con el condensado se realiza en un elemento calentador, que puede ser abierto (mezcla) o cerrado (intercambio térmico)

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

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

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 (XII)

2.4.- Ciclo Rankine con regeneración (IV)

Ec. Masa
(Prop agua)

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

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

Ec. Energía
(Prop agua)

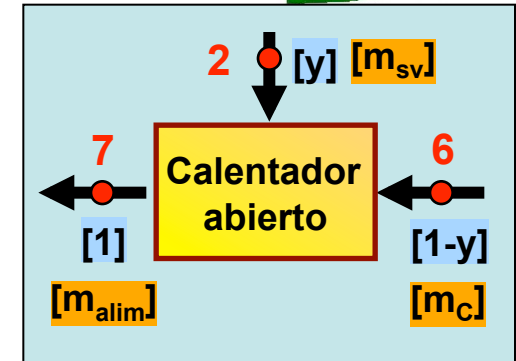
$$h_{\text{alim}} m_{\text{alim}} = h_{\text{sv}} m_{\text{sv}} + h_{\text{c}} m_{\text{c}}$$

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

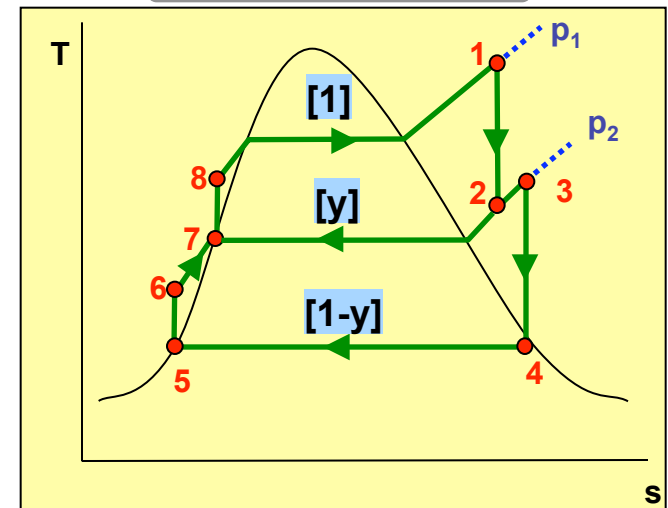
$$h_{\text{alim}} = h_{\text{sv}} y + h_{\text{c}} (1-y)$$

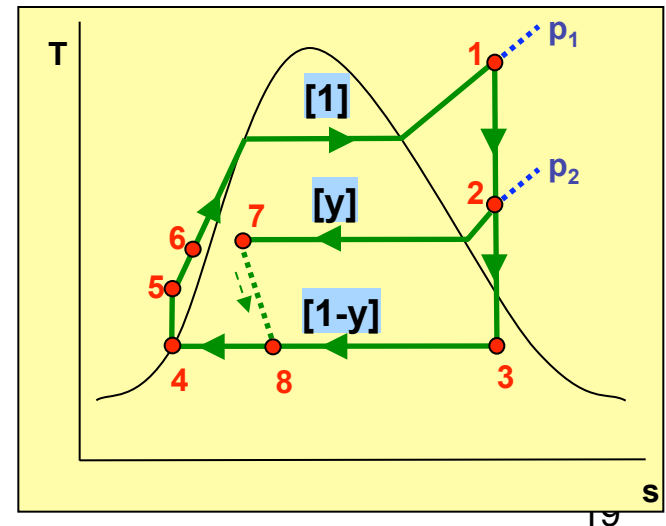
$$h_{\text{alim}} = y h_{\text{sv}} + h_{\text{c}} - y h_{\text{c}}$$

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



con Recal. y Regen.





2.- Ciclos de vapor (XIV)

2.4.- Ciclo Rankine con regeneración (VI)

Ec. Masa
(Prop agua)

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

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

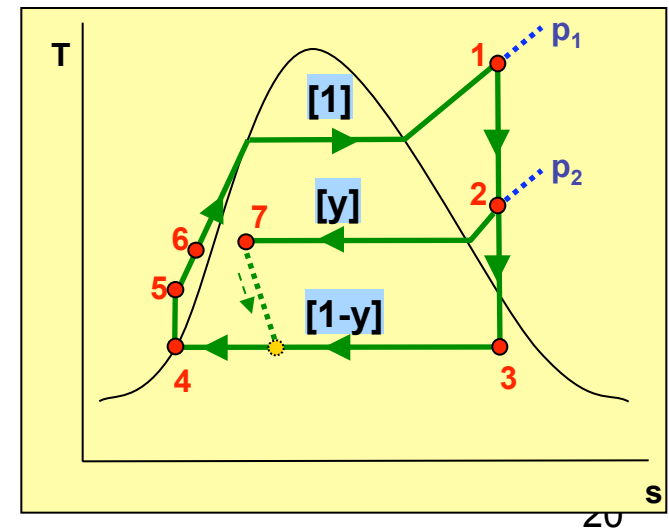
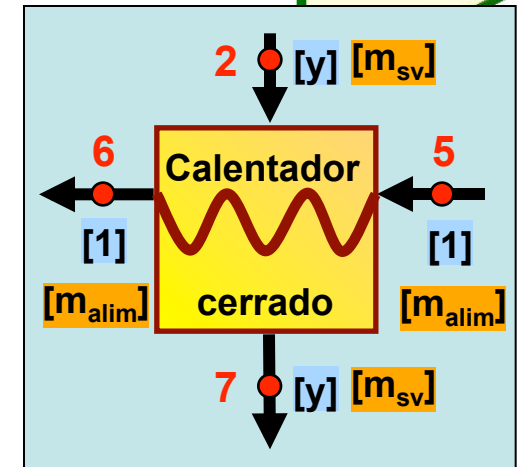
Ec. Energía
(Prop agua)

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

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

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

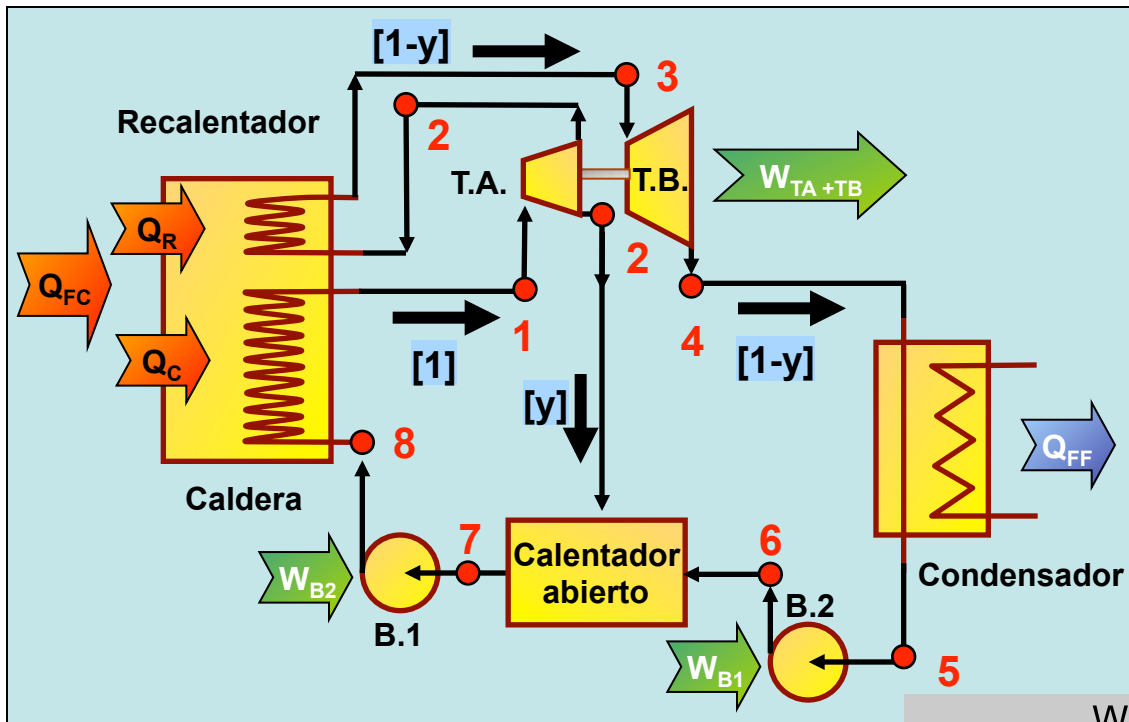
$$y = \frac{h_6 - h_5}{h_2 - h_7}$$



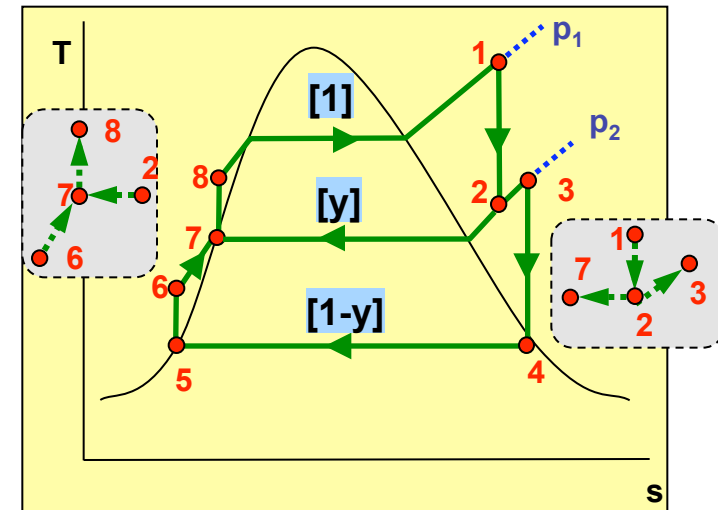
2.- Ciclos de vapor (XV)

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



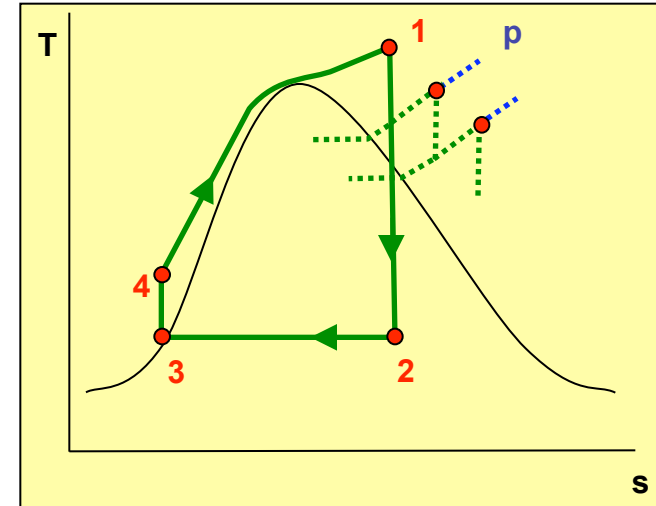
$$\eta_{R \text{ RegRec}} \approx \frac{W_{\text{THP}} + W_{\text{TL P}}}{Q_{\text{Cald}}} = \frac{1(h_1 - h_2) + [1 - y](h_3 - h_4)}{1(h_1 - h_8) + [1 - y](h_3 - h_2)}$$

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

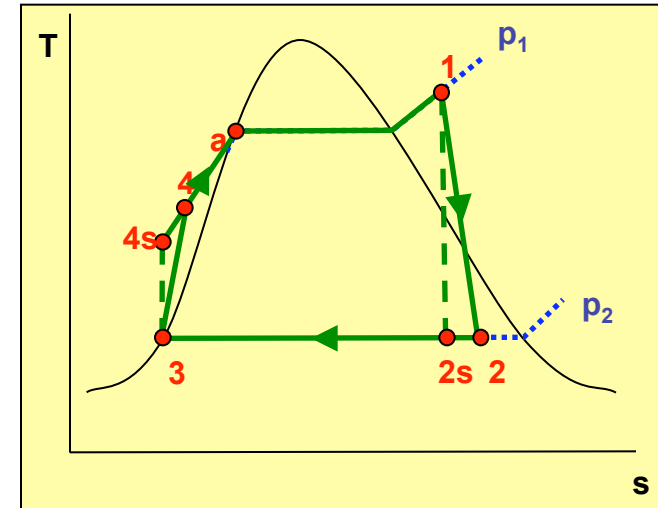
Los ciclos reales tienen pérdidas, debidas a enfriamientos, pérdidas de carga en conductos, en la bomba, etc

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: $w_{\text{compS}} = h_{\text{Salida}} - h_{\text{Entrada}}$

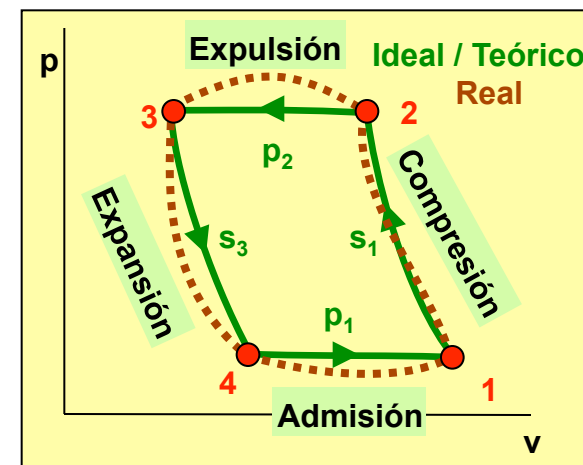
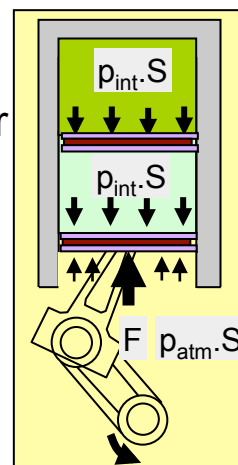
Por unidad de masa

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:

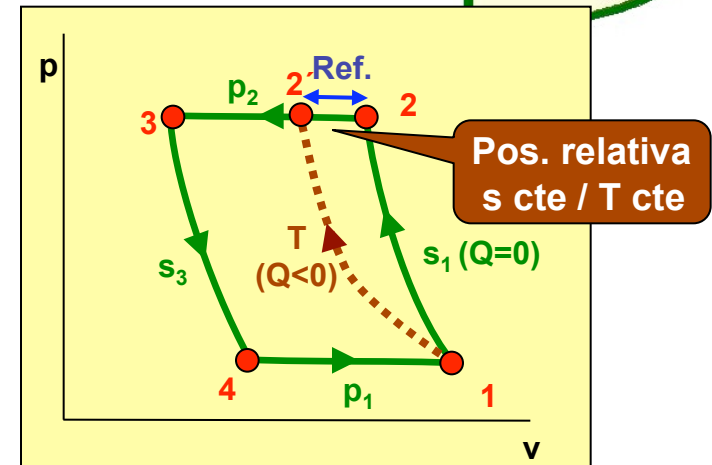
$$w_{\text{comp}} = h_2 - h_1 \quad [T2] \quad c_p = \frac{\Delta h}{\Delta T} \quad w_{\text{comp}} = c_p (T_2 - T_1)$$

Si la capacidad térmica es cte, en una compresión con $s = \text{cte}$: [T1] $T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$

De esta manera se puede expresar el trabajo como:

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

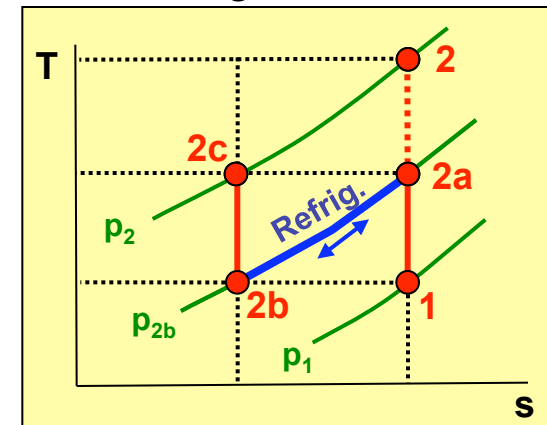
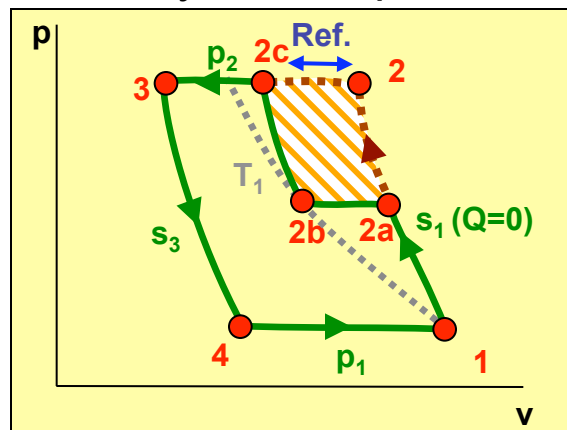
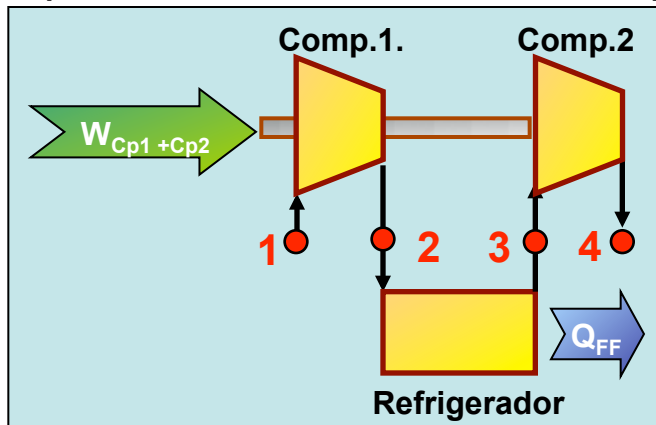
Interesa T_1 baja



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

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

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

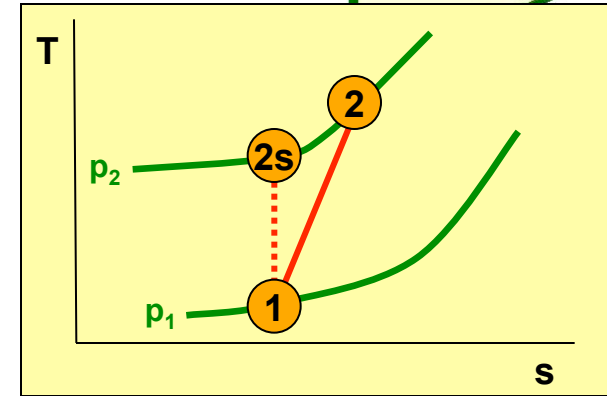
$$\eta_{s \text{ comp}} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1}$$

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

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

• 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

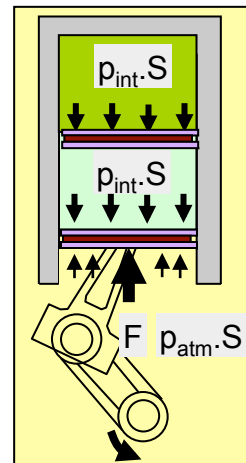
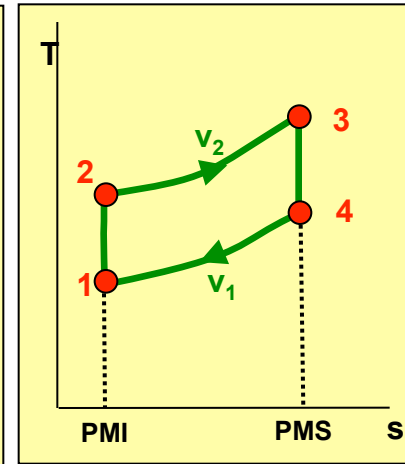
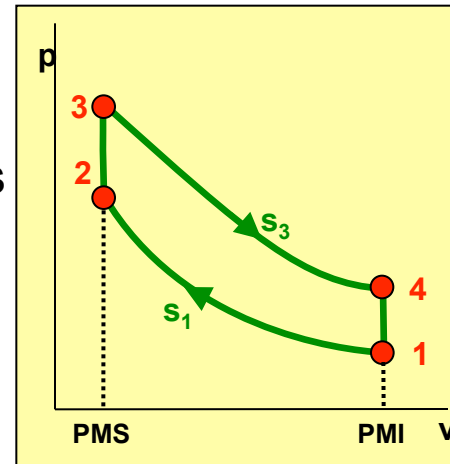
$$\text{Cilindrada} = V_1 - V_2$$

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

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

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

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

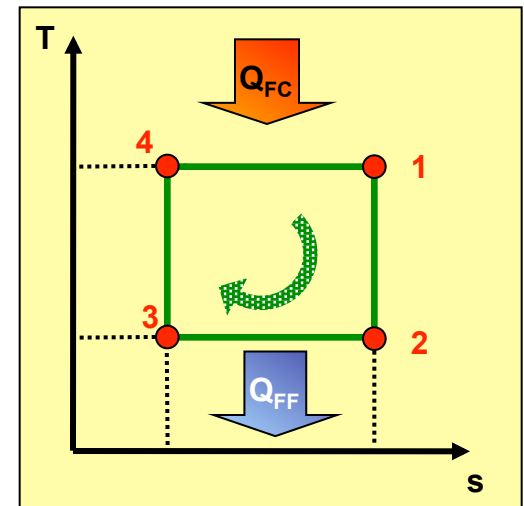
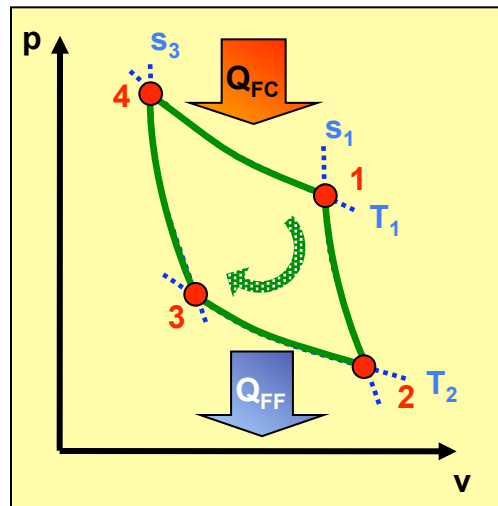
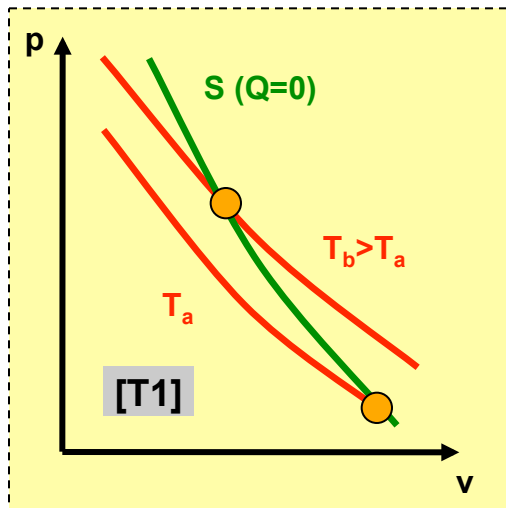


3.- Ciclos de gas (VII)

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

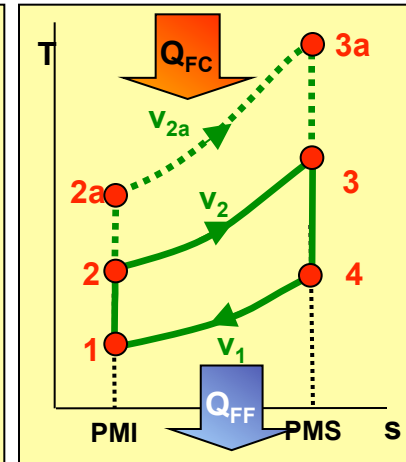
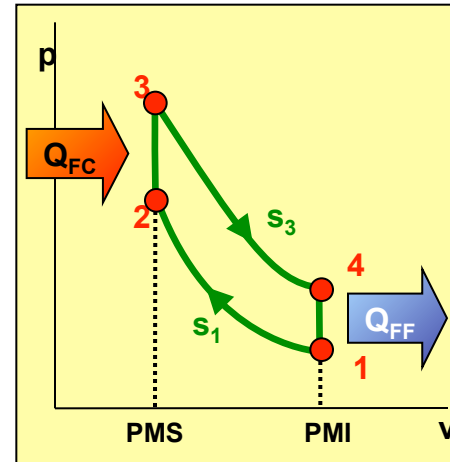
- Se comprime el aire a s cte (1-2)
- Se realiza la combustión brusca, necesita una chispa que la inicie; el calor generado eleva la presión interior (2-3) a v cte
- Se produce una expansión a s cte (3-4)
- Finalmente se comunica a v cte el calor al exterior (4-1)

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

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

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)

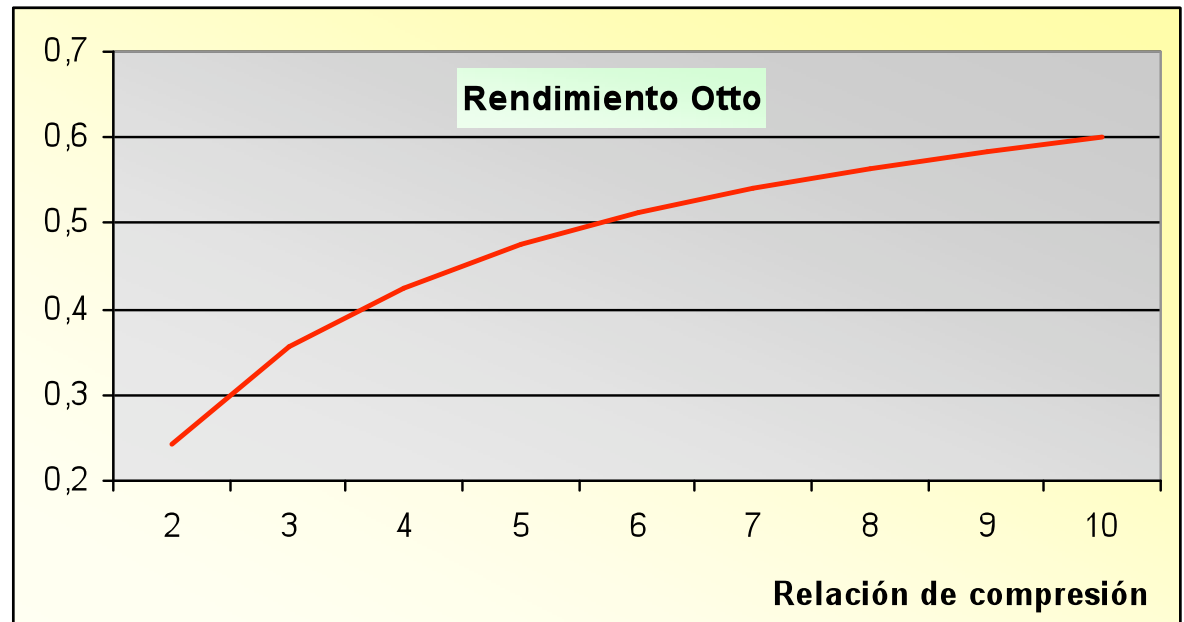
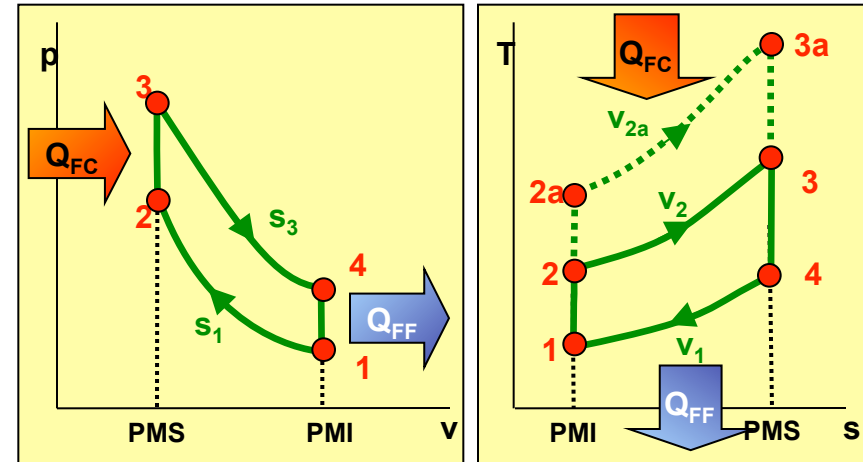
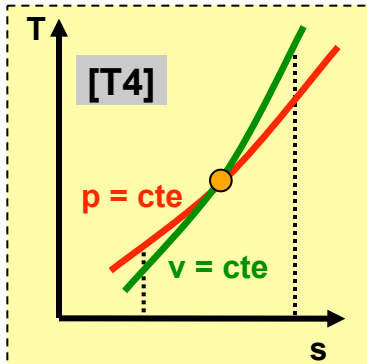
3.4.- Ciclo Otto (II)

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

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

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

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



3.- Ciclos de gas (X)

3.5.- Ciclo Diesel (I)

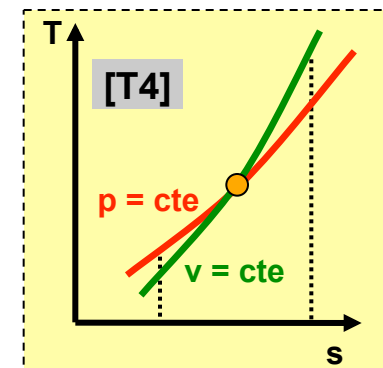
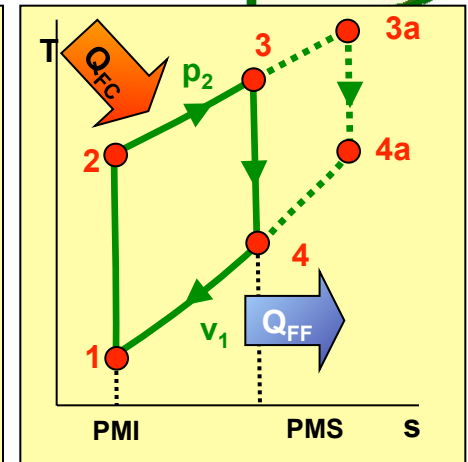
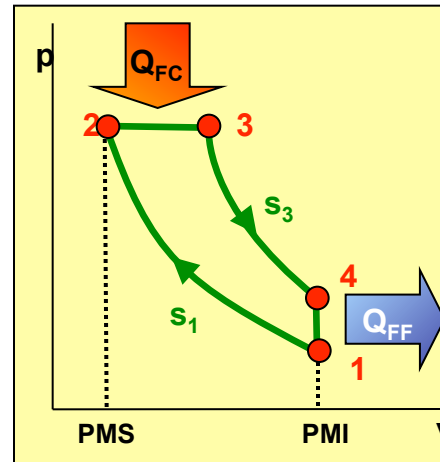
Si r_{cmp} es grande (>14) autodetona el combustible sin necesidad de chispa

- 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)

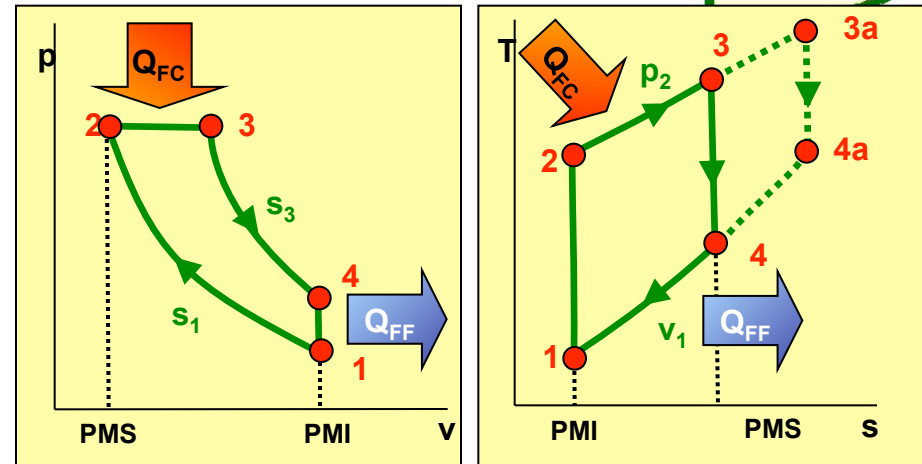
Adiabáticas: ($p v^\gamma = cte$)

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



3.- Ciclos de gas (XI)

3.5.- Ciclo Diesel (II)



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

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

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

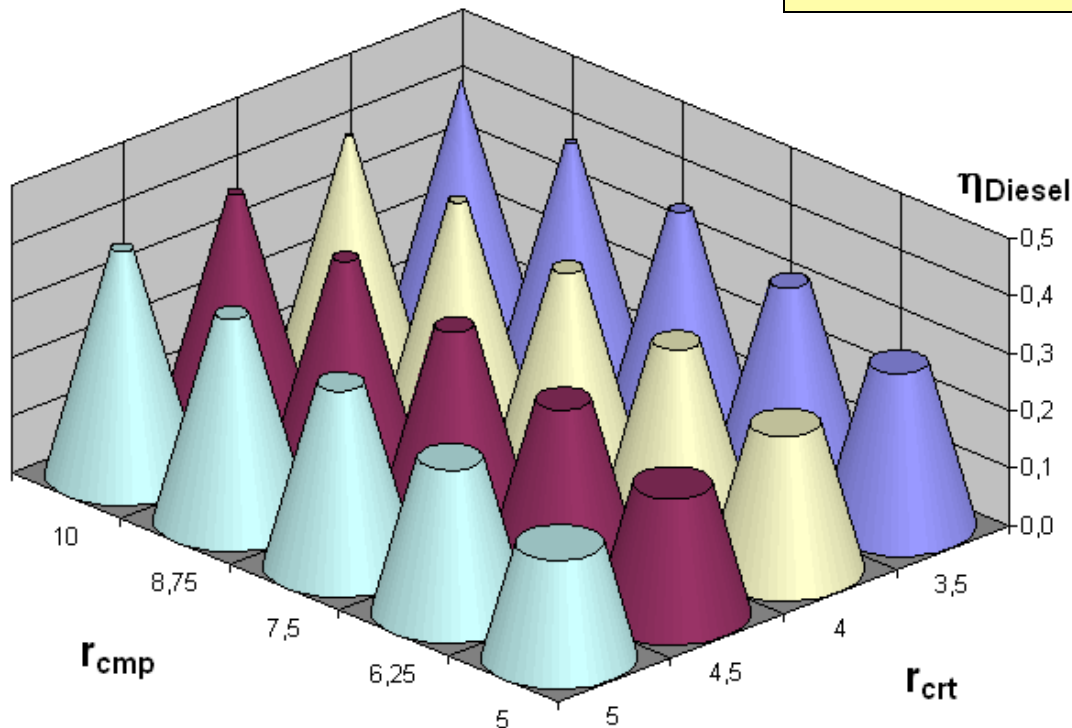
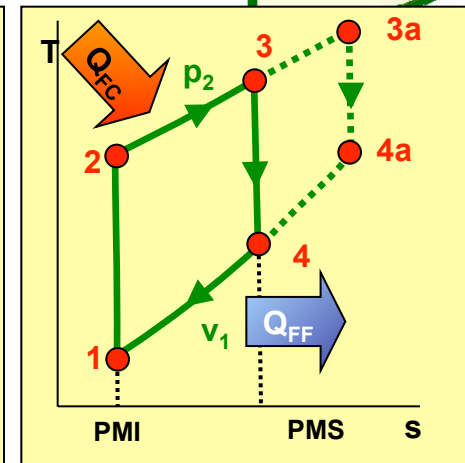
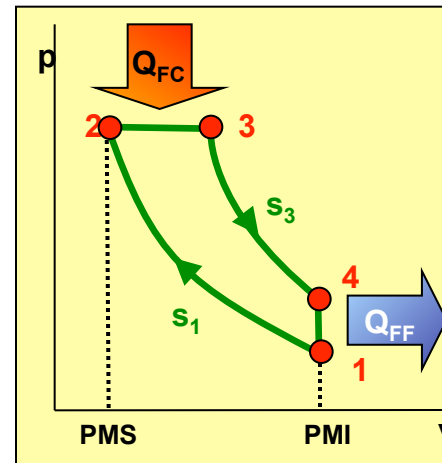
En la práctica $r_{\text{cmp Diesel}} > r_{\text{cmp Otto}}$ y $\eta_{\text{Otto}} < \eta_{\text{Diesel}}$

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 $\uparrow r_{\text{crt}} \downarrow \eta$

$$r_{\text{cmp}} = \frac{V_1}{V_2}$$

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

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)

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

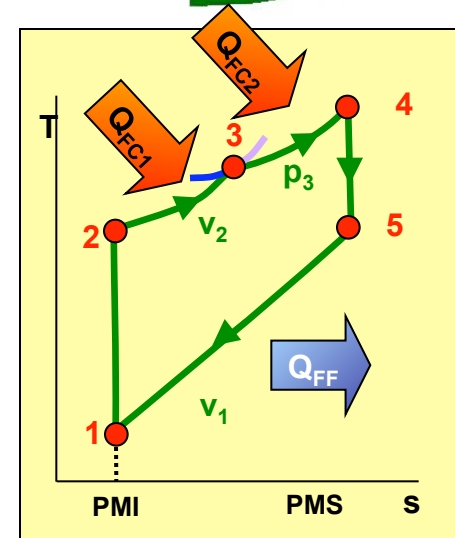
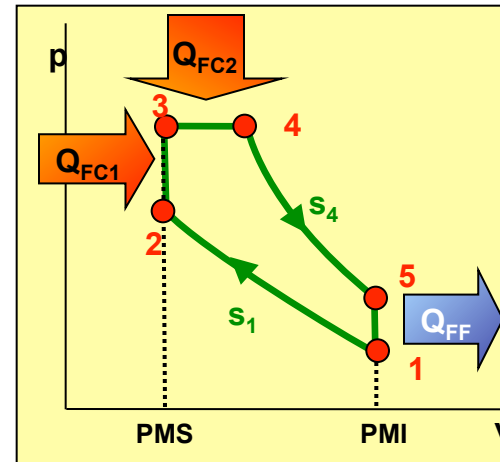
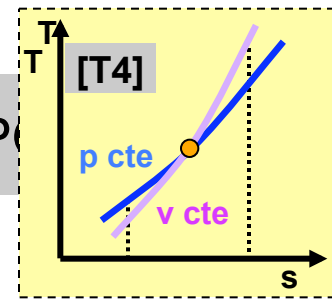
Si el motor es Otto el punto 3 es coincidente con el 4, y si el Diesel el 2 con el 3

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

Relación de presiones : $r_p = p_3 / p_2$

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

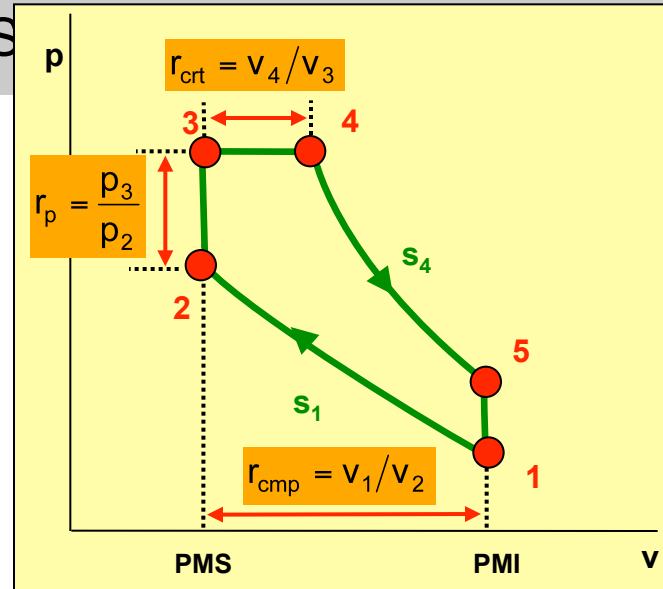
$$\eta_{\text{Dual}} = 1 - \frac{1}{r_{\text{cmp}}^{\gamma-1}} \frac{r_p r_{\text{crt}}^{\gamma} - 1}{\gamma r_p (r_{\text{crt}} - 1) + r_p - 1}$$



3.- Ciclos de gas (XIV)

3.6.- Ciclo Dual (II)

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

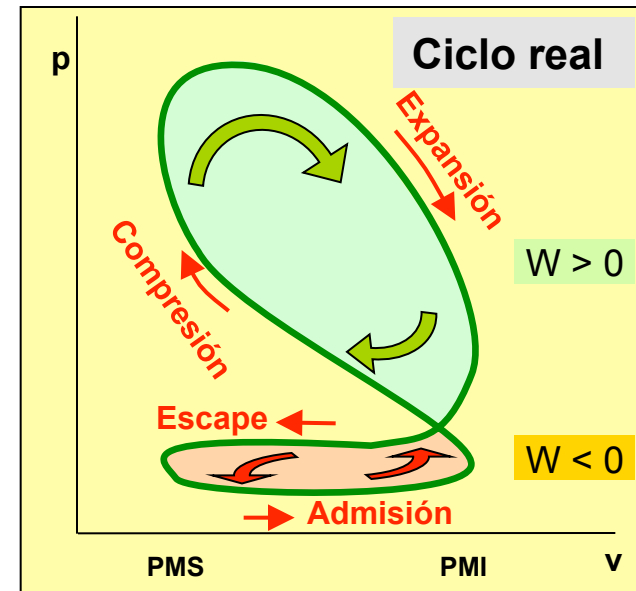


En el ciclo Otto $r_{\text{crt}} = 1$ $r_{\text{crt}} = V_4 / V_3$

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

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

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



← 4 carreras / 4 tiempos →

3.- Ciclos de gas (XV)

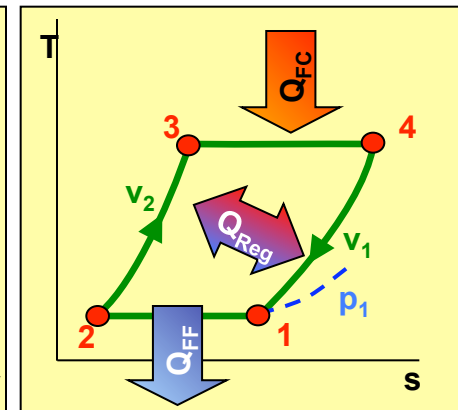
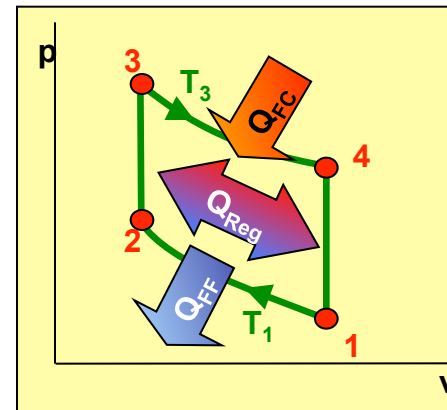
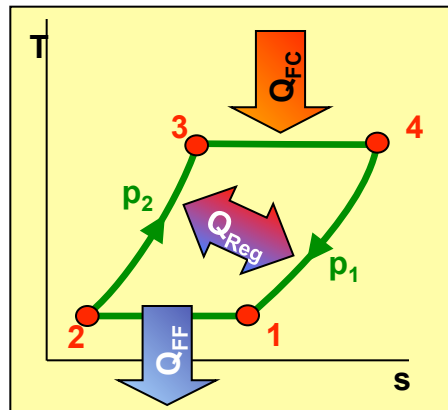
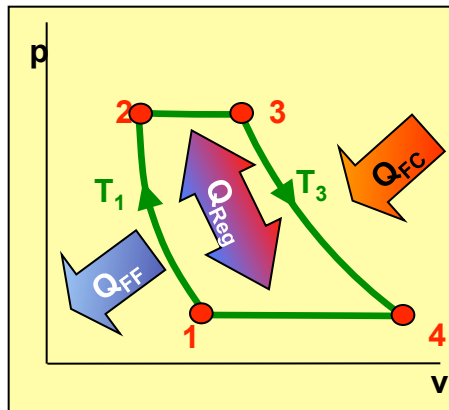
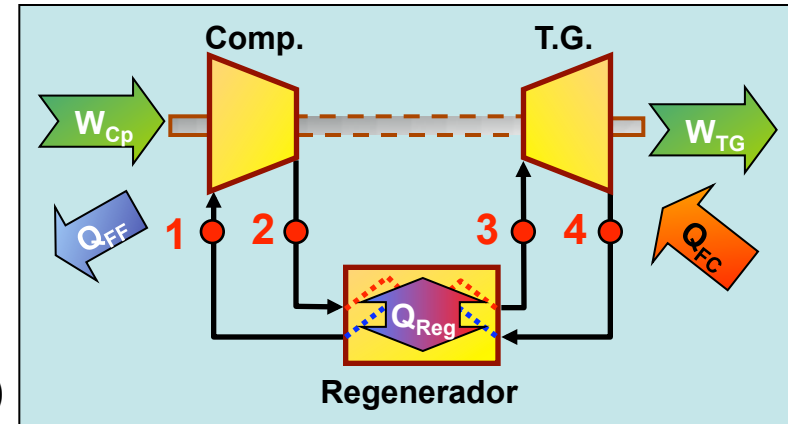
3.7.- Ciclos Ericson y Stirling

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, $\eta = \eta_{\text{Carnot}}$

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

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

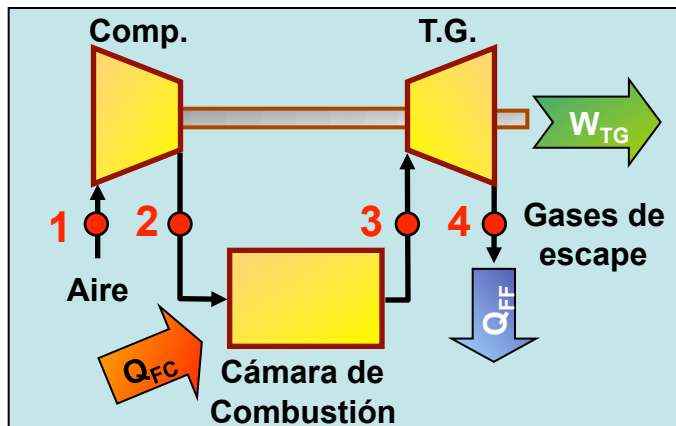
El calor se puede obtener mediante **combustión externa** (malos combustibles)

3.- Ciclos de gas (XVI)

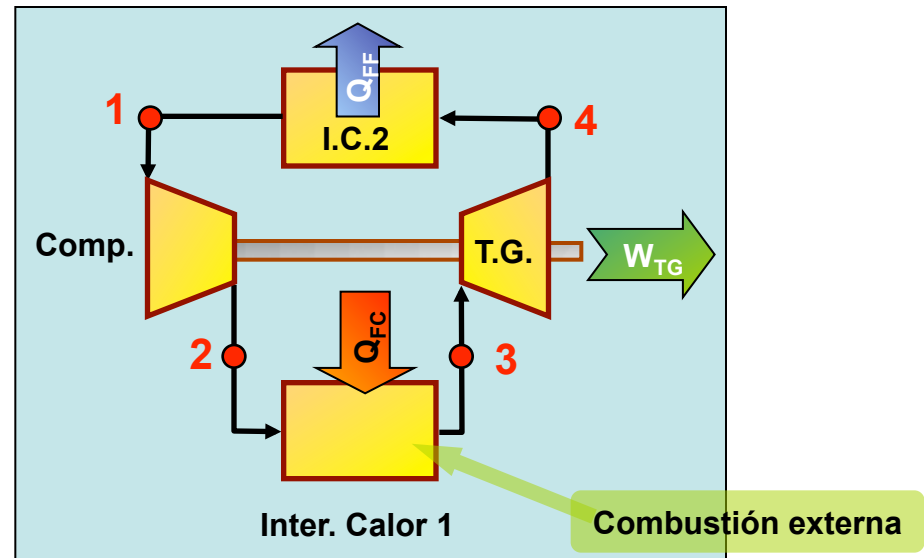
3.8.- Ciclo Brayton (I)

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%

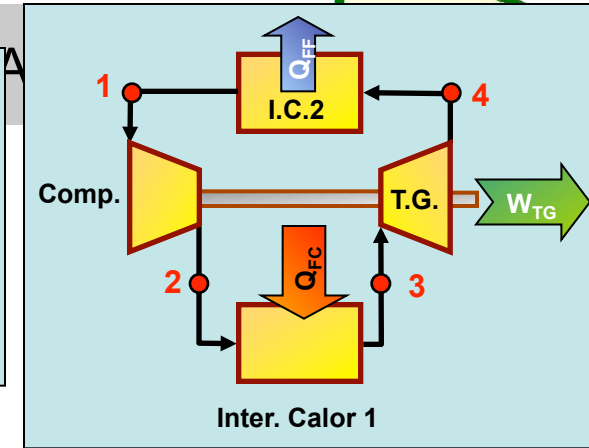
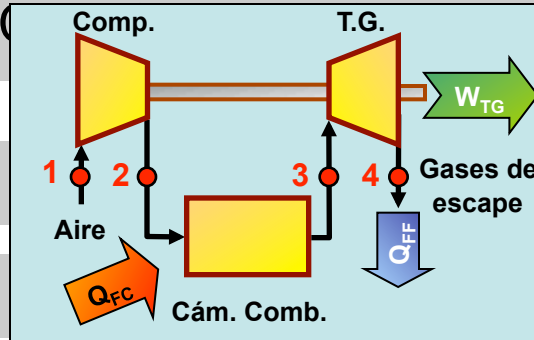
3.- Ciclos de gas (XVII)

3.8.- Ciclo Brayton (II)

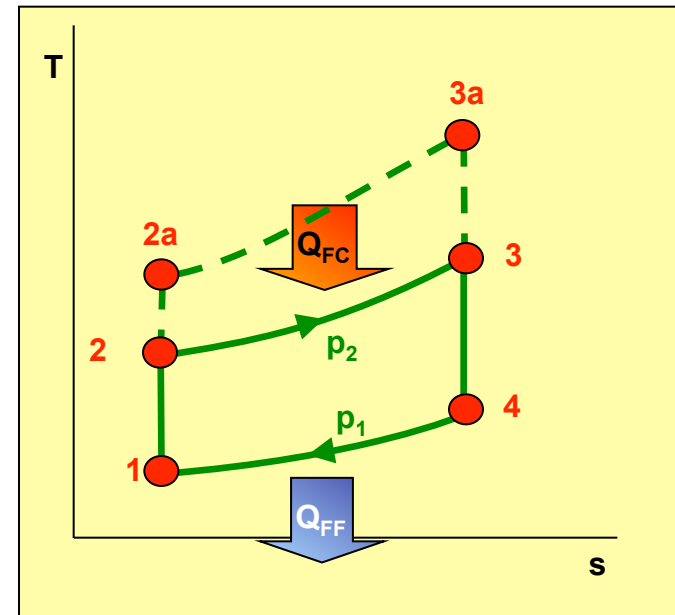
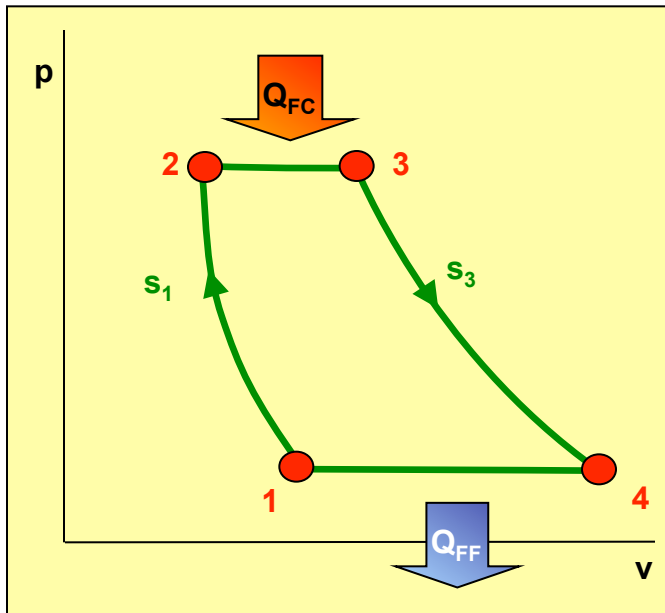
El ciclo Brayton es:

con dos adiabáticas y dos isobaras

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



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



3.- Ciclos de gas (XVIII)

3.8.- Ciclo Brayton (III)

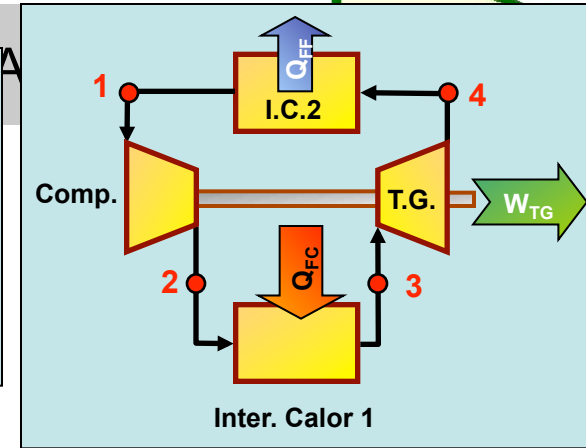
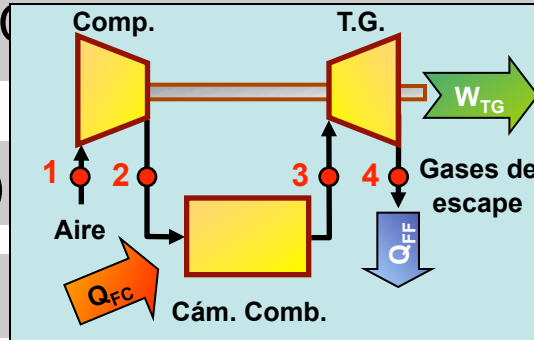
Se supone c_p cte

Cálculos precisos deben tener en cuenta su variación

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

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

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

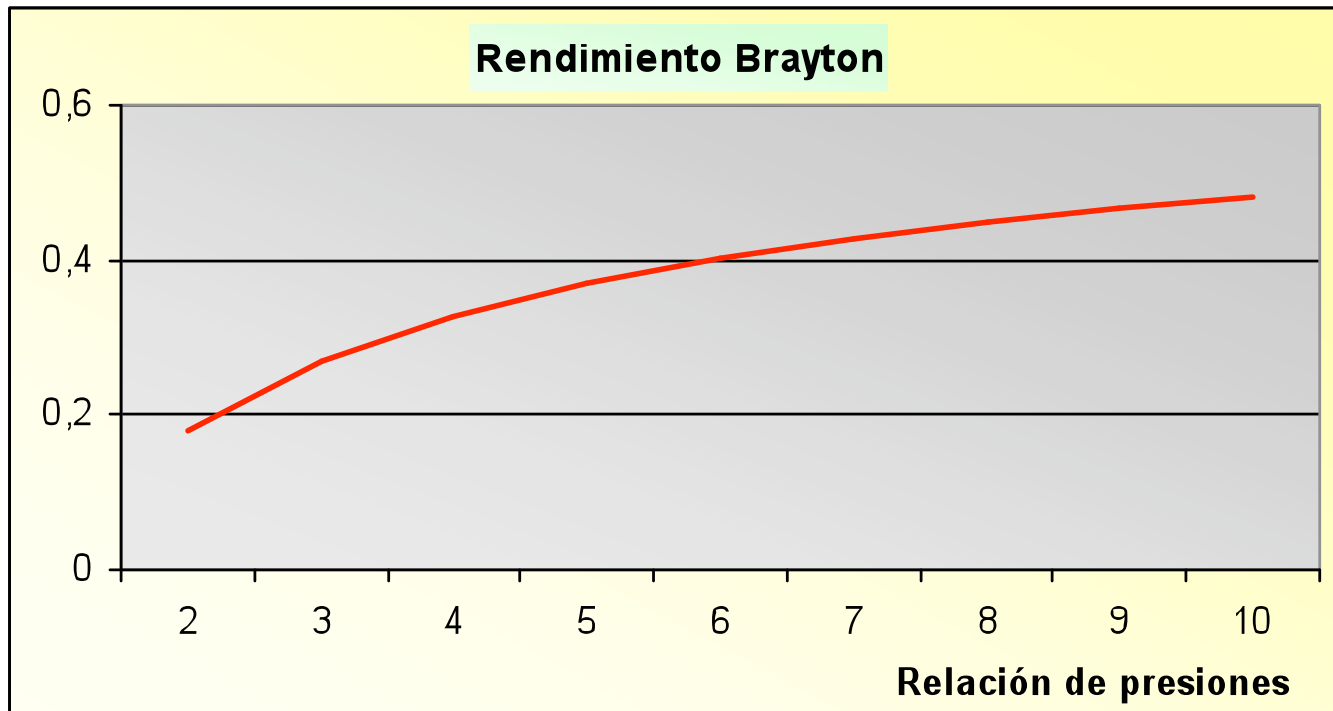
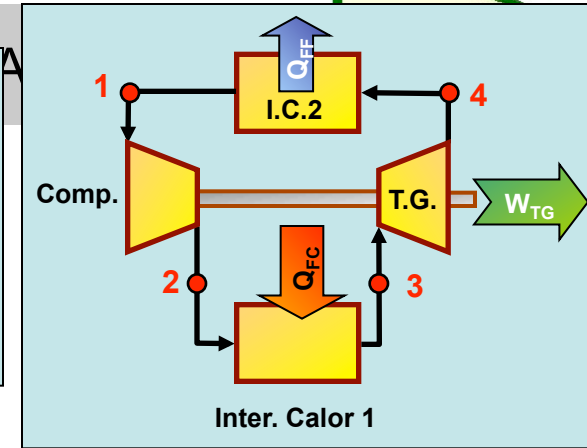
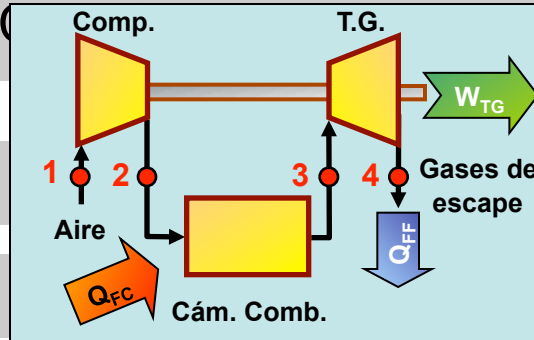


$$\eta_{\text{Brayton}} = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = \left| \begin{array}{c} r_p = p_2 / p_1 \end{array} \right| = 1 - r_p^{-(\gamma-1/\gamma)}$$

3.- Ciclos de gas (XIX)

3.8.- Ciclo Brayton (IV)

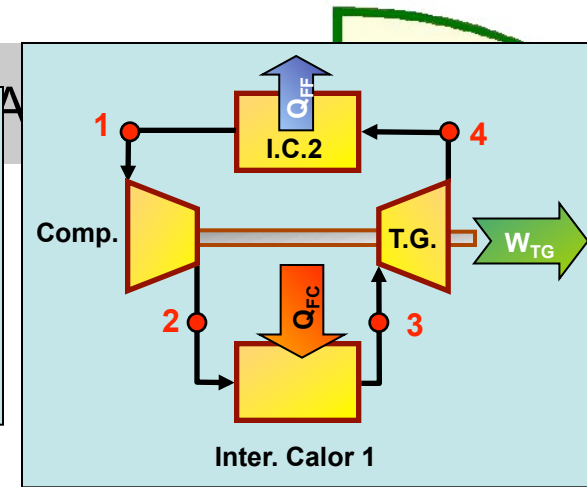
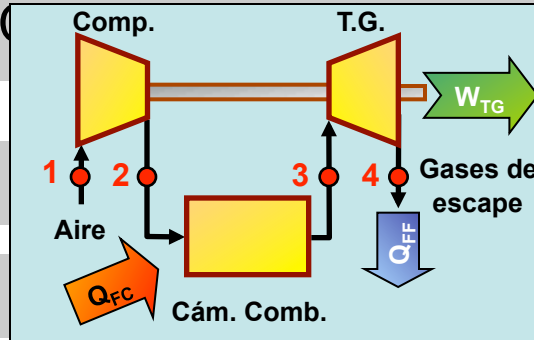
$$\eta_{\text{Brayton}} = 1 - r_p^{-(\gamma-1/\gamma)}$$



3.- Ciclos de gas (XX)

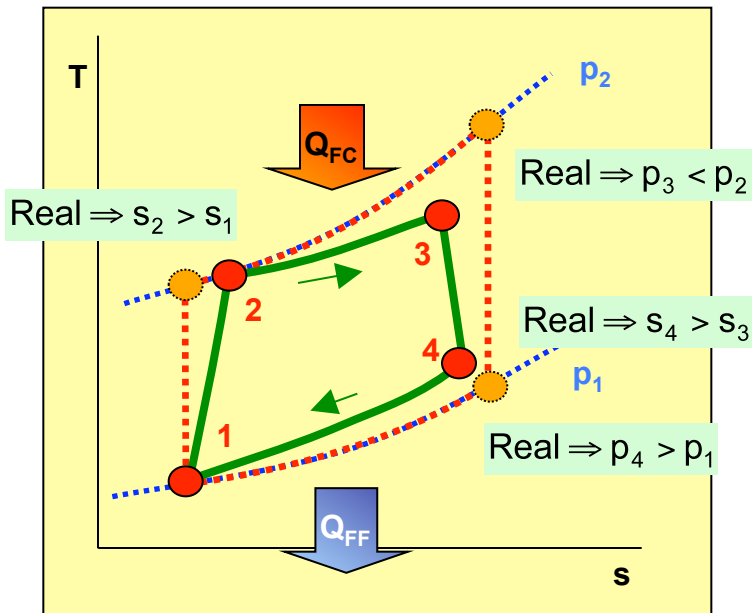
3.8.- Ciclo Brayton (III)

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

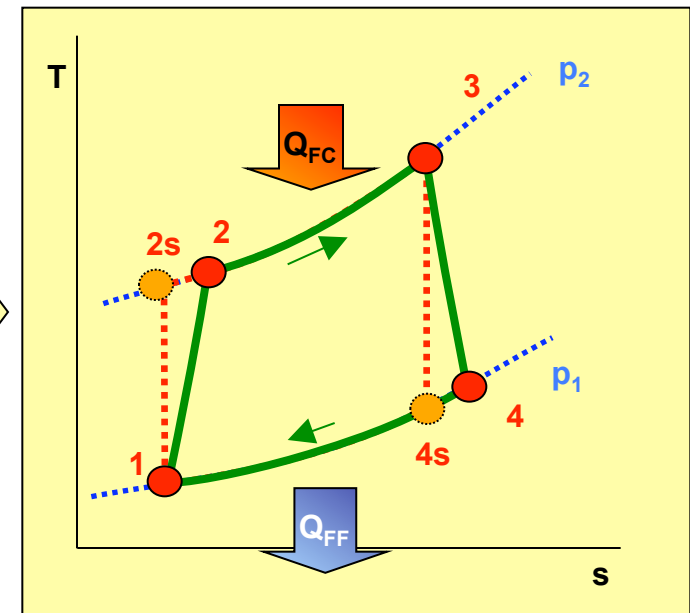


$$\eta_{\text{isoent Turb}} = \frac{W_{\text{real}}}{W_{s=\text{cte}}} = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4s}}$$

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



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

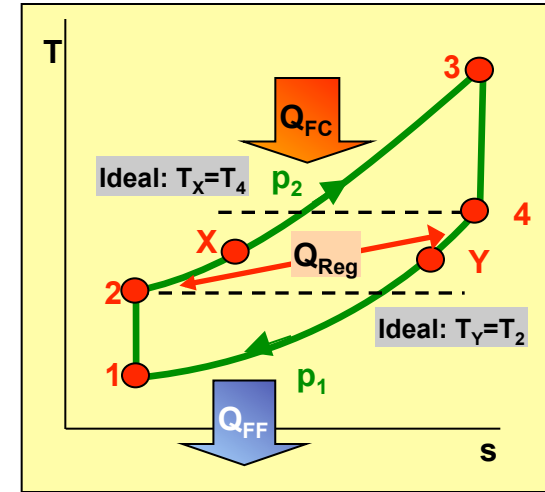
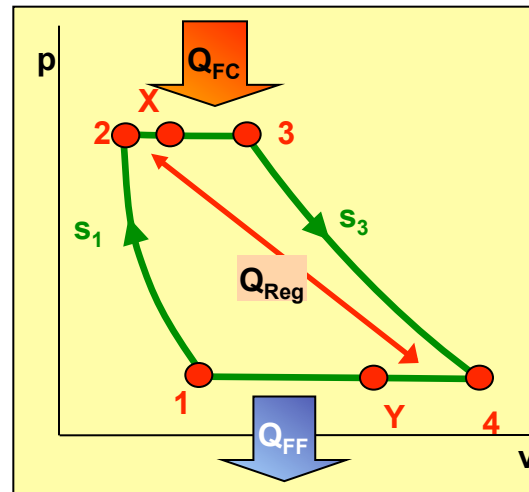
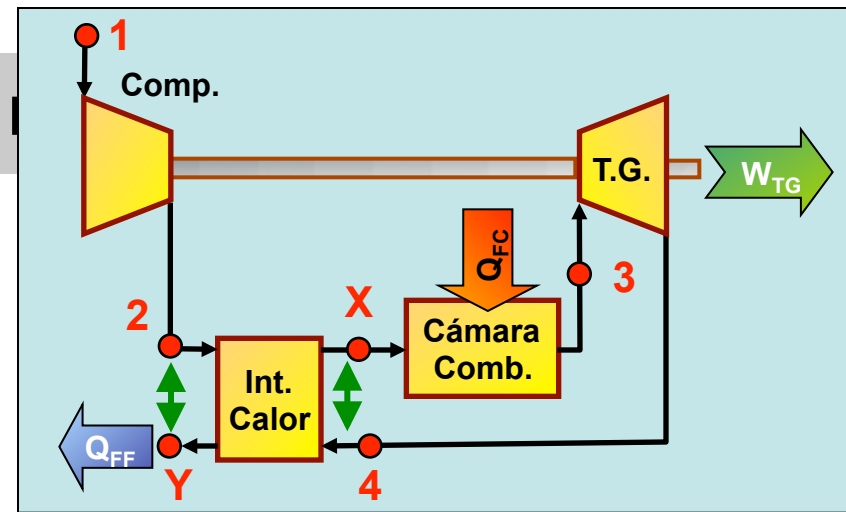
[T2] $s = \text{cte} \Rightarrow$

$$\left\{ \begin{array}{l} W_{\text{turb}} = m_{\text{aire}} c_p (T_3 - T_4) \\ W_{\text{comp}} = m_{\text{aire}} c_p (T_2 - T_1) \end{array} \right.$$

$h_a - h_b = c_p (T_a - T_b)$

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

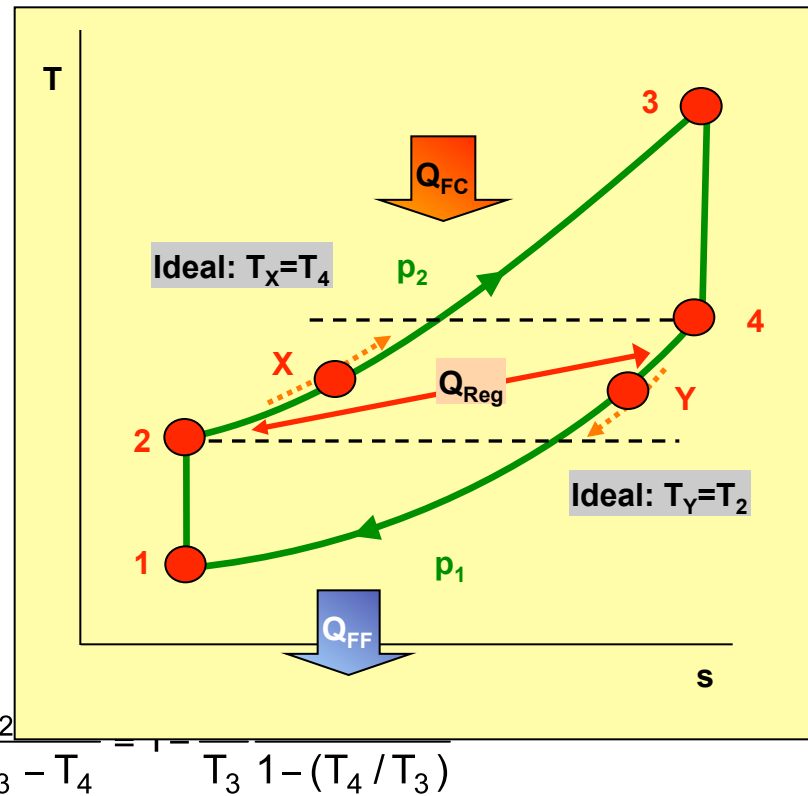
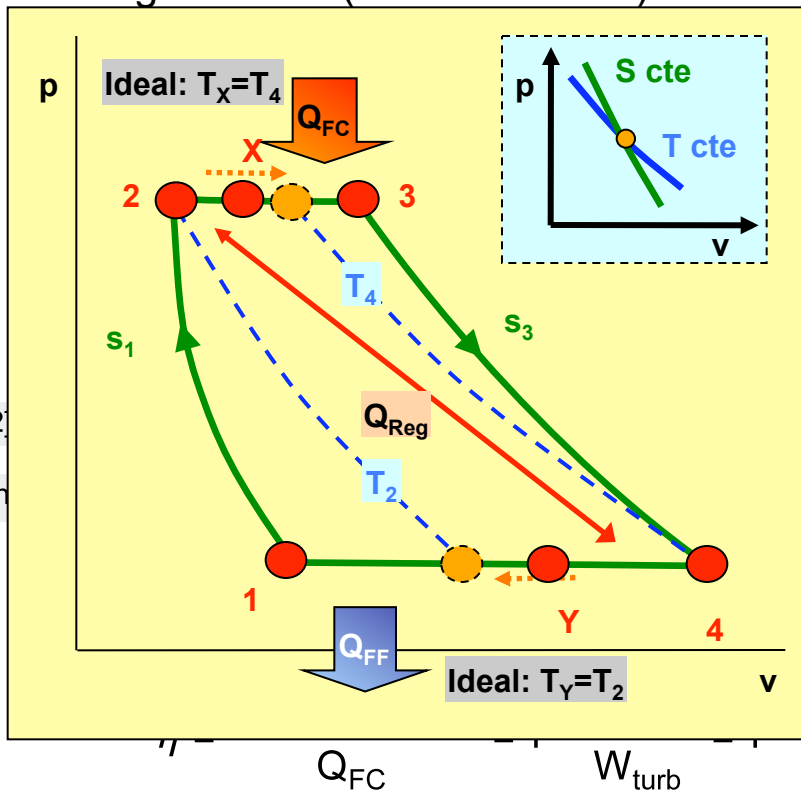
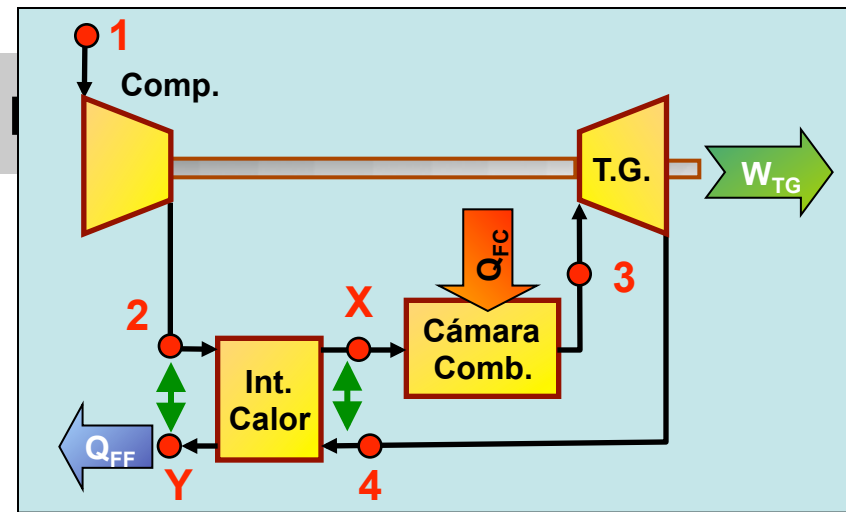
$$\eta = \frac{W_{\text{turb}} - W_{\text{comp}}}{Q_{FC}} = 1 - \frac{W_{\text{comp}}}{W_{\text{turb}}} = 1 - \frac{T_2 - T_1}{T_3 - T_4} = 1 - \frac{T_1}{T_3} \frac{(T_2/T_1) - 1}{1 - (T_4/T_3)}$$



3.- Ciclos de gas (XXI)

3.9.- Ciclo Brayton regenerativo (I)

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



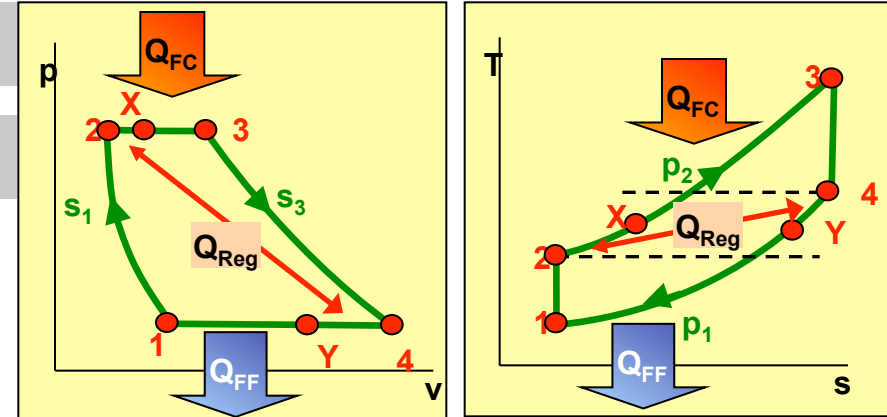
3.- Ciclos de gas (XXII)

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: $\begin{cases} (3-4) \\ (1-2) \end{cases}$

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



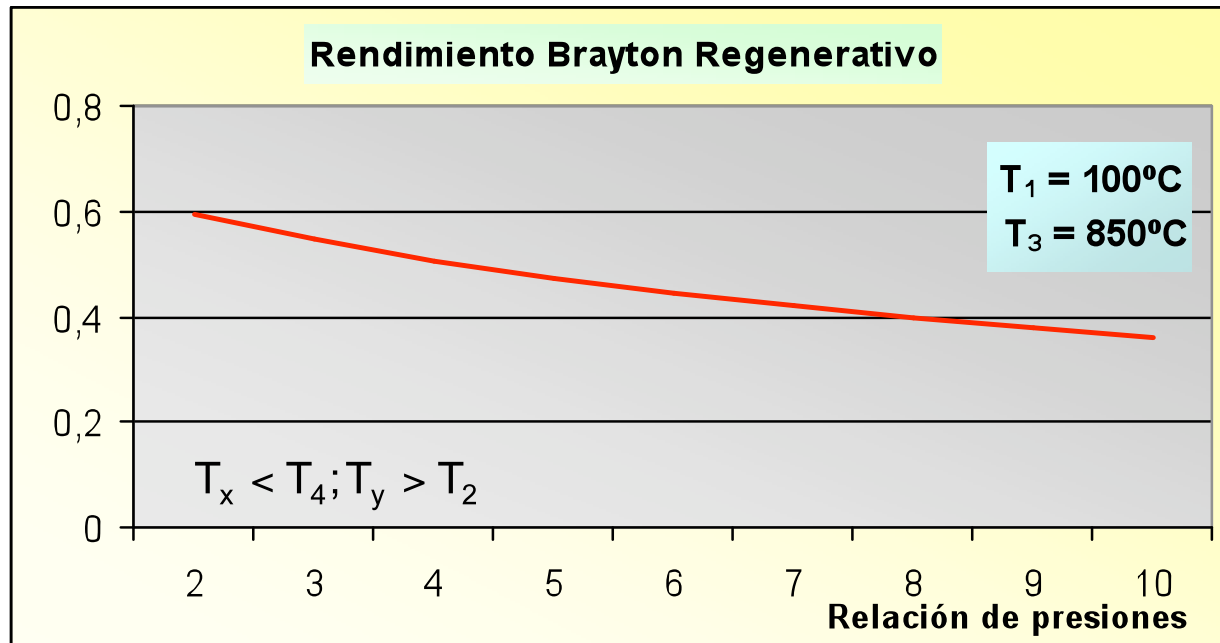
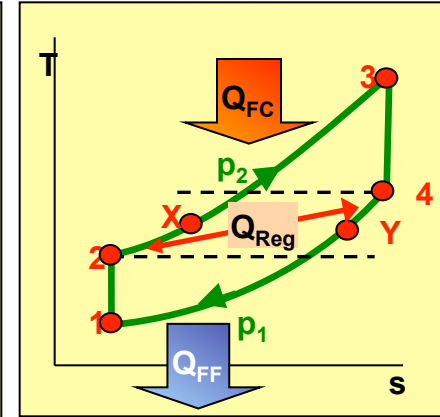
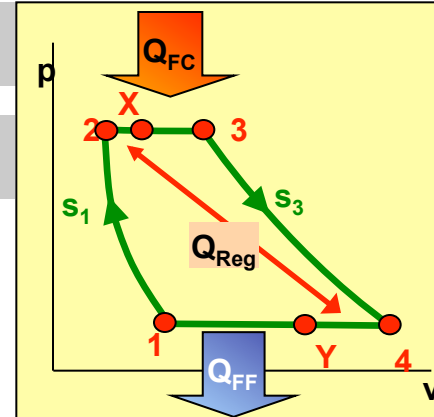
$$\eta_{BReg} = 1 - \frac{T_1}{T_3} r_p^{(\gamma-1)/\gamma}$$

3.- Ciclos de gas (XXIII)

3.9.- Ciclo Brayton regenerativo (III)

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

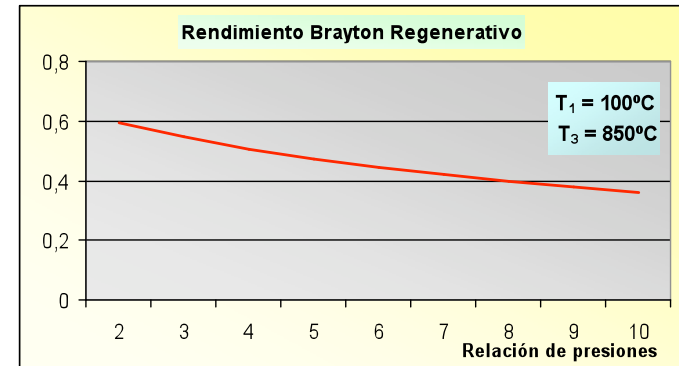
$\eta_{BReg} \downarrow$ al $\uparrow r_p$



3.- Ciclos de gas (XXIV)

3.9.- Ciclo Brayton regenerativo (IV)

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

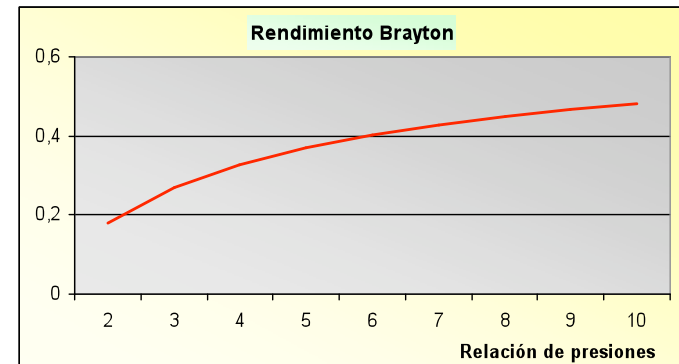


En el regenerador no se pueden igualar las T^{as}

$$T_x < T_4; T_y > T_2$$

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

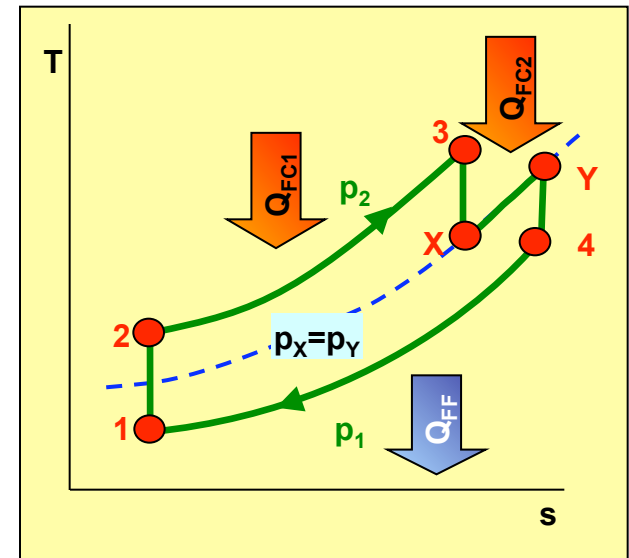
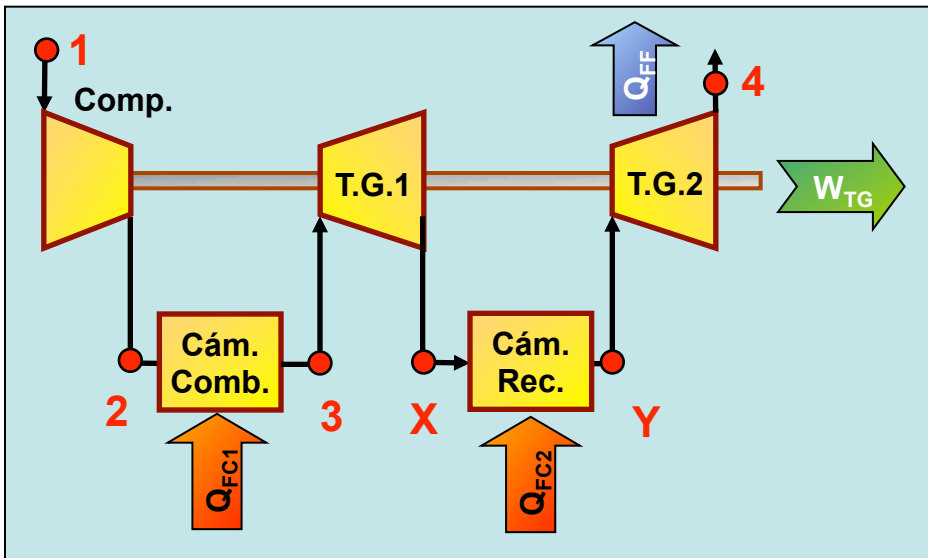
$$\eta_{Br} = 1 - r_p^{(1-\gamma/\gamma)} = 1 - r_p^{-(\gamma-1/\gamma)} \quad \eta_B \uparrow \text{ al } \uparrow r_p$$



$$\begin{cases} \text{Para } r_p \text{ bajas } \eta_{BReg} > \eta_B \\ \text{Para } r_p \text{ altas } \eta_{BReg} < \eta_B \end{cases}$$

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 $\uparrow T_{max}$

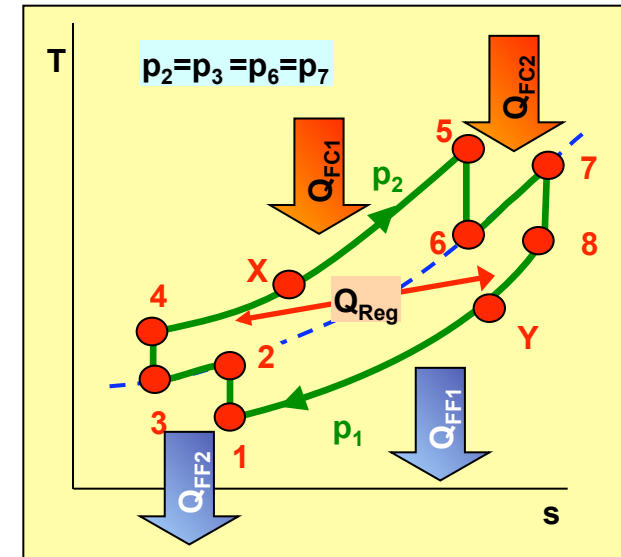
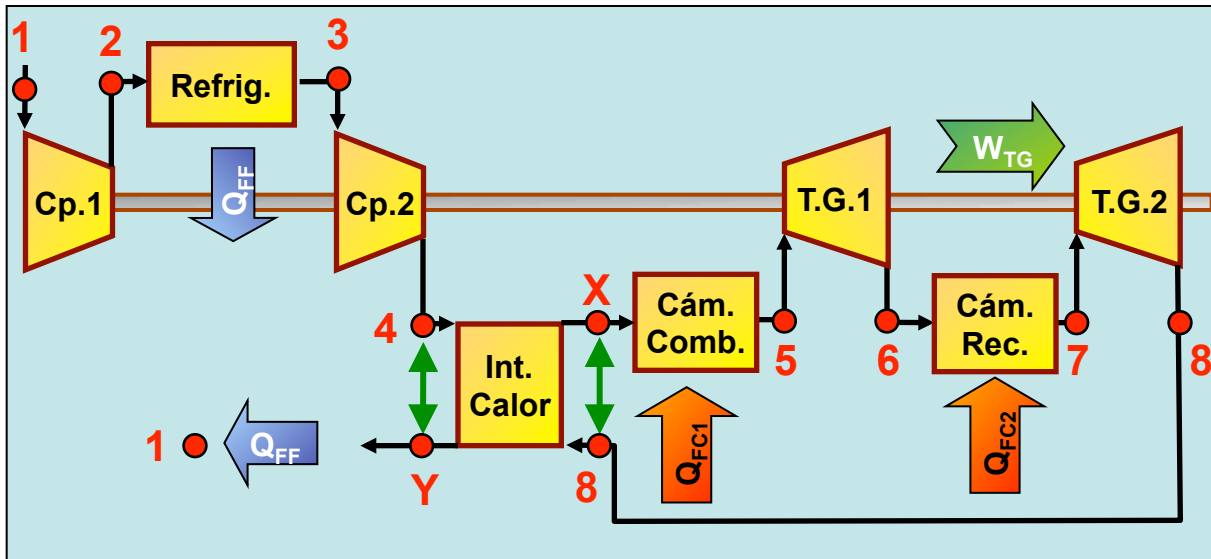
Se necesitan dos turbinas y una segunda cámara de combustión (recalentador)

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)

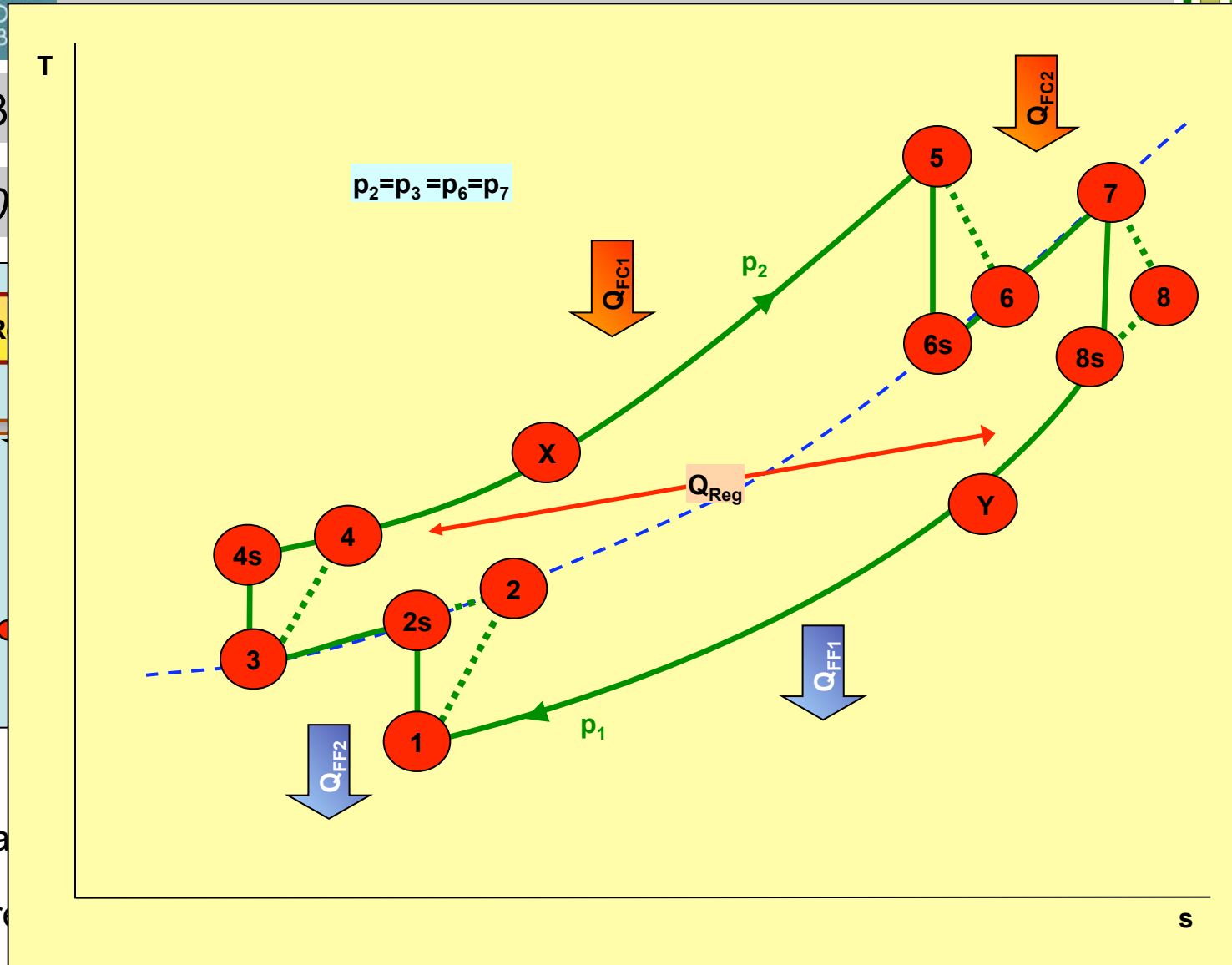
3.10.- Ciclo Brayton regenerativo con recalentamiento y refrigeración



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

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



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

4.- Máquinas Térmicas (I)

MÁQUINAS DE FLUIDO

MÁQUINAS HIDRÁULICAS

TURBOMÁQUINAS
(flujo continuo)

GENERADORAS

MOTORAS

MÁQUINAS VOLUMÉTRICAS
(de desplazamiento positivo)

GENERADORAS

MOTORAS

MÁQUINAS TÉRMICAS

TURBOMÁQUINAS
(flujo continuo)

GENERADORAS

(turbocompresores)

MOTORAS

(turbina de gas, turbina de vapor)

MÁQUINAS VOLUMÉTRICAS
(de desplazamiento positivo)

GENERADORAS

(compresores volumétricos)

MOTORAS

(motores de combustión interna alternativos Otto, Diésel, motor Stirling)

4.- Máquinas Térmicas (I)

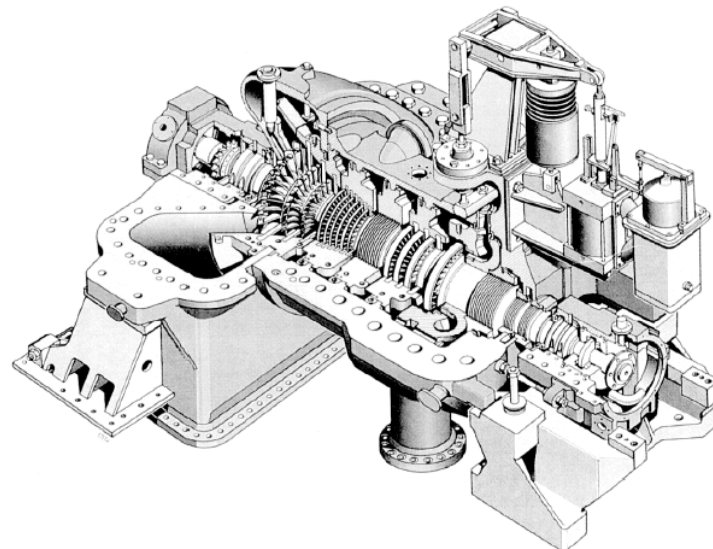
4.1.- Turbinas de vapor (I)

Transforma la entalpía del vapor de agua en energía mecánica en su eje

Su rendimiento es el más bajo de todas las máquinas térmicas cíclicas

Según el número de etapas se pueden clasificar en:

- Turbinas simples o monoetapas poseen un único escalonamiento
- Turbinas compuestas o multietapa con varios escalonamientos

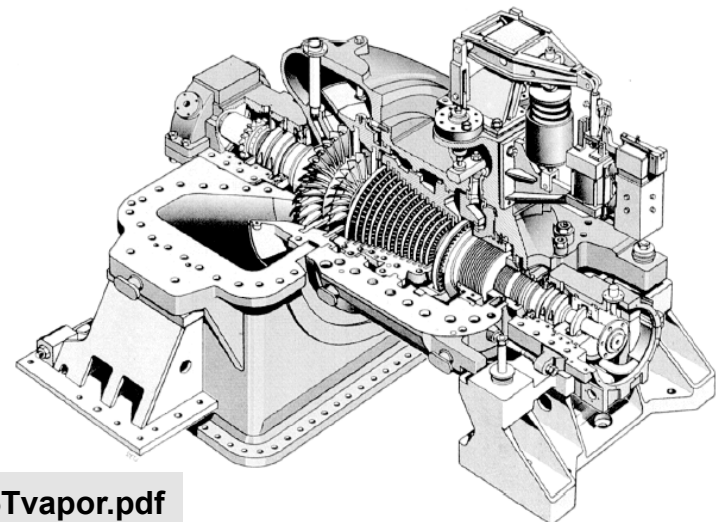
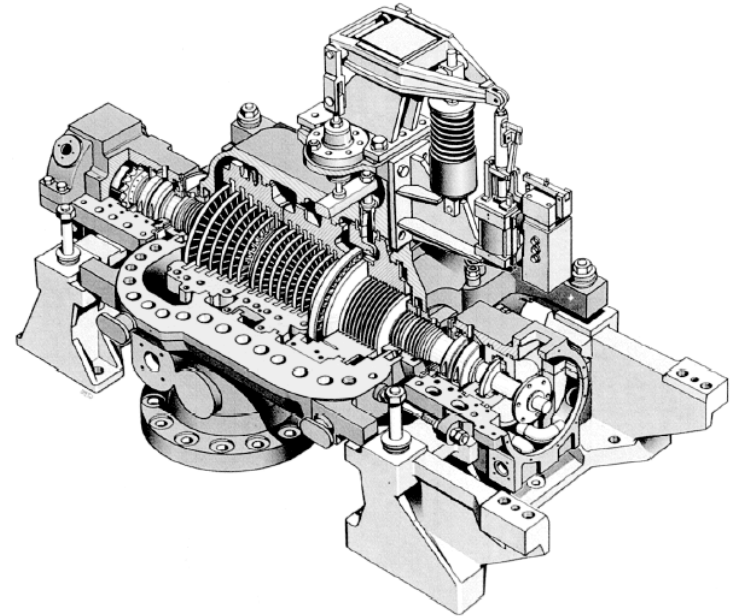


4.- Máquinas Térmicas (II)

4.1.- Turbinas de vapor (II)

En función de la presión del vapor a la salida:

- Turbinas de contrapresión; el vapor se extrae a $p > p_{atm}$, el vapor tras su paso por la turbina tiene un aprovechamiento
- Turbinas de condensación; el vapor sale a $p < p_{atm}$, llegando a salir vapor húmedo



4.- Máquinas Térmicas (III)

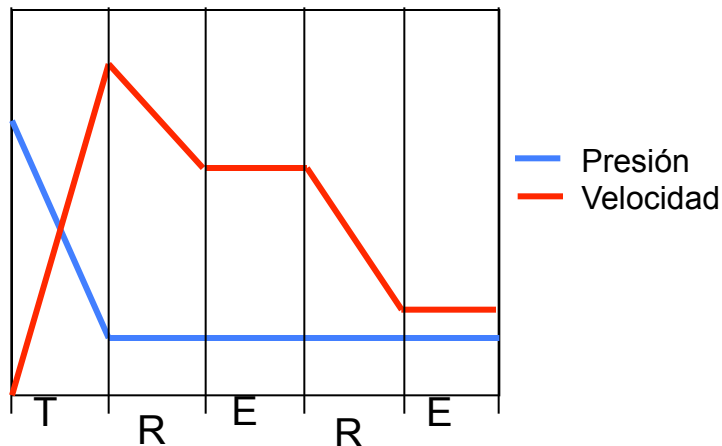
4.1.- Turbinas de vapor (III)

En función de la forma de aprovechamiento de la energía contenida en el flujo de vapor:

- Turbinas de vapor de reacción
- Turbinas de vapor de acción

Escalonamiento de velocidad (CURTIS)

(T: Tobera; R: Rodete; E: Enderezador)



4.- Máquinas Térmicas (III)

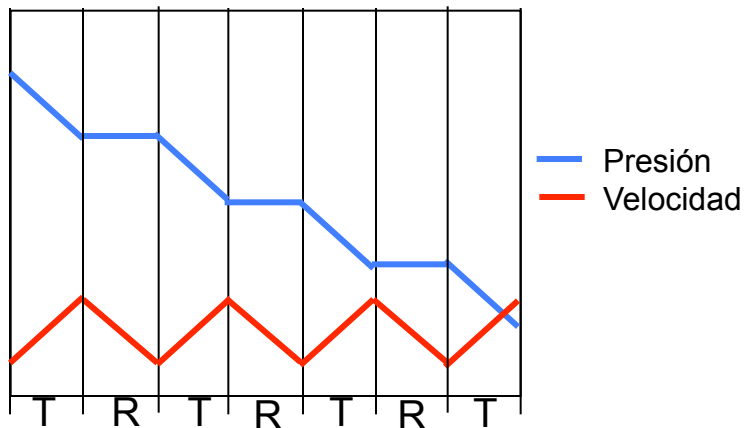
4.1.- Turbinas de vapor (III)

En función de la forma de aprovechamiento de la energía contenida en el flujo de vapor:

- Turbinas de vapor de reacción
- Turbinas de vapor de acción

Escalonamiento de presión (RATEAU)

(T: Tobera; R: Rodete)



4.- Máquinas Térmicas (IV)

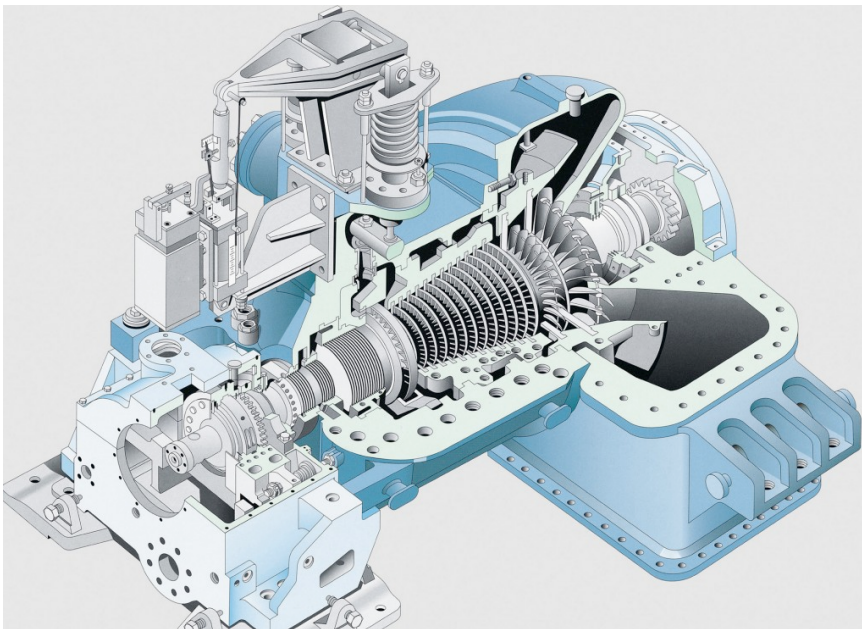
4.1.- Turbinas de vapor (IV)

En función de la dirección del flujo de vapor:

- *axiales*
- *radiales*

Principales elementos turbina de vapor:

- *Rotor*
- *Carcasa*
- *Alabes*
- *Válvula regulación*
- *Cojinetes de apoyo, de bancada o radiales*
- *Cojinete de empuje o axial*
- *Sistema de lubricación*
- *Sistema de refrigeración de aceite*
- *Sistema de control de aceite*
- *Sistema de sellado de vapor*
- *Virador*
- *Compensador*

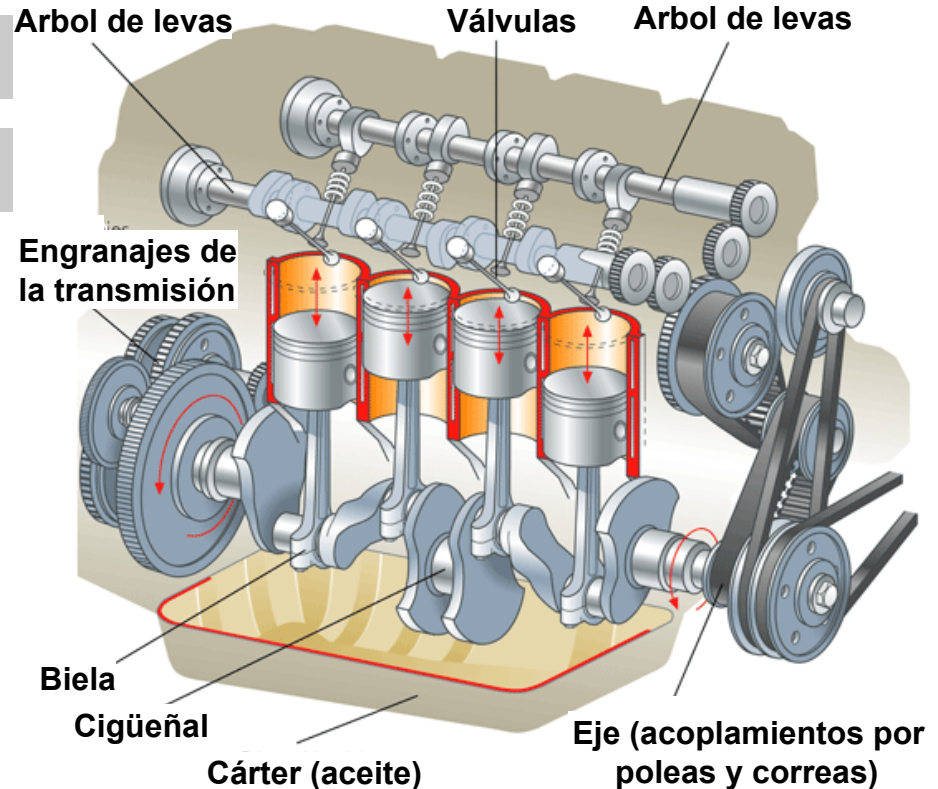


4.- Máquinas Térmicas (III)

4.2.- Motores de combustión (I)

La combustión del combustible se realiza en el interior de un cilindro, cuyo cierre lo forma un émbolo que lo recorre (pistón)

- Gasolina
- Diesel (autodetona por compresión)
- Gas



$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Potencia} \propto \text{Diámetro Cilindro}^2 \\ \text{Cilindrada} \propto \text{D.C.}^3 \\ \text{Masa Motor} \propto \text{D.C.}^3 \end{array} \right. \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \frac{\text{Potencia (kW)}}{\text{Cilindrada (cc)}} \propto \frac{1}{\text{D.C.}} \\ \frac{\text{Potencia (kW)}}{\text{Masa (kg)}} \propto \frac{1}{\text{D.C.}} \end{array} \right. \Rightarrow \downarrow \text{al } \uparrow \text{D.C.}$$

4.- Máquinas Térmicas (IV)

4.2.- Motores de combustión (I)

- De 4 tiempos; (mayor peso y mayor rendimiento)
- De 2 tiempos; admisión-compresión y expansión-escape
con = cilindrada y rpm, desarrolla más potencia (trabajo en cada carrera)
⇒ cortocircuito admisión escape
⇒ OTTO desperdicio de combustible

	2T	4T
OTTO	Pot Bajas (ligeros)	Pot Medias
DIESEL	Pot Altas (tamaño)	Pot Medias

4.- Máquinas Térmicas (V)

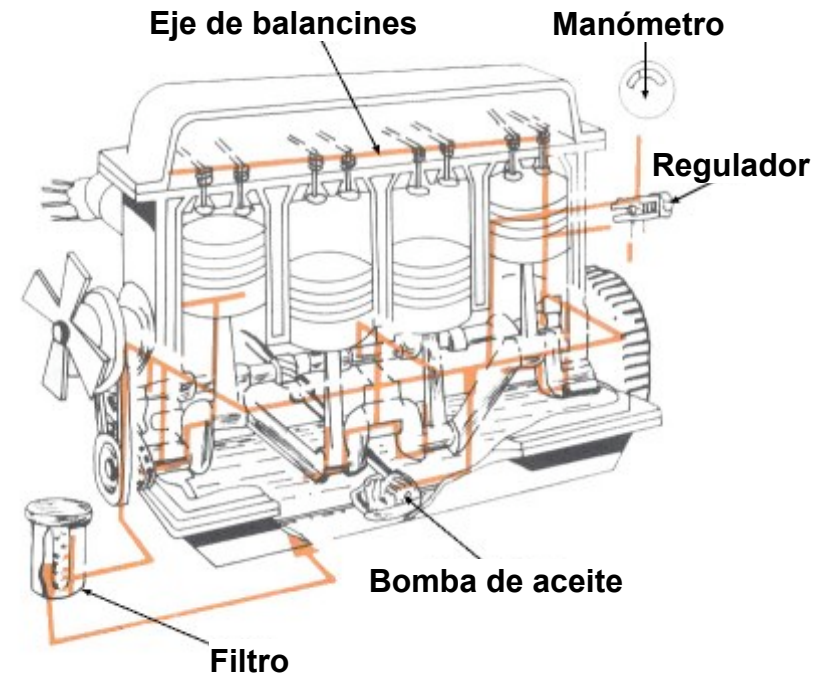
4.2.- Motores de combustión (III)

Los motores pueden tener aspiración natural o ser sobrealimentados

Necesitan refrigeración, lubricación y salida de gases (se puede extraer el calor)

Los gases están a $T \approx 400^{\circ}\text{C}$, en una caldera se puede producir vapor o agua caliente de $0,45 \text{ kW}_{\text{th}}$ por cada kW_{eje}

De la refrigeración de las camisas se puede obtener agua caliente a $T \approx 80$ a 90°C de $0,5$ a $0,8 \text{ kW}_{\text{th}}$ por cada kW_{eje}

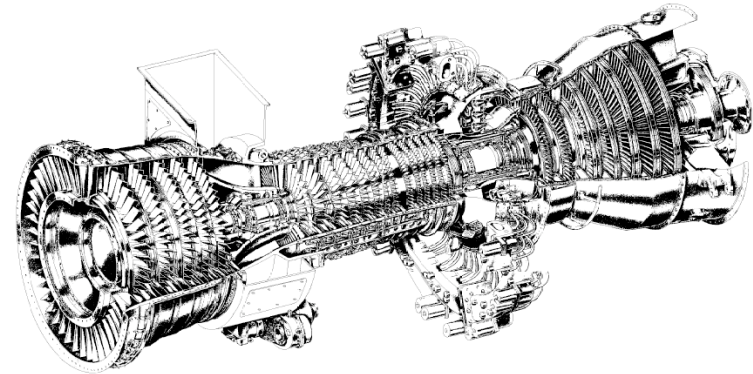


4.- Máquinas Térmicas (VI)

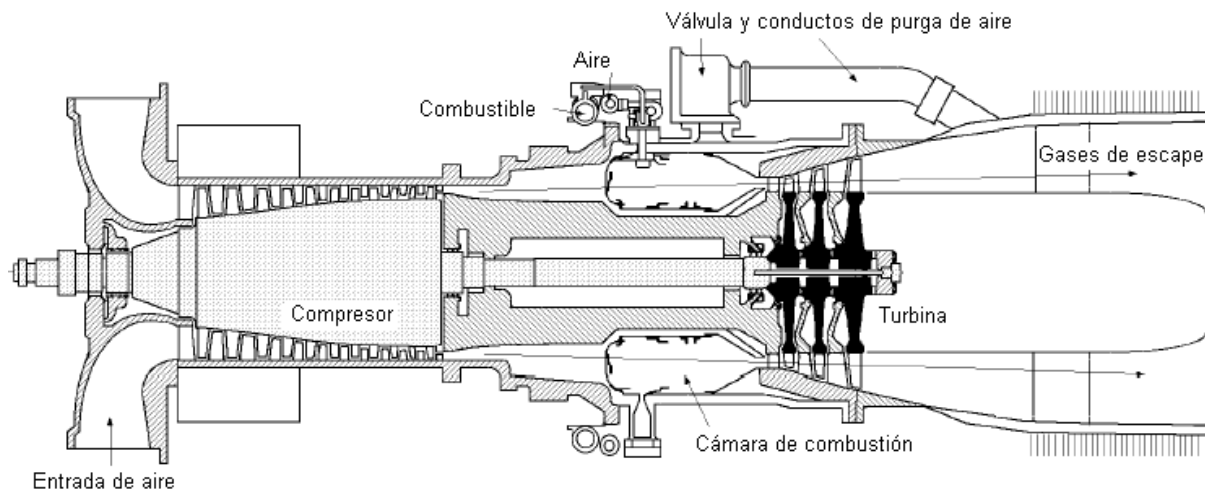
4.3.- Turbinas de gas (I)

Se componen principalmente de tres elementos:

- Compresor, que comprime el aire comburente
- Cámara(s) de combustión, dispuesta(s) radialmente
- Turbina accionada por los gases



La turbina es serie de álabes con un cierto ángulo de inclinación ángulo, solidarios con una parte móvil, sobre los que incide el gas y hace girar



4.- Máquinas Térmicas (VII)

4.3.- *Turbinas de gas* (II)

Giran a gran velocidad, peligro con los desequilibrio

Las partículas que pueda arrastrar el aire en la entrada son muy perjudiciales

El combustible debe estar perfectamente filtrado

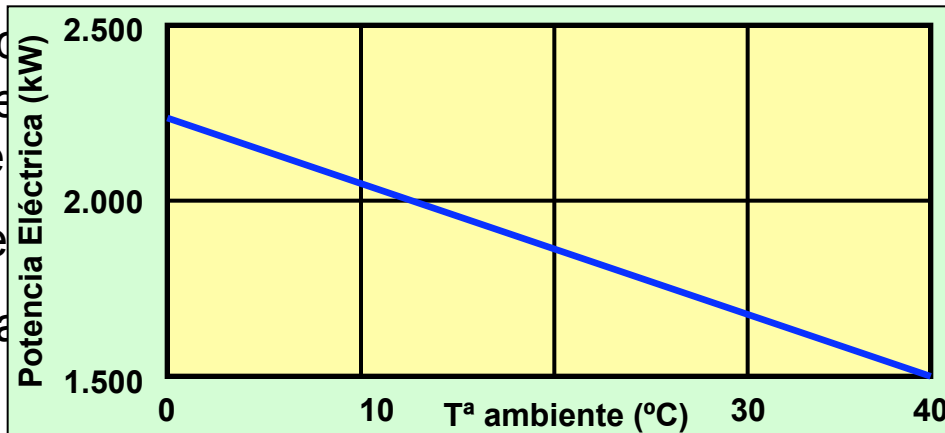
En los gases de escape está contenido el calor que cede la máquina térmica

Las turbinas de gas pueden tener varias etapas

4.- Máquinas Térmicas (VII)

4.3.- Turbinas de gas (II)

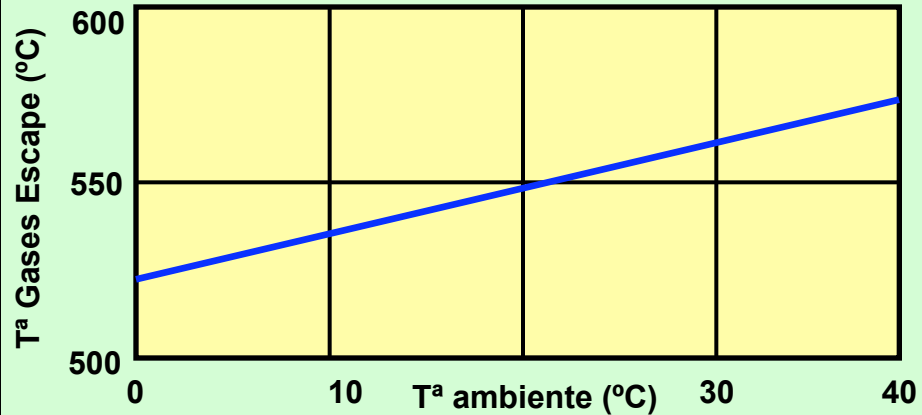
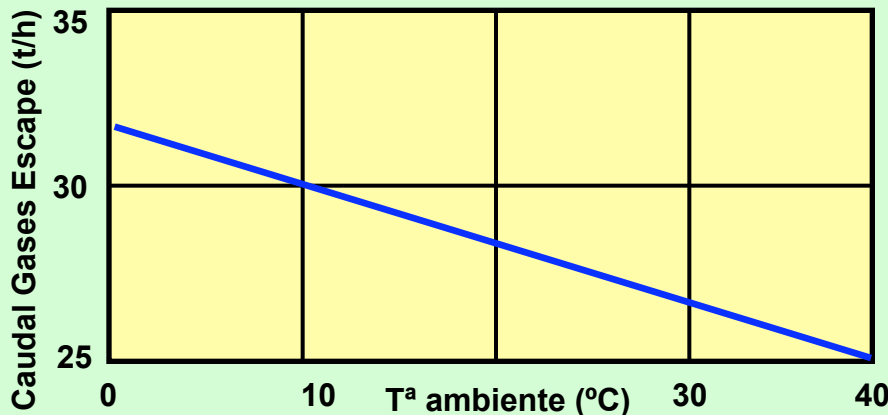
Giran a gran velocidad
Las partículas que
El combustible de
En los gases de escape
Las turbinas de gas



... muy perjudiciales

... máquina térmica

↑ T empeora su funcionamiento



4.- Máquinas Térmicas (VIII)

4.4.- Motor Stirling (I)

