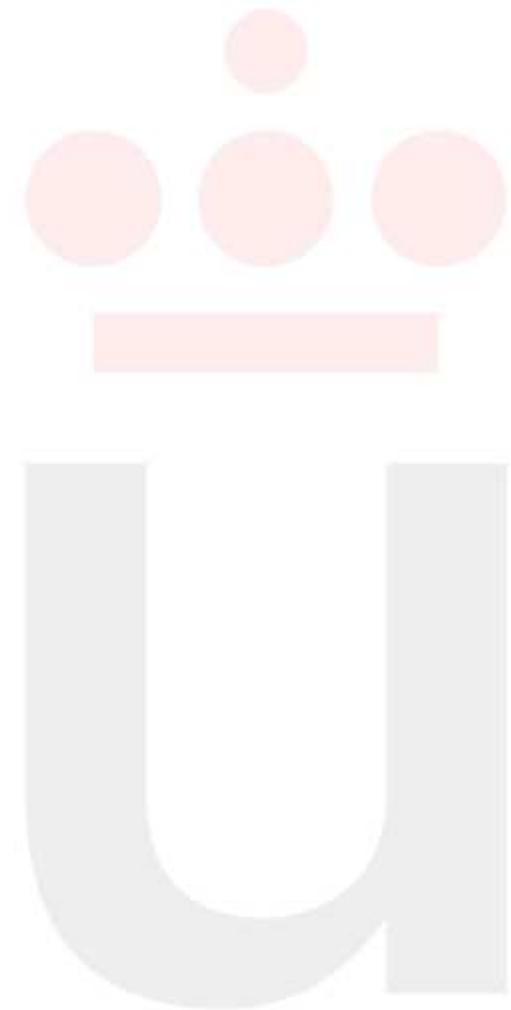


## Bloque I: Termotecnia

### Tema 3. Máquinas Térmicas II

1. Motores Rotativos
2. Motores de Potencia (Turbina) de Gas: Ciclo Brayton
3. Motores de Potencia (Turbina) de Vapor: Ciclo Rankine



## Tema 3. Ciclos de gas y vapor

### Motores Térmicos

Motores de Combustión Interna: en éstos, la combustión se realiza en el propio fluido motor, en una cámara interna del motor, y son los propios gases de la combustión los que, al expandirse, producen los movimientos de las piezas del motor.

*En función del tipo de movimiento producido:*

Motores alternativos: el fluido motor actúa sobre pistones que se desplazan subiendo y bajando en unos cilindros.

Motores rotativos: el fluido motor actúa sobre pistones rotantes o sobre álabes de turbinas.

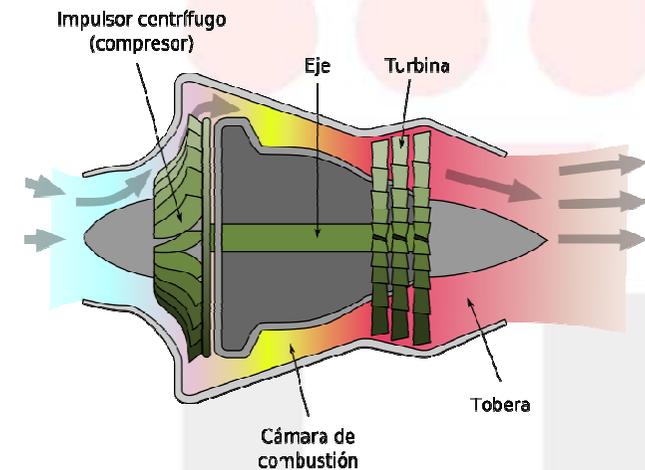
Motores de chorro o de reacción: el fluido motor produce el empuje por el principio de acción y reacción.

# Tema 3. Ciclos de gas y vapor

## Turbinas de Gas

### *Características generales*

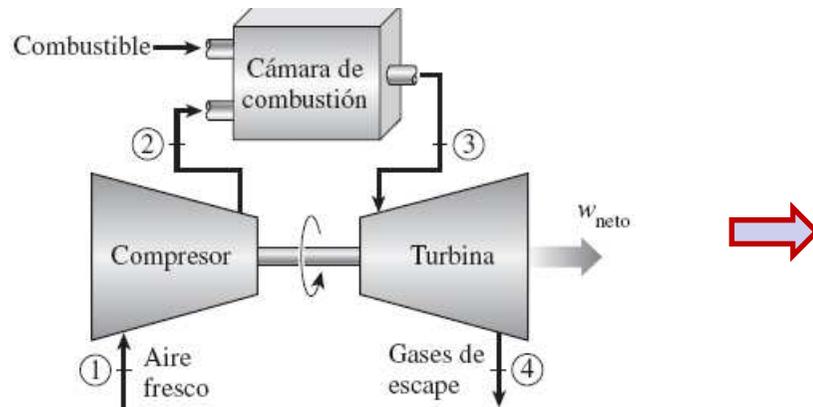
- ✓ Es una planta de potencia que produce gran cantidad de energía con poco peso y tamaño.
- ✓ Funcionan con una gran variedad de combustibles: gas natural, diesel, nafta, metano, gasóleos vaporizados y gases de biomasa.
- ✓ En los últimos años se uso se ha multiplicado como consecuencia de:
  - Mejora de los materiales y el proceso de refrigeración.
  - Incremento de las temperaturas y de las relaciones de compresión
  - Aumento del rendimiento (15 → 45 %)
- ✓ Sus principales aplicaciones son:
  - Propulsión (aérea, marítima y terrestre): los gases de escape de alta velocidad proporcionan impulso a las naves.
  - Generación de energía eléctrica: funcionan de manera independiente o en conjunto con las centrales eléctricas de vapor donde los gases de escape de las turbinas de gas sirven como fuente de calor para el vapor.



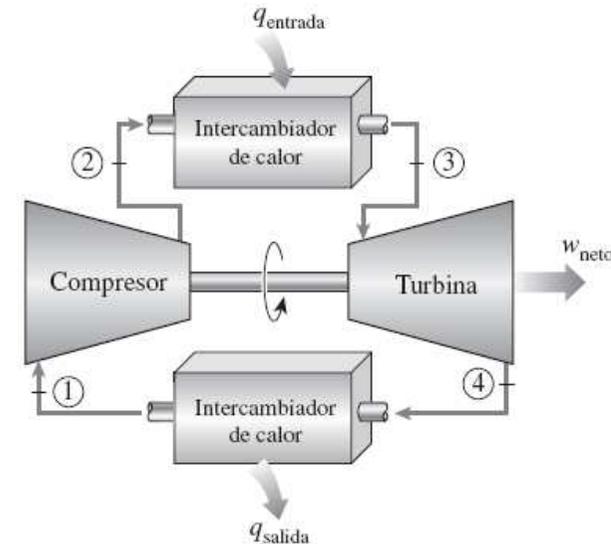
## Tema 3. Ciclos de gas y vapor

### Ciclo Brayton: Ideal para motores de turbina de gas

*Motor de turbina de gas de ciclo abierto*



*Motor de turbina de gas de ciclo cerrado*



Los cuatro procesos del ciclo Brayton se ejecutan en dispositivos de flujo estacionario, por lo tanto deben analizarse como procesos de flujo estacionario, utilizando las consideraciones de aire estándar.

#### Suposiciones de aire estándar

- Fluido: aire como gas ideal
- La combustión se trata como una absorción calorífica.
- No hay admisión ni escape.
- No hay irreversibilidades.

## Tema 3. Ciclos de gas y vapor

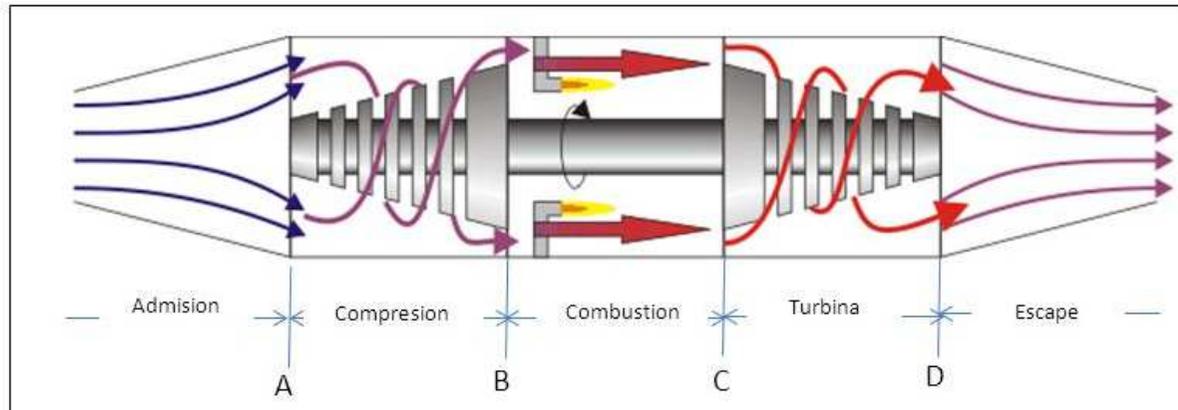
### Ciclo Brayton: Ideal para motores de turbina de gas

CICLO DE BRAYTON:

Modela el comportamiento ideal de una turbina a gas (normalmente aire)

Aunque es un ciclo de potencia de combustión interna abierto (los gases de salida no se reutilizan normalmente), para el análisis termodinámico es conveniente suponer que los gases de escape son reutilizados en el ingreso, permitiendo el análisis como ciclo cerrado

ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO

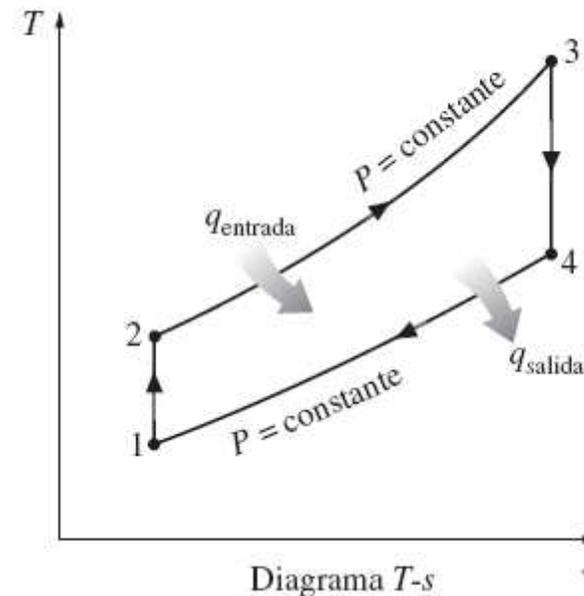
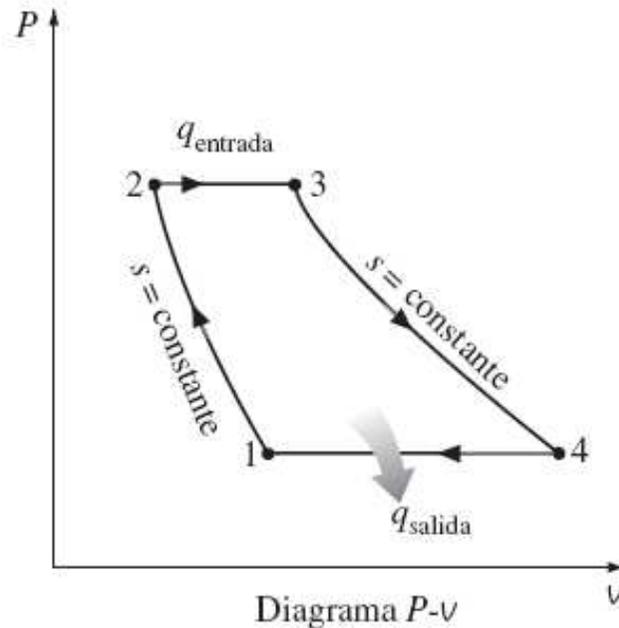


# Tema 3. Ciclos de gas y vapor

Cuatro procesos reversibles internamente:

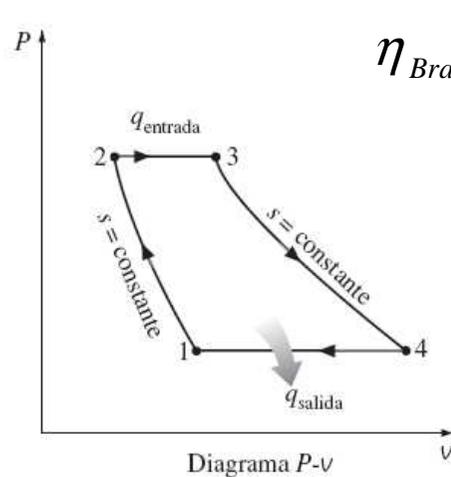
- 1-2 Compresión isentrópica (en un compresor)  $w_c = h_2 - h_1 \quad (\neq 0) \text{ (kJ / kg)}$
- 2-3 Adición de calor a presión constante  $q_{in} = h_3 - h_2 \quad (> 0) \text{ (kJ / kg)}$
- 3-4 Expansión isentrópica (en una turbina)  $w_T = h_4 - h_3 \quad (\leq 0) \text{ (kJ / kg)}$
- 4-1 Rechazo de calor a presión constante  $q_{out} = h_1 - h_4 \quad (< 0) \text{ (kJ / kg)}$

## Ciclo Brayton



# Tema 3. Ciclos de gas y vapor

## Ciclo Brayton



$$\eta_{Brayton} = \frac{W_{net}}{q_{in}} = 1 - \frac{q_{out}}{q_{in}}$$

Para un flujo estacionario:

$$(q_{in} - q_{out}) + (w_{in} - w_{out}) = \Delta h$$

$$q_{in} = \Delta h_{2 \rightarrow 3} = C_p \cdot (T_3 - T_2)$$

$$q_{out} = \Delta h_{4 \rightarrow 1} = -C_p \cdot (T_1 - T_4)$$

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

$$T_2 = T_1 \cdot \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (2)$$

$$T_4 = T_3 \cdot \left( \frac{p_4}{p_3} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = T_3 \cdot \left( \frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (3)$$

$$\Rightarrow T_2 \cdot T_4 = T_1 \cdot \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \cdot T_3 \cdot \left( \frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = T_1 \cdot T_3 \quad \therefore \frac{T_4}{T_1} = \frac{T_3}{T_2} \quad (4)$$

$$p_2 = p_3$$

$$p_1 = p_4$$

# Tema 3. Ciclos de gas y vapor

## Ciclo Brayton

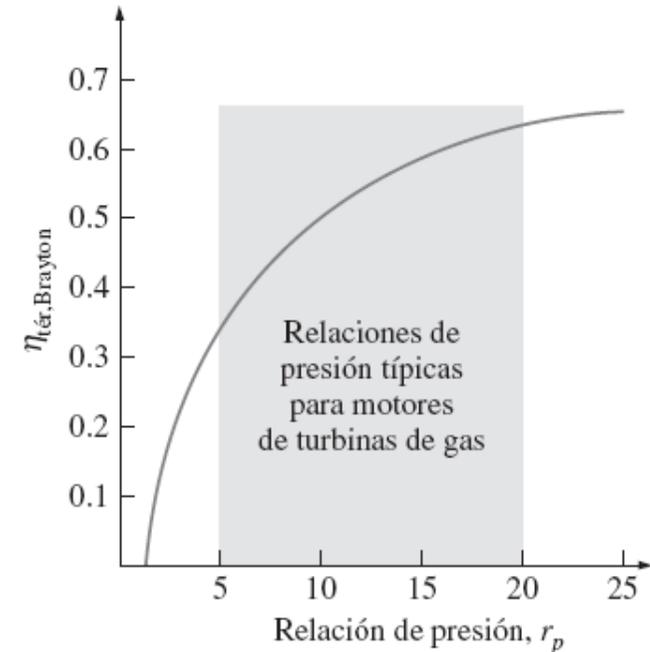
$$(2) \text{ y } (4) \text{ en } (1) \Rightarrow \eta_{\text{Brayton}} = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \frac{1}{\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^\gamma}$$

Definimos una nueva magnitud  $r_p = \frac{p_2}{p_1}$

*Relación de presión  $r_p$*

$$\eta_{\text{Brayton}} = 1 - \frac{1}{r_p^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}}$$

$$\gamma = \frac{C_P}{C_V}$$



*Relación de trabajos*

$$RT = \frac{w_C}{(-w_T)} = \frac{h_2 - h_1}{h_3 - h_4}$$

# Tema 3. Ciclos de gas y vapor

## Turbinas de Gas

La temperatura más alta en el ciclo está limitada por la temperatura máxima que los álabes de la turbina pueden resistir, lo cual limita la relación de presiones que puedan utilizarse en el ciclo y por ende, su rendimiento.

Para una temperatura máxima fija, el trabajo neto por ciclo aumenta con la relación de presiones hasta cierto valor a partir del cual, empieza a disminuir.



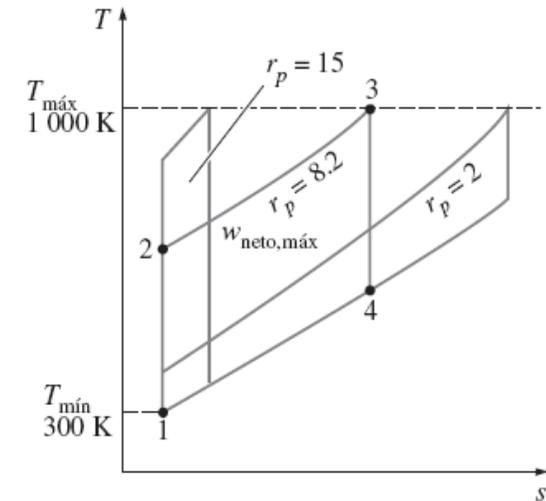
Debe existir un compromiso entre la relación de presiones (eficiencia térmica) y la salida neta de trabajo. Comúnmente la relación de presiones en turbinas de gas varía entre 11 y 16.

### *Propulsión marítima:*

Utilizan sistemas combinados de diesel y turbinas de gas. El diesel para proporcionar de manera eficiente baja potencia y operación de crucero, mientras que la turbina se emplea cuando se necesitan altas velocidades.

### *Centrales eléctricas:*

En estas centrales, la relación de trabajo de retroceso es muy alta (más de la mitad de la salida de trabajo de la turbina se utiliza para activar el compresor). Se requieren turbinas de gas muy grandes para la energía adicional que demanda el compresor.



## Tema 3. Ciclos de gas y vapor

### Turbinas de Gas

#### *Desarrollo de las turbinas de gas*

*1. Incrementar las temperaturas de entrada de la turbina ( o de quemado):*

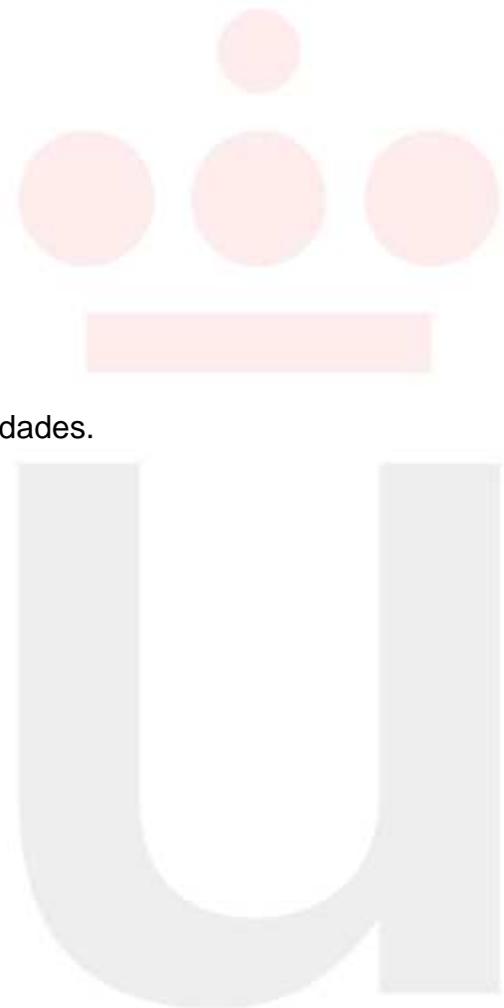
Desarrollo de nuevos materiales, revestimiento de los álabes con materiales cerámicos.

*2. Incrementar la eficiencia de los componentes de turbomaquinaria.*

Desarrollo en el diseño aerodinámico de turbinas y compresores. Disminuir irreversibilidades.

*3. Adición de modificaciones al ciclo básico.*

Incorporar interenfriamiento, regeneración ( o recuperación) y recalentamiento.

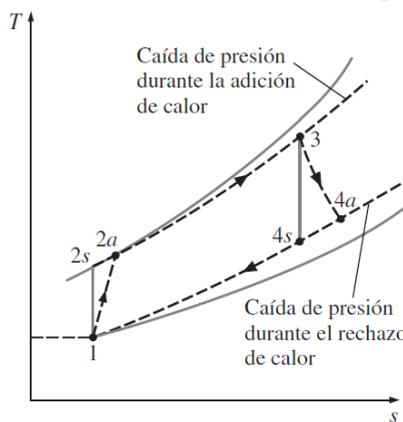
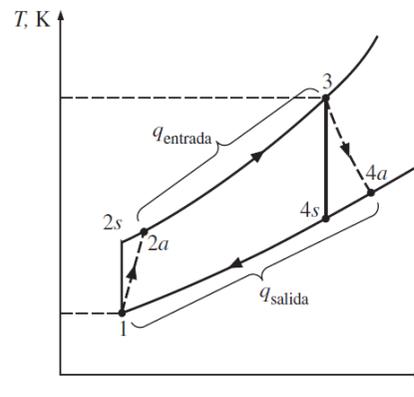
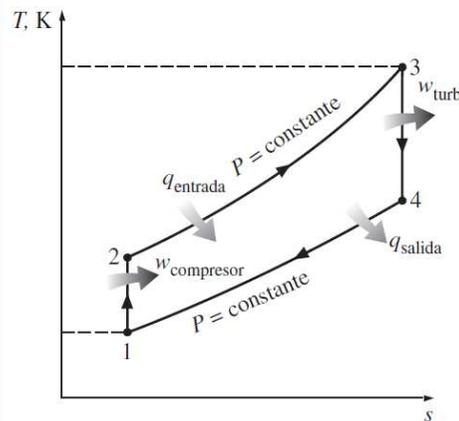


# Tema 3. Ciclos de gas y vapor

## Turbinas de Gas

### Desviación de los ciclos reales de turbina de gas en comparación con los idealizados

#### Irreversibilidades y Pérdidas



- Irreversibilidades en turbina y compresor  
*La entrada de trabajo real al compresor será mayor y la salida de trabajo real de la turbina será menor.*

$$\eta_C = \frac{|w_s|}{|w_a|} \cong \frac{|h_{2s} - h_1|}{|h_{2a} - h_1|}$$

$$\eta_T = \frac{|w_a|}{|w_s|} \cong \frac{|h_3 - h_{4a}|}{|h_3 - h_{4s}|}$$

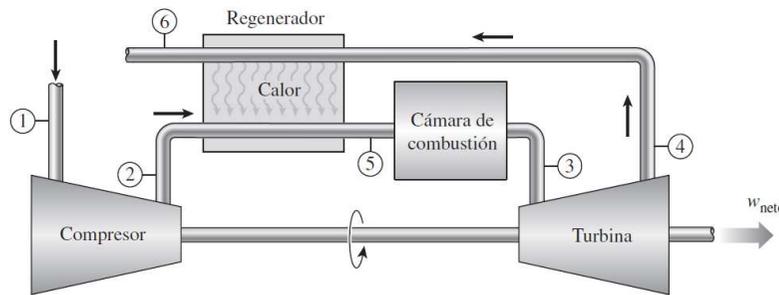
- Pérdidas de presión durante la adición y rechazo de calor

*En los cambiadores de calor se producen pérdidas de presión.*

# Tema 3. Ciclos de gas y vapor

## Ciclo Brayton con regeneración

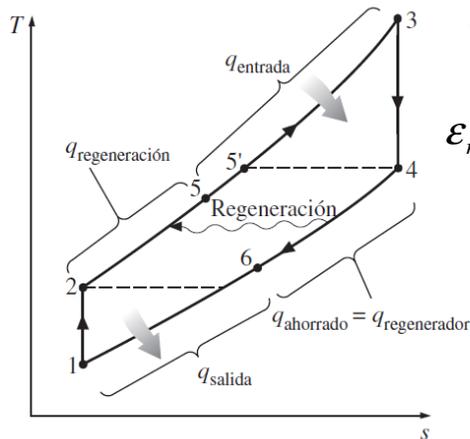
Objetivo: disminuir  $q_{in} = q_c$     Requisito:  $T_4 > T_2$      $q_{in} = q_c = h_3 - h_5$



$$q_{regen,real} = h_5 - h_2 \quad q_{regen,max} = h_{5'} - h_2 = h_4 - h_2$$

$$\epsilon_{regen} = \frac{q_{regen,real}}{q_{regen,max}} = \frac{h_5 - h_2}{h_4 - h_2}$$

*Eficacia o efectividad*



Bajo suposiciones de aire estándar

$$\epsilon_{regen} = \frac{h_5 - h_2}{h_4 - h_2} \Rightarrow \epsilon_{regen} = \frac{T_5 - T_2}{T_4 - T_2}$$

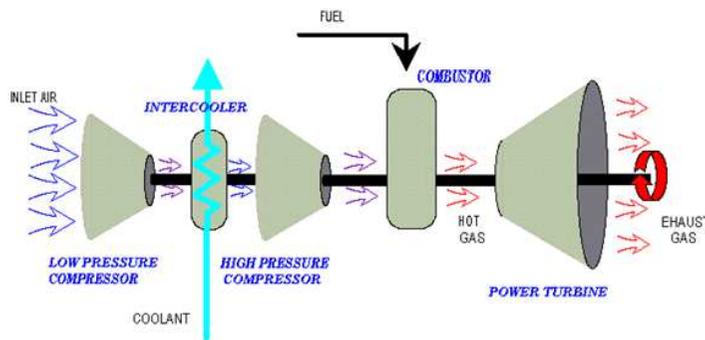
Un regenerador con una eficacia más alta ahorrará combustible al precalentar el aire antes de la combustión.

$$\eta_{regen} = 1 - \frac{T_1}{T_3} \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^\gamma = 1 - \frac{T_1}{T_3} (r_p)^\gamma$$

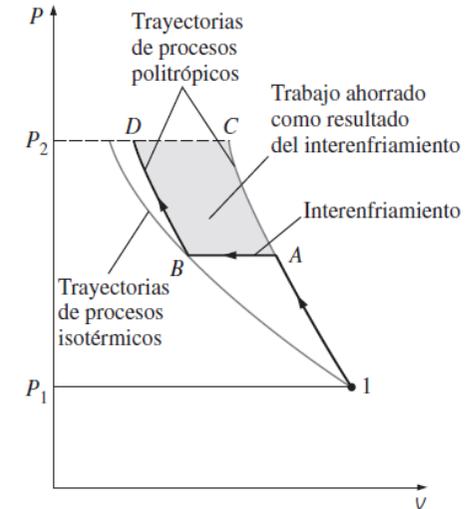
# Tema 3. Ciclos de gas y vapor

## Ciclo Brayton con interenfriamiento, recalentamiento y regeneración

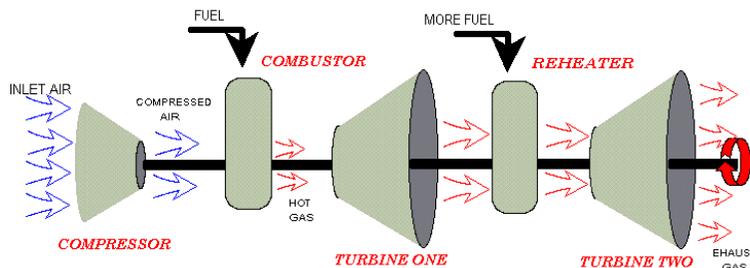
El trabajo requerido para comprimir un gas entre dos presiones específicas disminuye si dicho proceso se realiza en múltiples etapas enfriando el gas entre éstas.



Si el número de etapas  $N \rightarrow \infty$  el proceso de compresión  $\rightarrow$  isotérmico.



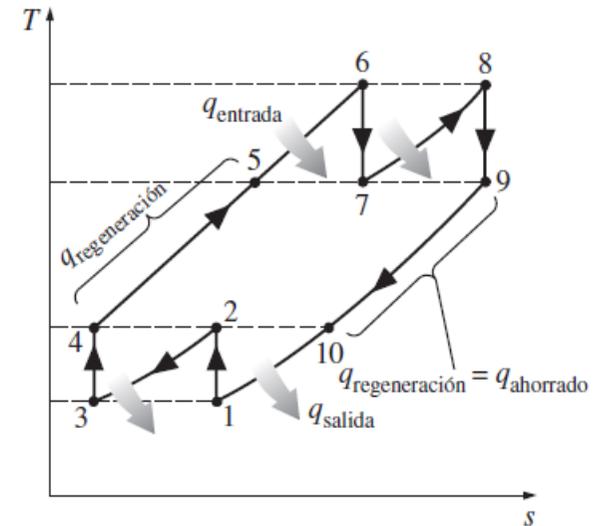
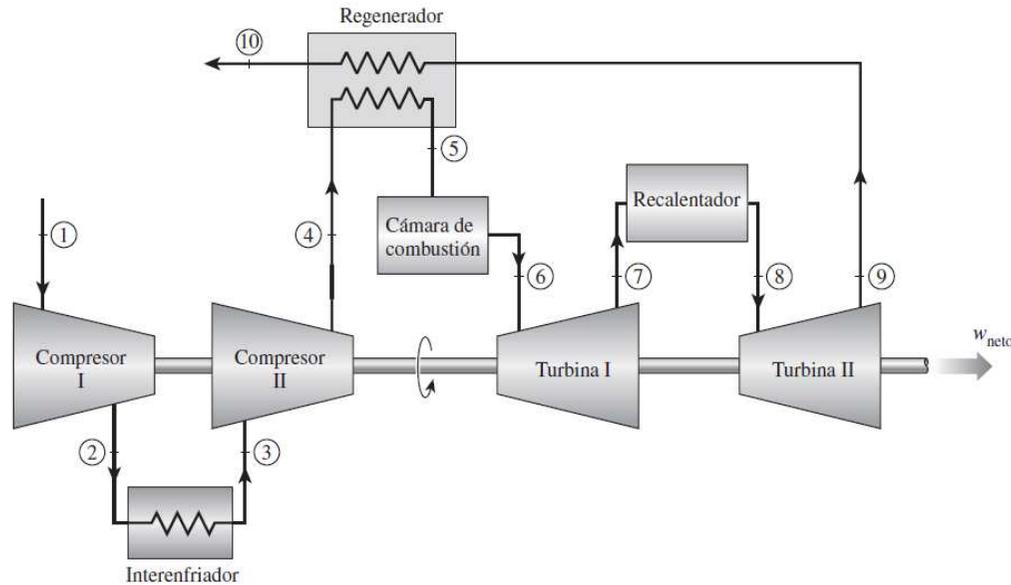
De forma análoga, el trabajo entregado por una turbina que opera entre dos presiones específicas aumenta al expandir el gas en múltiples etapas de recalentamiento.



El trabajo de compresión o expansión de flujo estacionario es proporcional al volumen específico del fluido. Por lo tanto, el volumen específico del fluido de trabajo debe ser lo más bajo posible durante un proceso de compresión y lo más alto posible durante un proceso de expansión.

# Tema 3. Ciclos de gas y vapor

## Ciclo Brayton con interenfriamiento, recalentamiento y regeneración



Recalentamiento

$$RT = \frac{(-w_C)}{w_T} + \text{Regeneración} \Rightarrow \eta$$

Interenfriamiento

Aumenta