

UNIDAD 11

TURBINAS DE GAS

Bibliografía:

- **Apuntes elaborados por la Cátedra**
- **Cengel, Yunus A. ; Boles, Michael A. TERMODINÁMICA . Edit. Mc. Graw Hill**



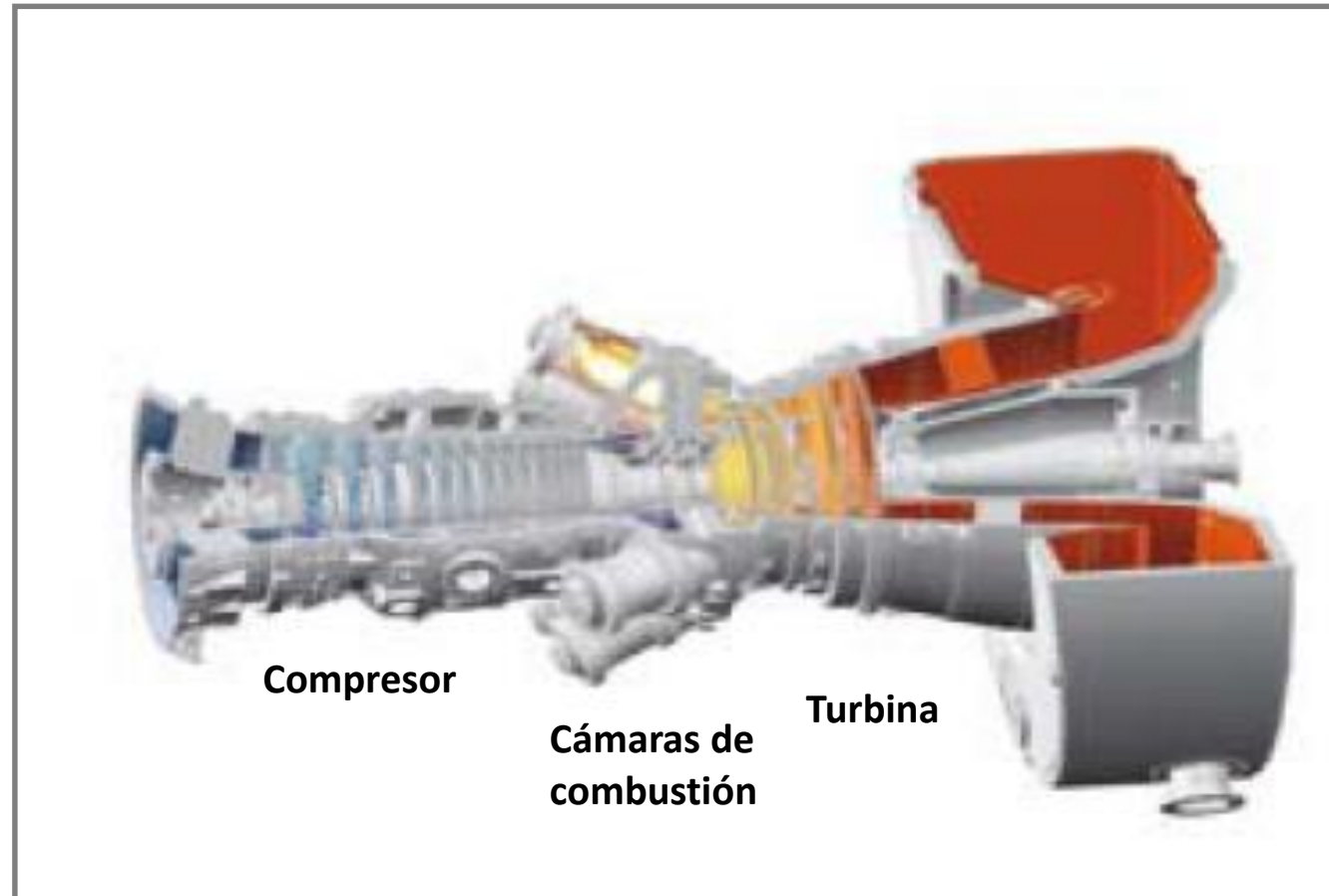
UNIDAD 11: TURBINAS DE GAS

11.A. Ciclo Brayton. Ciclo abierto y ciclo cerrado. Ciclo Brayton. Rendimiento térmico. Relaciones de trabajo máximo. Diferencias entre el ciclo Brayton real e ideal. Rendimiento isoentrópico del compresor y de la turbina.

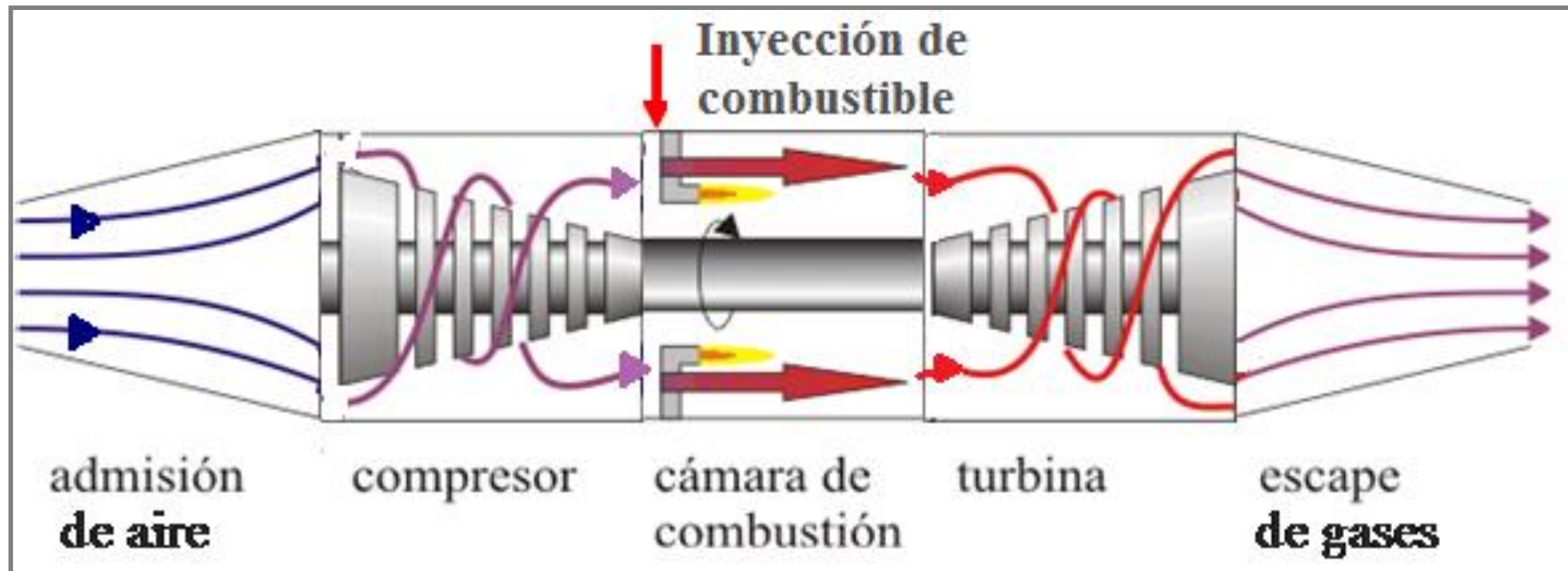
11.B. Optimización – Rendimientos. Mejoras para aumentar el rendimiento térmico de una turbina: Regeneración. Compresión multietapa con refrigeración intermedia. Expansión multietapa con recalentamiento. Aplicaciones más frecuentes de las turbinas de gas.



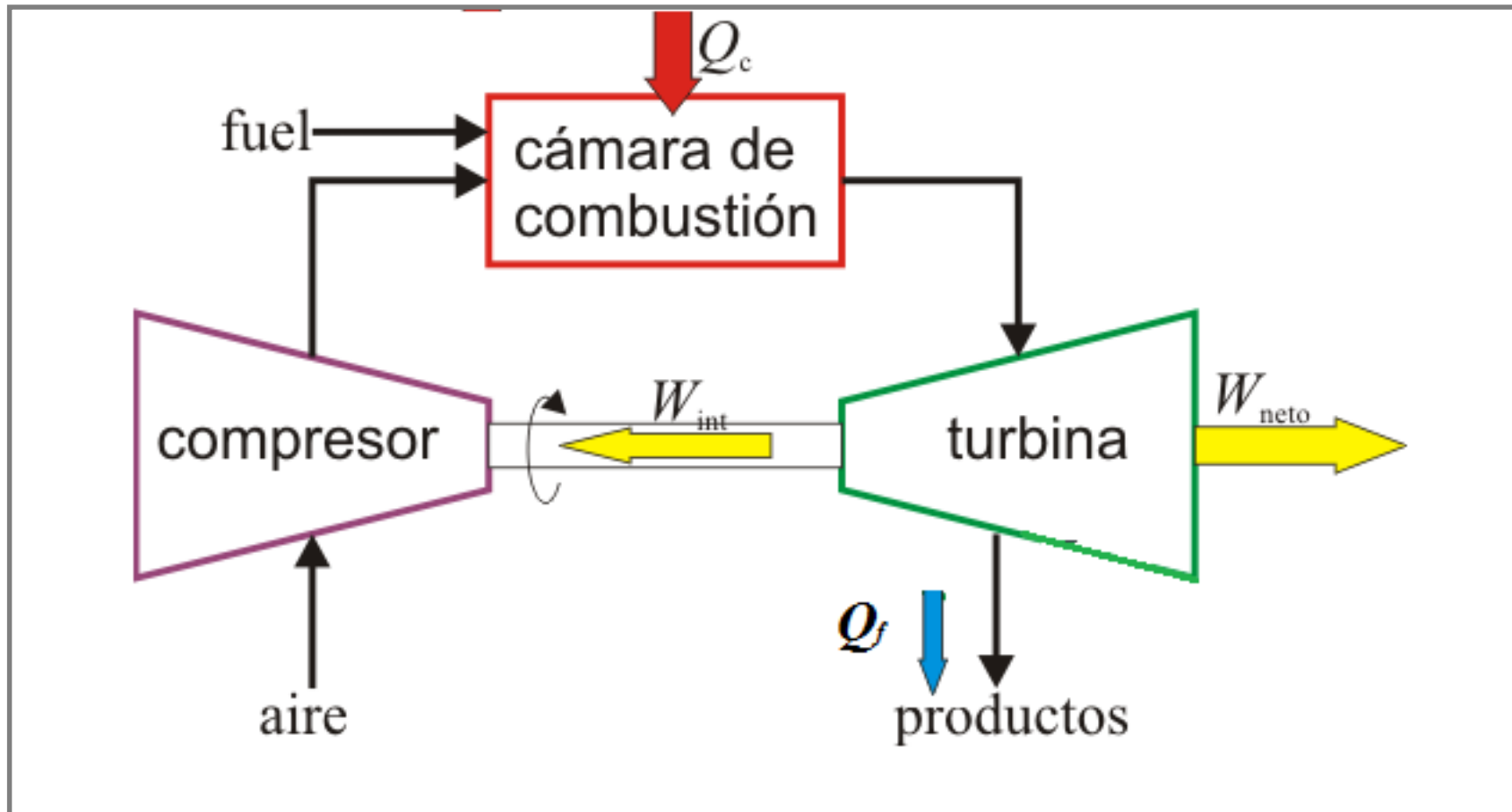
MOTOR DE TURBINA DE GAS



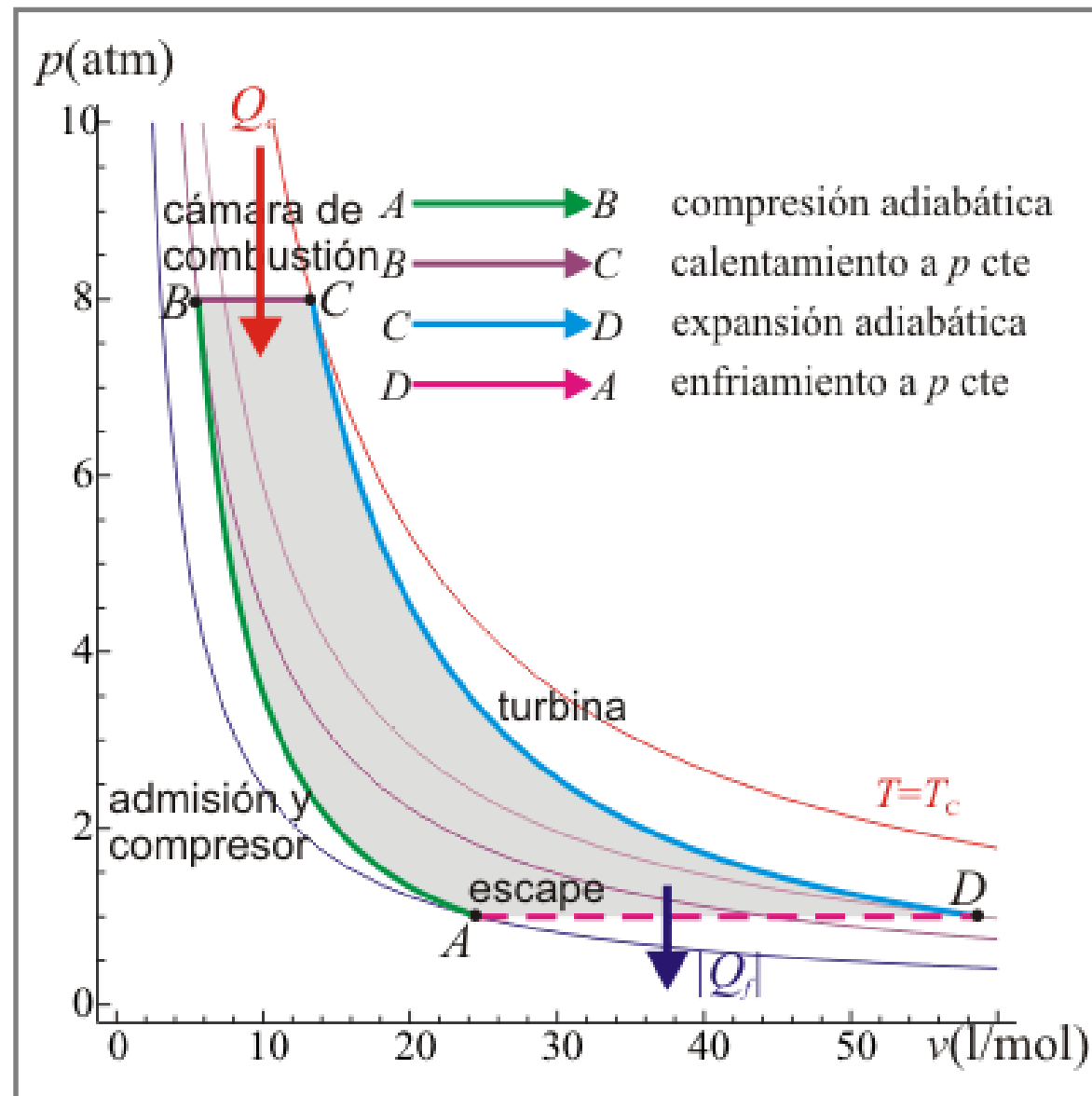
MOTOR DE TURBINA DE GAS



MOTOR DE TURBINA DE GAS

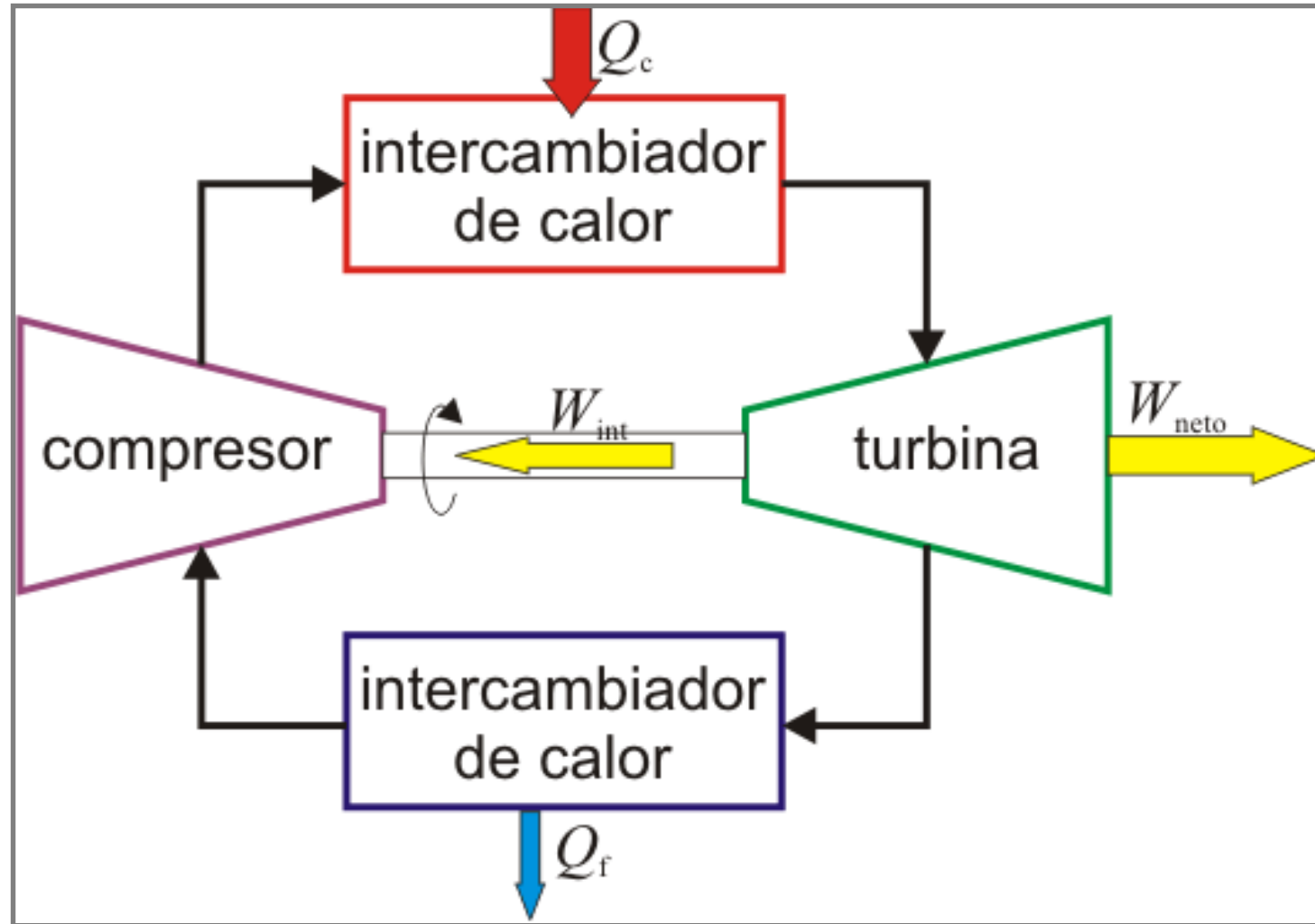


CICLO “ABIERTO”



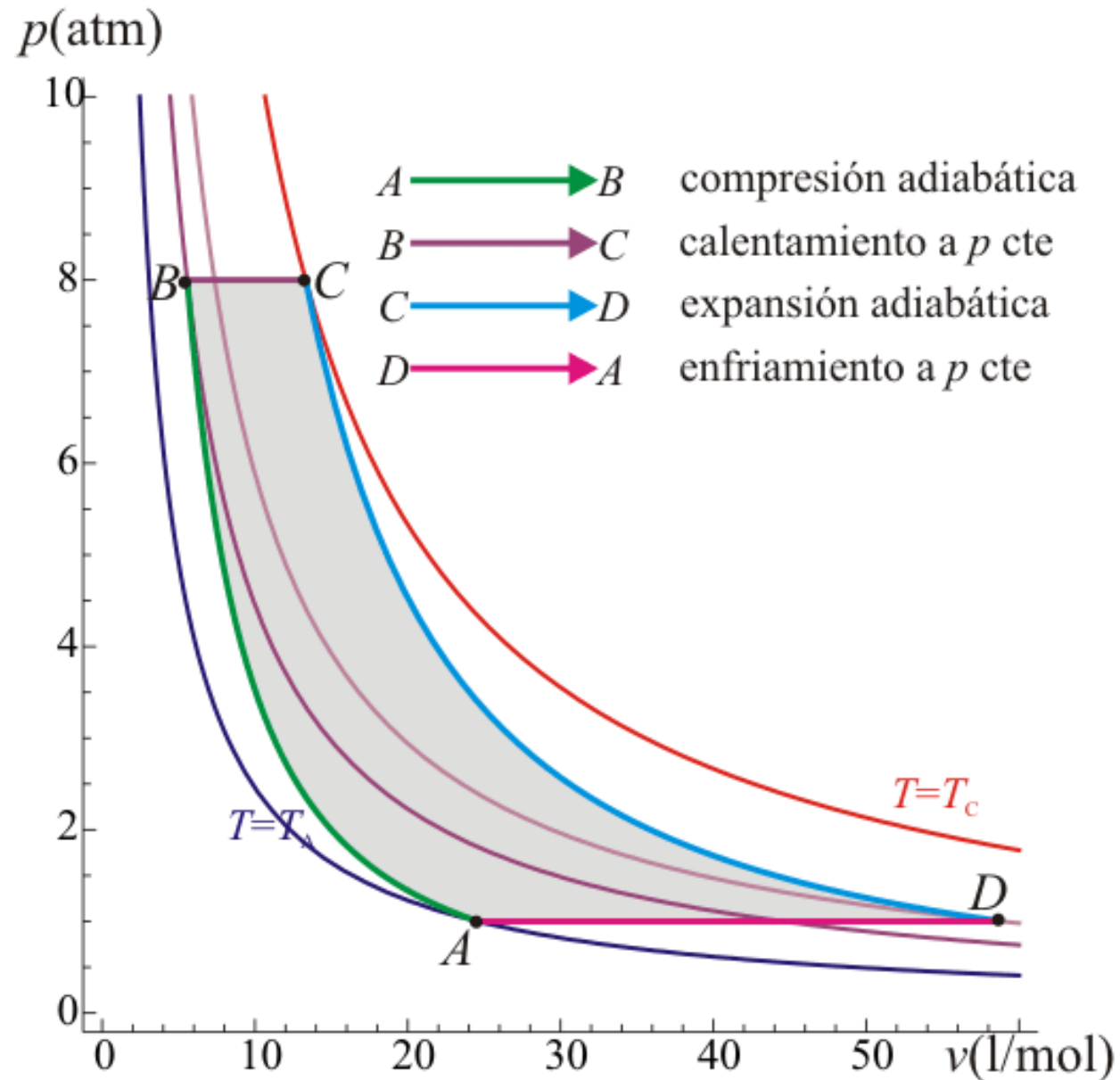
CICLO "ABIERTO"

CICLO BRAYTON IDEAL DE AIRE

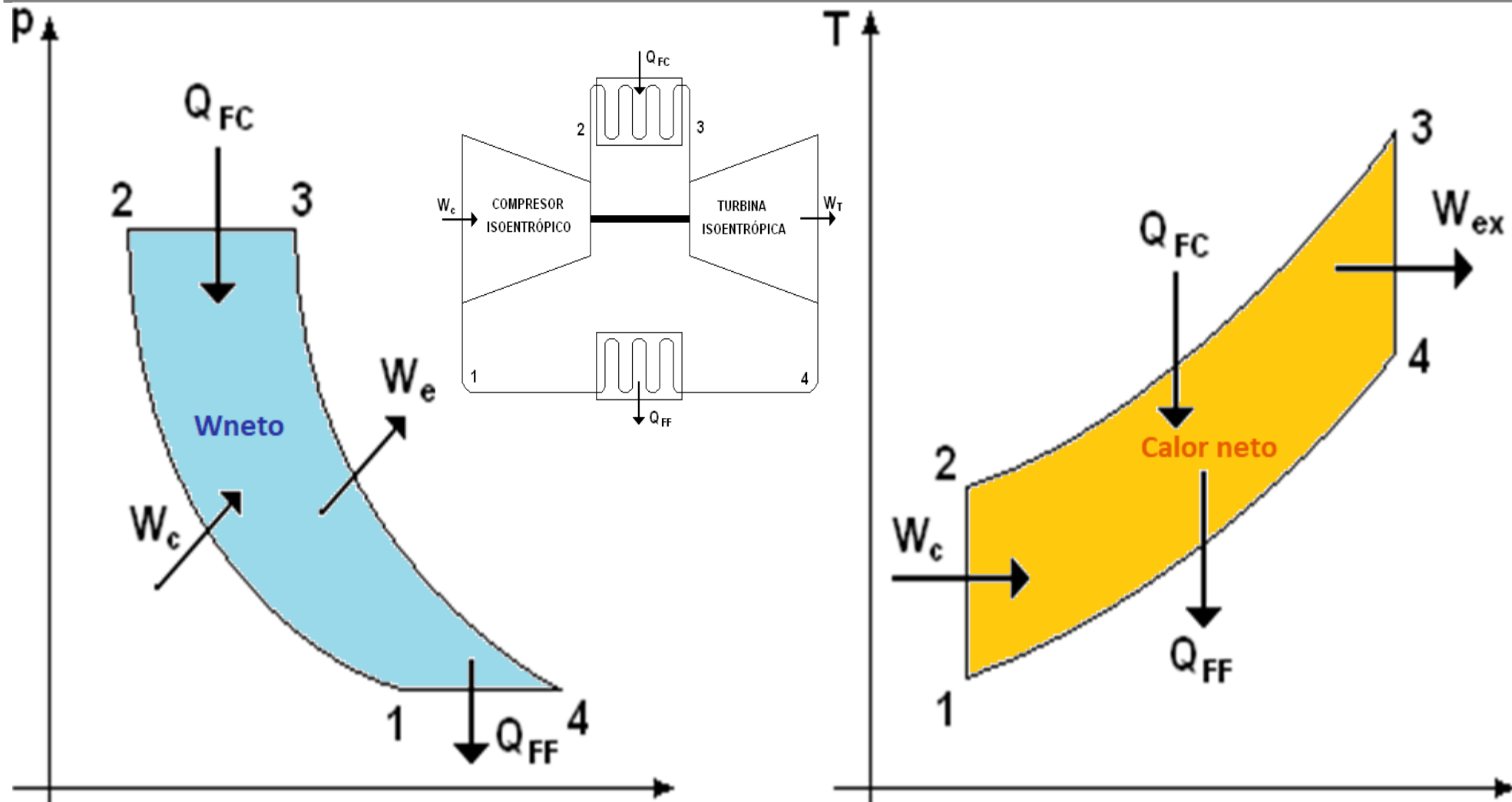


CICLO “CERRADO”

CICLO CERRADO: CICLO BRAYTON



ESTUDIO DE UN CICLO BRAYTON DE AIRE FRÍO ESTÁNDAR



$$Q_{neto} = W_{neto}$$

CICLO BRAYTON CON AIRE FRÍO ESTANDAR

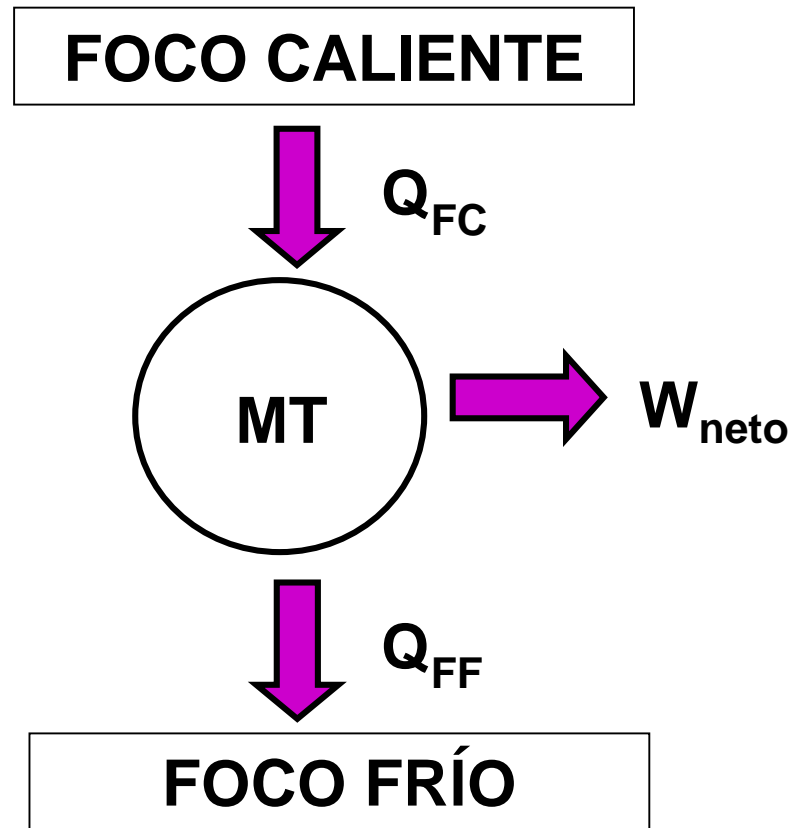
HIPÓTESIS PARA SU ESTUDIO TÉRMODINÁMICO

FLUIDO DE TRABAJO: AIRE CON COMPORTAMIENTO DE GAS IDEAL

PROCESOS O EVOLUCIONES:

- **CUASISTÁTICAS Ó INTERNAMENTE REVERSIBLES(SIN IRREVERSIBILIDADES INTERNAS)**
- **EXPANSIÓN (TURBINA) Y COMPRESIÓN (COMPRESOR) ADIABÁTICAS**
- **CALORES ESPECÍFICOS (C_p) CONSTANTES CON LA TEMPERATURA Y TOMADOS EN CONDICIONES ESTANDAR DE P Y T (25 °C y 1 atm.)**
- **INTERCAMBIAN CALOR CON FUENTES TÉRMICAS**
- **$\Delta E_{\text{cinética}}$ y $\Delta E_{\text{potencial}}$ DESPRECIABLES**

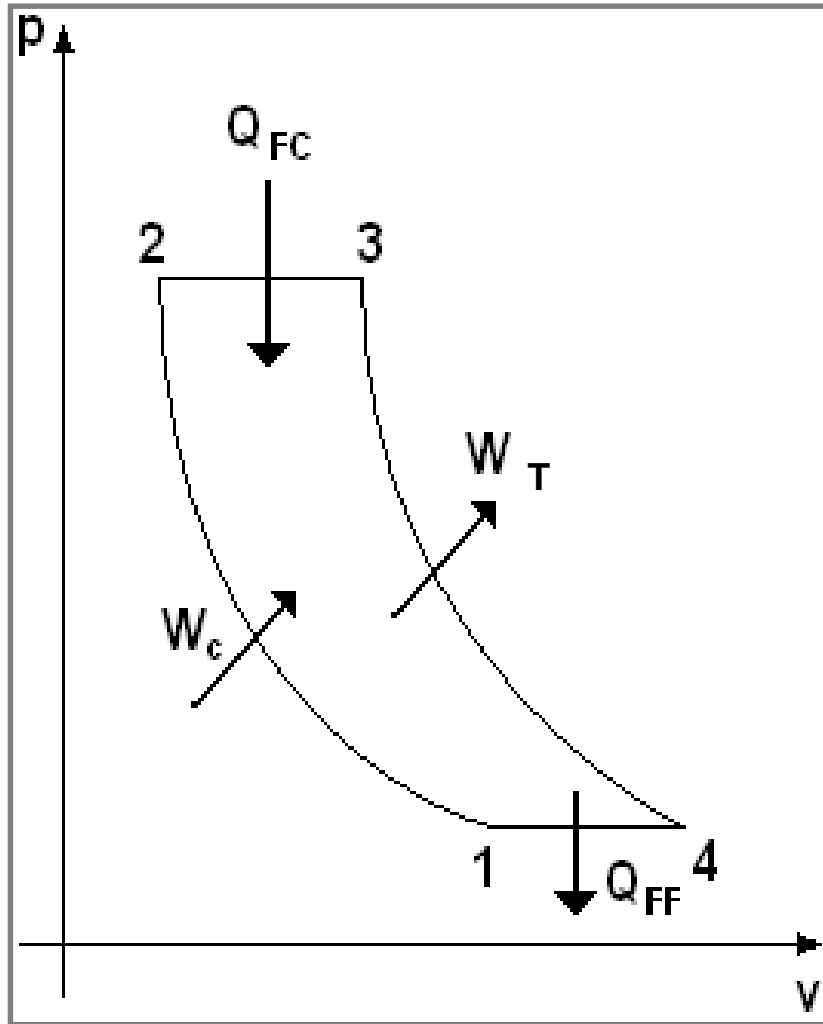
CÁLCULO DEL RENDIMIENTO



$$\eta = \frac{W_{neto}}{Q_{FC}}$$

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

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



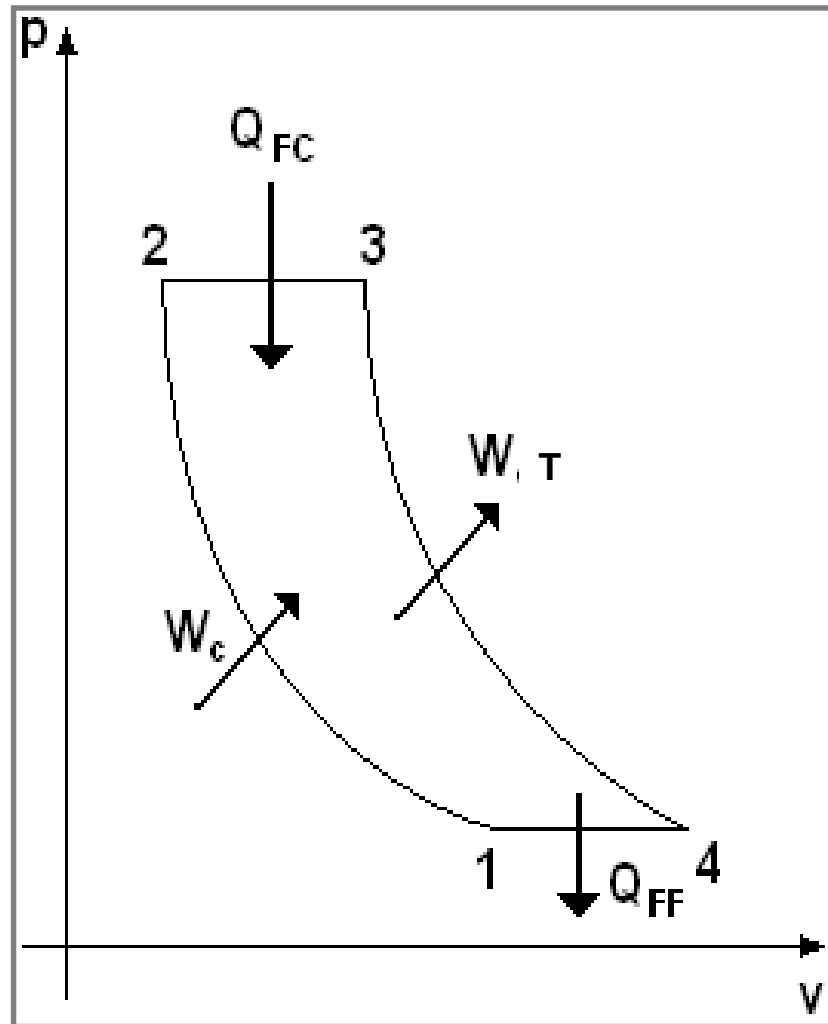
$$|Q_{FF}| = m \cdot c_p \cdot (T_4 - T_1)$$

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

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

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

$$T_1 \cdot p_1^{\frac{1-k}{k}} = T_2 \cdot p_2^{\frac{1-k}{k}} ; \quad T_4 \cdot p_4^{\frac{1-k}{k}} = T_3 \cdot p_3^{\frac{1-k}{k}}$$



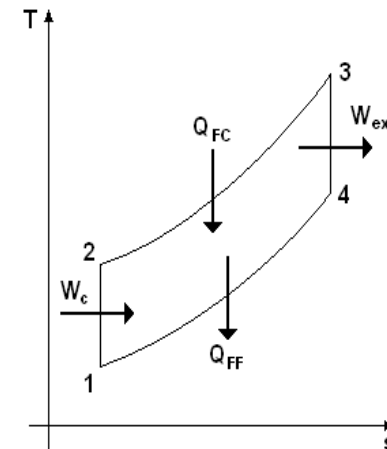
SI “ r_p ”
RELACIÓN DE
PRESIÓN

$$r_p = \frac{p_2}{p_1} = \frac{p_3}{p_1} = \frac{p_3}{p_4}$$

$$\frac{T_1}{T_2} = r_p^{\frac{1-k}{k}}$$

$$\frac{T_4}{T_3} = r_p^{\frac{1-k}{k}}$$

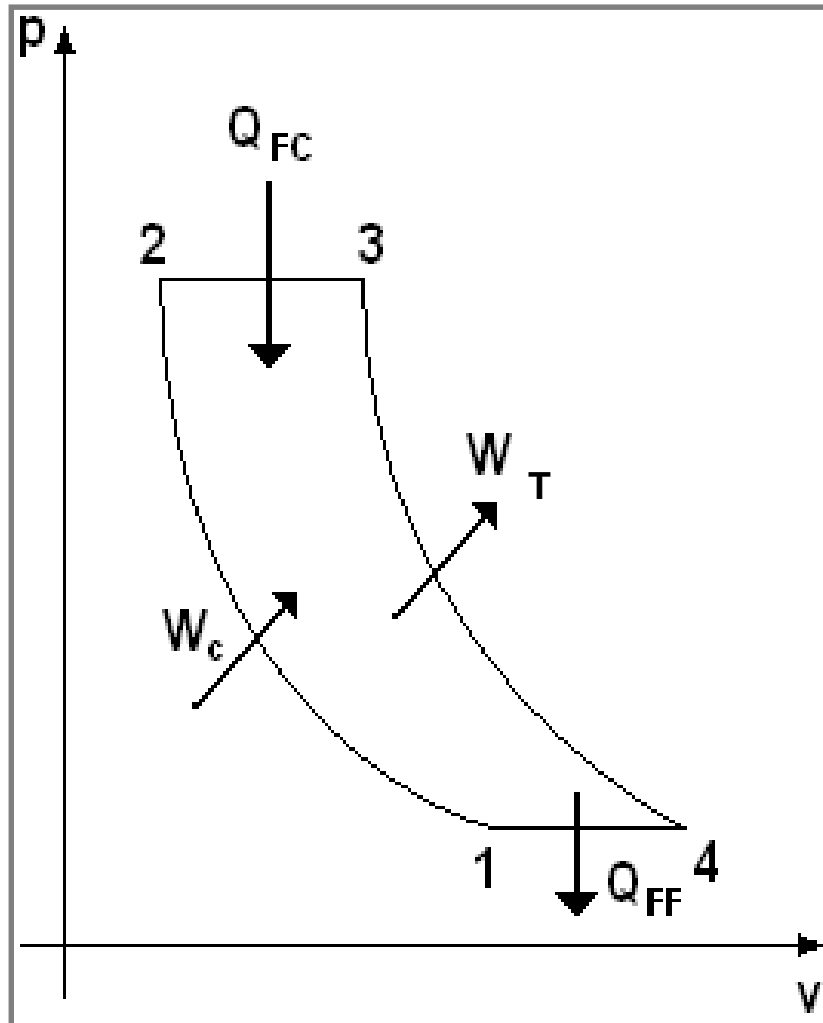
$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{T_4}{T_3}$$



$$r_p = \frac{p_2}{p_1} = \frac{p_3}{p_1} = \frac{p_3}{p_4}$$

$$\frac{T_1}{T_2} = r_p^{\frac{1-k}{k}}$$

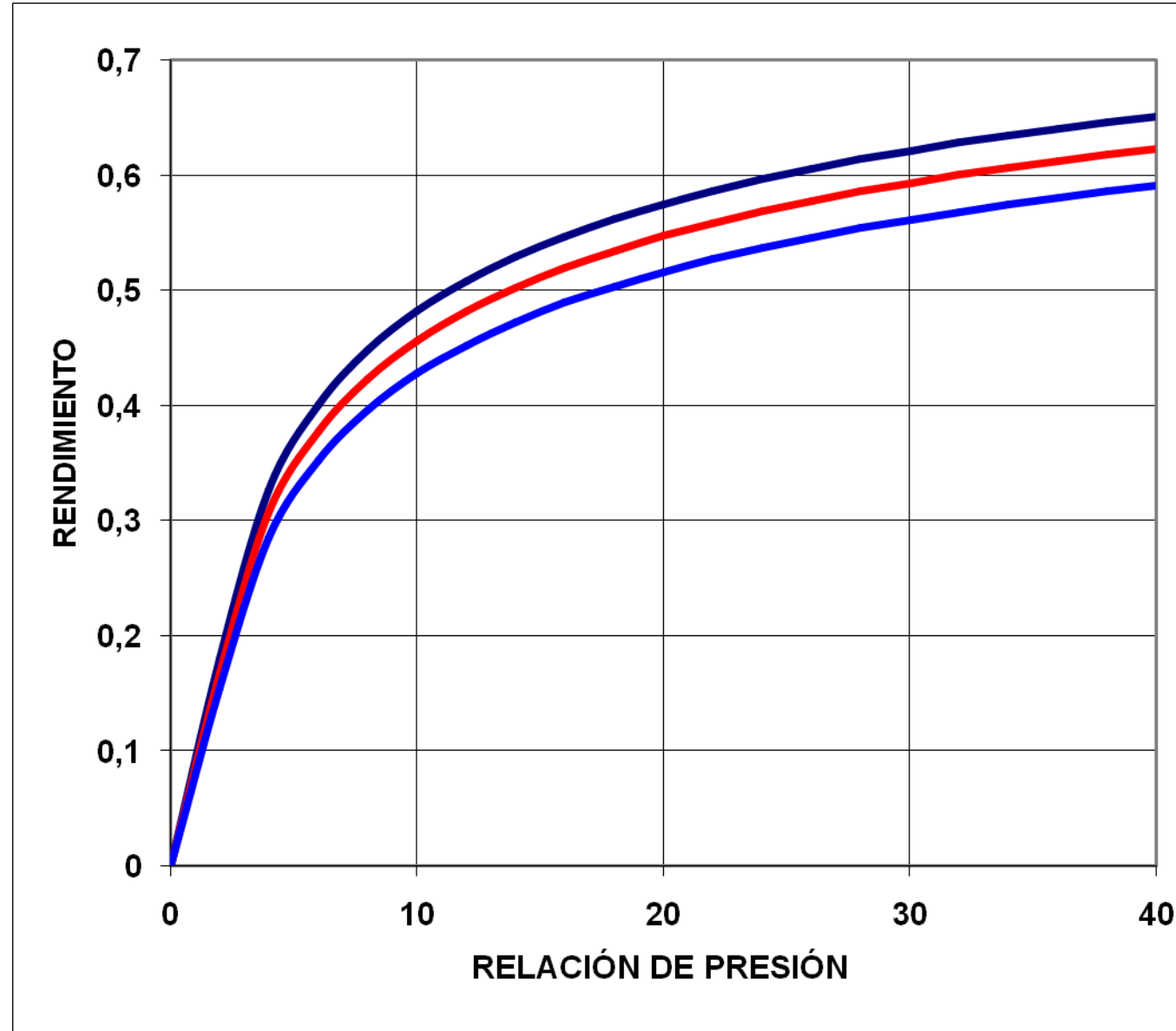
$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{T_4}{T_3}$$



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

$$\eta = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - r_p^{\frac{1-k}{k}}$$

El intervalo característico de variación de r_p , en motores reales de turbina de gas, va de 5 a 20, siendo el más común entre 11 y 16



k
1,4
1,36
1,32

Negativo
y menor
que 1

$$\eta = 1 - r_p^{\frac{1-k}{k}}$$

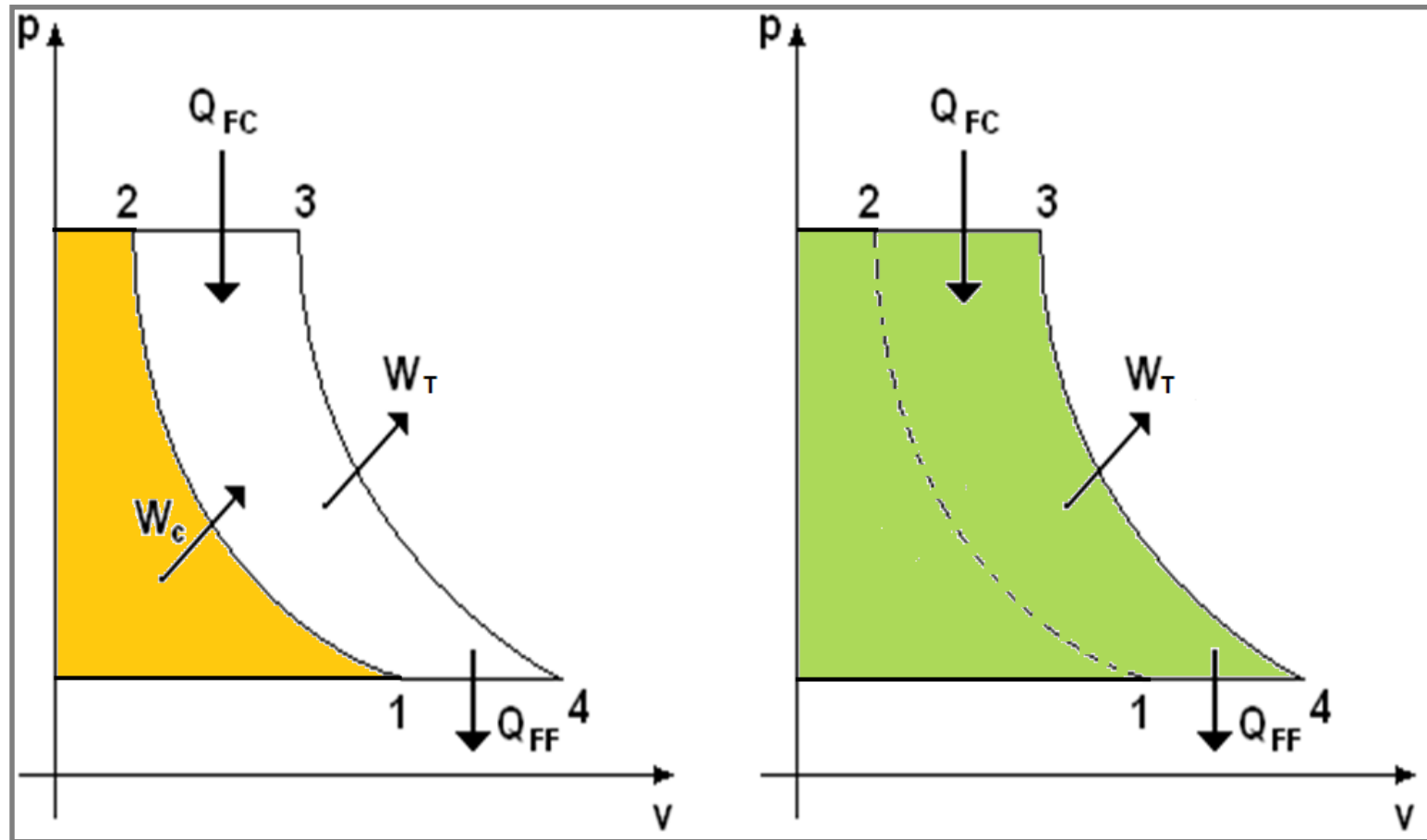
Mayor
que 1

$$\eta = 1 - \frac{1}{r_p^{\frac{k-1}{k}}}$$



RELACIÓN DE ACOPLAMIENTO Ó DE TRABAJO DE RETROCESO

$$\Gamma_{AC} = \frac{\text{Trabajo compresor}}{\text{Trabajo turbina}} = \frac{|W_c|}{W_T} \approx 0,5$$

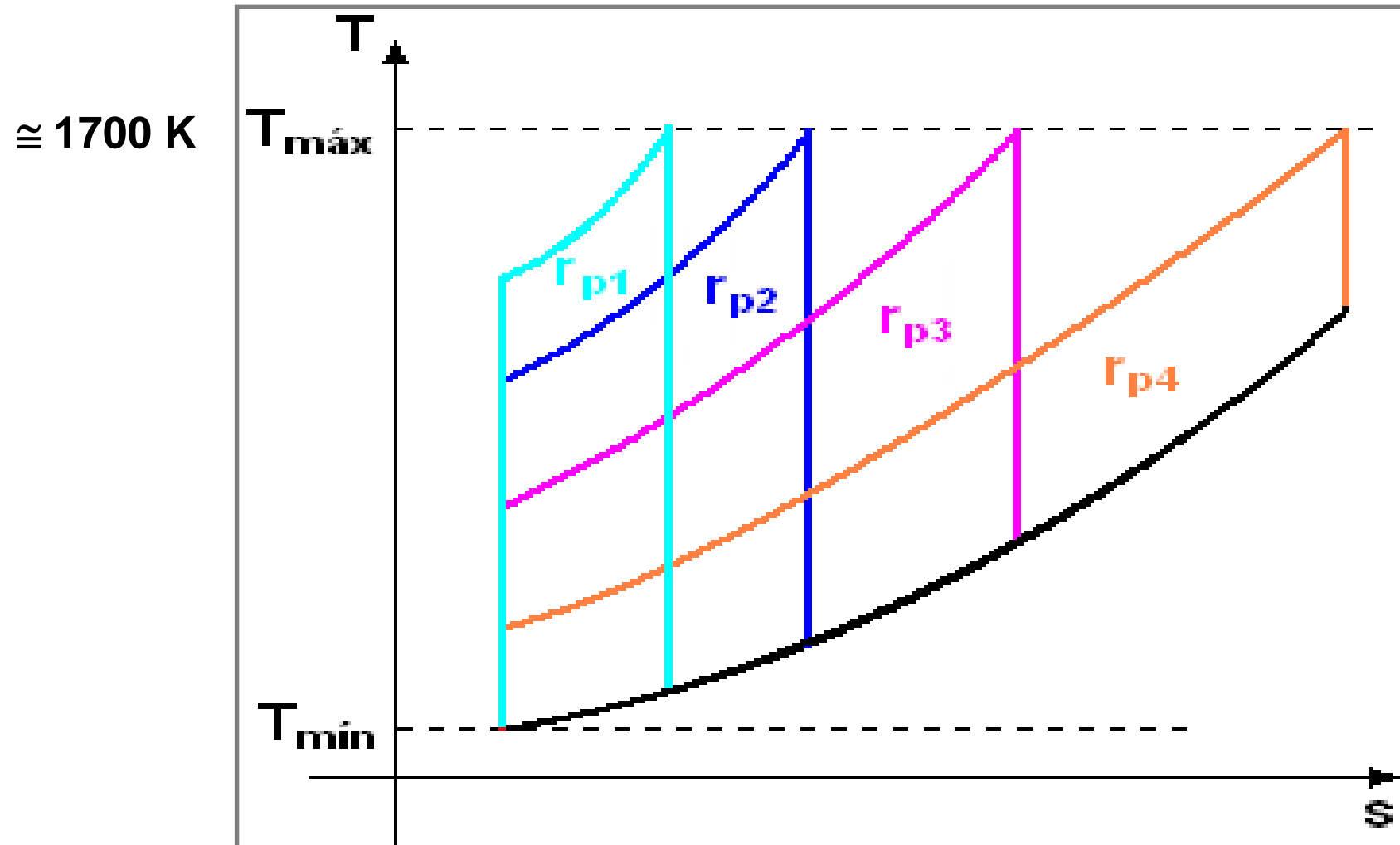




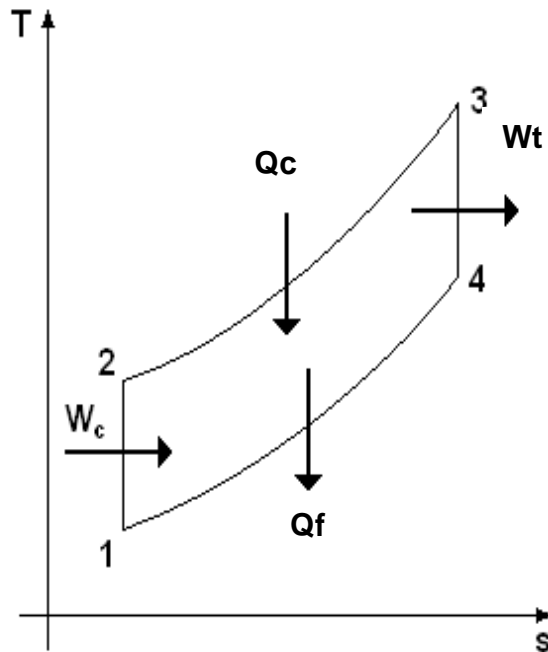
Unidad 14 Ciclo Brayton Ideal.mp4



RELACIONES DE TRABAJO MÁXIMO



RELACIONES DE TRABAJO MÁXIMO



$$W_{\text{neto}} = W_t - |W_c| = (h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)$$

$$W_{\text{neto}} = c_p [(T_3 - T_4) - (T_2 - T_1)]$$

$$W_{\text{neto}} = c_p T_1 \left[\left(\frac{T_3}{T_1} - \frac{T_4}{T_3} \frac{T_3}{T_1} \right) - \left(\frac{T_2}{T_1} - 1 \right) \right]$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{(k-1)}{k}} \quad \frac{T_4}{T_3} = \left(\frac{P_4}{P_3} \right)^{\frac{(k-1)}{k}} = \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{(k-1)}{k}}$$

$$W_{\text{neto}} = c_p T_1 \left[\frac{T_3}{T_1} - \frac{T_3}{T_1} \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{(k-1)}{k}} - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{(k-1)}{k}} + 1 \right]$$

$$W_{\text{neto}} = c_p T_1 \left[\frac{T_3}{T_1} - \frac{T_3}{T_1} \left(\frac{1}{r_p} \right)^{\frac{(k-1)}{k}} - (r_p)^{\frac{(k-1)}{k}} + 1 \right]$$

RELACIÓN DE COMPRESIÓN BRAYTON ÓPTIMA

$$W_{\text{neto}} = c_p T_1 \left[\frac{T_3}{T_1} - \frac{T_3}{T_1} \left(\frac{1}{r_p} \right)^{\frac{(k-1)}{k}} - \left(r_p \right)^{\frac{(k-1)}{k}} + 1 \right]$$

$$W_{\text{neto}} = f(r_p, k, T_1=T_{\text{min}}, T_3=T_{\text{max}})$$

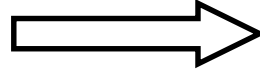
Para valores constantes de T_1 , T_3 , k y c_p , el valor del trabajo neto por unidad de masa depende sólo de r_p .

Para determinar el r_p que maximiza el trabajo neto por unidad de masa, deberá calcularse

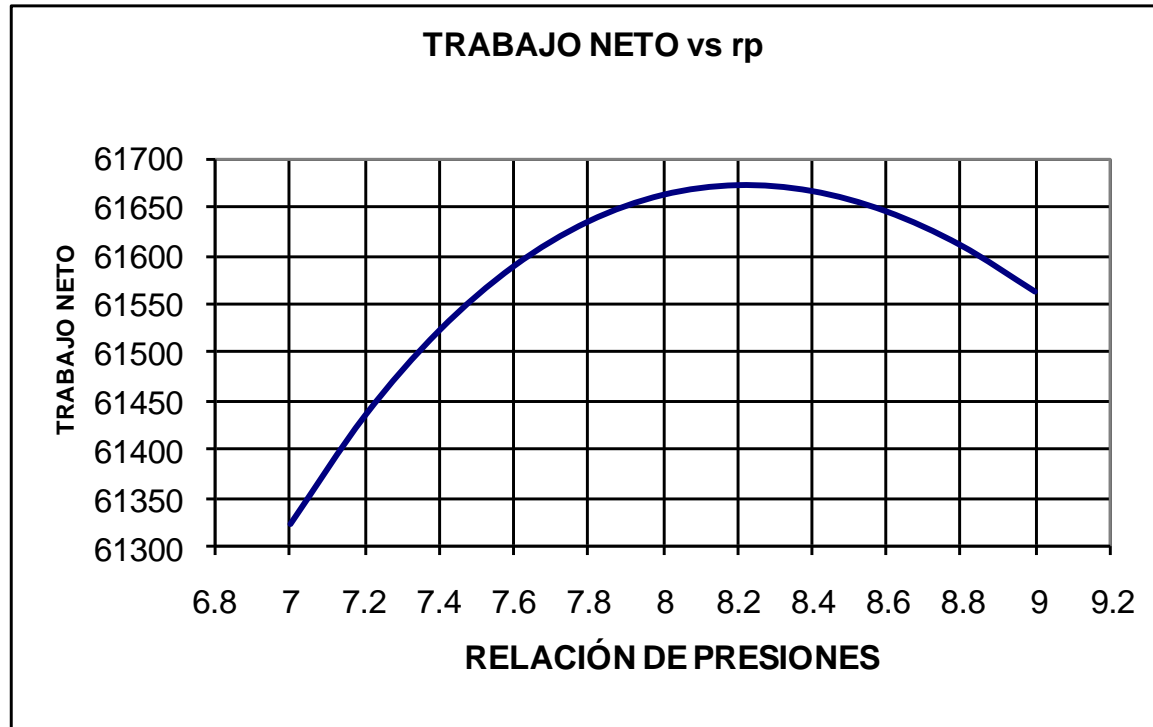
$$\frac{\partial W_{\text{neto}}}{\partial r_p} = 0 \rightarrow r_p \text{ óptimo}$$

RELACIÓN DE COMPRESIÓN BRAYTON ÓPTIMA

r_{optimo}



$W_{\text{neto Máximo}}$



$$r_{p\text{optimo}} = \left(\frac{T_3}{T_1} \right)^{\frac{k}{2k-2}}$$

PARA $T_1 = 300 \text{ K}$;

$T_3 = 1000 \text{ K}$ y $k = 1,4$

$$r_{\text{op}} = 8,2$$

$$T_2 = 548^\circ\text{K}$$

y

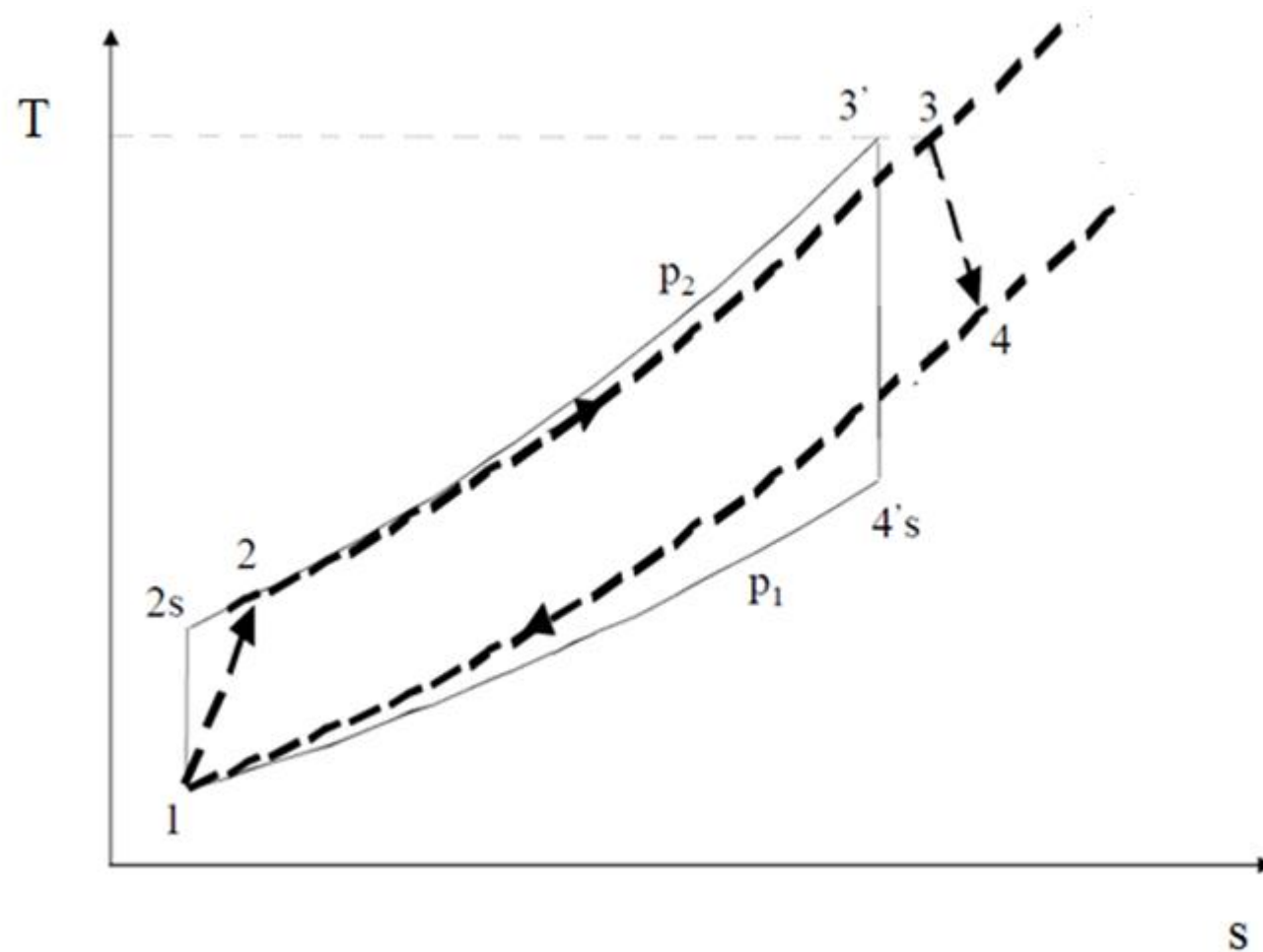
$$T_2 = \sqrt{T_1 * T_3} ;$$

CICLO REAL:

- LA COMPRESIÓN NO ES ISOENTRÓPICA DEBIDO A LA FRICCIÓN INTERNA EN EL COMPRESOR
- LA EXPANSIÓN NO ES ISOENTRÓPICA DEBIDO A LA FRICCIÓN INTERNA EN LA TURBINA
- EN TODO EL RESTO DEL SISTEMA TAMBIÉN SE PRODUCEN PÉRDIDAS DE PRESIÓN POR FRICCIÓN
- EL PROCESO DE LA COMBUSTIÓN ES INCOMPLETO, POR LO CUAL NO TODA LA ENERGÍA QUÍMICA CONTENIDA EN EL COMBUSTIBLE ES LIBERADA EN ELLA COMO CALOR
- EXISTEN PÉRDIDAS POR RADIACIÓN Y CONVECCIÓN A TRAVÉS DE TODO EL CUERPO DE LA MÁQUINA

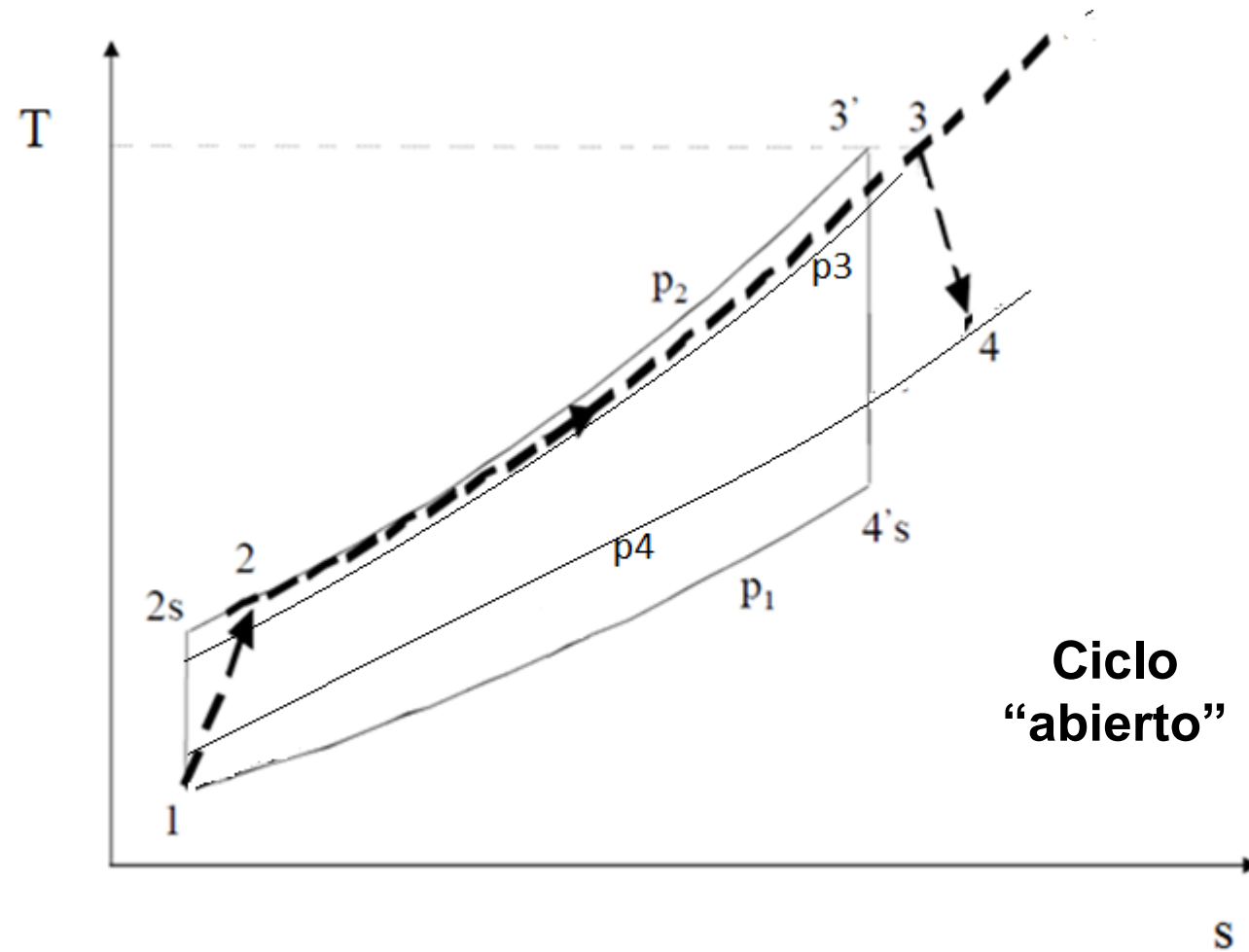


CICLO REAL:

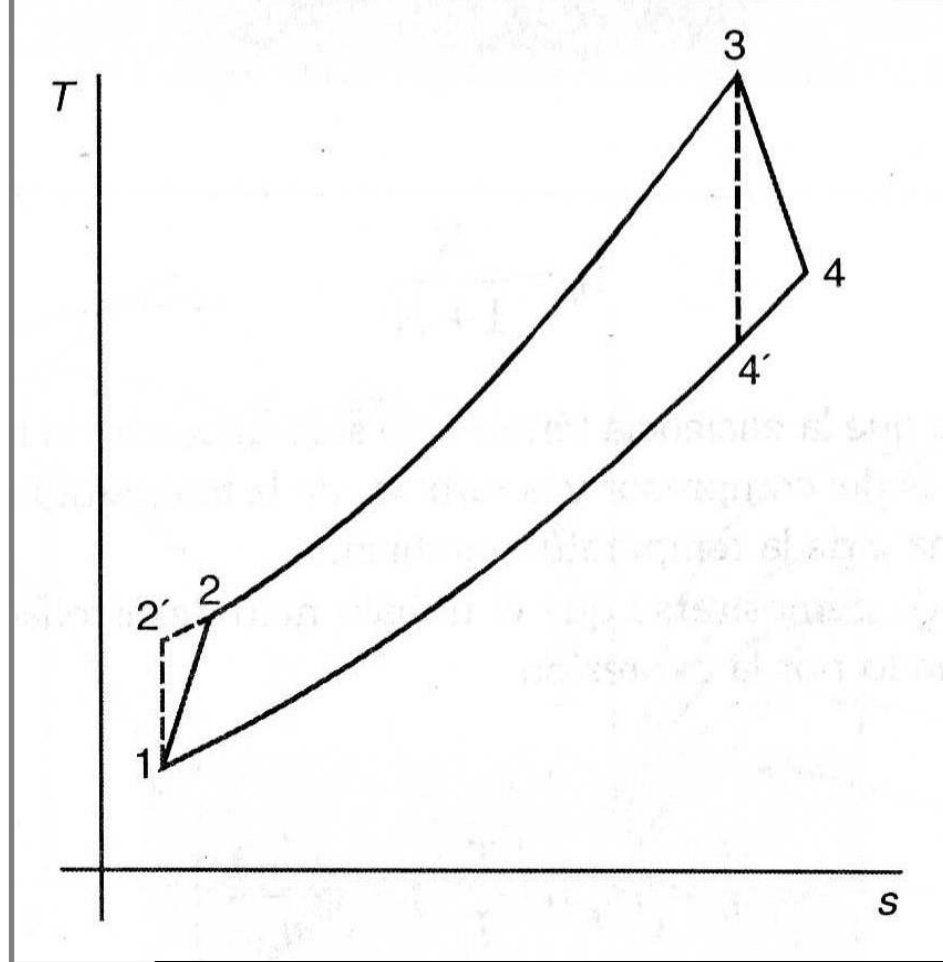


**Ciclo
“cerrado”**

CICLO REAL:



$$P_2 > P_3 > P_4 > P_1$$



CICLO REAL:

**CONSIDERANDO SÓLO LAS
IRREVERSIBILIDADES EN
LA TURBINA Y EL
COMPRESOR**



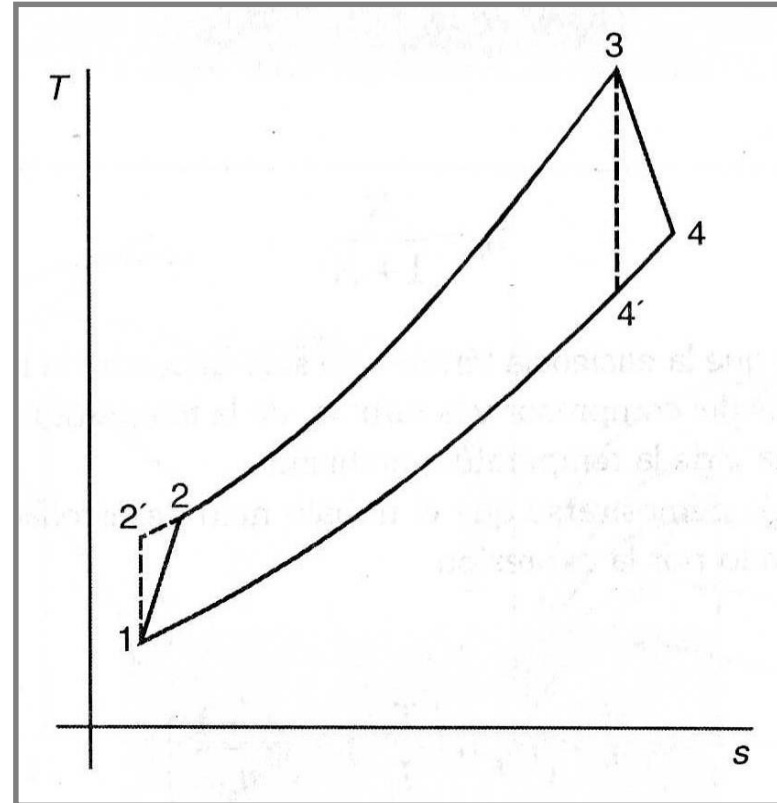
**“RENDIMIENTOS
ISENTRÓPICOS”**

$$\eta_T = \frac{\text{Trabajo real}}{\text{Trabajo ideal}} = \frac{w_t}{w_s} = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4'}} = \frac{c_p (T_3 - T_4)}{c_p (T_3 - T_{4'})}$$

$$\eta_c = \frac{\text{Trabajo ideal}}{\text{Trabajo real}} = \frac{w_s}{w_c} = \frac{h_{2'} - h_1}{h_2 - h_1} = \frac{c_p (T_{2'} - T_1)}{c_p (T_2 - T_1)}$$



IRREVERSIBILIDADES: INFLUENCIA EN LA RELACIÓN DE ACOPLAMIENTO O DE TRABAJO DE RETROCESO



$$\eta = \frac{W_{\text{neto}}}{Q_{\text{FC}}}$$

$$\Gamma_{\text{ACideal}} = \frac{\text{Trabajo ideal compresor}}{\text{Trabajo ideal turbina}} = \frac{h_{2'} - h_1}{h_3 - h_{4'}} \approx 50\%$$

$$\Gamma_{\text{ACreal}} = \frac{\text{Trabajo real compresor}}{\text{Trabajo real turbina}} = \frac{h_2 - h_1}{h_3 - h_4} = \frac{\Gamma_{\text{ACideal}}}{\eta_T * \eta_C} = \frac{0,5}{0,85 * 0,85} = 69\%$$

MEJORAS EN EL CICLO BRAYTON

FIJADAS:

- **LA TEMPERATURA DE INGRESO A LA TURBINA (T_3),**
- **LA TEMPERATURA DE INGRESO AL COMPRESOR (T_1) Y**
- **LA RELACIÓN DE COMPRESIÓN (r_p),**

LAS MEJORAS POSIBLES SON:

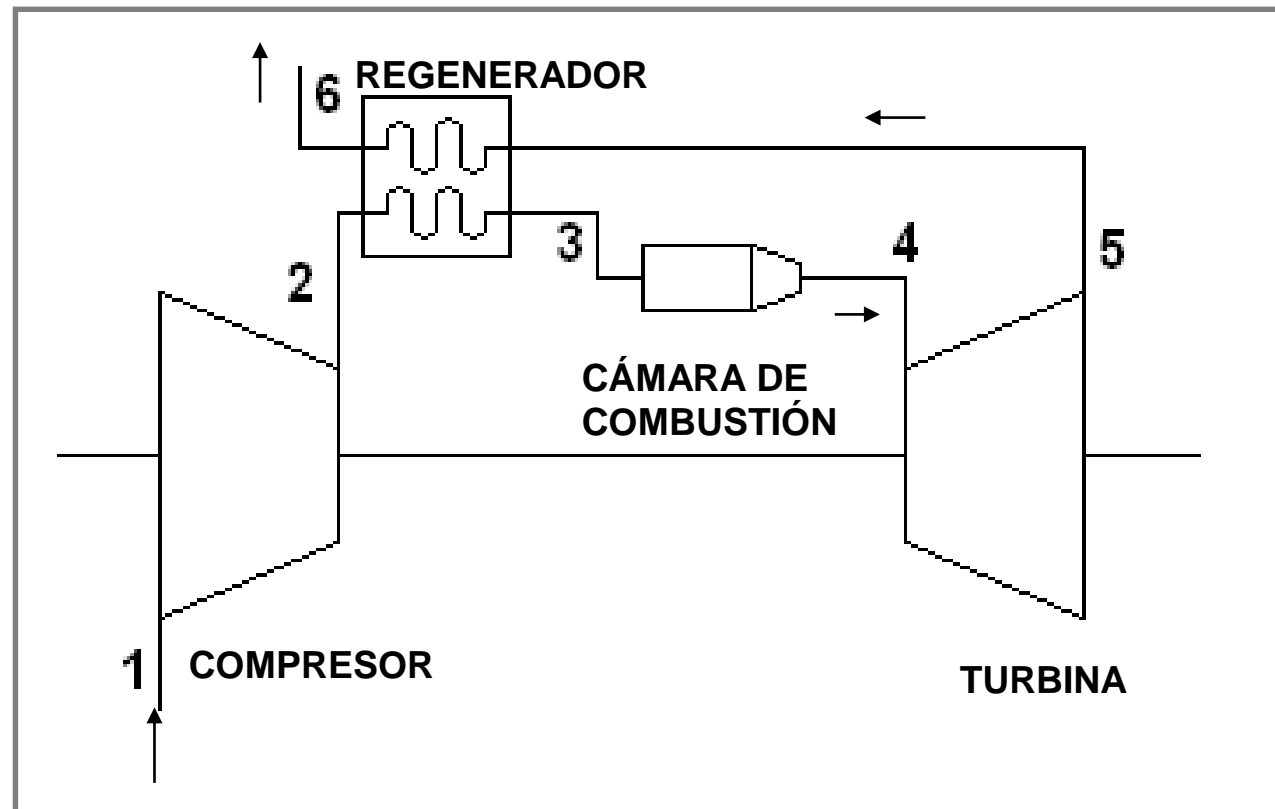
- **AUMENTAR EL RENDIMIENTO ISENTRÓPICO DE LA TURBINA**
- **AUMENTAR EL RENDIMIENTO ISENTRÓPICO DEL COMPRESOR**

- **MODIFICACIONES EN EL CICLO**

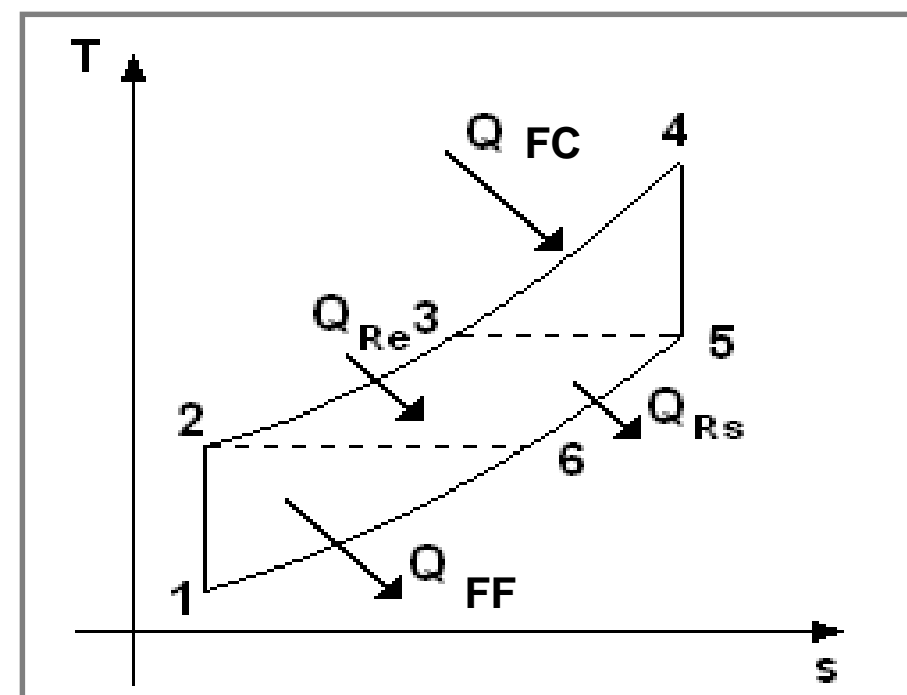
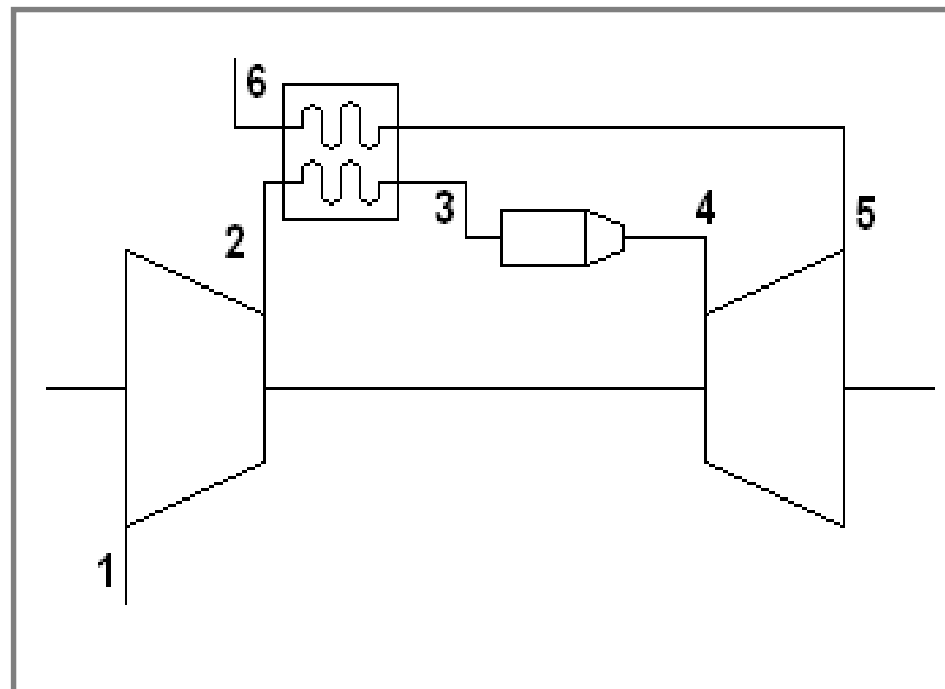
Regeneración
Interenfriamiento
Recalentamiento

CICLO BRAYTON CON REGENERACIÓN

SE PRECALIENTA EL AIRE QUE SALE DEL COMPRESOR CON LA ENERGÍA RESIDUAL DE LOS GASES QUE SALEN DE LA TURBINA

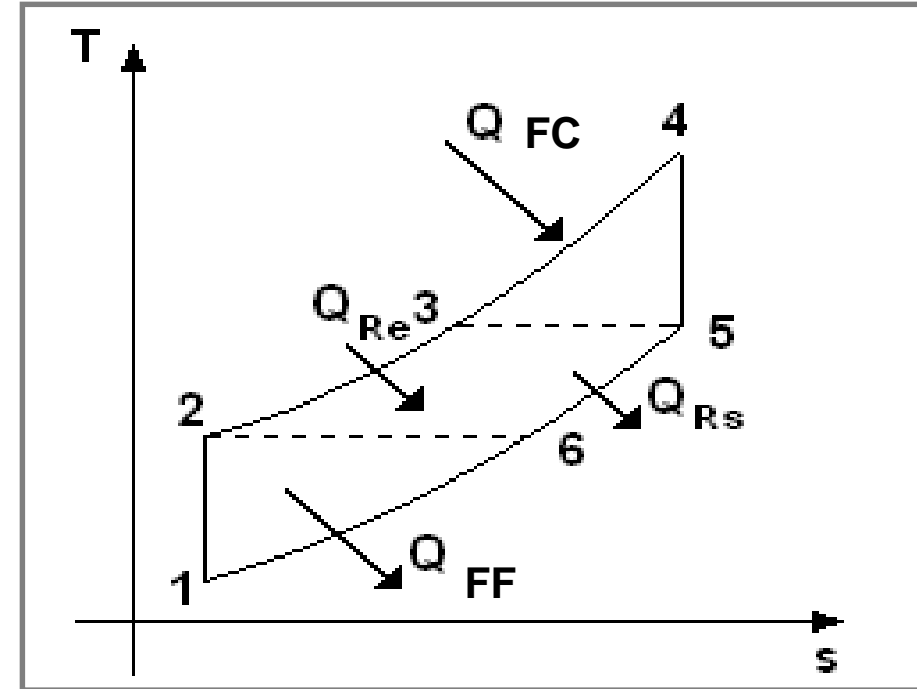
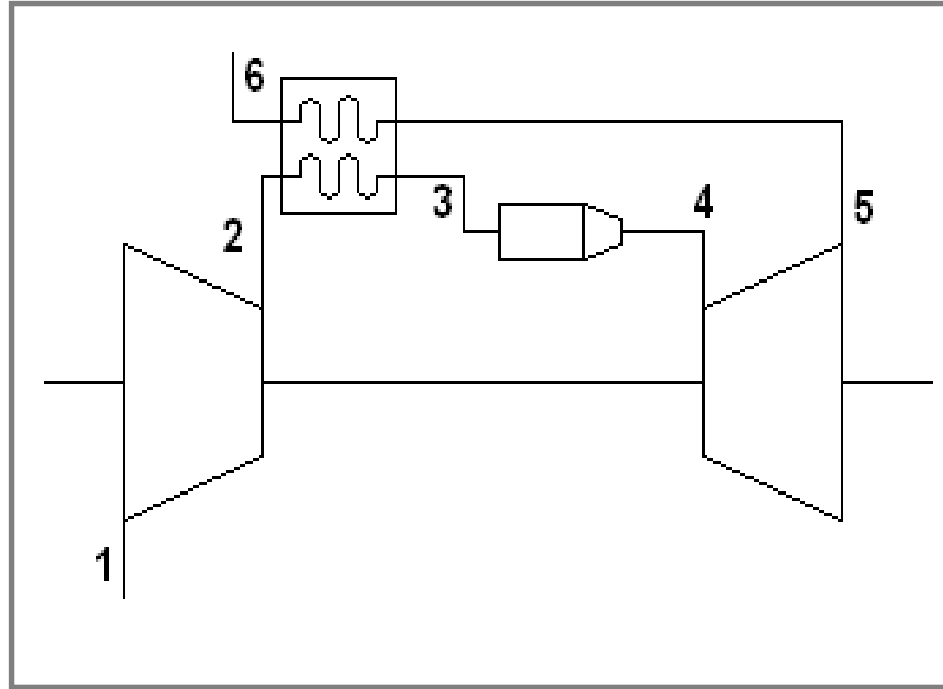


CICLO BRAYTON CON REGENERACIÓN



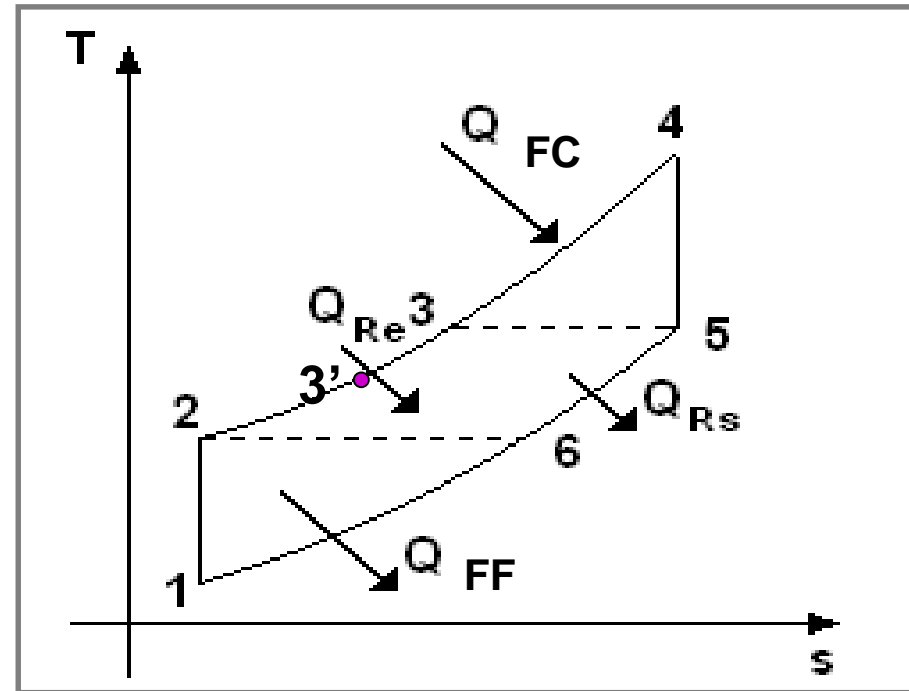
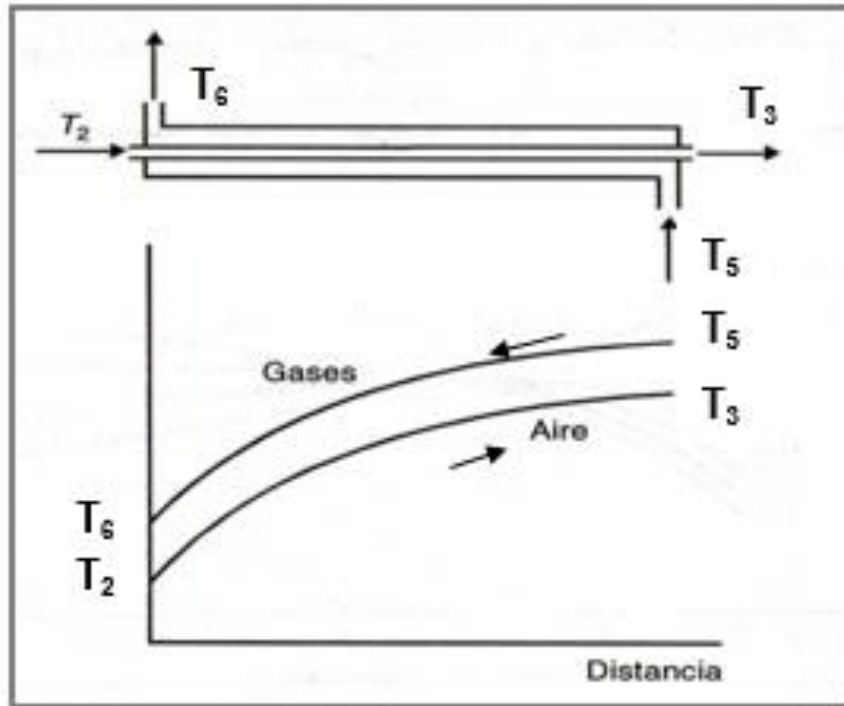
$$\eta = \frac{W_{\text{neto}}}{Q_{\text{FC}}} \approx \left. \begin{array}{l} \downarrow \\ \uparrow \end{array} \right\}$$

CICLO BRAYTON CON REGENERACIÓN



- Se trata de un ciclo cerrado con aire como fluido de trabajo.
- Se ha asumido que no hay pérdidas de calor en el equipo de intercambio $\rightarrow Q_{rs} = Q_{re}$.
- Como c_p se considera constante, esto implica que T_3 , es coincidente con la de salida de la turbina T_5 . Y También que T_6 , alcanza el mismo valor que T_2 . Como se describirá posteriormente esto es imposible en la realidad y los valores de Q_{rs} y Q_{re} calculados con esta hipótesis son el máximo teórico.

CICLO BRAYTON CON REGENERACIÓN

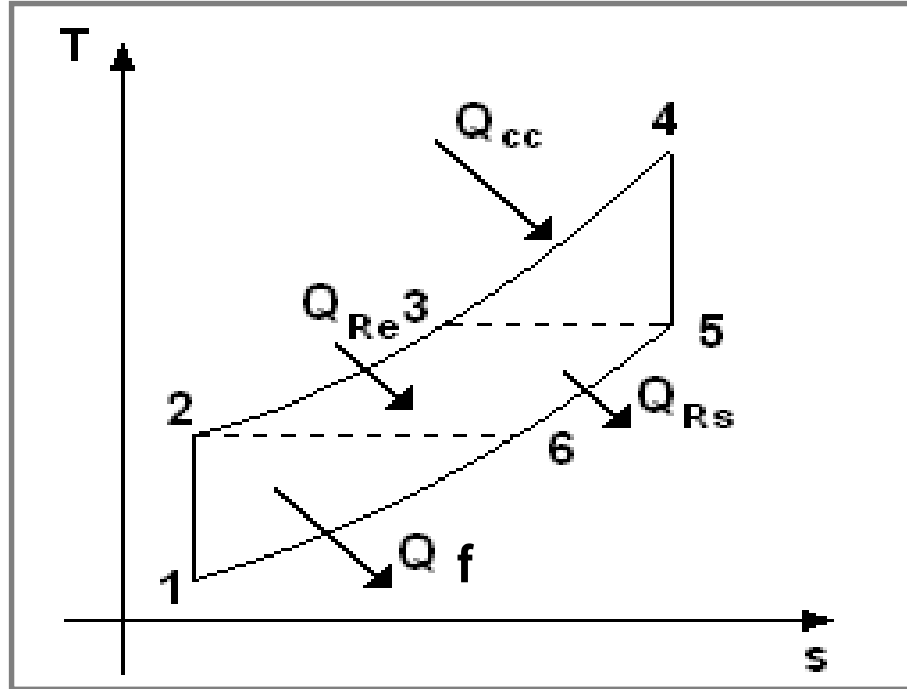


**EFICIENCIA DEL
REGENERADOR:**

$$\varepsilon_R = \frac{Q_{Re}^{real}}{Q_{Re}^{máximo}} = \frac{h_{3'} - h_2}{h_3 - h_2} = \frac{T_{3'} - T_2}{T_3 - T_2}$$

60 a 80%

Rendimiento ciclo regenerativo ideal



$$T_1 P_1^{\frac{(1-k)}{k}} = T_2 P_2^{\frac{(1-k)}{k}} \rightarrow \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{(k-1)}{k}} = r_p^{\frac{(k-1)}{k}}$$

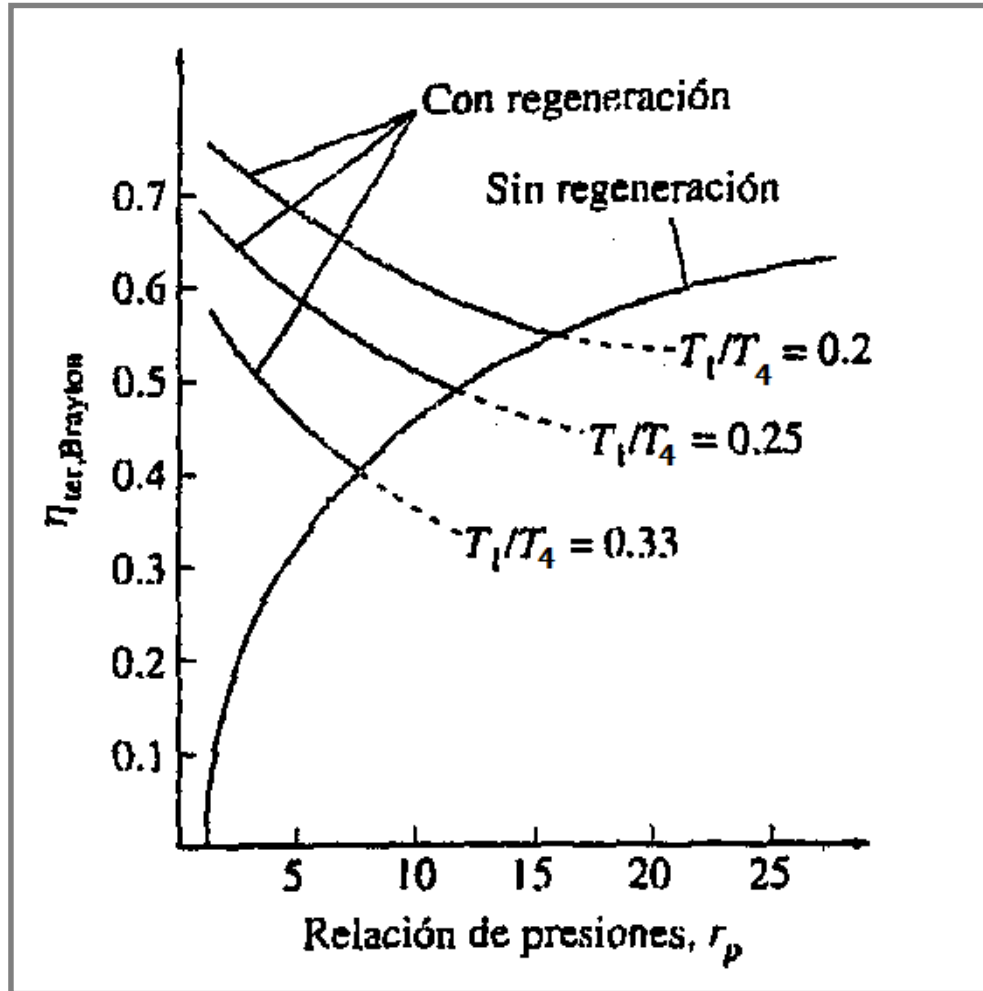
$$T_4 P_4^{\frac{(1-k)}{k}} = T_5 P_5^{\frac{(1-k)}{k}}$$

$$\frac{T_5}{T_4} = \left(\frac{P_5}{P_4} \right)^{\frac{(k-1)}{k}} = \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{(k-1)}{k}} = \frac{1}{r_p^{\frac{(k-1)}{k}}}$$

$$\eta_{\text{treg}} = 1 - \frac{|q_f|}{q_c} = 1 - \frac{h_6 - h_1}{h_4 - h_3} = 1 - \frac{c_p(T_2 - T_1)}{c_p(T_4 - T_5)} = 1 - \frac{T_1 \left(\frac{T_2}{T_1} - 1 \right)}{T_4 \left(1 - \frac{T_5}{T_4} \right)}$$

$$\boxed{\eta_{\text{treg}} = 1 - \frac{T_1}{T_4} r_p^{\frac{k-1}{k}}}$$

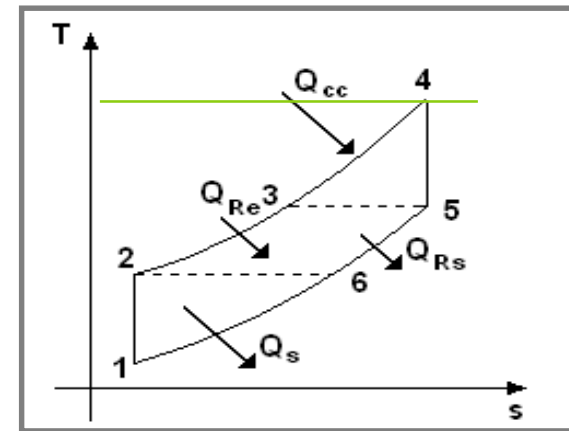
Rendimiento ciclo regenerativo



$$\eta_{treg} = 1 - \frac{T_1}{T_4} r_p^{\frac{k-1}{k}}$$

Si $T_1/T_4 \uparrow$, $\eta_{treg} \downarrow$

Si $r_p \uparrow$, $\eta_{treg} \downarrow$

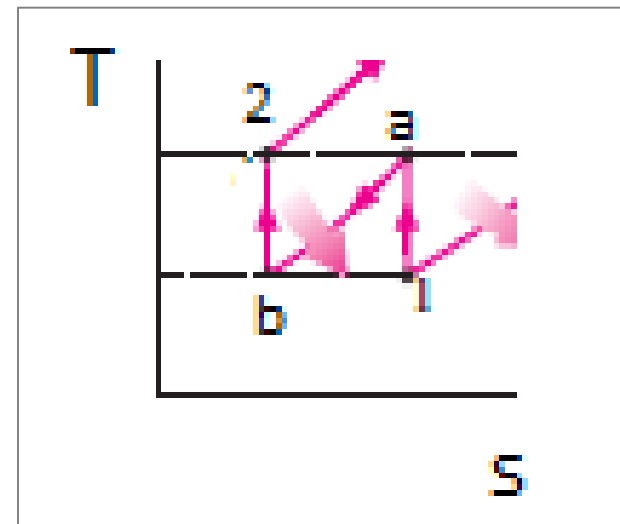
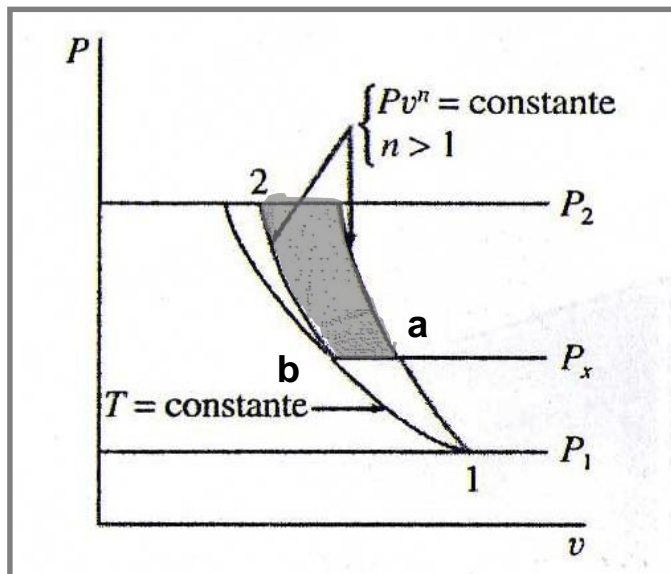
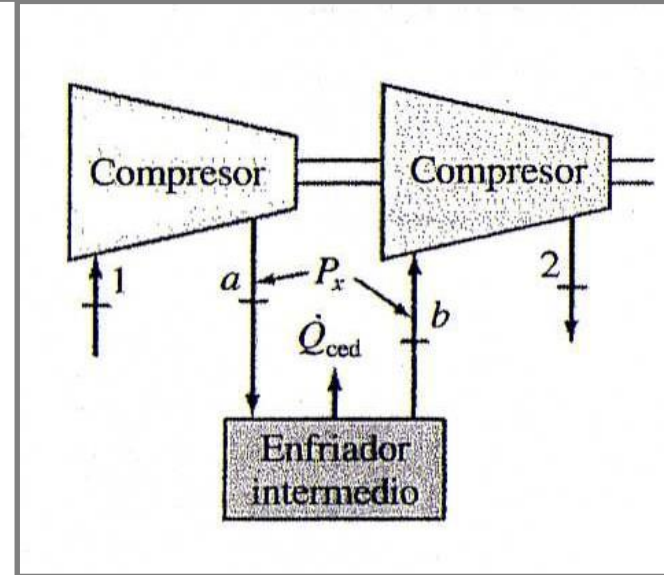
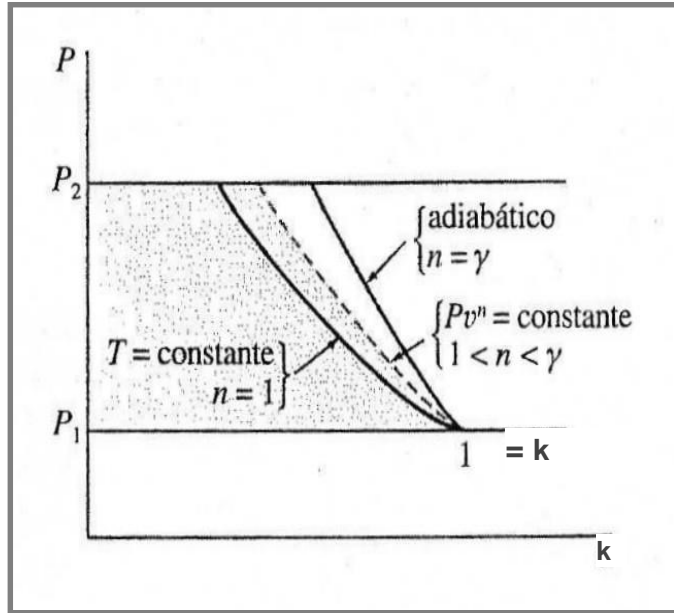




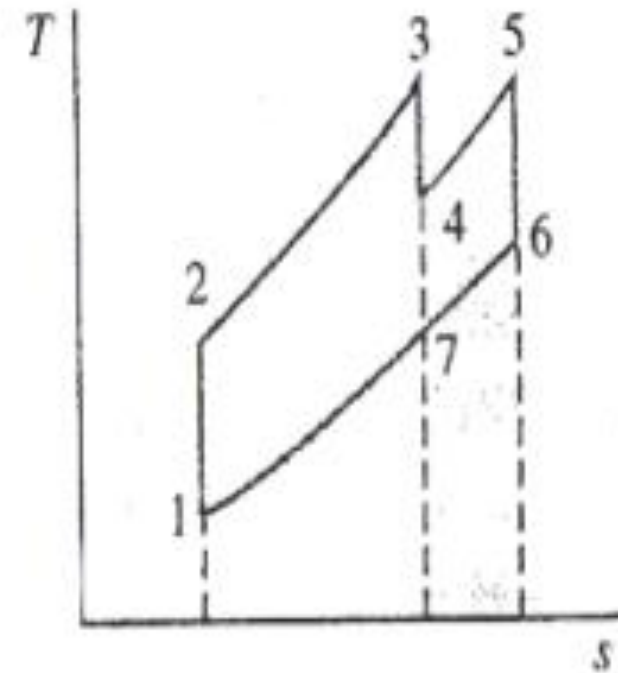
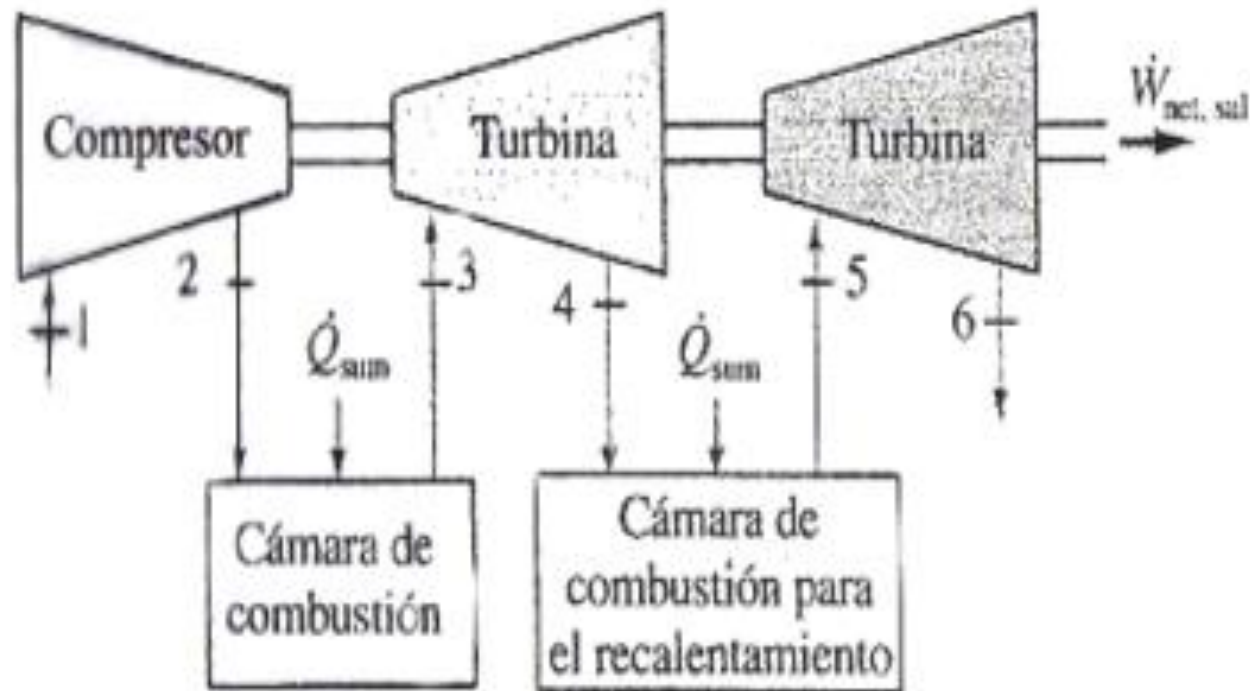
Unidad 14 Ciclo Brayton con Reg.mp4



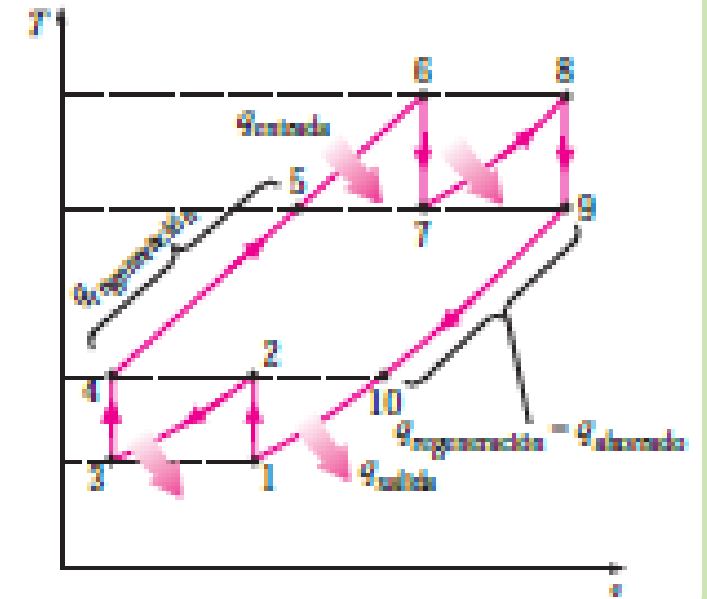
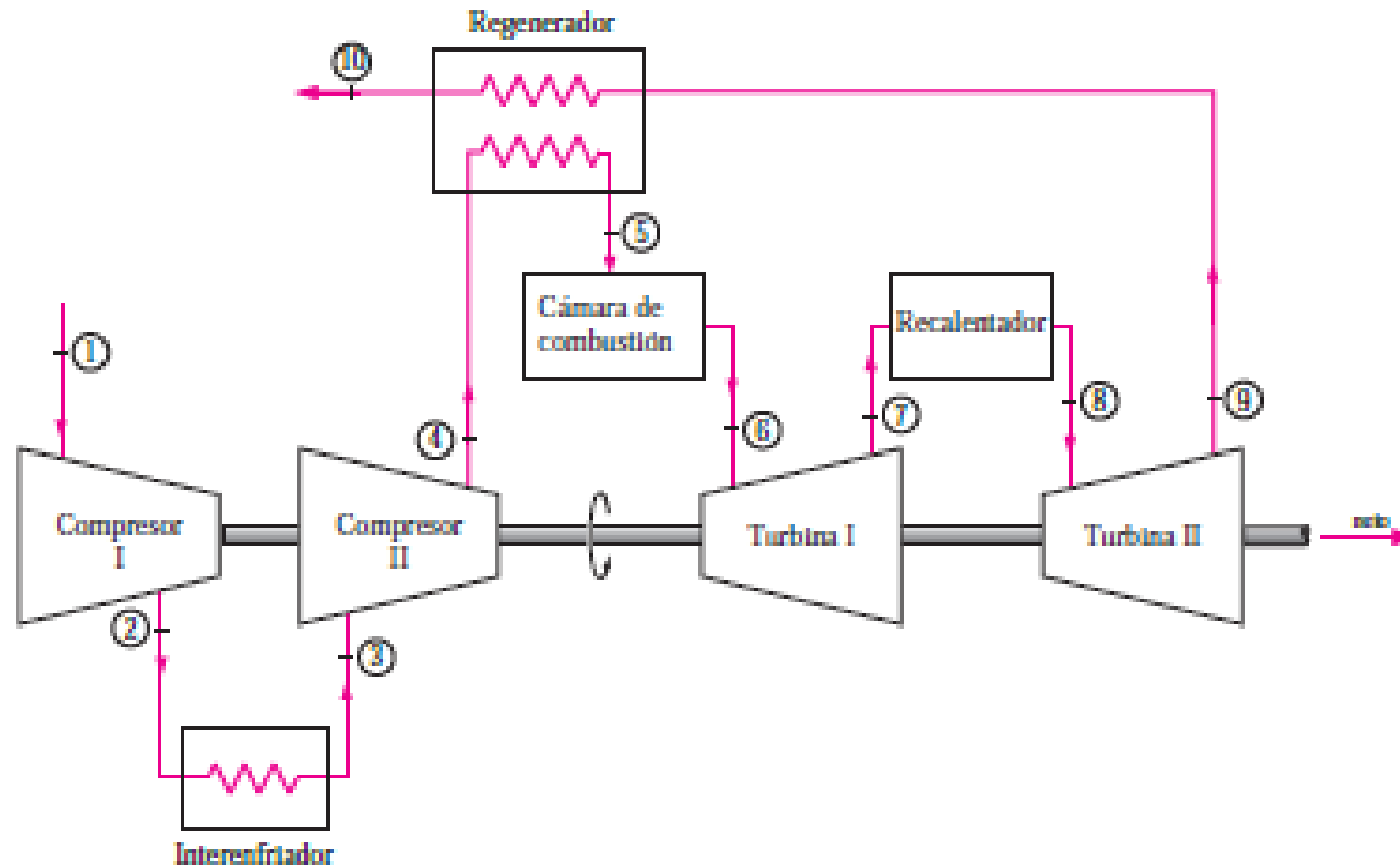
CICLO BRAYTON CON COMPRESIÓN MULTIETAPA CON REFRIGERACIÓN INTERMEDIA



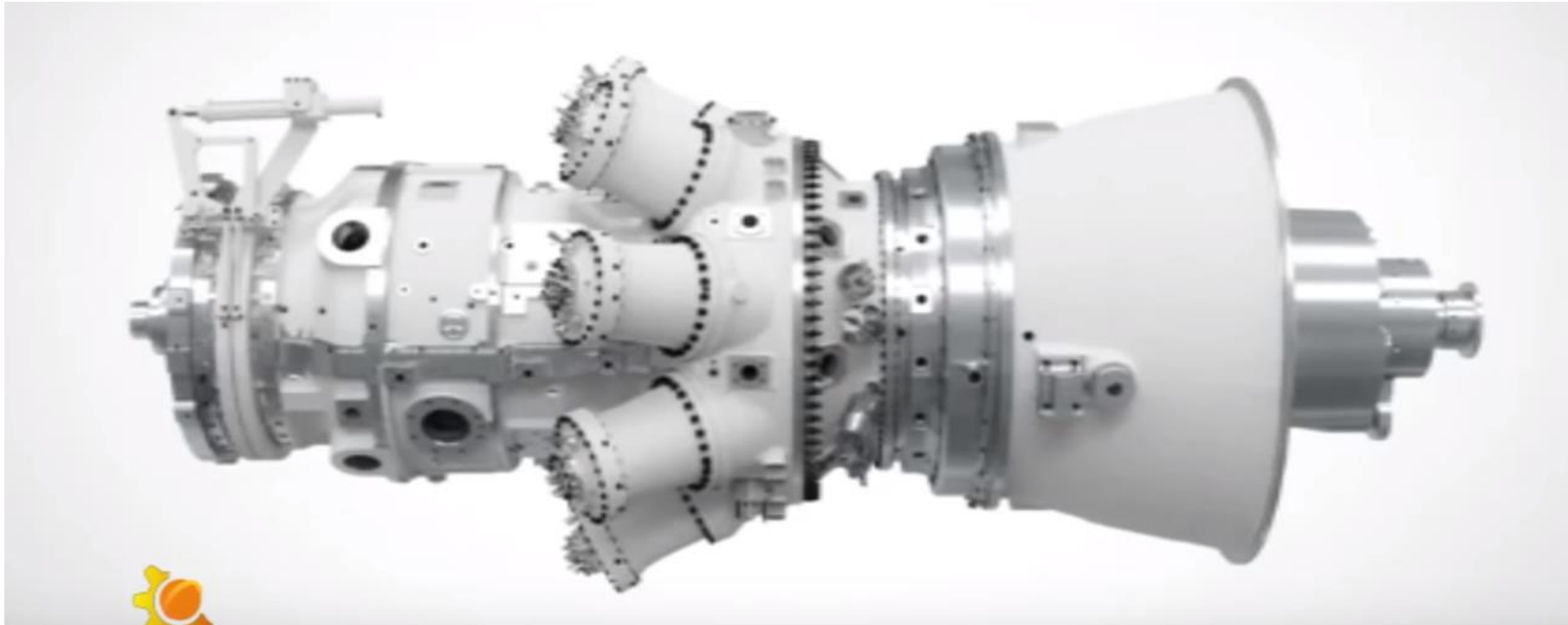
CICLO BRAYTON CON EXPANSIÓN MULTIETAPA Y RECALENTAMIENTO INTERMEDIO



CICLO BRAYTON CON INTERENFRIAMIENTO, RECALENTAMIENTO Y REGENERACIÓN



MOTOR DE TURBINA DE GAS



FIN

