

TD. T5.- Ciclos de Potencia

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

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

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

1

TD. T5.- Ciclos de Potencia

Objetivos:

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

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

2

1.- Introducción

2.- Ciclos de Vapor

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

3.- Ciclos de Aire

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

4.- Ciclo Combinado

5.- Cogeneración

6.- Máquinas Térmicas

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

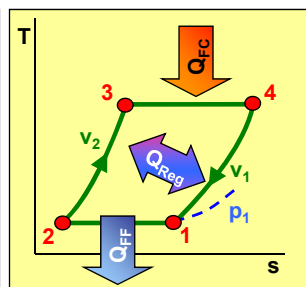
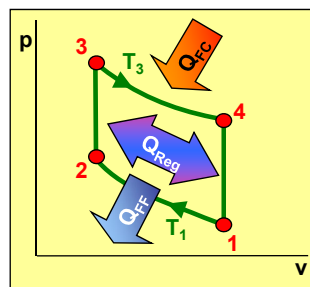
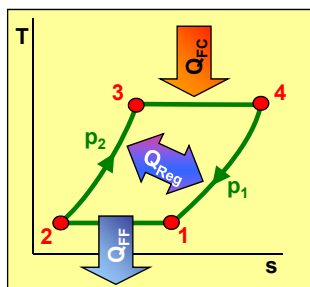
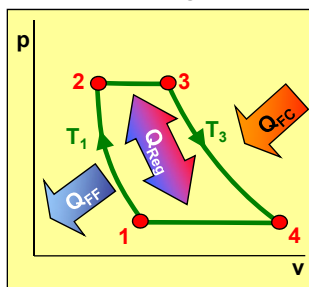
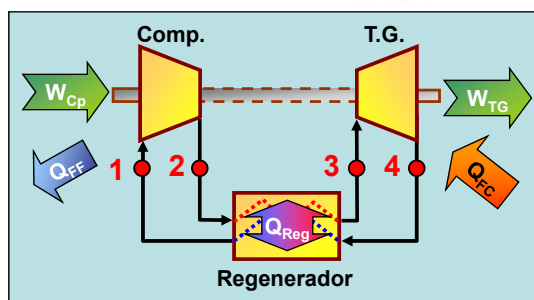
3.- Ciclos de Gas (XV)

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 $\eta_{real} < \eta_{teórico}$

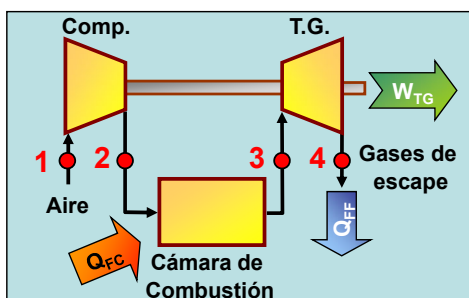
El calor se puede obtener mediante **combustión externa** (malos combustibles)

3.- Ciclos de Gas (XVI)

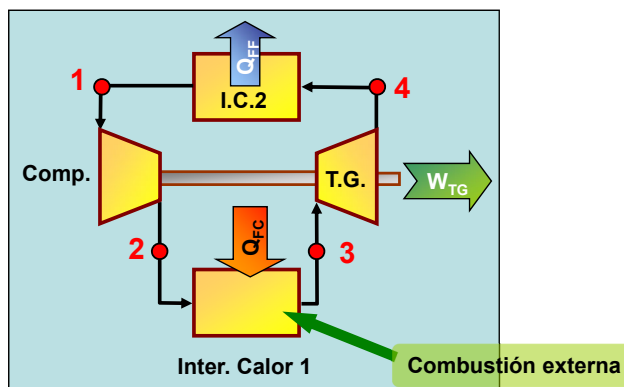
3.8.- Ciclo Brayton (I)

La turbina de gas puede funcionar:

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



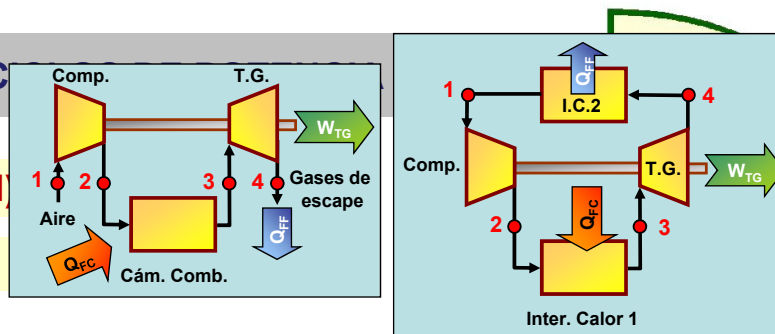
Relación de acoplamiento = $\frac{W_{\text{compresor}}}{W_{\text{turbina}}}$



puede alcanzar el 80%

3.- Ciclos de Gas (XVII)

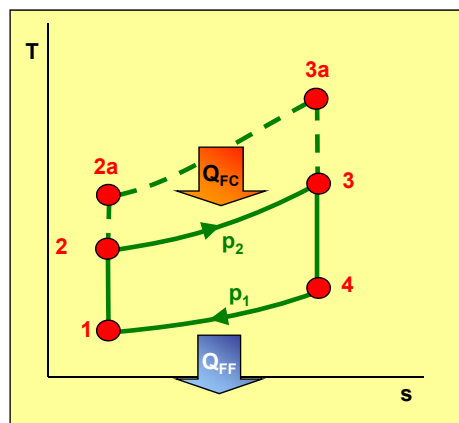
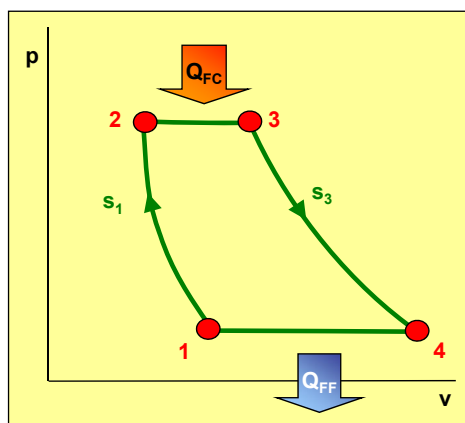
3.8.- Ciclo Brayton (II)



El ciclo Brayton lo forman dos adiabáticas y dos isobaras

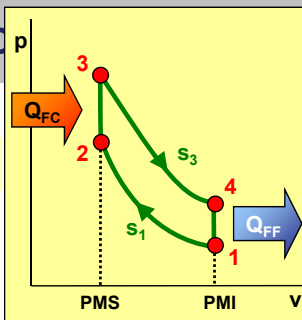
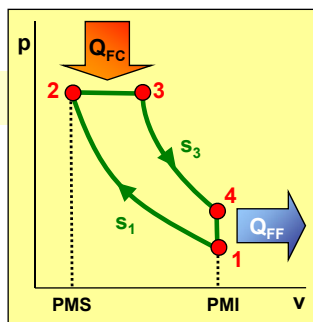
- La compresión y expansión son isoentrópicas
- El calor se comunica y extrae con p cte

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



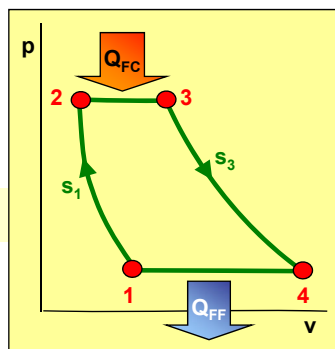
3.4.- Ciclo Otto

dos s = cte y dos v = cte



3.5.- Ciclo Diesel

dos s = cte, una v = cte y una p = cte



3.8.- Ciclo Brayton

dos s = cte y dos p = cte

3.- Ciclos de Gas (XVIII)

3.8.- Ciclo Brayton (III)

Se supone c_p cte

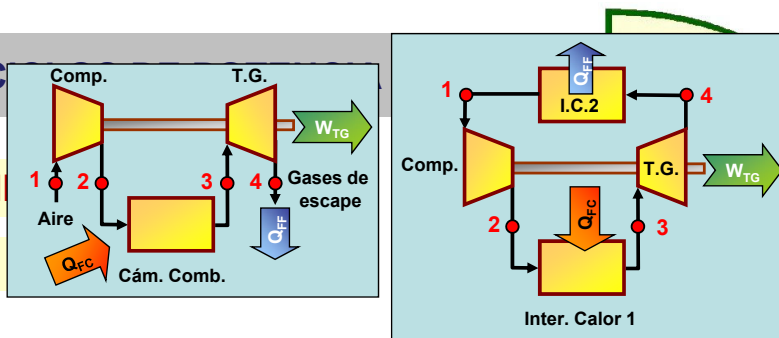
Cálculos precisos deben tener en cuenta su variación

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

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

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

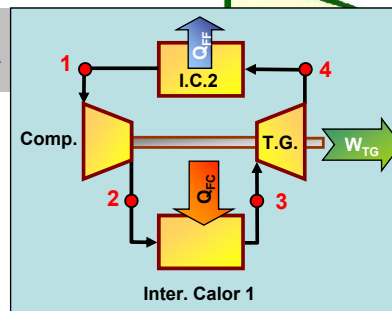
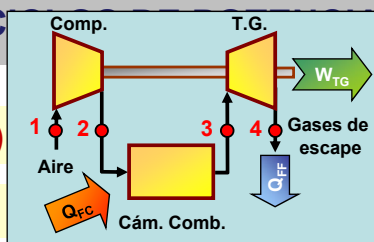
Considerando que C_p no cambia



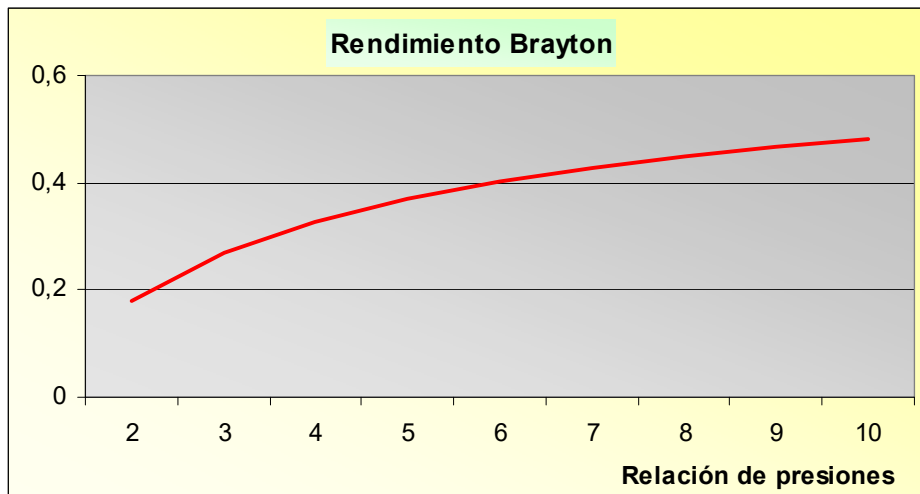
$$\eta_{\text{Brayton}} = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = \left| \begin{array}{l} r_p = p_2 / p_1 \end{array} \right| = 1 - r_p^{-[(\gamma-1)/\gamma]}$$

3.- Ciclos de Gas (XIX)

3.8.- Ciclo Brayton (IV)

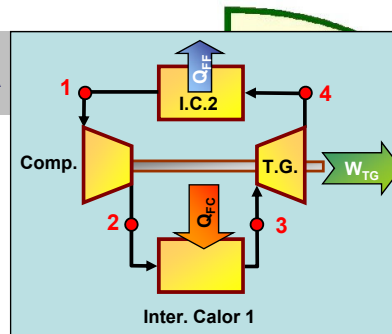
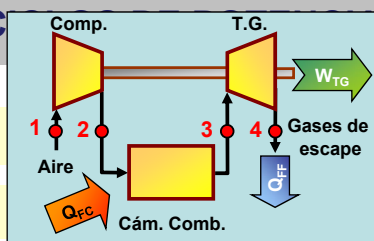


$$\eta_{\text{Brayton}} = 1 - r_p^{-[(\gamma-1)/\gamma]}$$



3.- Ciclos de Gas (XX)

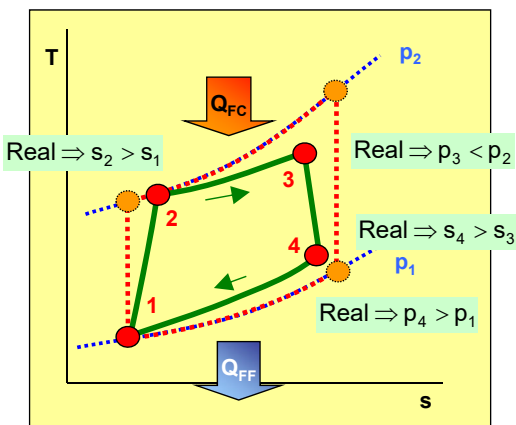
3.8.- Ciclo Brayton (III)



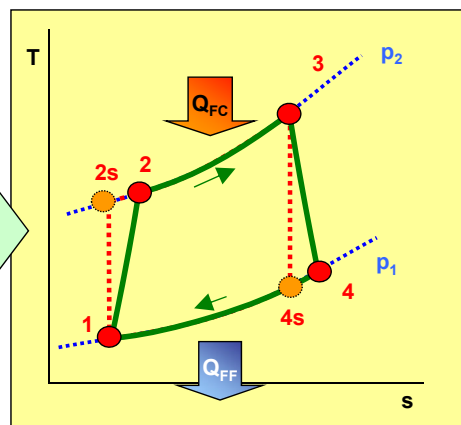
s no cte $\Rightarrow \downarrow \eta$ aprox. 15%

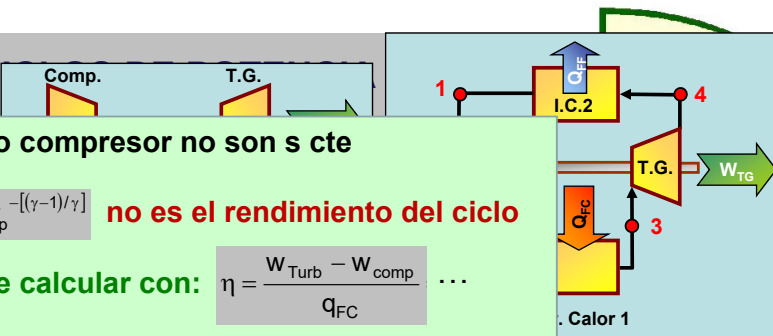
$$\eta_{\text{isoeent Turb}} = \frac{W_{\text{real}}}{W_{s=\text{cte}}} = \frac{w_{\text{real}}}{w_{s=\text{cte}}} = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4s}}$$

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



Sólo se considera s = cte
Se desprecian las caídas de p





3.- Ciclos

3.8.- Ciclo Bra

• Si turbina y/o compresor no son s cte

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

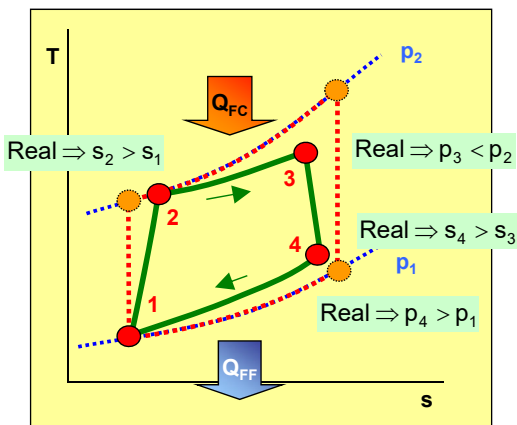
no es el rendimiento del ciclo

que se debe calcular con: $\eta = \frac{W_{\text{Turb}} - W_{\text{comp}}}{Q_{\text{FC}}}$...

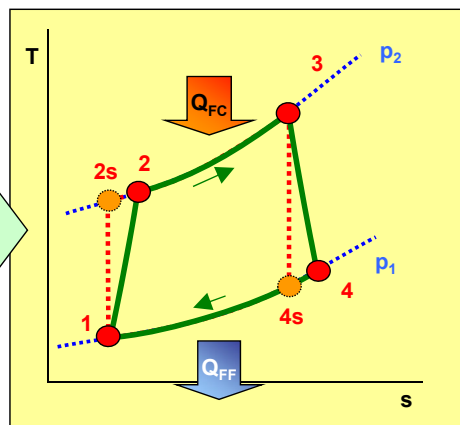
s no cte \Rightarrow

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

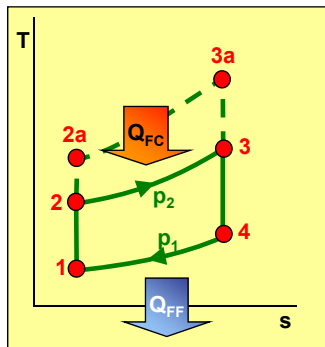
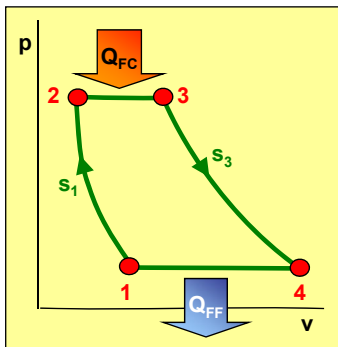
$$\eta_{\text{isoent Comp}} = \frac{W_{s=\text{cte}}}{W_{\text{real}}} = \frac{w_{s=\text{cte}}}{w_{\text{real}}} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1}$$



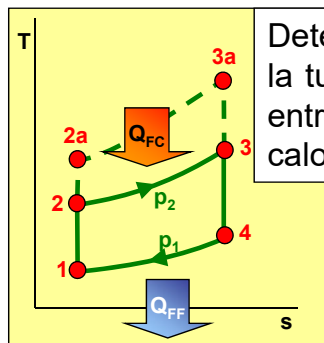
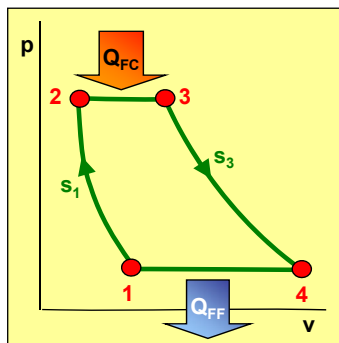
Sólo se considera s ≠ cte
Se desprecian las caídas de p



Al compresor de una turbina de gas entra aire a 100 kPa y 25°C. Para una relación de presiones de 5 y una temperatura máxima de 850°C determinar la relación de acoplamiento y el rendimiento térmico utilizando el ciclo Brayton



Al compresor de una turbina de gas entra aire a 100 kPa y 25°C. Para una relación de presiones de 5 y una temperatura máxima de 850°C determinar la relación de acoplamiento y el rendimiento térmico utilizando el ciclo Brayton



Determinar: los trabajos desarrollados por la turbina, absorbido por el compresor, el entregado por el grupo al exterior, y los calores suministrados y expulsado

13

Si el **compresor y la turbina** del ejercicio anterior tienen un **rendimiento** del **80%**. Determinar: los trabajos desarrollados por la turbina y absorbido por el compresor, el trabajo que entrega el grupo t-c al exterior, la relación de acoplamiento, los calores suministrados y expulsado, y el rendimiento térmico

14

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

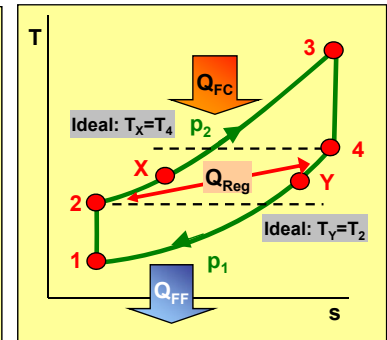
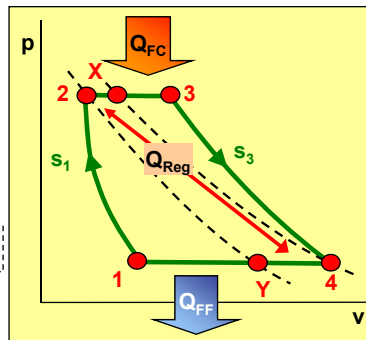
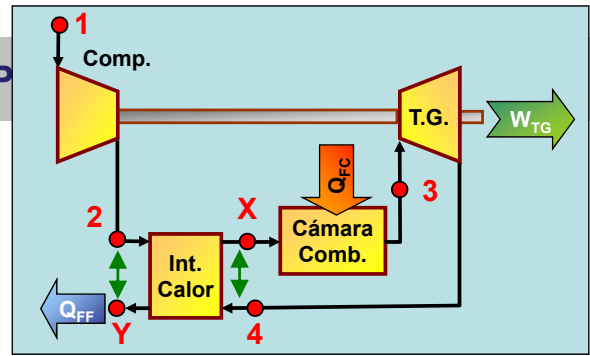
Ideal: $Q_{FC} = m_{aire} \cdot c_p \cdot (T_3 - T_4)$

[T2] $s = cte \Rightarrow W_{turb} = m_{aire} \cdot c_p \cdot (T_3 - T_4)$

$h_a - h_b = c_p \cdot (T_a - T_b) \Rightarrow W_{comp} = m_{aire} \cdot c_p \cdot (T_2 - T_1)$

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

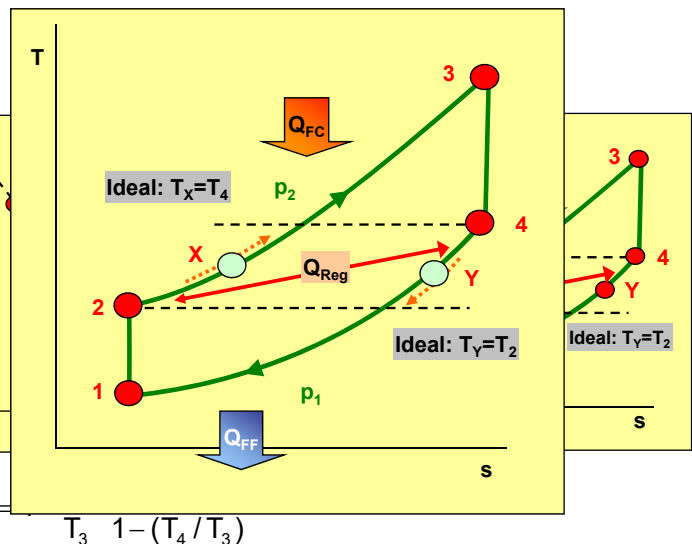
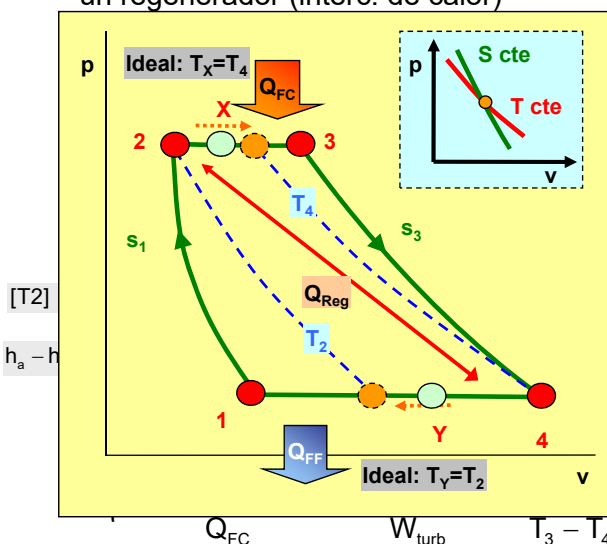
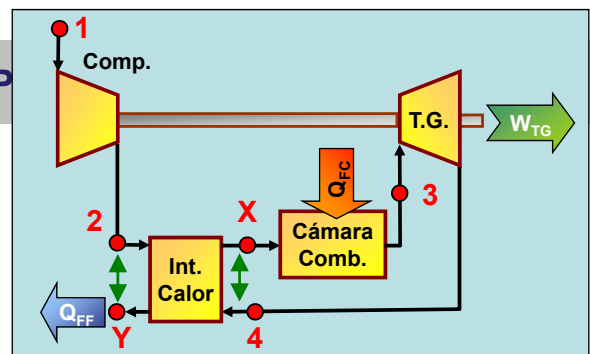
$$\eta = \frac{W_{turb} - W_{comp}}{Q_{FC}} = 1 - \frac{W_{comp}}{W_{turb}} = 1 - \frac{T_2 - T_1}{T_3 - T_4} = 1 - \frac{T_1}{T_3} \cdot \frac{(T_2/T_1) - 1}{1 - (T_4/T_3)}$$



3.- Ciclos de Gas (XXI)

3.9.- Ciclo Brayton Regenerativo (I)

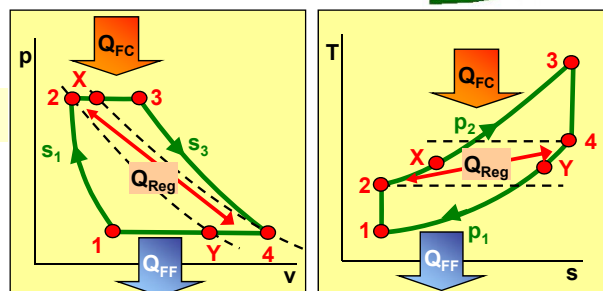
El calor cedido al exterior se aprovecha con un regenerador (interc. de calor)



3.- Ciclos de Gas (XXII)

3.9.- Ciclo Brayton Regenerativo (II)

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



Adiabáticas: $\left\{ \begin{array}{l} [T1] \frac{T_b}{T_a} = \left(\frac{p_b}{p_a} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \end{array} \right. \begin{array}{l} (3-4) \\ (1-2) \end{array}$

Isobaras: $\left\{ \begin{array}{l} [T1] p_a = p_b \end{array} \right. \begin{array}{l} (2-3) \\ (4-1) \end{array}$

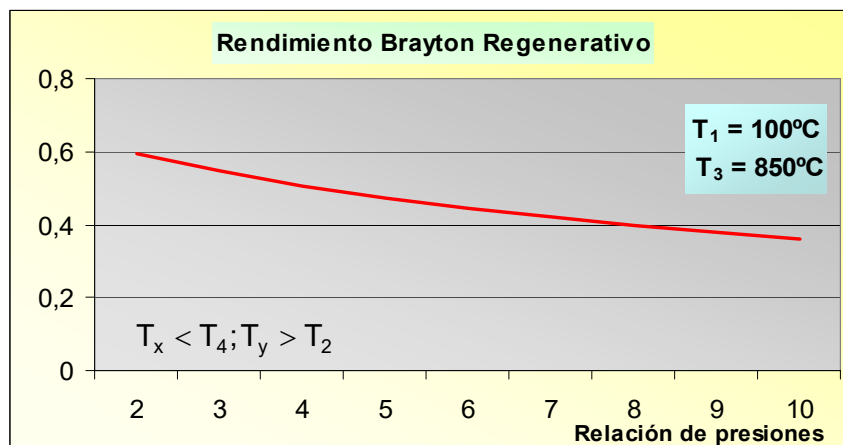
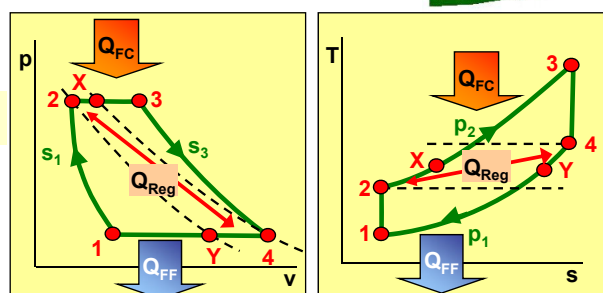
$$\eta_{BReg} = 1 - \frac{T_1}{T_3} \cdot r_p^{(\gamma-1)/\gamma}$$

3.- Ciclos de Gas (XXIII)

3.9.- Ciclo Brayton Regenerativo (III)

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

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



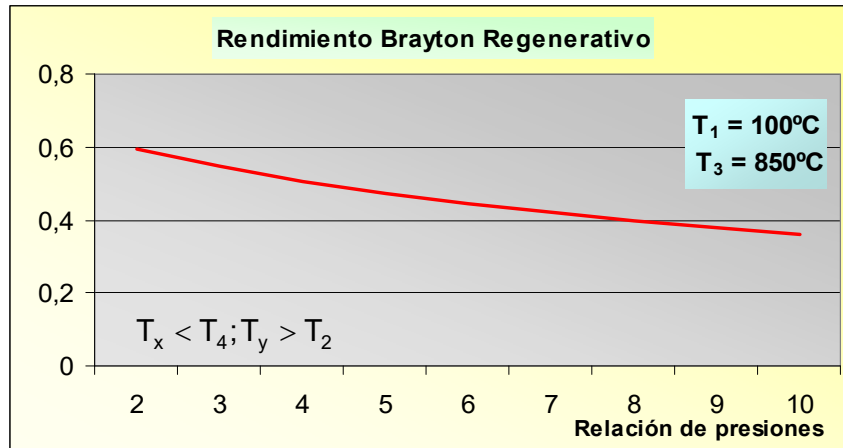
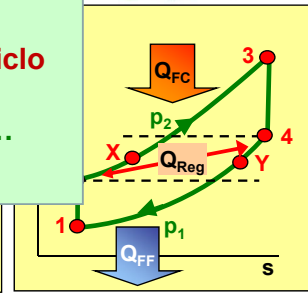
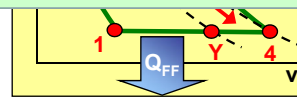
3.- Ciclos

3.9.- Ciclo Brayton

• Si turbina y/o compresor no son s cte
 $\eta_{BReg} = 1 - \frac{T_1}{T_3} \cdot r_p^{(\gamma-1)/\gamma}$ **no es el rendimiento del ciclo**
que se debe calcular con: $\eta = \frac{W_{Turb} - W_{comp}}{Q_{FC}} = \dots$

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

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

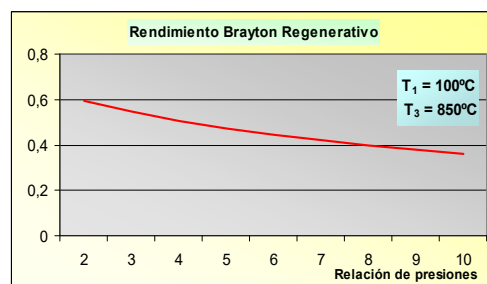


3.- Ciclos de Gas (XXIV)

3.9.- Ciclo Brayton Regenerativo (IV)

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

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



En el regenerador no se pueden igualar las T_{as}

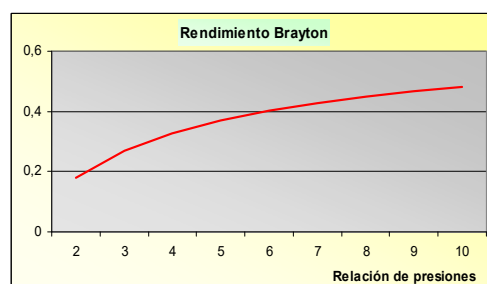
$T_x < T_4; T_y > T_2$

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

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

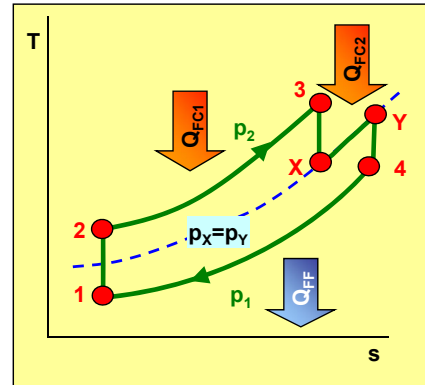
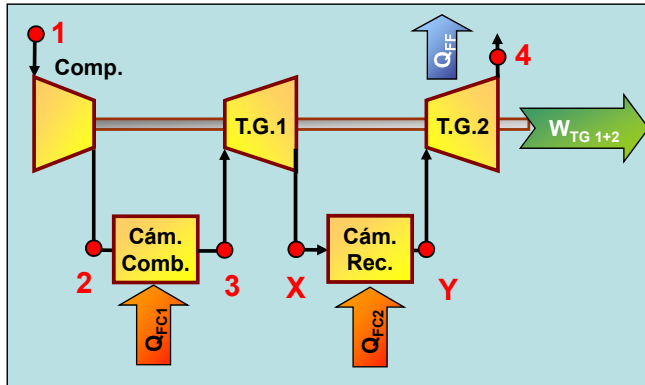
$\eta_B \uparrow$ al $\uparrow r_p$

{ 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



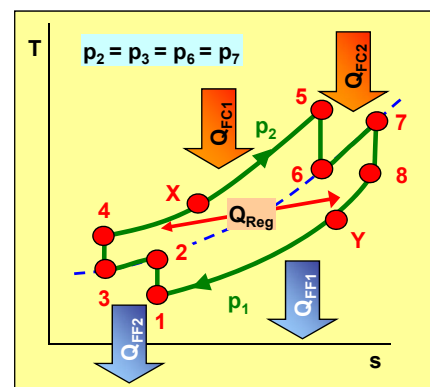
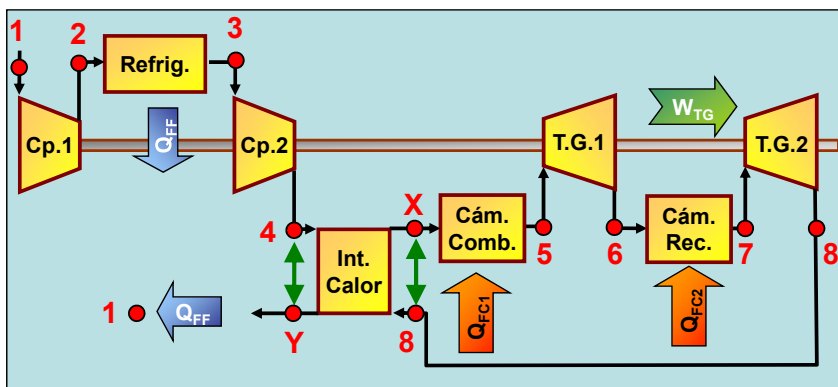
T_{max} limitada por los álabes de la turbina
El recalentamiento \uparrow el área del ciclo sin $\uparrow T_{max}$
Se necesitan dos turbinas y una segunda cámara de combustión (recalentador)

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)

3.11.- Ciclo Brayton Regenerativo con Recalentamiento y Refrigeración



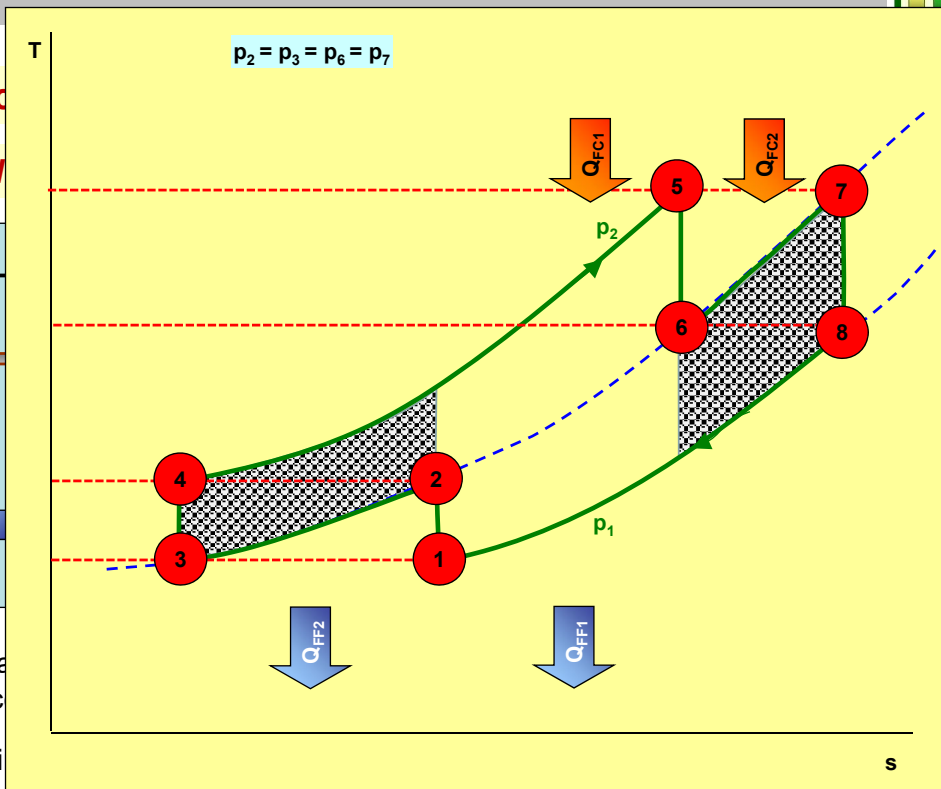
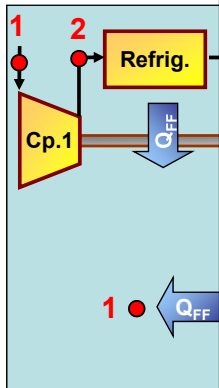
Para mejorar el funcionamiento se puede introducir una refrigeración intermedia entre dos etapas de compresión complementado con un recalentamiento y un regenerador

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

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

3.- Ciclos

3.11.- Ciclos

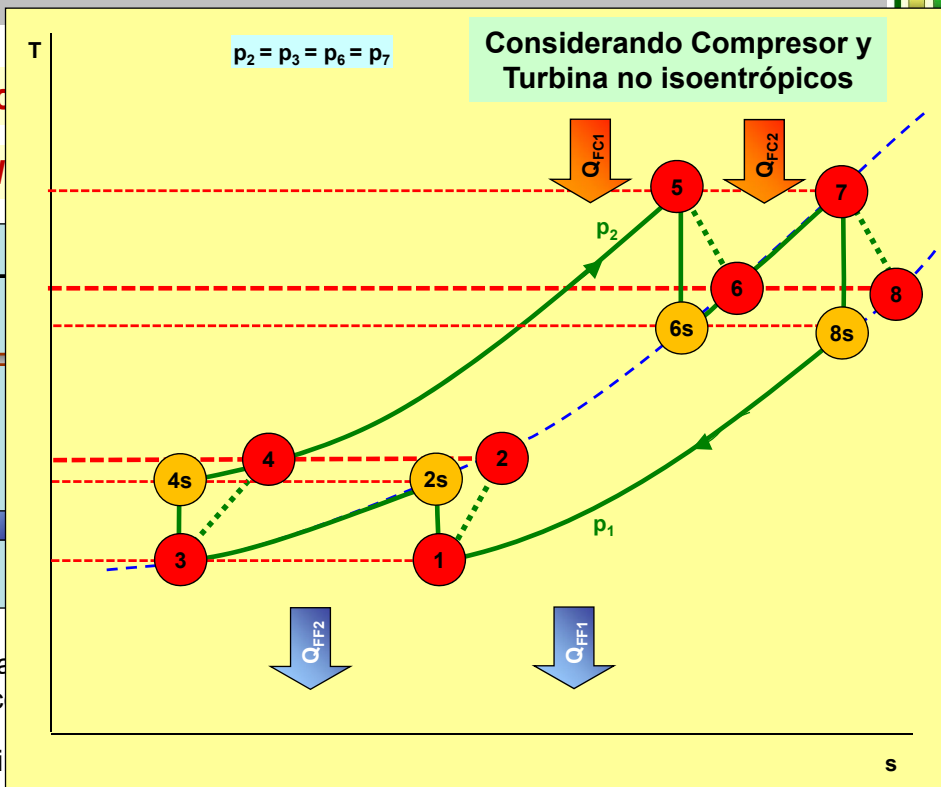
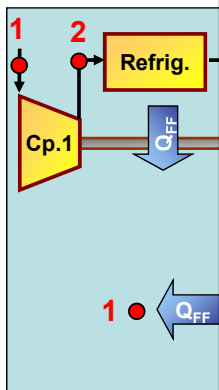


Para mejorar etapas de c
La presión i

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

3.- Ciclos

3.11.- Ciclos

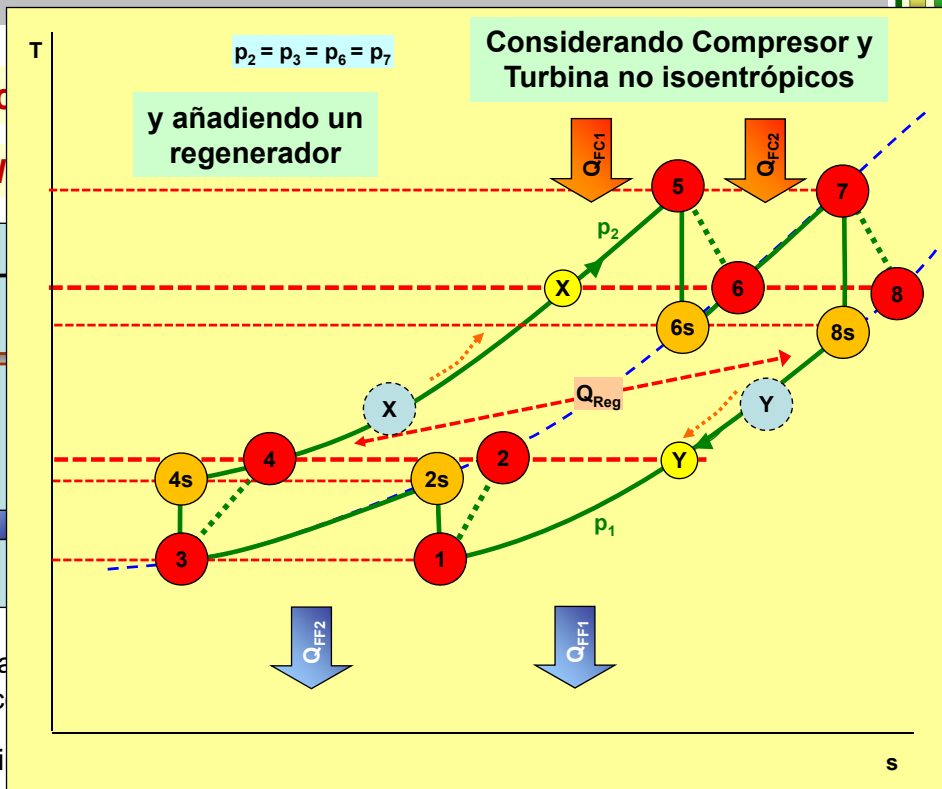
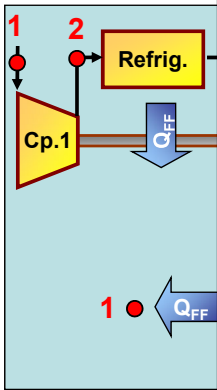


Para mejorar etapas de c
La presión i

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

3.- Ciclos

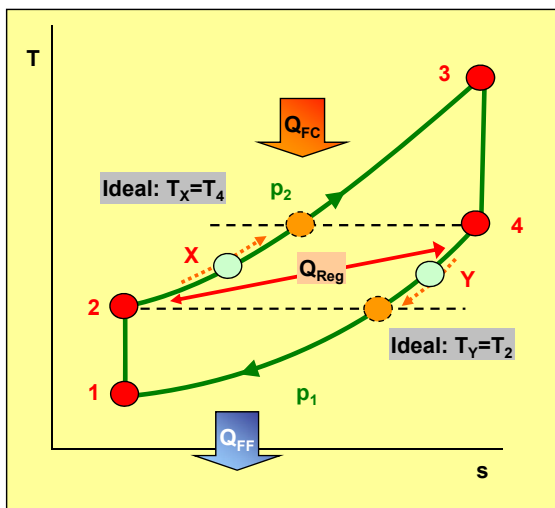
3.11.- Ciclos



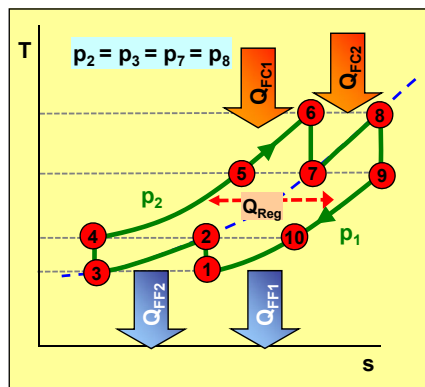
Para mejorar etapas de c
La presión i

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

Determinar la relación de acoplamiento y el rendimiento térmico Si al compresor de una turbina de gas le entra aire a 100 kPa y 25°C, tiene una relación de presiones de 5 y una temperatura máxima de 850°C, **se le añade un regenerador ideal**



Una turbina de gas tiene una **compresión en dos etapas con refrigeración intermedia, un recalentador ideal y una postcombustión**. Considerando el compresor y la turbina isoentrópicos, determinar el rendimiento si al compresor le entra aire a 100 kPa y 25°C, la relación de presiones es de 5 y la temperatura máxima de 850°C



Práctica de laboratorio

PROGASES

Archivos Cálculos Ayuda

Seleccionar gas Estados Transformaciones Listados

GASES

- Aire
- Hidrógeno
- Oxígeno
- Nitrógeno
- Vapor de agua
- Monóxido de carbono
- Dióxido de carbono
- Metano
- Amoníaco
- Gases de Combustión...

PROPAGUA

Archivos Listados Cálculos Ayuda

Estados Equipos Ec. masa Ec energía

Estado 1 de 0 (ir a)

Presión: 0.02-221.2 bar

Temperatura: 0-800 °C

Título: dm³/kg

Vol. específico: dm³/kg

Entalpía: kJ/kg

Entropía: kJ/kg K

Caudal: kg/s

Introduzca dos datos de cada estado, así como el caudal, si

SISCECT

Archivo Modo Configuración Complementos Ventana Ayuda

Comandos

Fábrica (vapor húmedo) Temporal

Aparatos

- Turbina
- Bomba
- Caldera
- Cond.
- Esfurc.
- Intercamb.
- Válvula
- Mezcl.

Modo: Diseño del Ciclo / Fluido de Trabajo: "Agua T(0-700)"