

TEMA 4.

TERMODINÁMICA APLICADA A MÁQUINAS TÉRMICAS





- 4.1. Definición y Clasificación de Máquinas Térmicas
- 4.2. Ciclos de Motores Rotativos
- 4.3. Modificaciones del ciclo Rankine
- 4.4. Modificaciones del ciclo Brayton
- 4.5. Ciclos de Motores Alternativos
- 4.6. Ciclos de Refrigeración



4.1. Definición y Clasificación de Máquinas Térmicas

4.2. Ciclos de Motores Rotativos

4.3. Modificaciones del ciclo Rankine

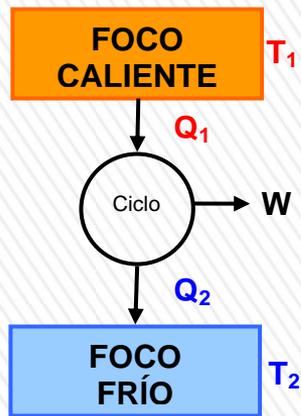
4.4. Modificaciones del ciclo Brayton

4.5. Ciclos de Motores Alternativos

4.6. Ciclos de Refrigeración

Máquina Térmica: aquella capaz de transformar calor en trabajo o viceversa

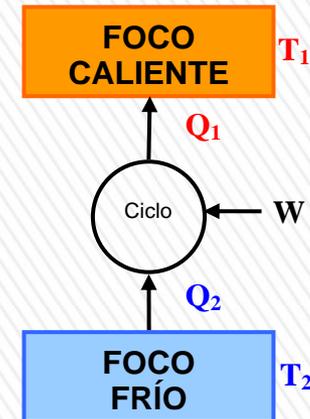
Motor Térmico



Rendimiento Térmico del ciclo

$$\eta = \frac{W_{NETO}}{Q_{TOTAL_APORTADO}} = \frac{\sum |W_{PRODUCIDO}| - \sum |W_{CONSUMIDO}|}{\sum |Q_{ABSORBIDO}|} \quad [4.1]$$

Máquina Frigorífica



Coeficiente de Operación

$$\beta = \frac{\text{Efecto refrigerante}}{\text{Trabajo consumido}} = \left| \frac{Q_E}{W_C} \right| \quad [4.2]$$



4.1 Definición de Máquinas Térmicas



Motores térmicos: Tipos

En función del agente de transformación:

- a) Máquinas de gas: el agente de transformación (gas) no cambia de estado durante el ciclo.
- b) Máquinas de vapor: el agente de transformación (vapor) cambia de estado durante el ciclo.

En función del lugar de obtención del calor:

- a) Máquinas de combustión externa.
- b) Máquinas de combustión interna.

En función del tipo de movimiento obtenido:

- a) Motores rotativos: giro de un eje.
- b) Motores alternativos: cilindro-pistón.

TERMOTECNIA:

Turbinas de vapor: motor de combustión externa, de vapor y rotativo.

Turbinas de gas: motor de combustión interna, de gas y rotativo

Motores alternativos: motor de combustión interna, de gas y cilindro-pistón



4.1. Definición y Clasificación de Máquinas Térmicas

4.2. Ciclos de Motores Rotativos

4.3. Modificaciones del ciclo Rankine

4.4. Modificaciones del ciclo Brayton

4.5. Ciclos de Motores Alternativos

4.6. Ciclos de Refrigeración

Motor Rotativo:

- Generan movimiento de giro de un eje
- Aplicación: industria aeroespacial, plantas de generación de potencia



Turbinas de Vapor

- Combustión externa
- AT: agua



Ciclo Rankine

Turbinas de gas

- Combustión interna
- AT: gases de combustión



Ciclo Brayton

4.2.1 Ciclo Rankine ideal

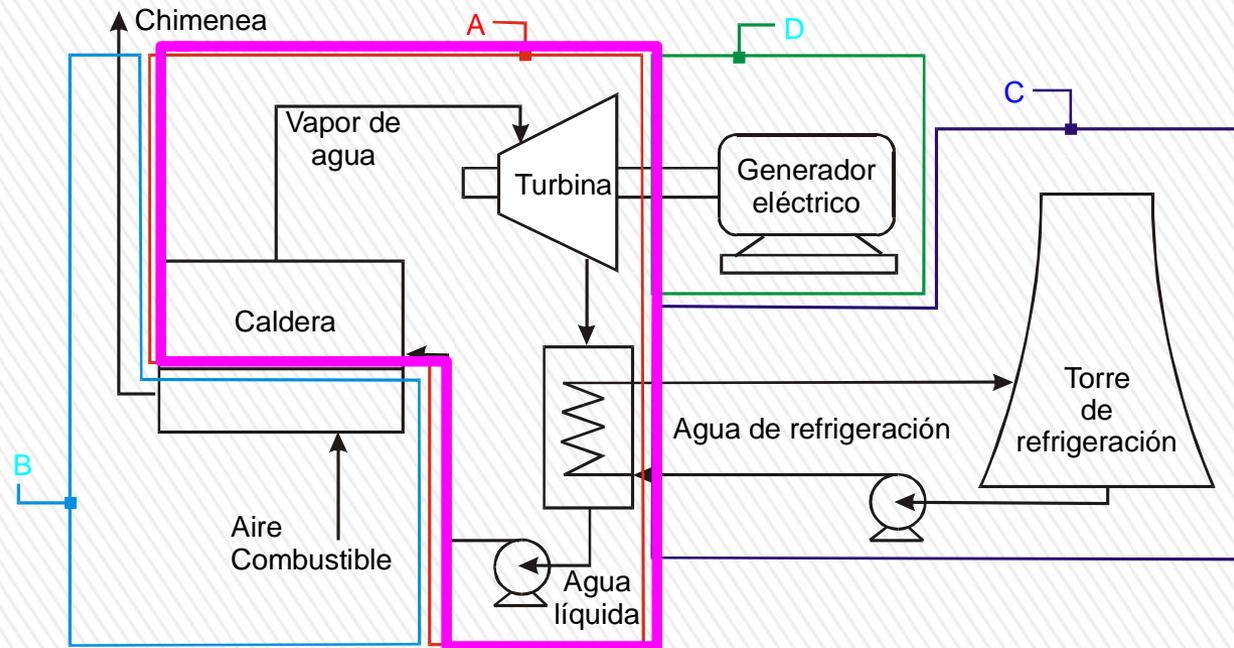
ZONA A: Ciclo termodinámico del AT.

Transformación de la entalpía del vapor en energía cinética en del eje de la turbina (W).

ZONA B: Foco caliente. Generación de calor.

ZONA C: Foco frío. Condensación del vapor saliente de la turbina.

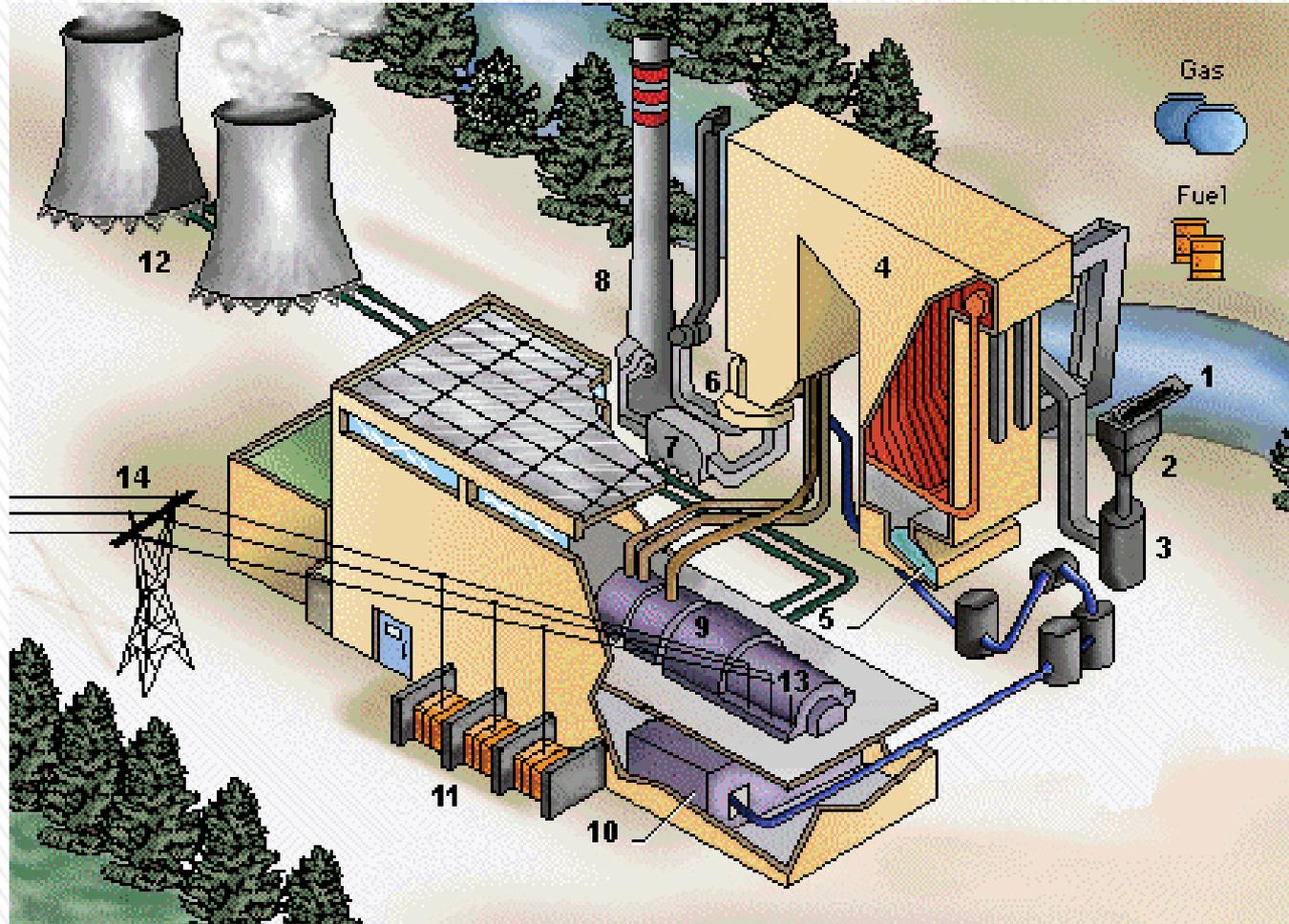
ZONA D: Obtención de energía eléctrica. Transformación del trabajo mecánico producido en la turbina en energía eléctrica mediante un generador.



Esquema de una central térmica de vapor

4.2.1 Ciclo Rankine ideal

Esquema de una central térmica de vapor



4.2.1 Ciclo Rankine ideal

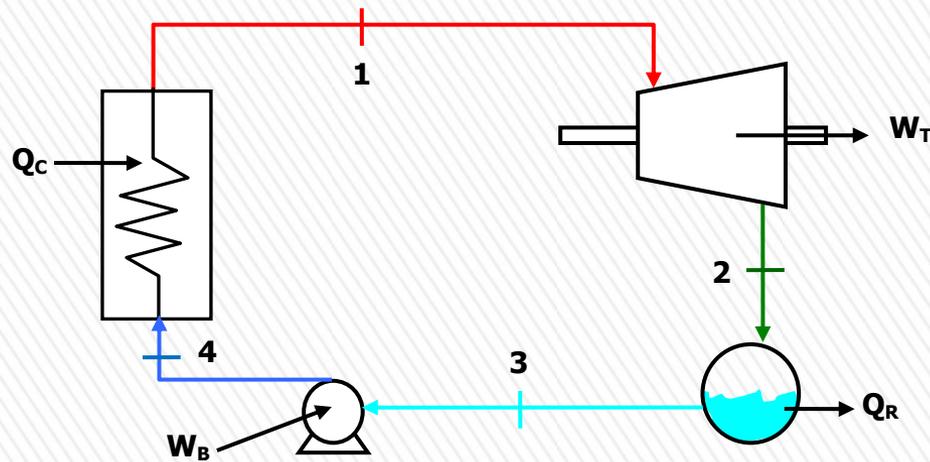
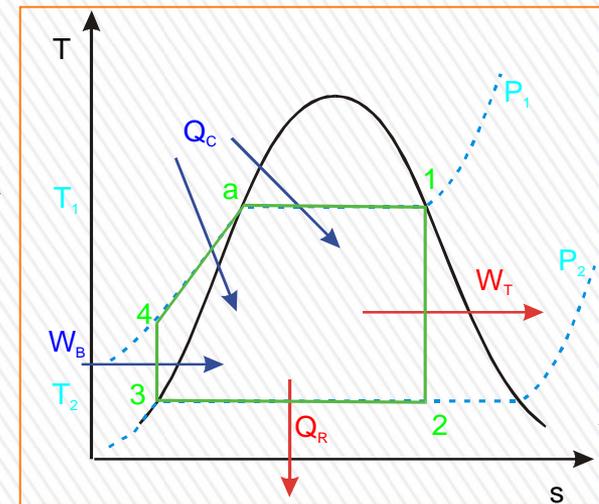
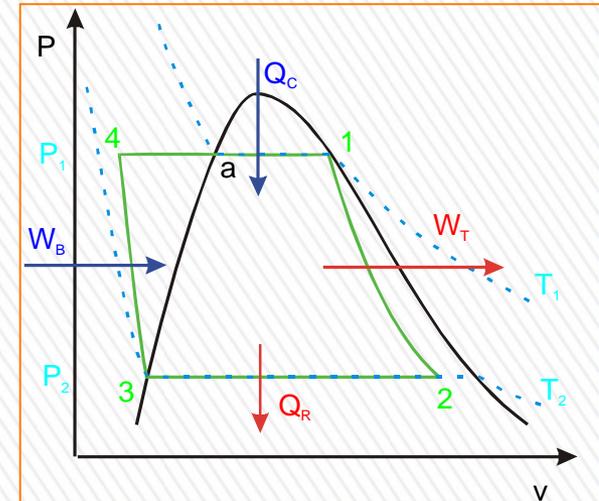


Diagrama de bloques ciclo Rankine

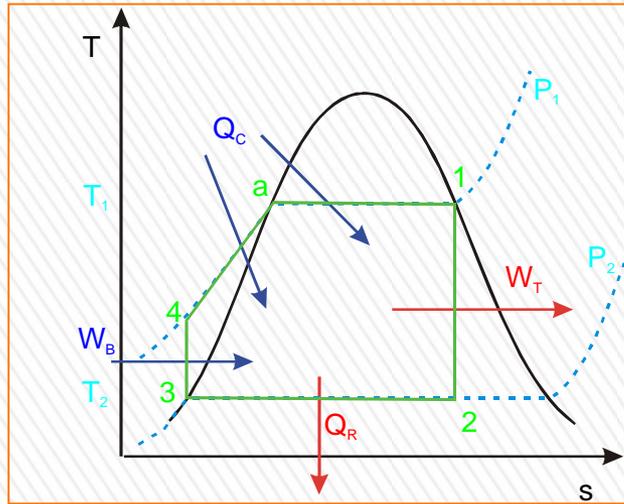
Suposiciones:

- Todos los procesos son reversibles
- Sin pérdidas de presión en la circulación del AT
- Caldera y condensador a $P = \text{cte}$
- Turbina y bomba adiabáticos (+ reversible) \rightarrow isoentrópicos



4.2.1 Ciclo Rankine ideal

Rendimiento Térmico de Ciclo:



- Etapa 1→2: expansión del vapor en la turbina

Entrada a la turbina: vapor saturado seco

Salida de la turbina: vapor húmedo

Proceso: expansión isoentrópica con generación de trabajo W_T

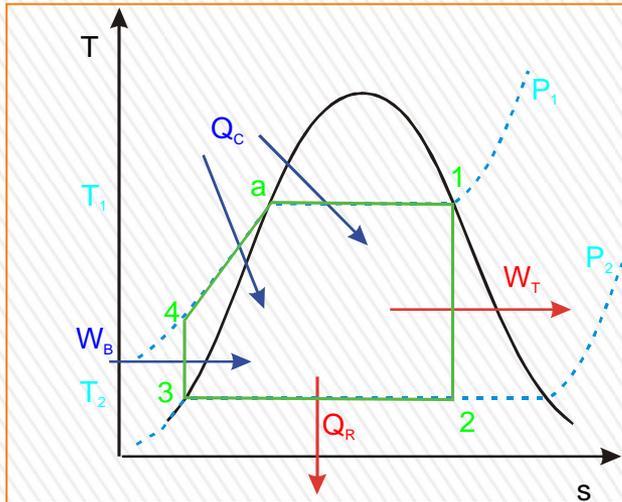
Principio de conservación de energía:

$$0 = Q - W + \left(h_1 - h_2 + \frac{V_1^2 - V_2^2}{2} + g \cdot (z_1 - z_2) \right) \quad (\text{J/kg})$$

$$W_T = (h_1 - h_2) \quad (> 0) \quad [4.3]$$

4.2.1 Ciclo Rankine ideal

Rendimiento Térmico de Ciclo:



- Etapa 2→3: condensador del vapor húmedo en el condensador

Entrada al condensador: vapor húmedo

Salida del condensador: líquido saturado

Proceso: extracción de calor Q_R a presión constante

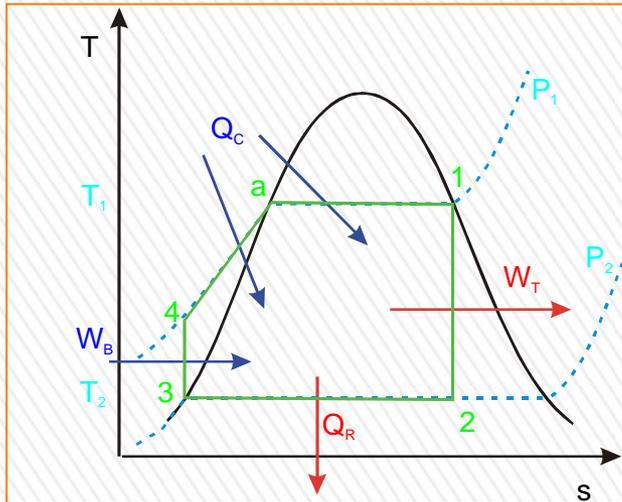
Principio de conservación de energía:

$$0 = Q - W + \left(h_2 - h_3 + \frac{V_2^2 - V_3^2}{2} + g \cdot (z_2 - z_3) \right) \quad (\text{J/kg})$$

$$Q_R = (h_3 - h_2) \quad (< 0) \quad [4.4]$$

4.2.1 Ciclo Rankine ideal

Rendimiento Térmico de Ciclo:



- Etapa 3→4: compresión del condensado en la bomba

Entrada a la bomba: líquido saturado

Salida de la bomba: líquido subenfriado a la presión de la caldera

Proceso: compresión isoentrópica con generación de trabajo por la bomba W_B

Principio de conservación de energía:

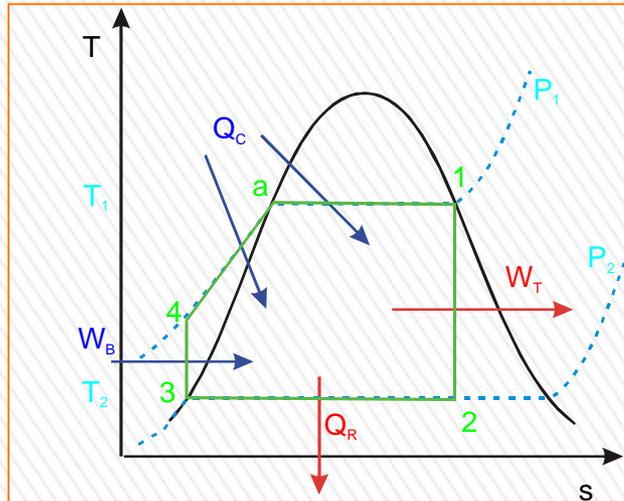
$$W_B = (h_3 - h_4) \quad (< 0) \quad [4.5]$$

Considerando la compresión del líquido:

$$W_B = -\int_3^4 v dp = -v_3(p_4 - p_3) \quad [4.6]$$

4.2.1 Ciclo Rankine ideal

Rendimiento Térmico de Ciclo:



- Etapa 4→1: calentamiento en la caldera

Entrada a la caldera: líquido subenfriado

Salida de la caldera: vapor saturado seco

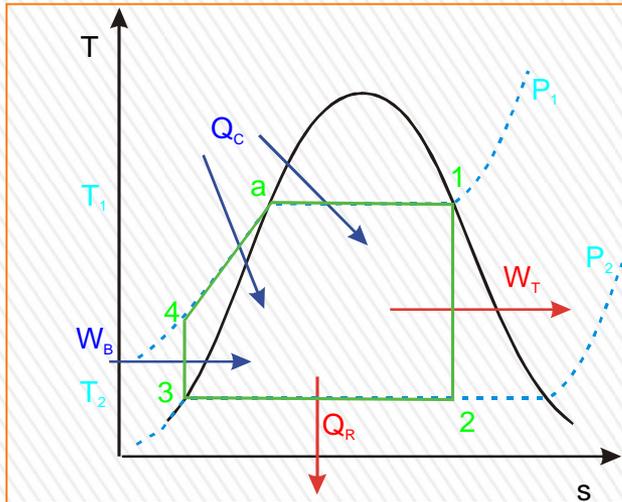
Proceso: aporte de calor Q_C a presión constante

Principio de conservación de energía:

$$Q_C = (h_1 - h_4) \quad (> 0) \quad [4.7]$$

4.2.1 Ciclo Rankine ideal

Rendimiento Térmico de Ciclo:



$$\eta_{RANKINE} = \frac{|W_T| - |W_B|}{|Q_C|} = \frac{|h_1 - h_2| - |h_3 - h_4|}{|h_1 - h_4|} \quad [4.8]$$

Trabajo neto realizado en un ciclo

$$\Delta E = Q - W = 0 \longrightarrow |W_T| - |W_B| = |Q_C| - |Q_R|$$

$$\eta_{RANKINE} = \frac{|Q_C| - |Q_R|}{|Q_C|} = 1 - \frac{|Q_R|}{|Q_C|} = 1 - \frac{|h_3 - h_2|}{|h_1 - h_4|} \quad [4.9]$$

Relación de trabajos

$$RT = \frac{|W_B|}{|W_T|} = \frac{|h_3 - h_4|}{|h_1 - h_2|} \quad [4.11]$$

Aplicando 2º Principio de la Termodinámica

$$\eta_{RANKINE} = 1 - \frac{|Q_R|}{|Q_C|} = 1 - \frac{|T_2 \cdot (s_3 - s_2)|}{|\bar{T}_C \cdot (s_1 - s_4)|} = 1 - \frac{T_2}{\bar{T}_C} \quad [4.10]$$

4.2.1 Ciclo Rankine ideal

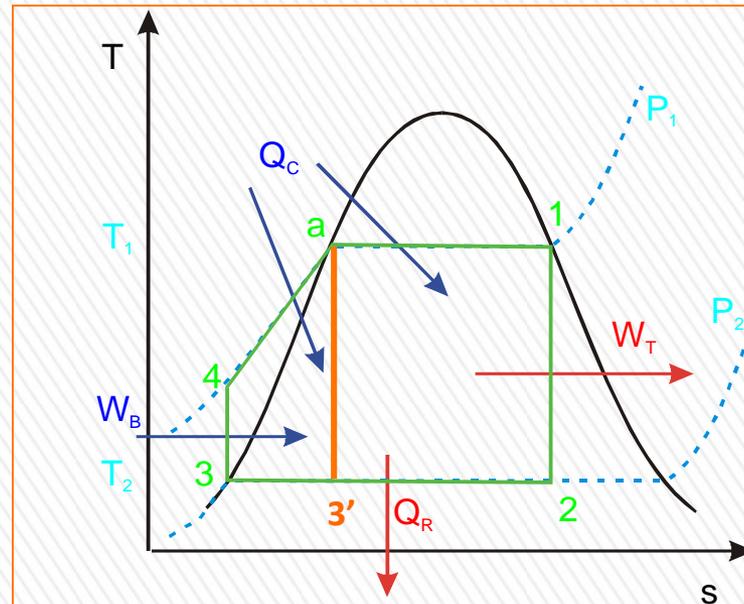
Comparación con el ciclo de Carnot

Ciclo de Rankine:

1 - 2 - 3 - 4 - a

Ciclo de Carnot:

1 - 2 - 3' - a



Ciclo de Carnot: 2 procesos isoterms + 2 adiabáticos

$$\eta_{CARNOT} = 1 - \frac{T_2}{T_1} = 1 - 2 - 3' - a$$

$$\eta_{RANKINE} = 1 - \frac{T_2}{T_C} = 1 - 2 - 3 - 4 - a$$

$$T_1 > T_C \longrightarrow \eta_{CARNOT} > \eta_{RANKINE}$$

4.2.1 Ciclo Rankine ideal

Irreversibilidades y Pérdidas:

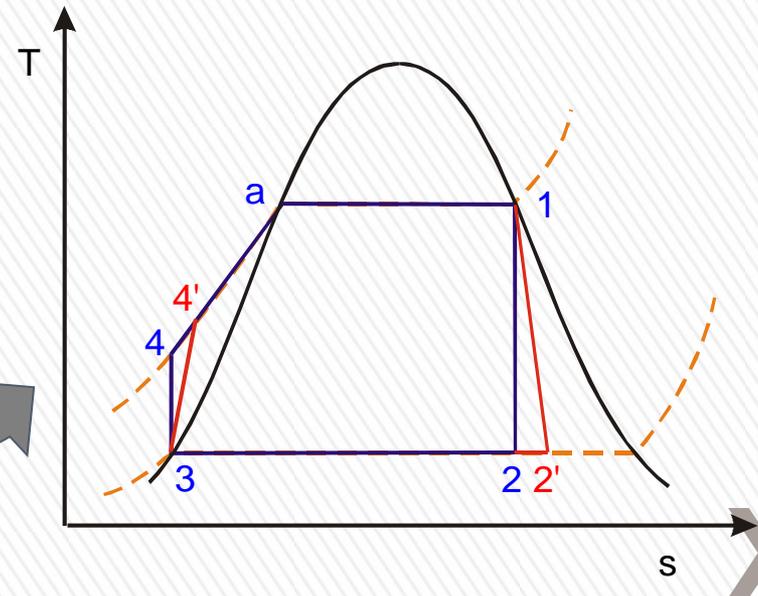
Desviaciones del ciclo de Rankine ideal:

- Pérdidas de energía en el condensador y la caldera por cesión de calor al exterior
- Pérdidas de energía por rozamiento del fluido en el condensador, caldera y tuberías
- Irreversibilidades en la turbina y en la bomba

- o Procesos no adiabáticos
- o Pérdidas de energía por rozamiento

$$\eta_{TV} = \frac{|W_T|}{|W_T|_s} = \frac{h_1 - h_2'}{h_1 - h_2} \quad [4.12]$$

$$\eta_B = \frac{|W_B|_s}{|W_B|} = \frac{|h_3 - h_4|}{|h_3 - h_4'|} \quad [4.13]$$



4.2.2 Ciclo Brayton ideal

Rendimiento máximo

Rendimiento real

Turbinas de vapor (550 °C)

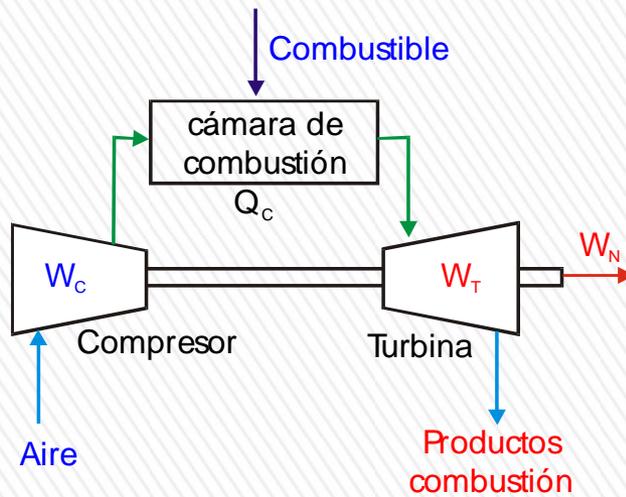
65 %

40-45 %

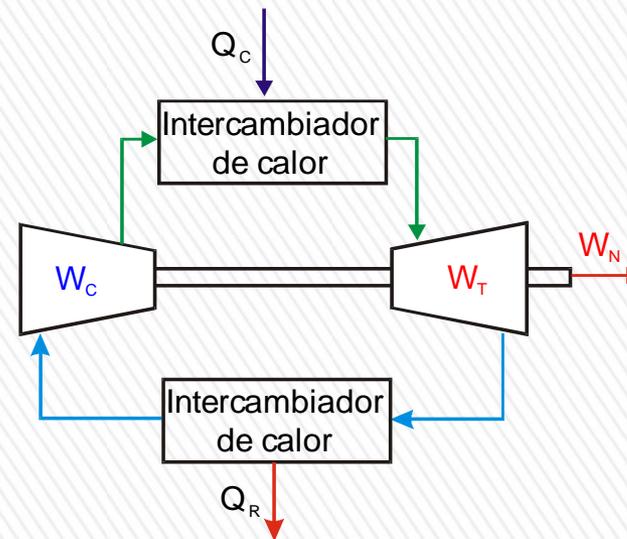
Turbinas de gas (1000-1400 °C)

83 %

62 %

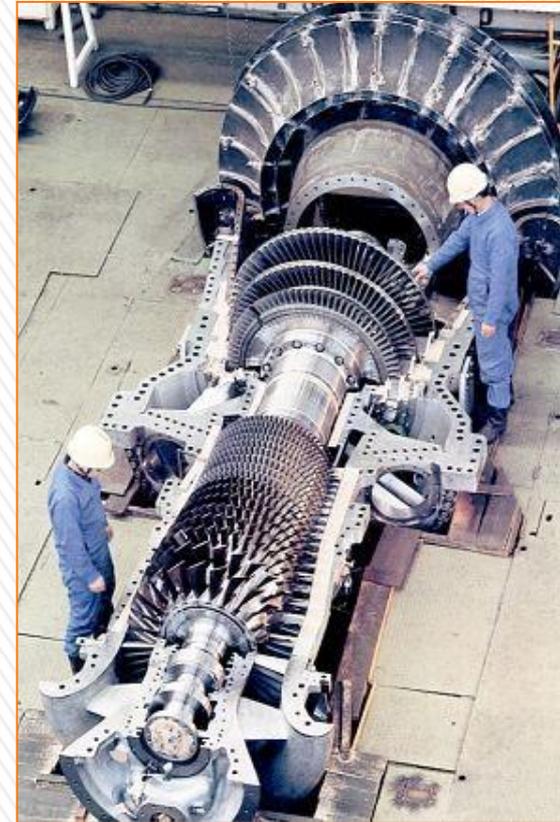
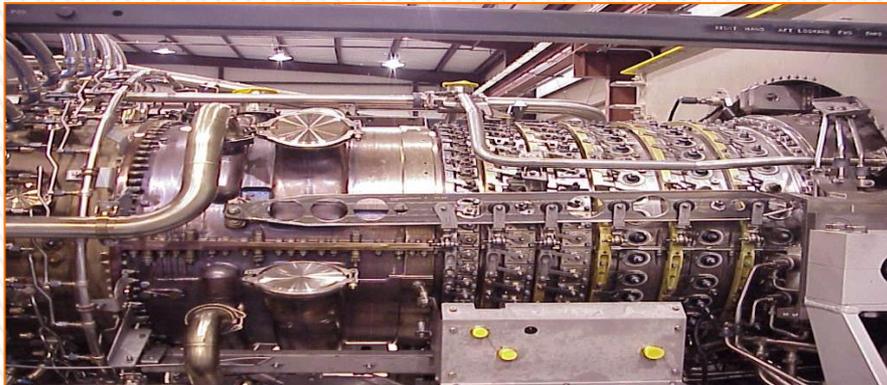


Ciclo abierto



Ciclo cerrado

4.2.2 Ciclo Brayton ideal



4.2.2 Ciclo Brayton ideal

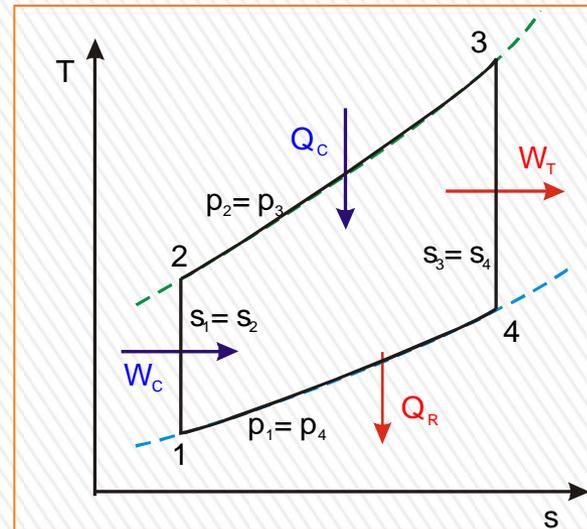
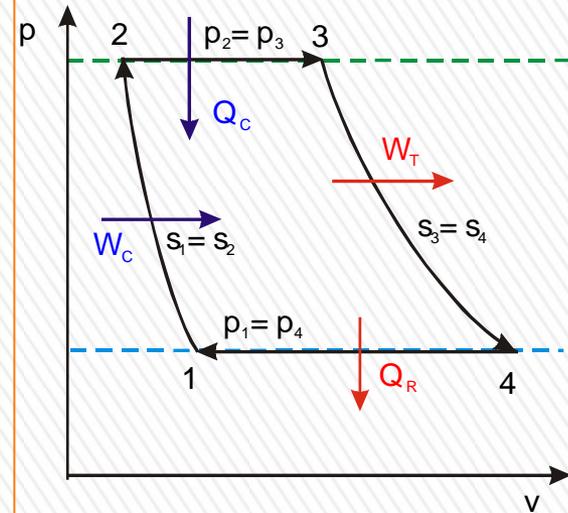
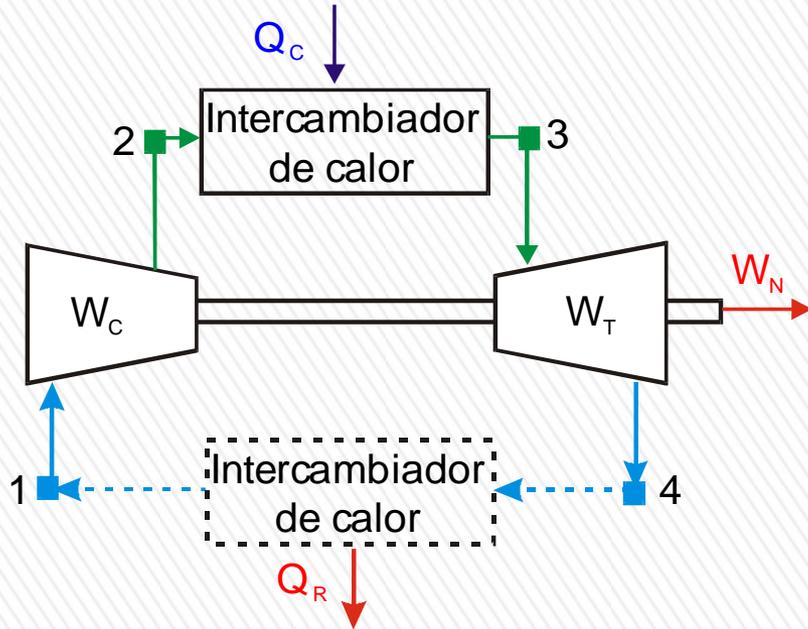
Ciclo abierto

→ *Inconveniente:* el agente de transformación cambia de composición

→ **Análisis de aire estándar**

- ✓ El aire se comporta como gas ideal y sin cambio de composición
- ✓ El calor de la combustión procede de una fuente externa caliente
- ✓ El aire retorna al estado inicial por cesión de calor al ambiente

4.2.2 Ciclo Brayton ideal



Suposiciones:

- Todos los procesos son reversibles
- Sin pérdidas de presión en la circulación del AT
- Cambiadores a $P = \text{cte}$
- Turbina y compresor adiabáticos \rightarrow isoentrópicos



4.2.2 Ciclo Brayton ideal

Rendimiento Térmico de Ciclo:

$$\eta_{BRAYTON} = \frac{|W_T| - |W_C|}{|Q_C|} = \frac{|h_3 - h_4| - |h_1 - h_2|}{|h_3 - h_2|} \quad [4. 14]$$

Relación de Trabajos:

$$RT = \frac{|W_C|}{|W_T|} = \frac{|h_1 - h_2|}{|h_3 - h_4|} \quad [4. 15]$$

<i>Relación de trabajos (RT)</i>	
Turbinas de vapor	1-3 %
Turbinas de gas	40-80 %

4.2.2 Ciclo Brayton ideal

Análisis de Aire Estándar Frío:

Se supone C_p y $C_v = \text{cte} \rightarrow \gamma = \text{cte}$

$$\eta = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \frac{T_4}{T_3} \quad [4.16]$$

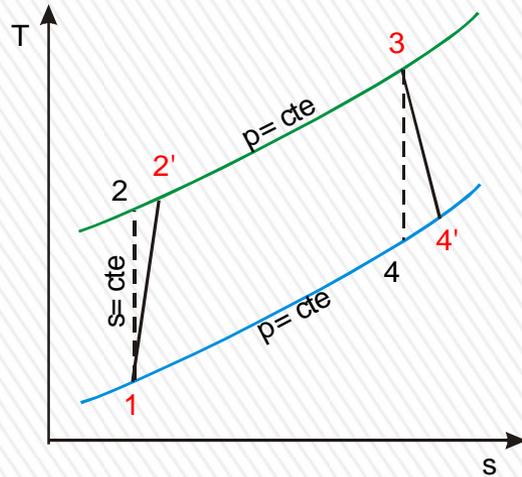
Compresión adiabática y reversible:

$$T_2 = T_1 \cdot \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \longrightarrow \eta = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \frac{1}{\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} \quad [4.17]$$

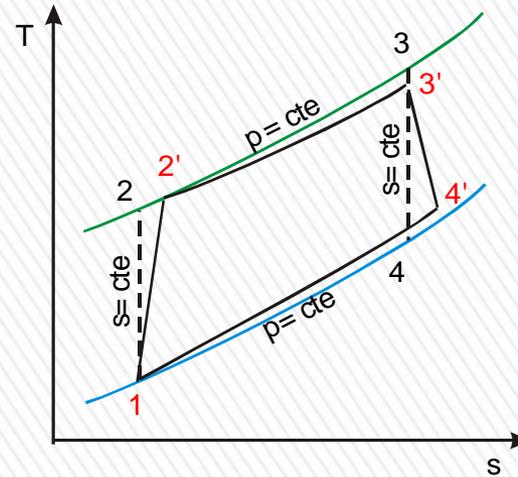
4.2.2 Ciclo Brayton ideal

Irreversibilidades y Pérdidas:

Análogo a lo descrito para ciclos de Turbinas de Vapor



Irreversibilidades en turbina y compresor



Irreversibilidades en turbina y compresor + pérdidas de presión en cambiadores de calor

$$\eta_{TG} = \frac{|W|_T}{|W_T|_s} = \frac{h_3 - h_{4'}}{h_3 - h_4} \quad [4.18]$$

$$\eta_C = \frac{|W_C|_s}{|W_C|} = \frac{|h_1 - h_2|}{|h_1 - h_{2'}|} \quad [4.19]$$



4.1. Definición y Clasificación de Máquinas Térmicas

4.2. Ciclos de Motores Rotativos

4.3. Modificaciones del ciclo Rankine

4.4. Modificaciones del ciclo Brayton

4.5. Ciclos de Motores Alternativos

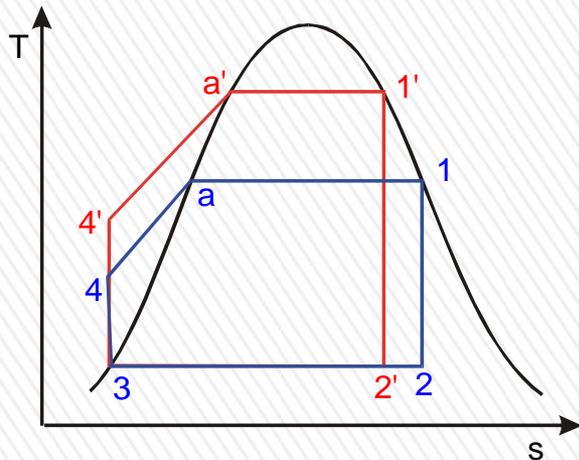
4.6. Ciclos de Refrigeración

$$\eta_{RANKINE} = \frac{|W_T| - |W_B|}{|Q_C|} \quad [4.8]$$

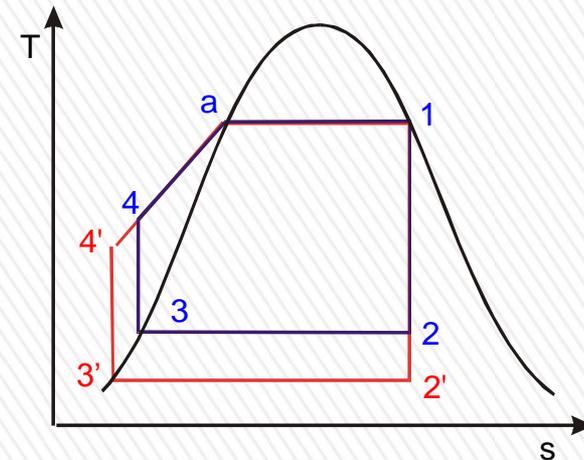
$$\eta_{RANKINE} = 1 - \frac{T_2}{T_C} \quad [4.10]$$

Modificaciones para aumentar la eficiencia térmica del ciclo:

A. Aumento de $P_{CALDERA}$



B. Disminución de $P_{CONDENSADOR}$



Problema:

$X_{2'} < X_2 \rightarrow$ problemas de funcionamiento de la turbina



Requisito práctico:

$X_2 > 90\%$



$$\eta_{RANKINE} = \frac{|W_T| - |W_B|}{|Q_C|} \quad [4.8]$$

$$\eta_{RANKINE} = 1 - \frac{T_2}{T_C} \quad [4.10]$$

Modificaciones para aumentar la potencia y/o eficiencia térmica del ciclo:

Requisito práctico:

$X_2 > 90 \%$



Aumento de η limitado mediante los procedimientos a y b.

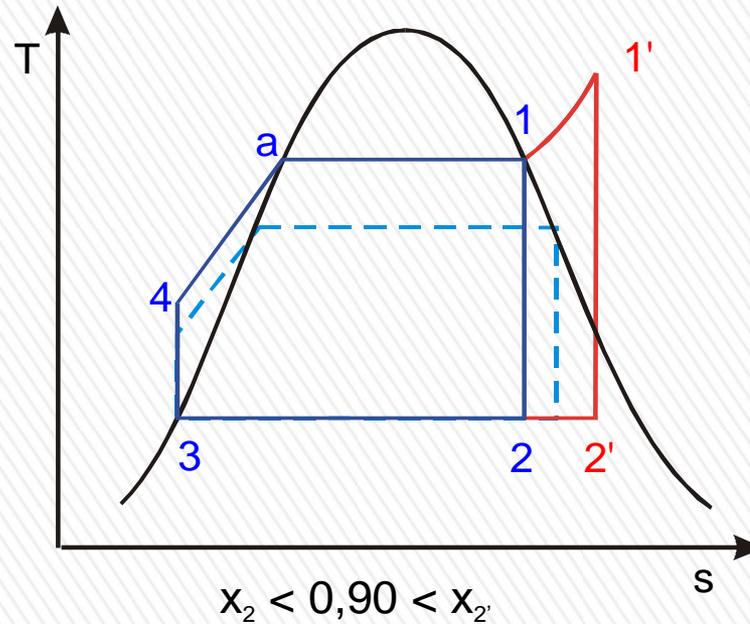


- C. Sobrecalentamiento (o recalentamiento)
- D. Recalentamiento intermedio
- E. Regeneración

C. Sobrecalentamiento (o

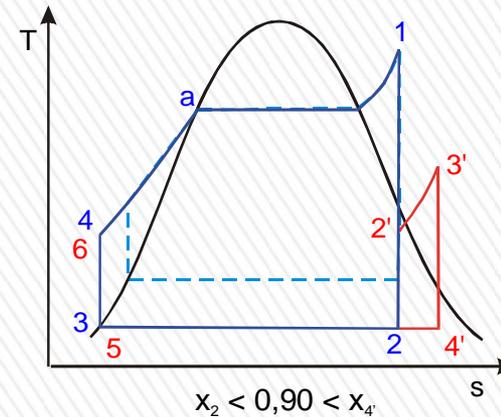
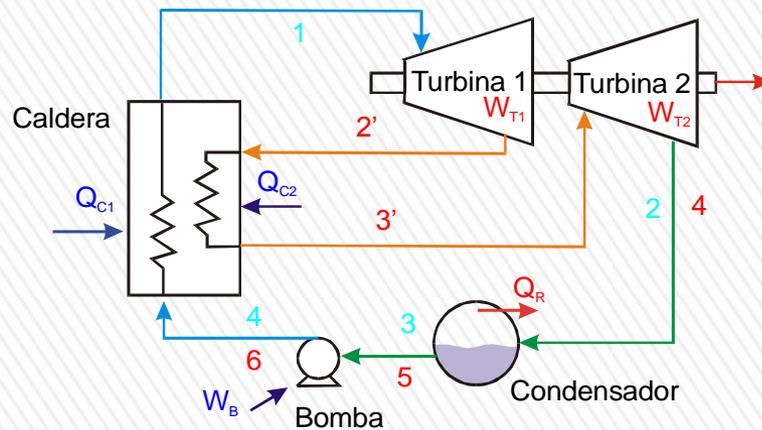
recalentamiento)

Obtención de vapor recalentado en la caldera a temperatura superior a la de saturación.



D. Recalentamiento intermedio

Vapor sobrecalentado se expande parcialmente en una primera etapa de la turbina, se recalienta y se vuelve a expandir en una segunda etapa de la turbina.



Ventajas

- Aumento del título del vapor a la salida de la turbina
- Mayor diferencia de presiones entre la caldera y el condensador

Limitaciones

- Resistencia térmica y mecánica de los materiales de construcción

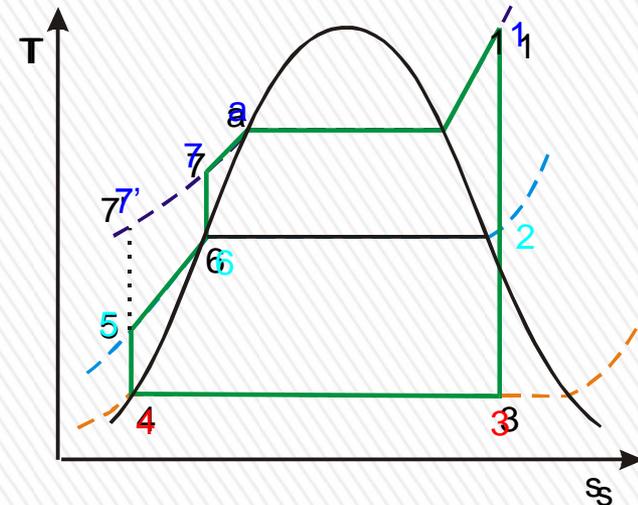
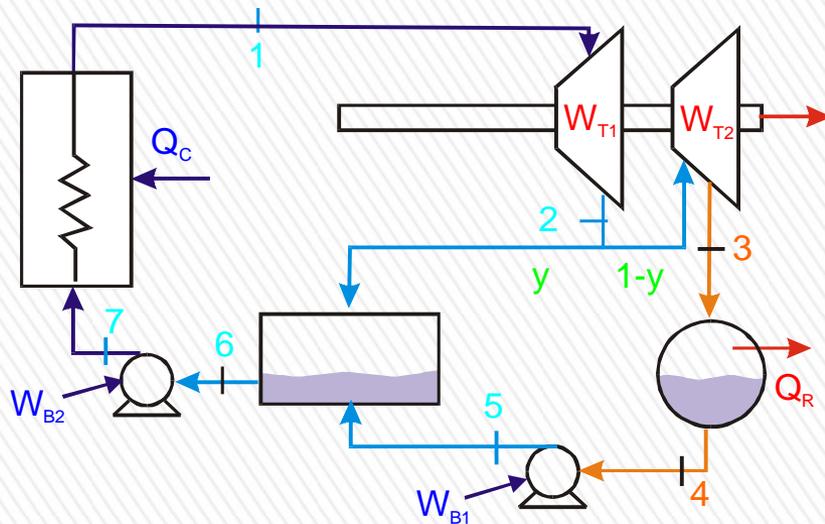
$$\eta = \frac{|W_{T1}| + |W_{T2}| - |W_B|}{|Q_{C1}| + |Q_{C2}|} \quad [4.20]$$

E. Regeneración

Aumento de la temperatura de trabajo de la caldera mediante precalentamiento del agua líquida que se introduce en la misma con parte del vapor de la turbina.

E.1 Cambiadores abiertos

Contacto directo de las corrientes fría y caliente

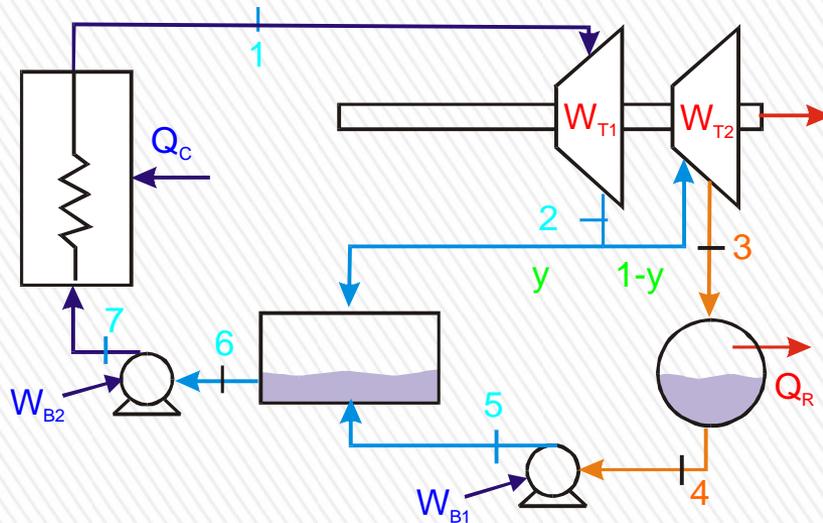


E. Regeneración

Aumento de la temperatura de trabajo de la caldera mediante precalentamiento del agua líquida que se introduce en la misma con parte del vapor de la turbina.

E.1 Cambiadores abiertos

$$\eta = \frac{|W_{T1}| + |W_{T2}| - [|W_{B1}| + |W_{B2}|]}{|Q_C|} \quad [4.21]$$



Trabajos del ciclo

$$W_{T1} = h_1 - h_2$$

$$W_{T2} = (h_2 - h_3) \cdot (1 - y)$$

$$W_{B1} = (h_4 - h_5) \cdot (1 - y)$$

$$W_{B2} = (h_6 - h_7)$$

Intercambios de calor

$$Q_C = h_1 - h_7$$

$$Q_R = (h_4 - h_3) \cdot (1 - y)$$

Balance de energía en calentador

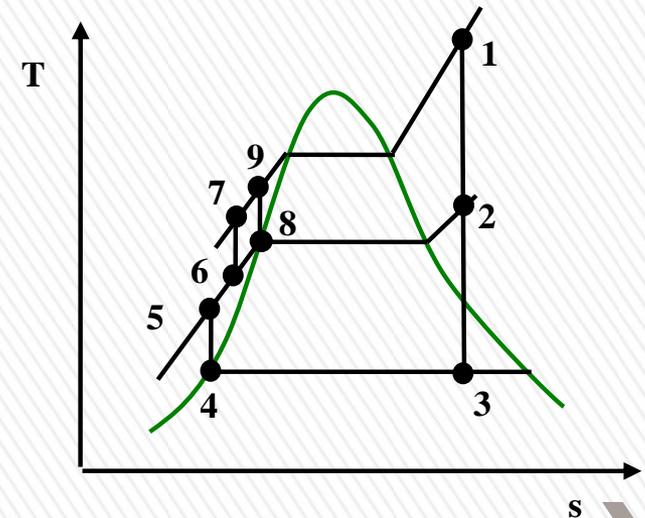
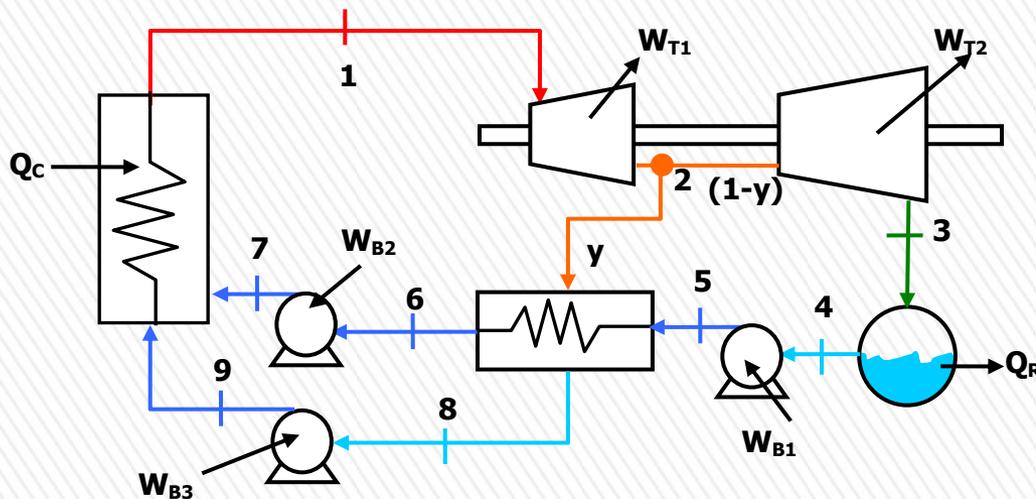
$$m \cdot h_6 = m \cdot y \cdot h_2 + m \cdot (1 - y) \cdot h_5$$

E. Regeneración

E.2 Cambiadores cerrados

Sin contacto directo de las corrientes fría y caliente (cambiador de carcasa y tubos)

OPCIÓN 1. Bombeo a caldera

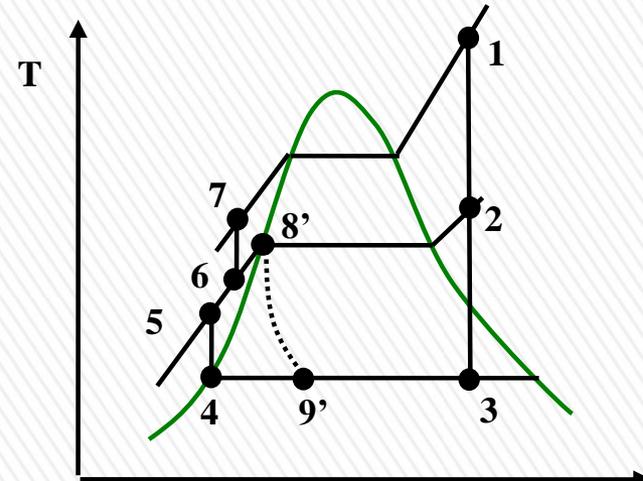
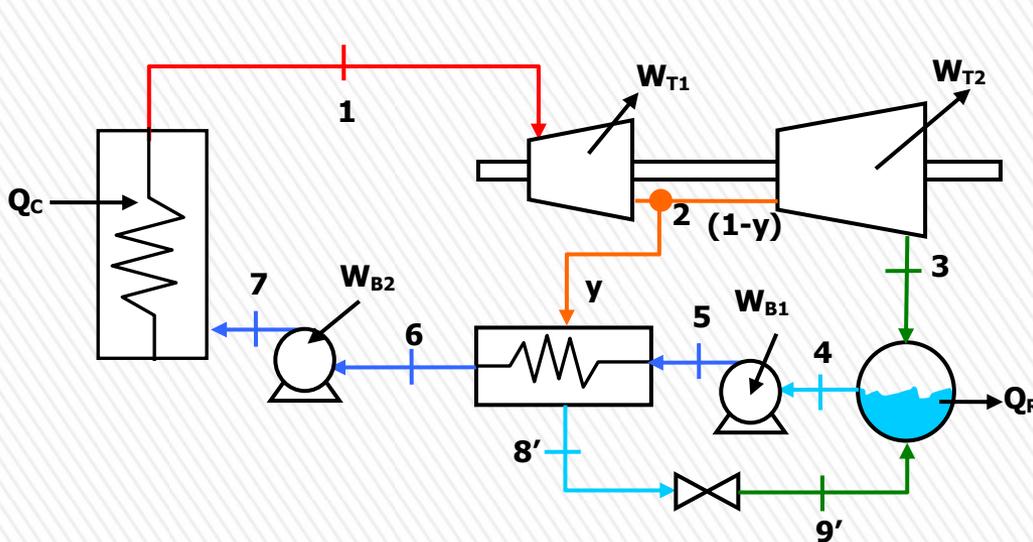


E. Regeneración

E.2 Cambiadores cerrados

Sin contacto directo de las corrientes fría y caliente (cambiador de carcasa y tubos)

OPCIÓN 2. Envío a condensador



E. Regeneración

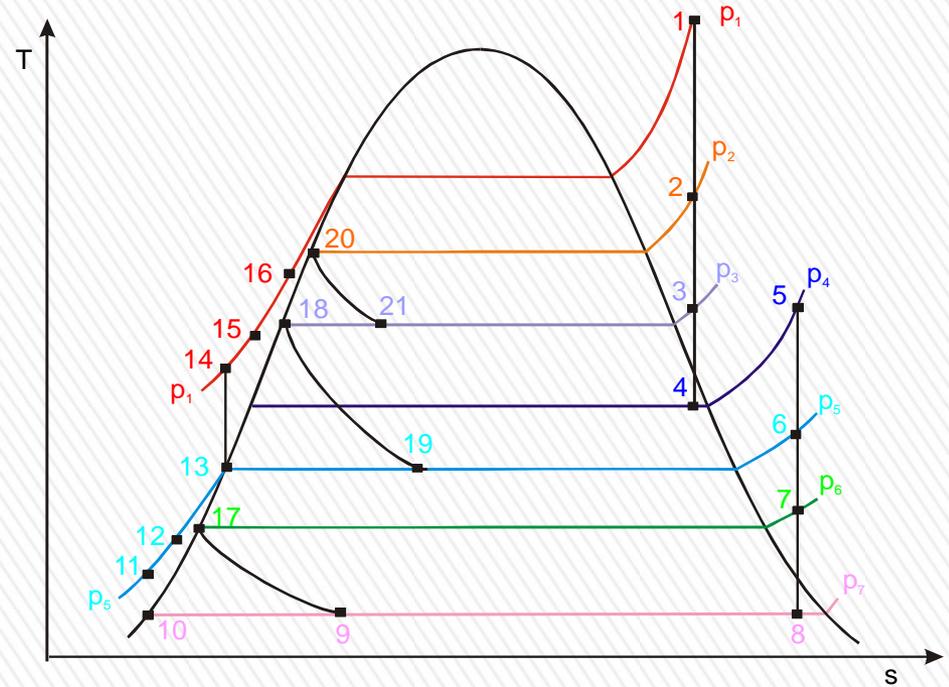
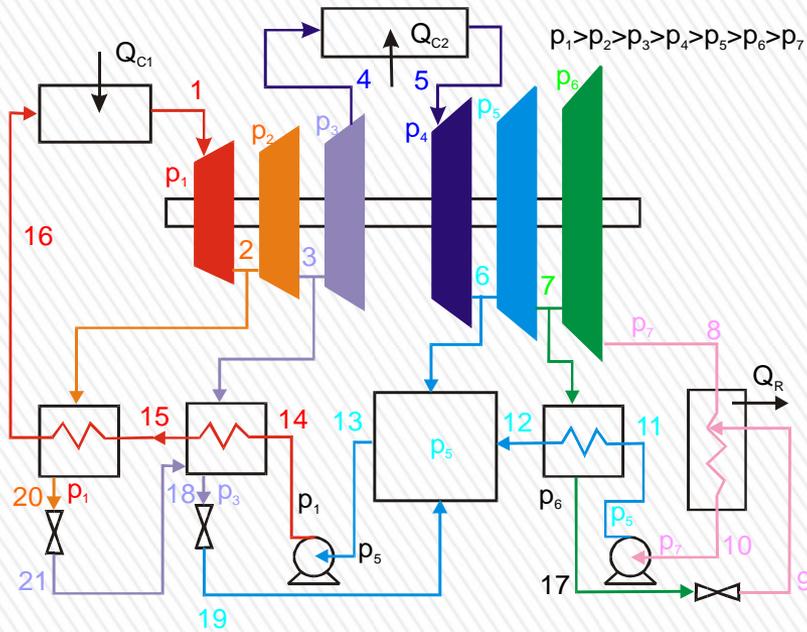
E.2 Cambiadores cerrados

Sin contacto directo de las corrientes fría y caliente (cambiador de carcasa y tubos)

Balance de energía en calentador

$$m \cdot y \cdot h_2 + m \cdot h_5 = m \cdot y \cdot h_8 + m \cdot h_6 \quad \therefore \quad y = \frac{h_6 - h_5}{h_2 - h_8} \quad [4.24]$$

Cambiadores múltiples





4.1. Definición y Clasificación de Máquinas Térmicas

4.2. Ciclos de Motores Rotativos

4.3. Modificaciones del ciclo Rankine

4.4. Modificaciones del ciclo Brayton

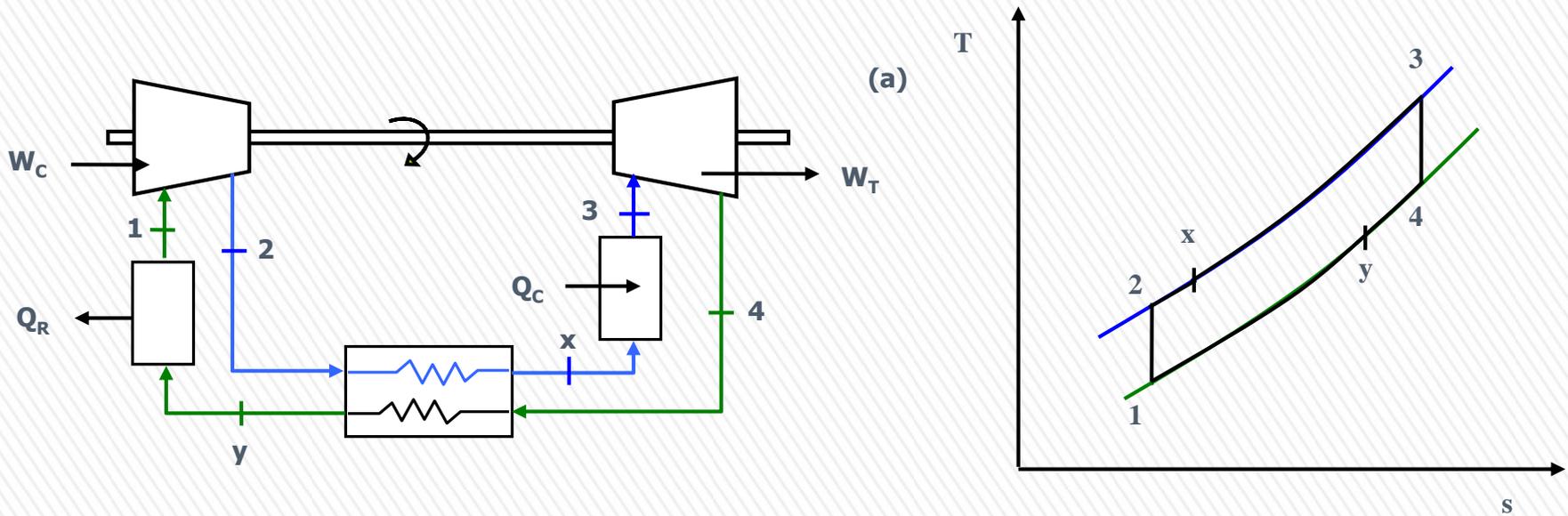
4.5. Ciclos de Motores Alternativos

4.6. Ciclos de Refrigeración

A. Regeneración

Objetivo: disminuir Q_c

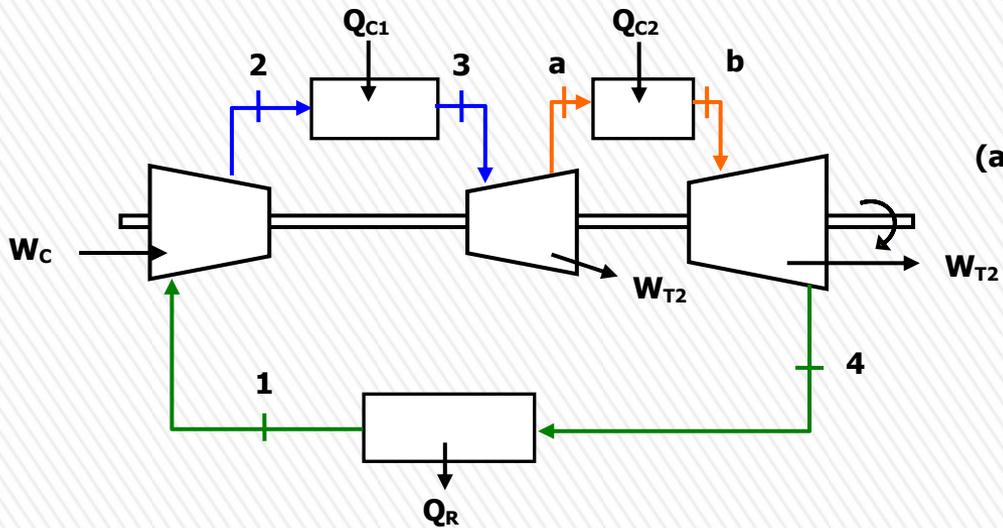
Requisito: $T_4 > T_2$



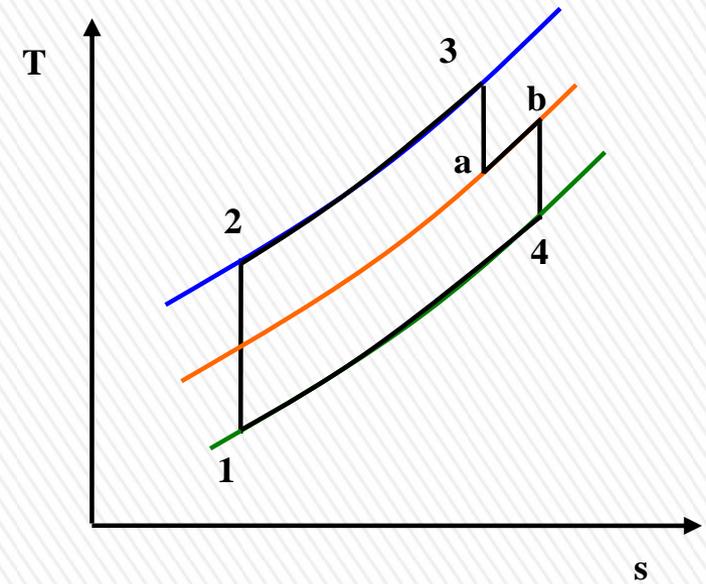
$$|Q_c| = h_3 - h_x \quad \Rightarrow \quad \eta_{reg} = \frac{h_x - h_2}{h_4 - h_2} \quad [4.25] \quad \Rightarrow \quad \eta_{REG} \sim 75\%$$

B. Recalentamiento

Objetivo: Aumentar W_T



(a)



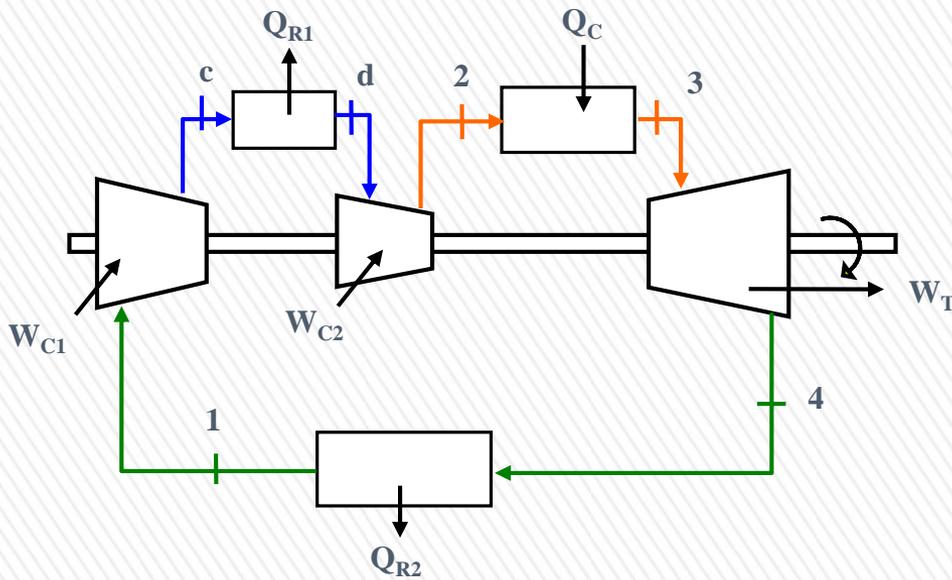
$$\eta = \frac{|W_{T1}| + |W_{T1}| - |W_C|}{|Q_{C1}| + |Q_{C1}|}$$

[4.26]

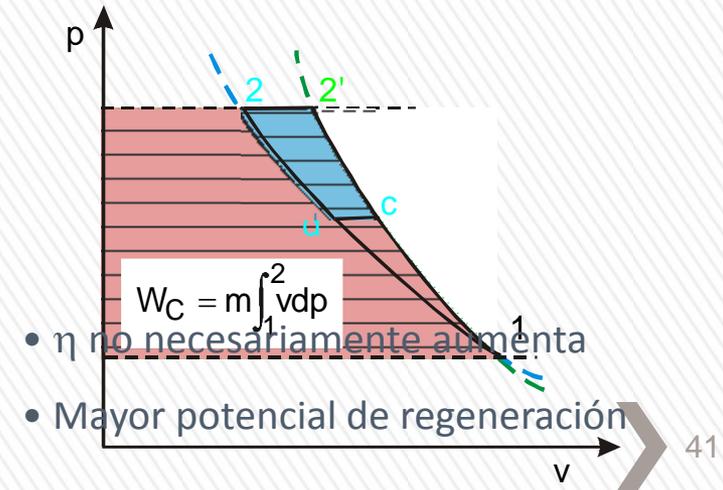
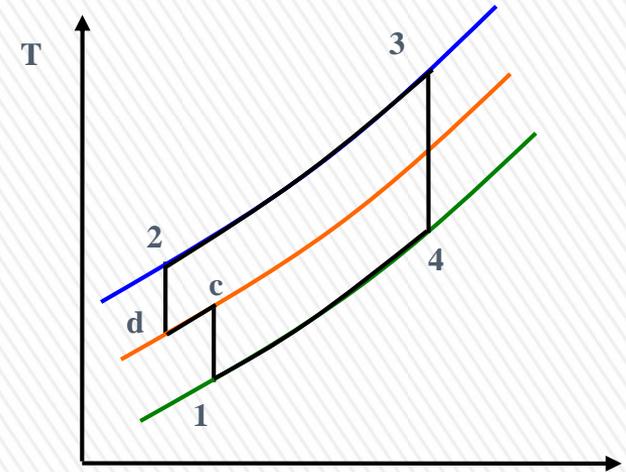
- η no necesariamente aumenta
- Mayor potencial de regeneración

C. Compresión con refrigeración

Objetivo: Disminuir W_C (aunque aumenta Q_C)



$$\eta_T = \frac{|W_T| - [|W_{C1}| + |W_{C2}|]}{|Q_C|} \quad [4.27]$$





4.1. Definición y Clasificación de Máquinas Térmicas

4.2. Ciclos de Motores Rotativos

4.3. Modificaciones del ciclo Rankine

4.4. Modificaciones del ciclo Brayton

4.5. Ciclos de Motores Alternativos

4.6. Ciclos de Refrigeración

Motor Alternativo:

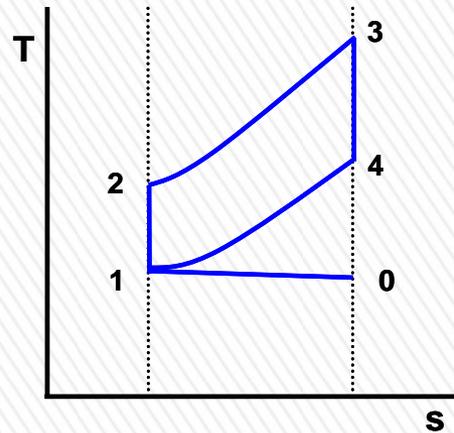
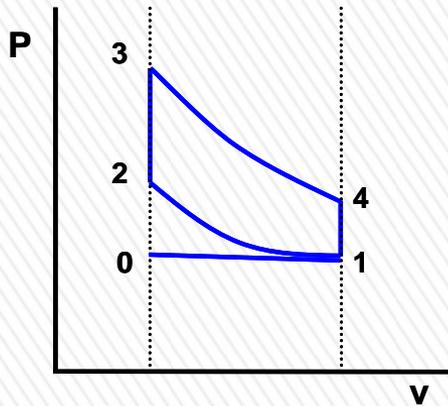
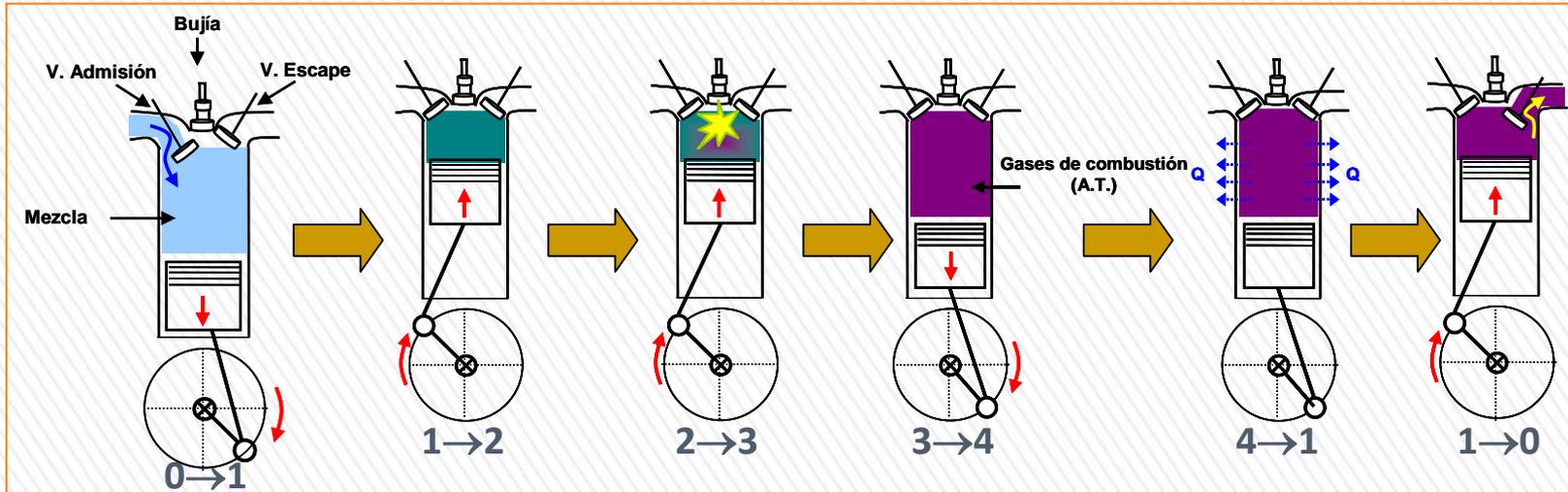
- Generan movimiento cilindro-pistón
- Combustión interna
- Agente de Transformación (AT): gases de combustión
- Aplicación: automoción, plantas de generación de potencia (cogeneración)



4.5.1 Ciclo Otto

4.5.2 Ciclo Diesel

4.5.1 Ciclo Otto



- 0→1. Carrera de aspiración
- 1→2. Carrera de compresión
- 2→3. Calentamiento instantáneo
- 3→4. Carrera de expansión
- 4→1. Disipación de calor residual
- 1→0. Carrera de expulsión



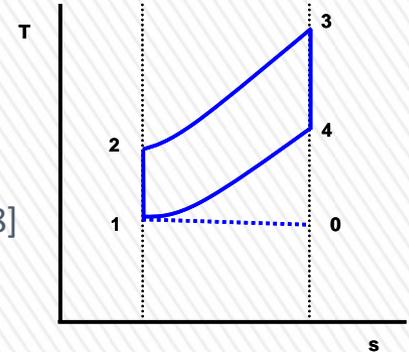
4.5 Ciclos de Motores Alternativos



4.5.1 Ciclo Otto

Rendimiento Térmico del ciclo

$$\eta = \frac{W_{NETO}}{Q_{TOTAL_APORTADO}} = \frac{\sum |W_{PRODUCIDO}| - \sum |W_{CONSUMIDO}|}{\sum |Q_{ABSORBIDO}|} \quad [4.28]$$



Suposiciones:

- AT no cambia de composición en todo el ciclo y es un gas ideal (aire)
- Etapas de aspiración y expulsión: a presión atmosférica y en sentidos opuestos → se anulan
- Etapas de compresión y expansión adiabáticas y reversibles → isoentrópicas
- Etapas de aporte y eliminación de calor isocoras

$$\eta_{OTTO} = \frac{|W_{EXP}| - |W_{COMP}|}{|Q_{ABS}|} = \frac{|Q_{ABS}| - |Q_{CED}|}{|Q_{ABS}|} = 1 - \frac{|Q_{CED}|}{|Q_{ABS}|} \quad [4.29]$$

$$\Delta E = Q - W = 0 \rightarrow Q = W$$

4.5.1 Ciclo Otto

Rendimiento Térmico del ciclo

$$\eta_{OTTO} = 1 - \frac{|Q_{CED}|}{|Q_{ABS}|} \quad [4.3]$$

$$Q_{ABS} = C_V \cdot (T_3 - T_2) \quad (> 0) \text{ (J / kg)} \quad [4.30]$$

$$Q_{CED} = C_V \cdot (T_1 - T_4) \quad (< 0) \text{ (J / kg)} \quad [4.31]$$

$$\eta_{OTTO} = 1 - \frac{|T_1 - T_4|}{|T_3 - T_2|} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} \quad [4.32]$$

Etapas de compresión y expansión adiabáticas:

$$T_1 \cdot V_1^{\gamma-1} = T_2 \cdot V_2^{\gamma-1} \quad \therefore \quad T_4 \cdot V_4^{\gamma-1} = T_3 \cdot V_3^{\gamma-1} \quad [4.33]$$

Etapas de calentamiento y disipación de calor isocoras:

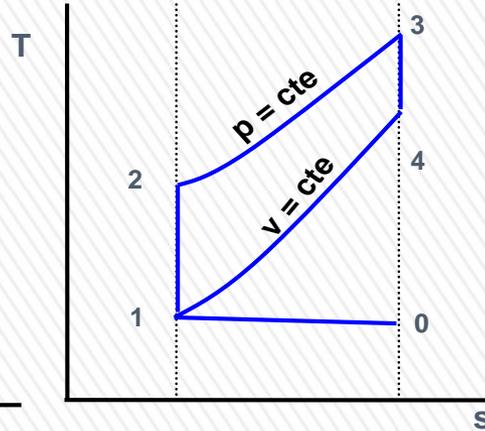
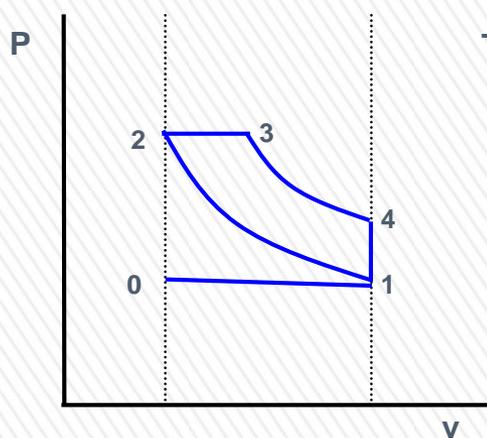
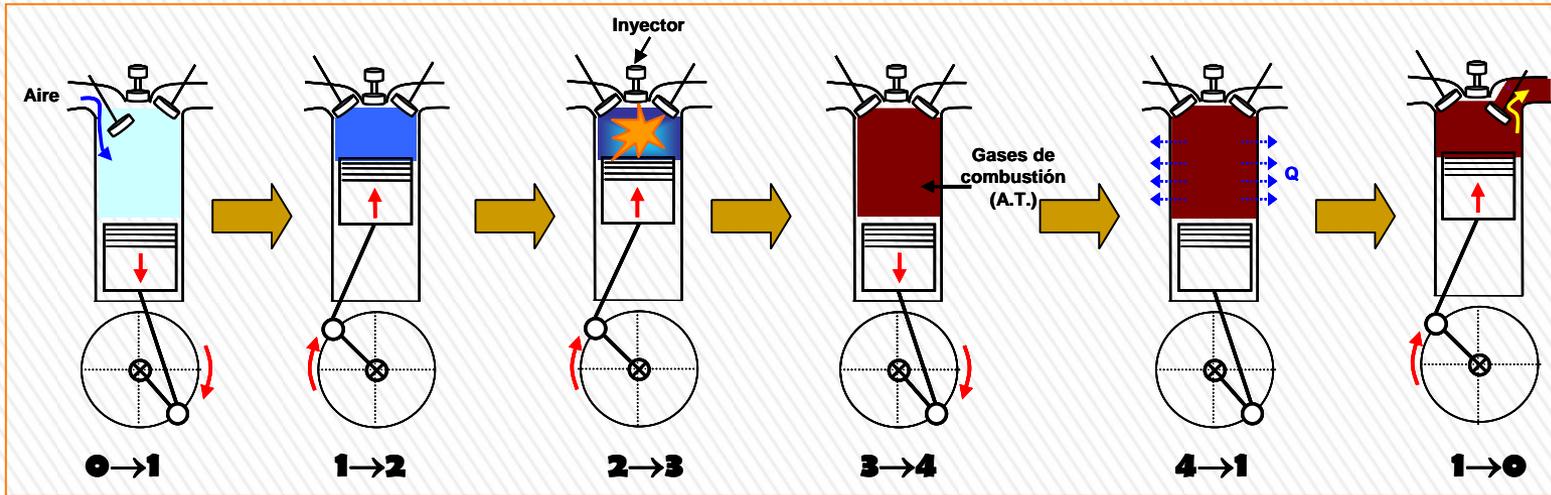
$$V_4 = V_1 \quad \therefore \quad V_3 = V_2$$

$$\eta_{OTTO} = 1 - \frac{T_1}{T_2} \quad [4.34]$$

$$\eta_{OTTO} = 1 - \frac{V_2^{\gamma-1}}{V_1^{\gamma-1}} = 1 - \frac{1}{\epsilon^{\gamma-1}} \quad [4.35]$$

Relación de compresión $\epsilon = \frac{V_1}{V_2}$

4.5.2 Ciclo Diesel

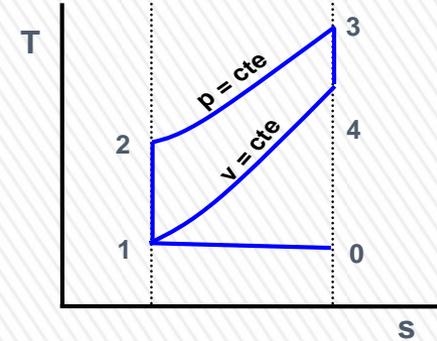


- 0→1. Carrera de aspiración
- 1→2. Carrera de compresión
- 2→3. Calentamiento instantáneo
- 3→4. Carrera de expansión
- 4→1. Disipación de calor residual
- 1→0. Carrera de expulsión

4.5.2 Ciclo Diesel

Rendimiento Térmico del ciclo

$$\eta = \frac{W_{NETO}}{Q_{TOTAL_APORTADO}} = \frac{\sum |W_{PRODUCIDO}| - \sum |W_{CONSUMIDO}|}{\sum |Q_{ABSORBIDO}|} \quad [4.1]$$



Suposiciones:

- AT no cambia de composición en todo el ciclo y es un gas ideal (aire)
- Etapas de aspiración y expulsión: a presión atmosférica y en sentidos opuestos → se anulan
- Etapas de compresión y expansión adiabáticas y reversibles → isoentrópicas
- Etapas de aporte y eliminación de calor isobara e isocora, respectivamente

$$\eta_{DIESEL} = \frac{|W_{EXP}| - |W_{COMP}|}{|Q_{ABS}|} = \frac{|Q_{ABS}| - |Q_{CED}|}{|Q_{ABS}|} = 1 - \frac{|Q_{CED}|}{|Q_{ABS}|}$$

$$\Delta E = Q - W = 0 \rightarrow Q = W$$

4.5.2 Ciclo Diesel

Rendimiento Térmico del ciclo

$$Q_{CED} = C_V \cdot (T_1 - T_4) \quad (< 0) \text{ (J / kg)} \quad [4.31]$$

$$Q_{ABS} = C_P \cdot (T_3 - T_2) \quad (> 0) \text{ (J / kg)} \quad [4.36]$$

$$\eta_{DIESEL} = 1 - \frac{C_V (T_4 - T_1)}{C_P (T_3 - T_2)} = 1 - \frac{(T_4 - T_1)}{\gamma \cdot (T_3 - T_2)} \quad [4.37]$$

Relación de combustión: $\xi = \frac{V_3}{V_2}$

Relación de compresión: $\varepsilon = \frac{V_1}{V_2}$

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

$$\eta_{DIESEL} = -\frac{1}{\gamma} \cdot \frac{1}{\varepsilon^{\gamma-1}} \cdot \left[\frac{\xi^\gamma - 1}{\xi - 1} \right] \quad [4.38]$$



4.1. Definición y Clasificación de Máquinas Térmicas

4.2. Ciclos de Motores Rotativos

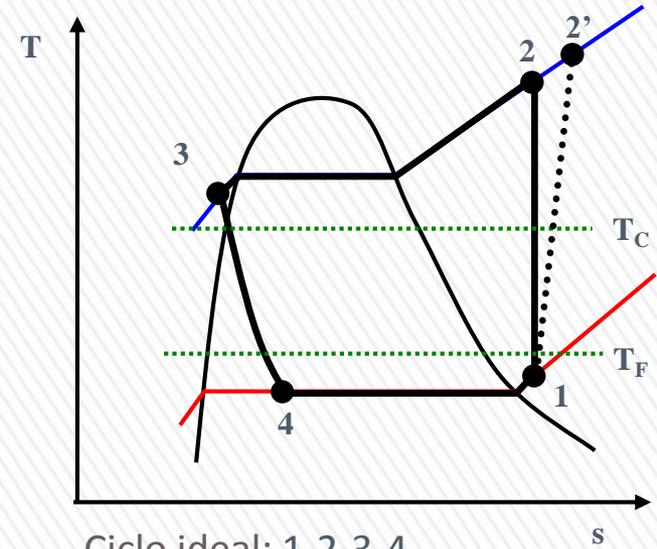
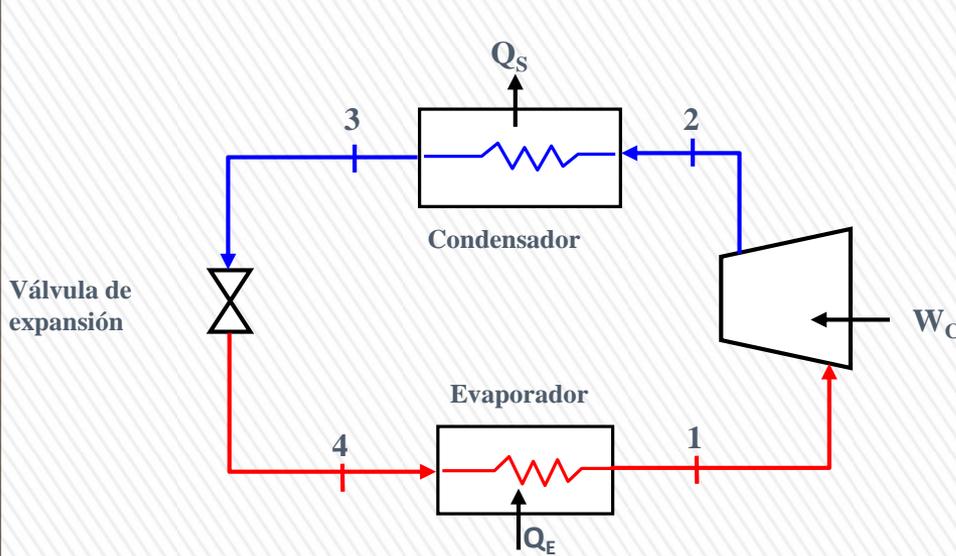
4.3. Modificaciones del ciclo Rankine

4.4. Modificaciones del ciclo Brayton

4.5. Ciclos de Motores Alternativos

4.6. Ciclos de Refrigeración

4.6.1 Ciclo de Refrigeración por Compresión de Vapor



Ciclo ideal: 1-2-3-4

Irreversibilidades en compresor: 1-2'-3-4

Ciclo ideal

- Etapa 1 → 2. Compresión isoentrópica del refrigerante
- Etapa 2 → 3. Condensación y enfriamiento del refrigerante a presión constante
- Etapa 3 → 4. Estrangulación o expansión isoentálpica en la válvula
- Etapa 4 → 1. Evaporación del refrigerante a presión constante

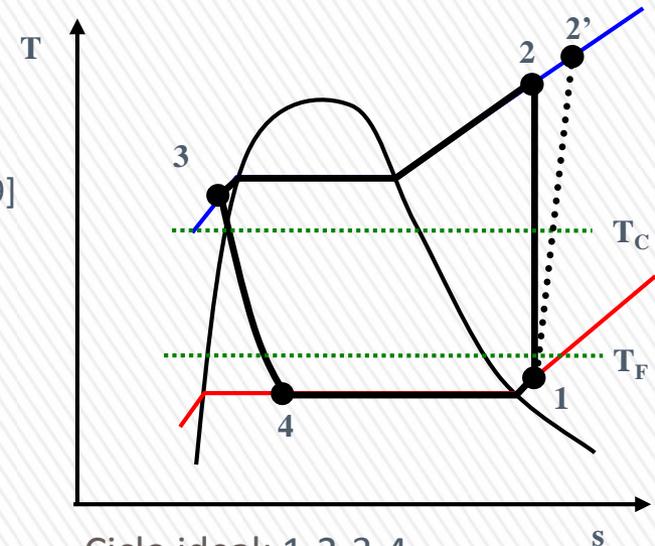
4.6.1 Ciclo de Refrigeración por Compresión de Vapor

Coeficiente de Operación

$$\beta = \frac{\text{Efecto refrigerante}}{\text{Trabajo consumido}} = \frac{|Q_E|}{|W_C|} = \frac{|h_1 - h_4|}{|h_1 - h_2|} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} \quad [4.39]$$

Irreversibilidades en Compresor

$$\eta_c = \frac{|W_C|_s}{|W_C|} = \frac{|h_1 - h_2|}{|h_1 - h_{2'}|} \quad [4.40]$$



Ciclo ideal: 1-2-3-4

Irreversibilidades en compresor: 1-2'-3-4

Refrigerante: derivados halogenados de hidrocarburos (CFCs, FCs, etc.)

4.6.2 Ciclo de Refrigeración por Absorción

Refrigerante

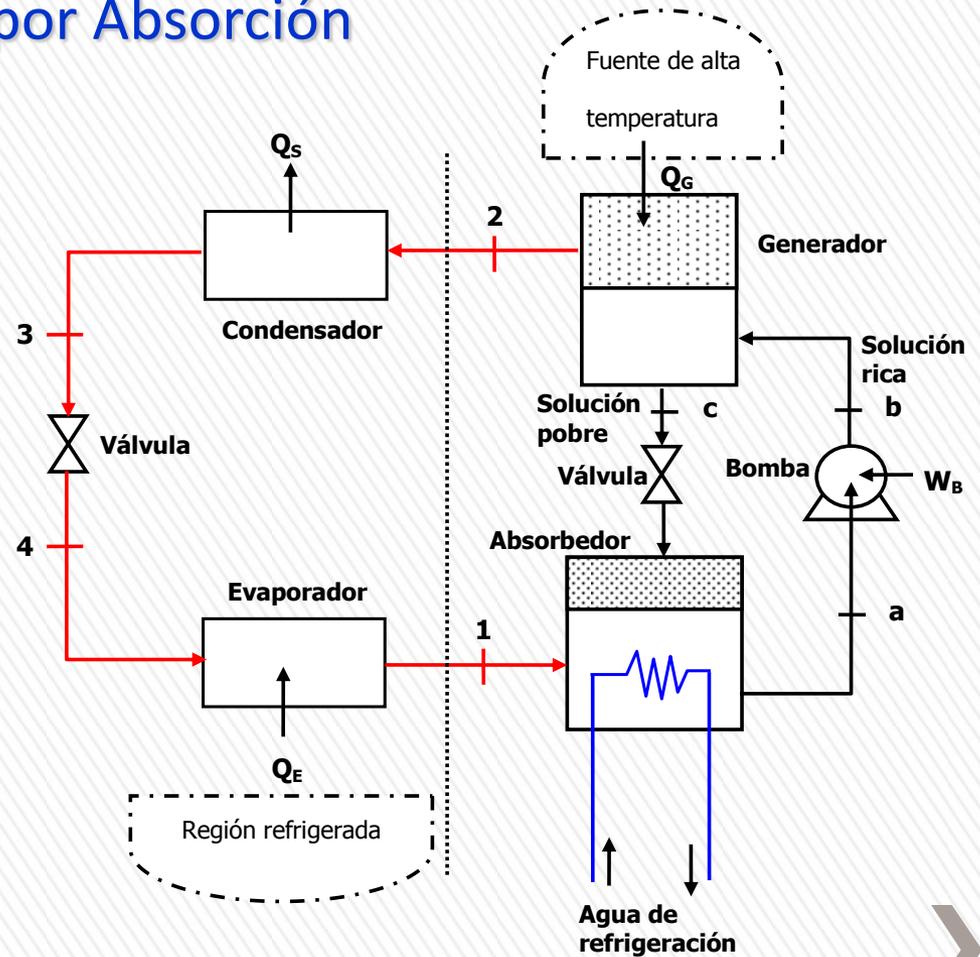
Disolvente

Amoníaco

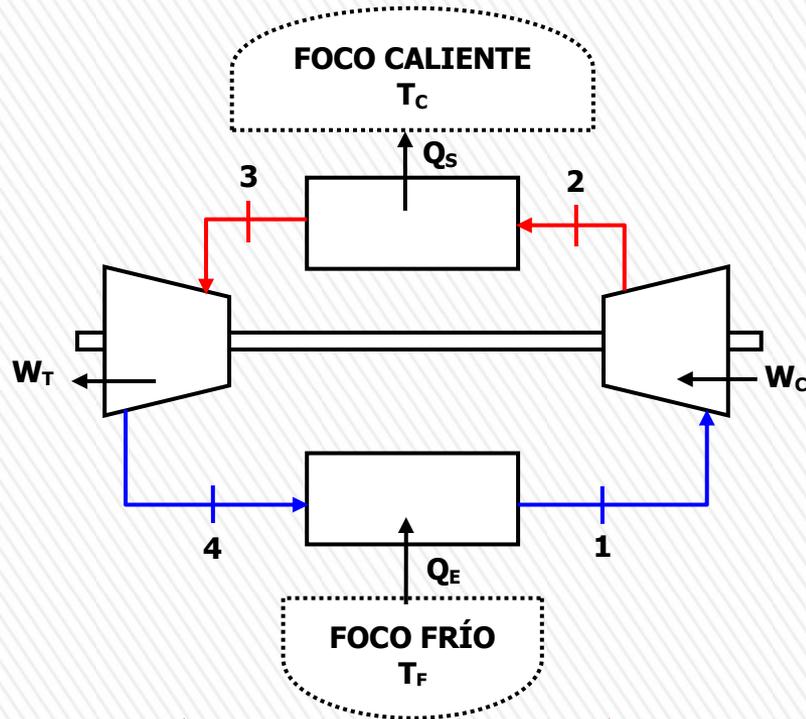
Agua

Agua

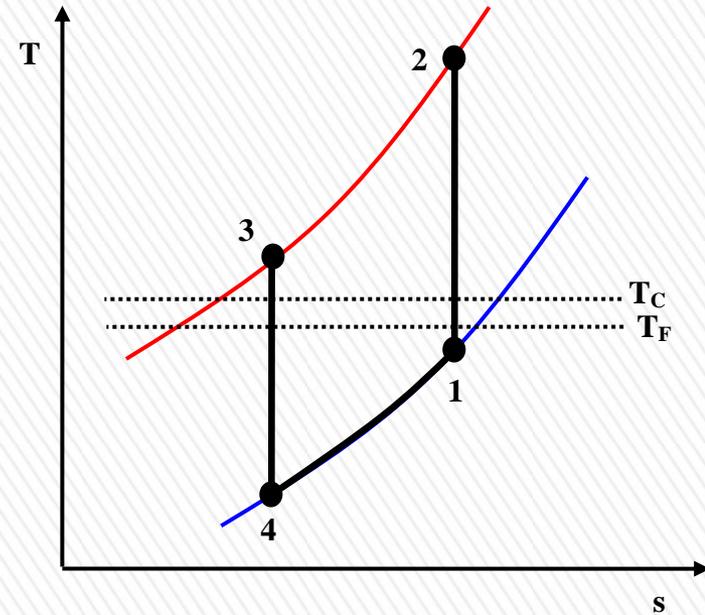
Bromuro de litio



4.6.3 Ciclo de Brayton Invertido



Refrigerante: aire



Coeficiente de Operación

$$\beta = \frac{|Q_E|}{|W_C| - |W_T|} = \frac{|h_1 - h_4|}{|h_1 - h_2| - |h_3 - h_4|}$$



1.- Fundamentos de termodinámica técnica. M. J. Morán y H. N. Shapiro.
Editorial Reverté, Barcelona, 1998-1999.

2.- Termotecnia básica para ingenieros químicos. A. de Lucas. Ediciones
de la Universidad de Castilla La Mancha, 2004-2007