3. Ciclos de vapor y gas

1. INTRODUCCIÓN
2. CICLO DE RANKINE
3. CICLO DE BRAYTON

Motor Rotativo:

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

Turbinas de Vapor

- Combustión externa
- Agente Transf.: agua

Ciclo Rankine

Turbinas de gas

- Combustión interna
- A.T.: gases de combustión

Ciclo Brayton

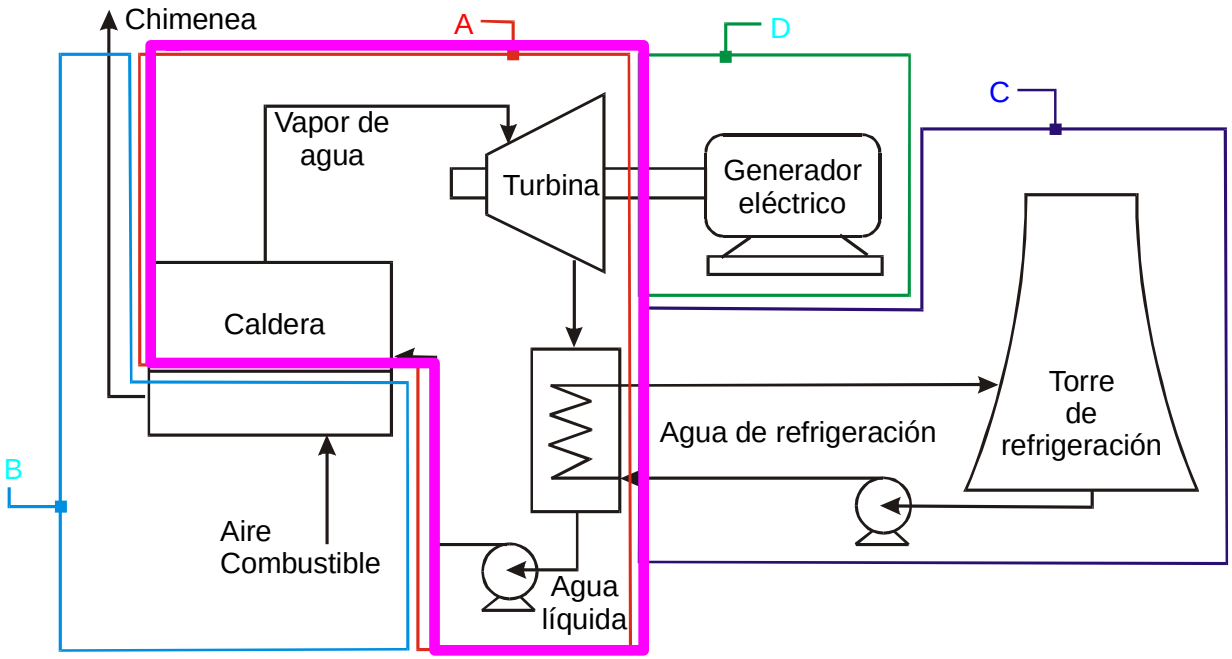
CICLO RANKINE

ZONA B: Foco caliente. Generación de calor.

ZONA A: Ciclo termodinámico del agente de transformación (AT). Transformación de la entalpía del vapor en energía cinética en del eje de la turbina (W).

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

www.tectrapro.com

CICLO RANKINE IDEAL

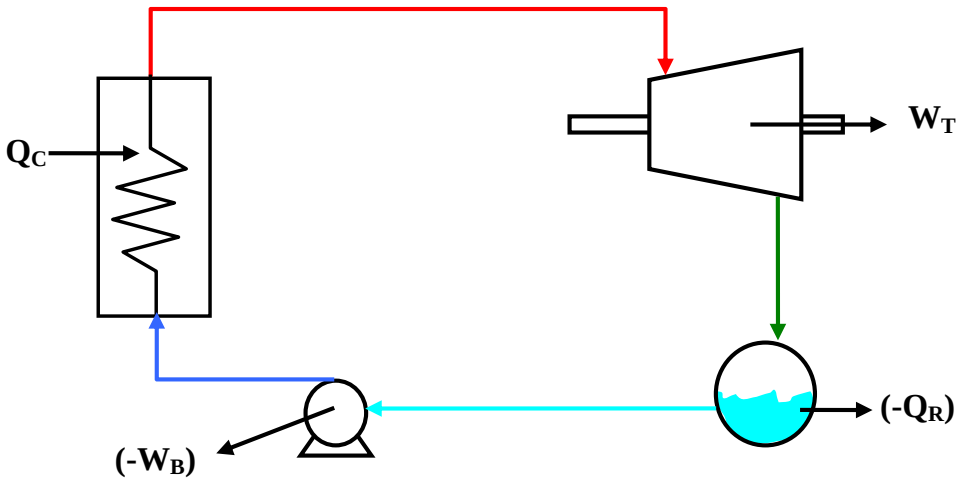
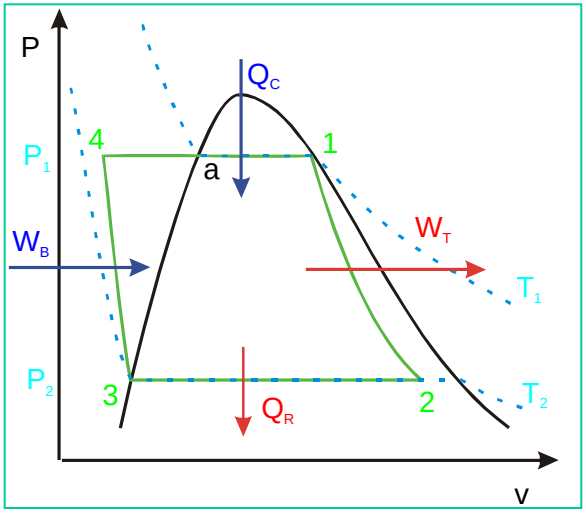
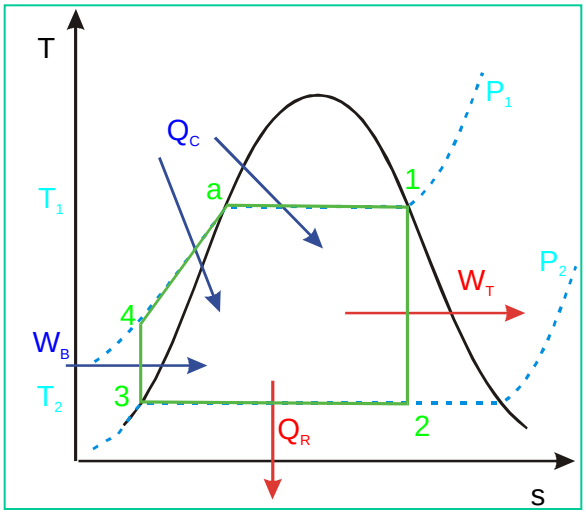


Diagrama de bloques ciclo Rankine



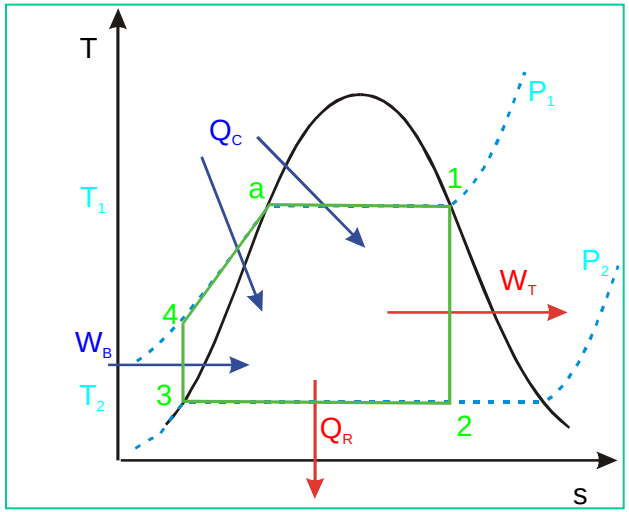


Suposiciones:

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

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

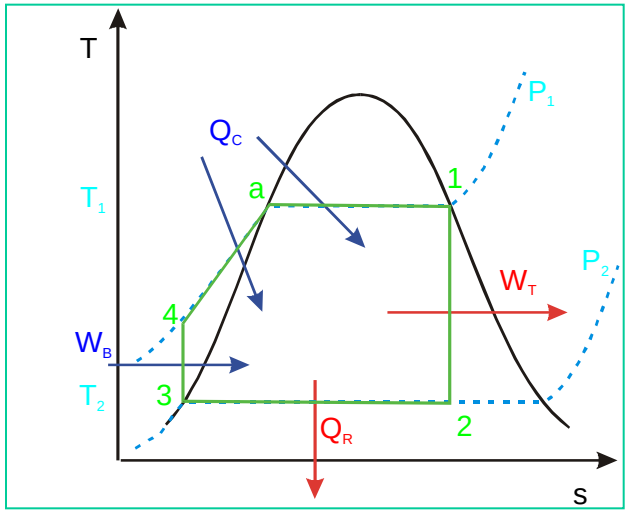
Principio de conservación de energía:

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

$$W_T = (h_1 - h_2) \qquad [6.3]$$

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

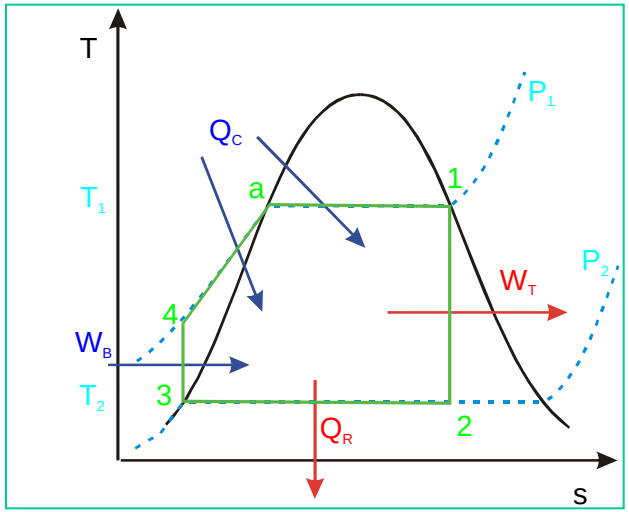
Principio de conservación de energía:

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

$$\boxed{(-Q_R) = (h_2 - h_3)} \qquad [6.4]$$

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:

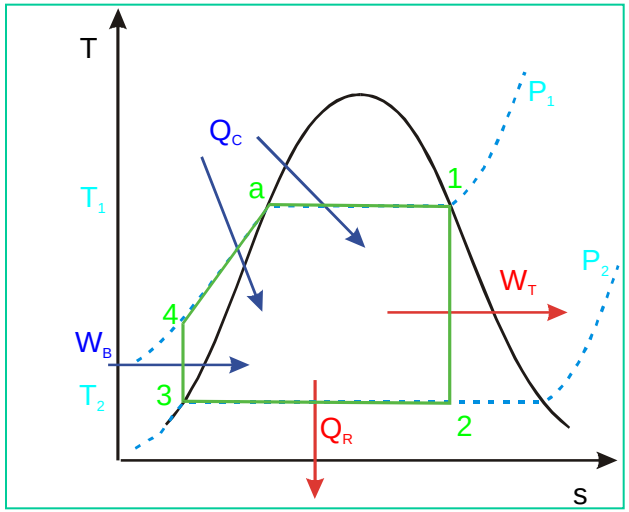
$$\left(-W_B\right)=\left(h_4-h_3\right) \qquad [6.5]$$

Considerando la compresión del líquido:

$$\left(-W_B\right)=\int_3^4 v\,dp=v_3\left(p_4-p_3\right) \qquad [6.6]$$

CICLO RANKINE IDEAL

Rendimiento Térmico de Ciclo:



- Etapa 4→1: calentamiento en la caldera

Entrada a la caldera: líquido subenfriado

Salida del condensador: vapor saturado seco

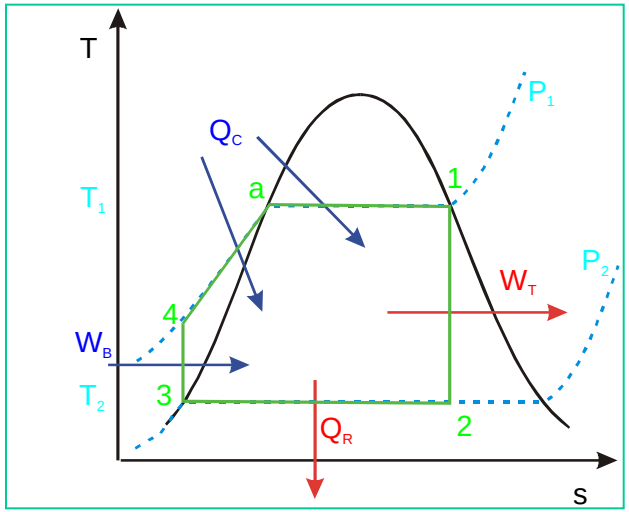
Proceso: aporte de calor Q_C a presión constante

Principio de conservación de energía:

$$(Q_C) = (h_1 - h_4) \qquad [6.7]$$

CICLO RANKINE IDEAL

Rendimiento Térmico de Ciclo:



$$\eta_{RANKINE} = \frac{W_T - (-W_B)}{Q_C} = \frac{(h_1 - h_2) - (h_4 - h_3)}{(h_1 - h_4)} \quad [6.8]$$

Trabajo neto realizado en un ciclo

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

$$\eta_{RANKINE} = \frac{Q_C - (-Q_R)}{Q_C} = 1 - \frac{(-Q_R)}{Q_C} = 1 - \frac{h_2 - h_3}{h_1 - h_4} \quad [6.9]$$

Relación de trabajos

$$RT = \frac{(-W_B)}{W_T} = \frac{h_4 - h_3}{h_1 - h_2} \quad [6.11]$$

Aplicando 2º Principio de la Termodinámica

$$\eta_{RANKINE} = 1 - \frac{(-Q_R)}{Q_C} = 1 - \frac{T_2 \cdot (s_2 - s_3)}{T_C \cdot (s_1 - s_4)} = 1 - \frac{T_2}{T_C} \quad [6.10]$$

CICLO RANKINE con NO IDEALIDADES

Irreversibilidades y Pérdidas:

Desviaciones del ciclo de Rankine ideal:

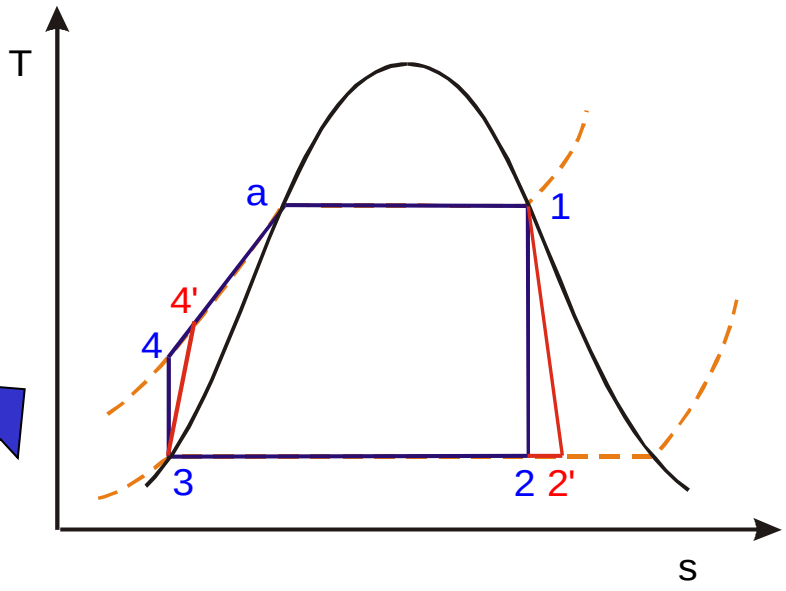
a) Pérdidas de energía en el condensador y la caldera por cesión de calor al exterior

b) Pérdidas de energía por rozamiento del fluido en el condensador, caldera y tuberías

c) Irreversibilidades en la turbina y en la bomba
   - Procesos no adiabáticos
   - Pérdidas de energía por rozamiento

$$\eta_{TV} = \frac{W_T}{(W_T)_S} = \frac{h_1 - h_{2'}}{h_1 - h_2} \qquad [6.12]$$

$$\eta_B = \frac{(-W_B)_S}{(-W_B)} = \frac{h_4 - h_3}{h_{4'} - h_3} \qquad [6.13]$$



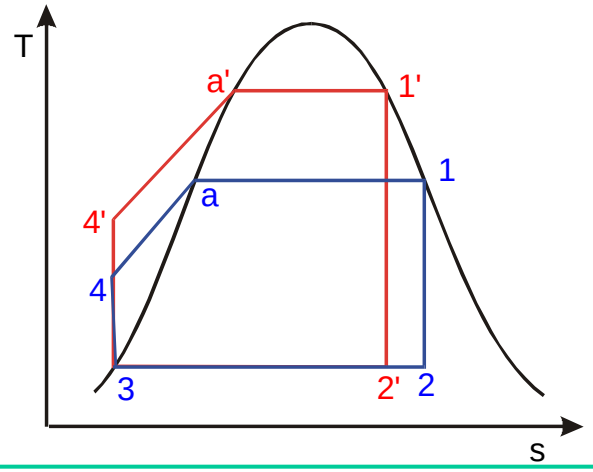
MODIFICIACIONES DEL CICLO RANKINE

$$\eta_{RANKINE} = \frac{W_T - (-W_B)}{Q_C} \quad [6.8]$$

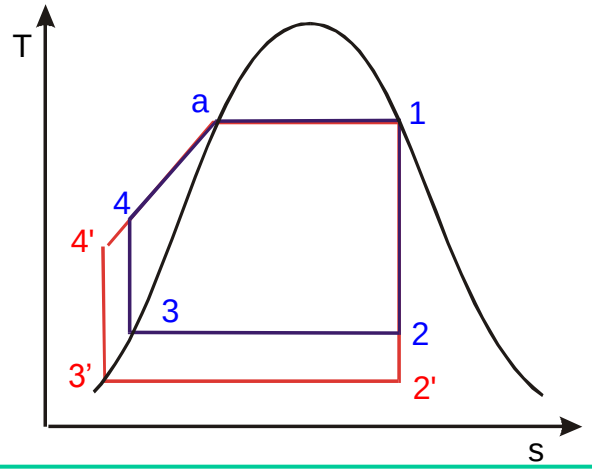
$$\eta_{RANKINE} = 1 - \frac{T_2}{T_C} \quad [6.10]$$

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:

$X_2 > 90\ \%$

MODIFICIACIONES DEL CICLO RANKINE

$$\eta_{RANKINE} = \frac{W_T - (-W_B)}{Q_C} \quad [6.8]$$

$$\eta_{RANKINE} = 1 - \frac{T_2}{T_C} \quad [6.10]$$

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

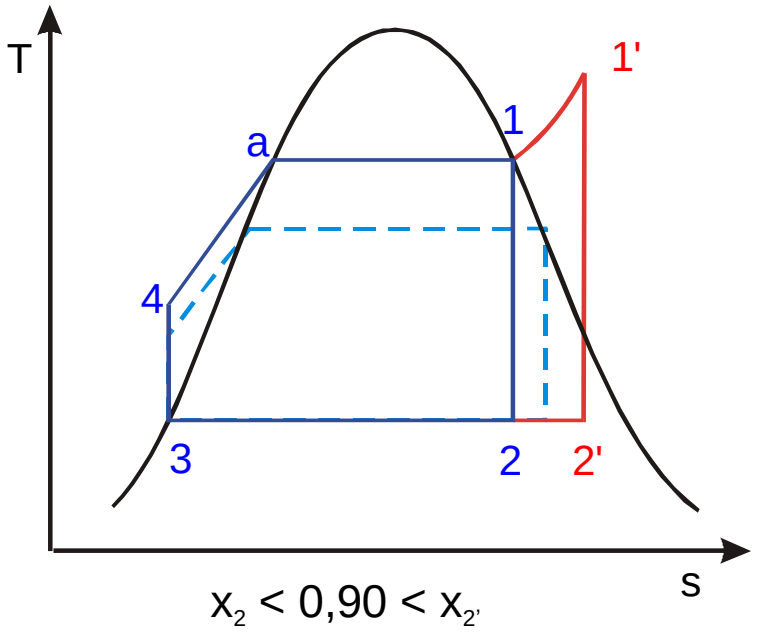
Requisito práctico: $X_2 > 90\ \%$ → Aumento de η limitado mediante los procedimientos A y B.

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

MODIFICIACIONES DEL CICLO RANKINE

C. Sobrecalentamiento (o recalentamiento)

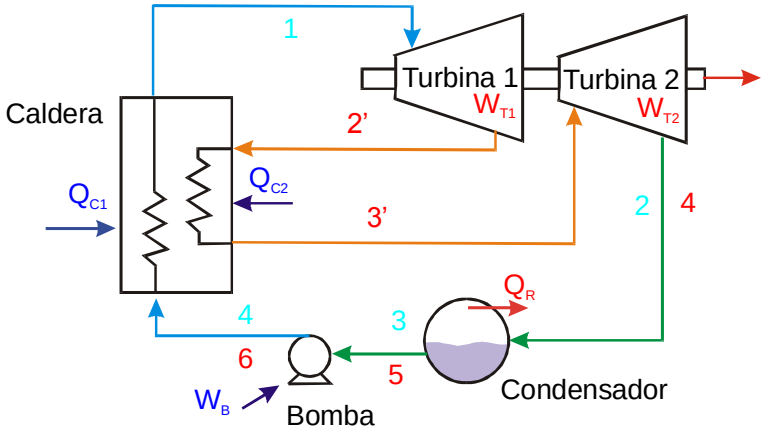
Obtención de vapor recalentado en la caldera a temperatura superior a la de saturación.

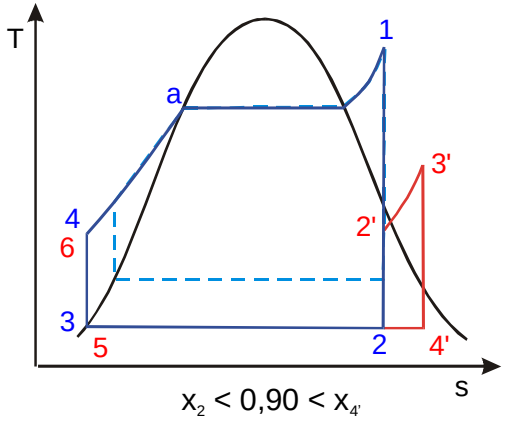


MODIFICIACIONES DEL CICLO RANKINE

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

$$\eta = \frac{W_{T1} + W_{T2} - (-W_B)}{Q_{C1} + Q_{C2}} \qquad [6.20]$$

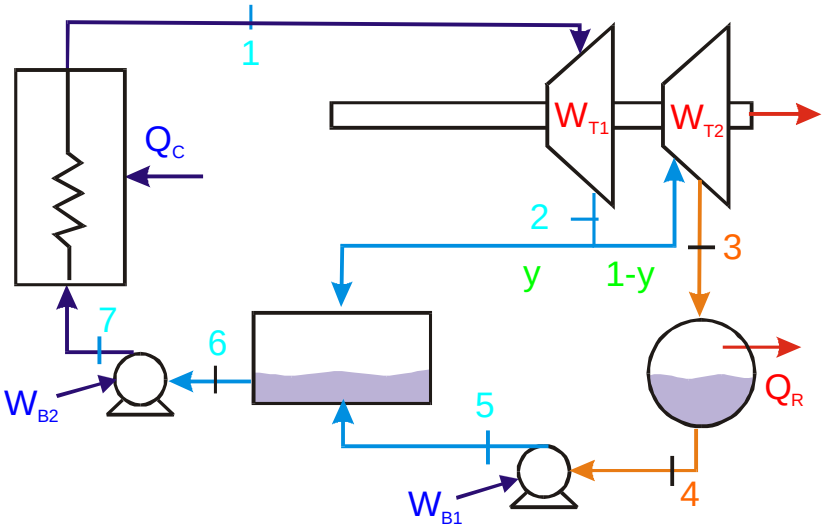
MODIFICIACIONES DEL CICLO RANKINE

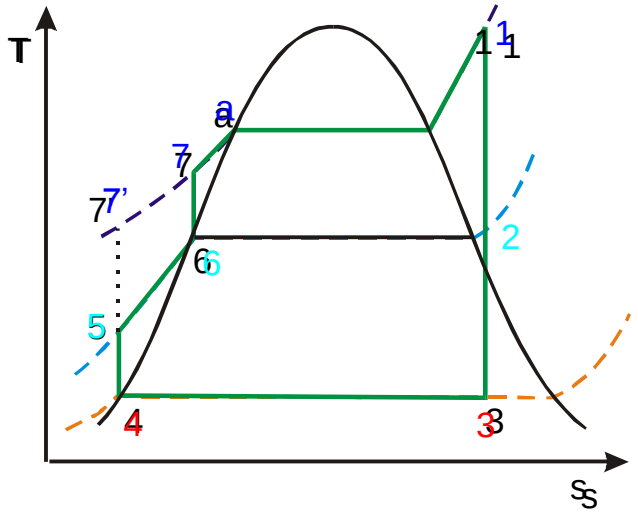
E. Regeneración

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





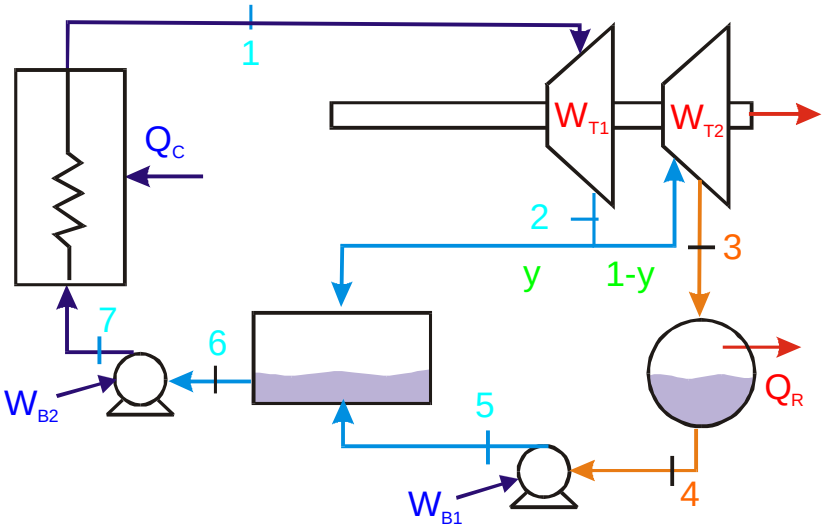
MODIFICIACIONES DEL CICLO RANKINE

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

$$\eta = \frac{W_{T1} + W_{T2} - \left[\left(-W_{B1}\right) + \left(-W_{B2}\right)\right]}{Q_C} \qquad [6.21]$$



Trabajos del ciclo

$W_{T1} = h_1 - h_2$

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

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

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

Intercambios de calor

$Q_C = h_1 - h_7$

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

Balance de energía en calentador

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

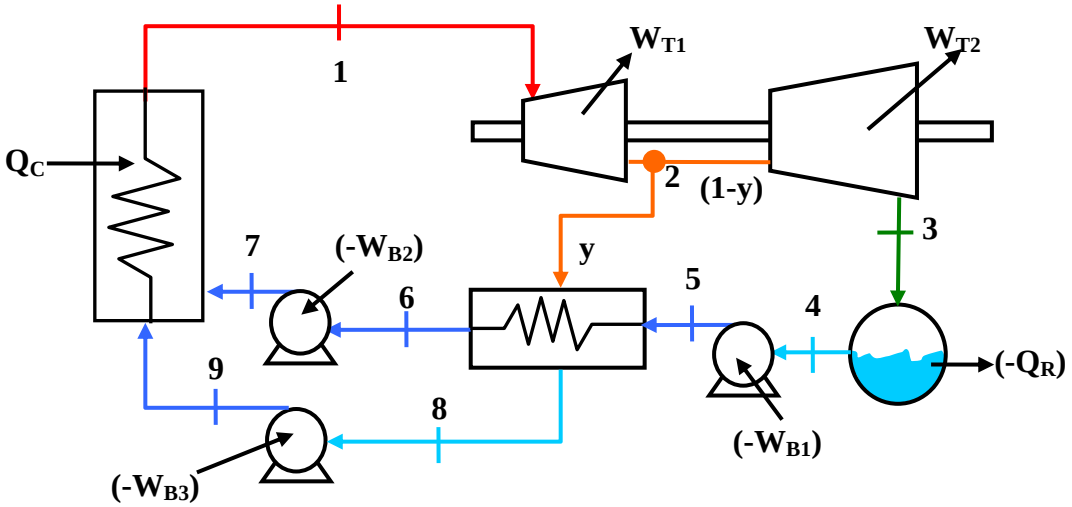
MODIFICIACIONES DEL CICLO RANKINE

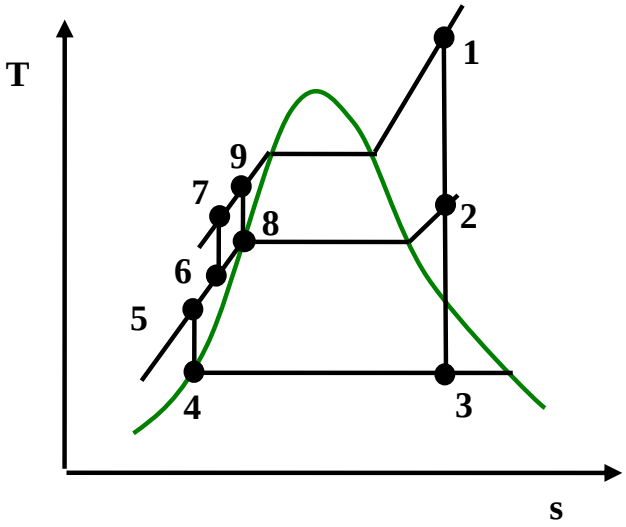
E. Regeneración

E.2 Cambiadores cerrados

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

OPCIÓN 1. Bombeo a caldera





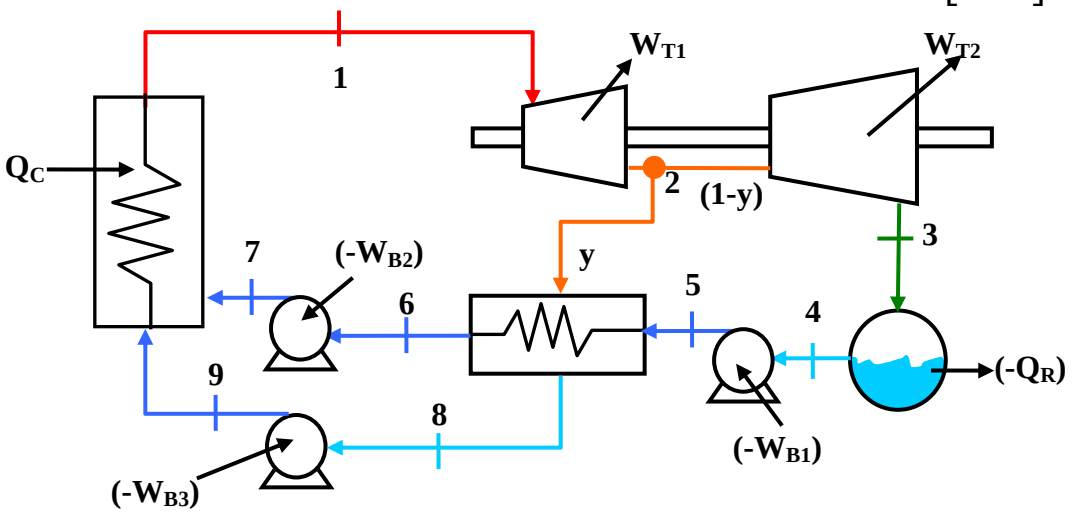
MODIFICIACIONES DEL CICLO RANKINE

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



[6.22]

$$\eta = \frac{W_{T1} + W_{T2} - \left[\left(-W_{B1}\right) + \left(-W_{B2}\right) + \left(-W_{B3}\right)\right]}{Q_C}$$

$$W_{T1} = h_1 - h_2 \qquad W_{T2} = (h_2 - h_3)\cdot(1-y)$$

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

$$\left(-W_{B2}\right) = (h_7 - h_6)\cdot(1-y)$$

$$\left(-W_{B3}\right) = (h_9 - h_8)\cdot(y)$$

$$Q_C = (h_1 - h_7)\cdot(1-y) - h_9\cdot(y)$$

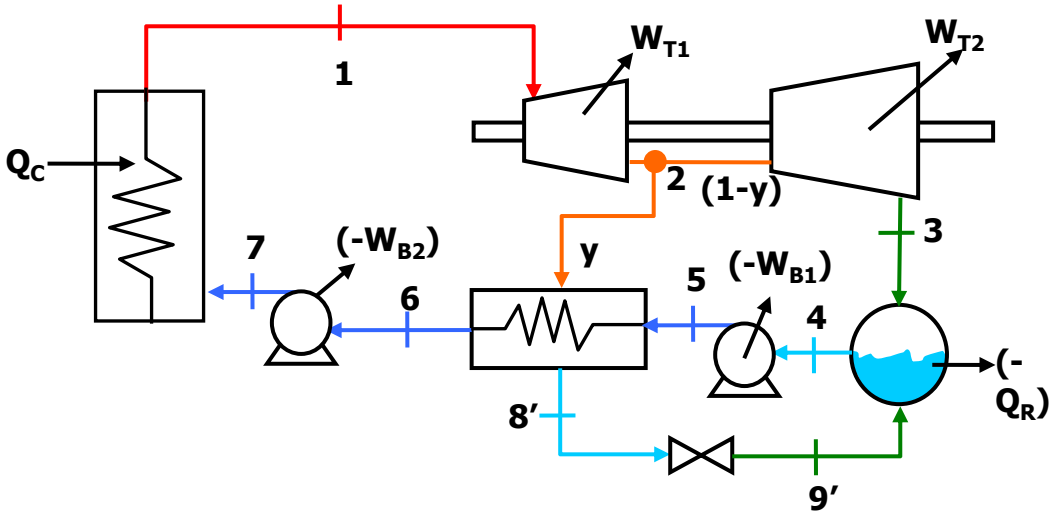
MODIFICIACIONES DEL CICLO RANKINE

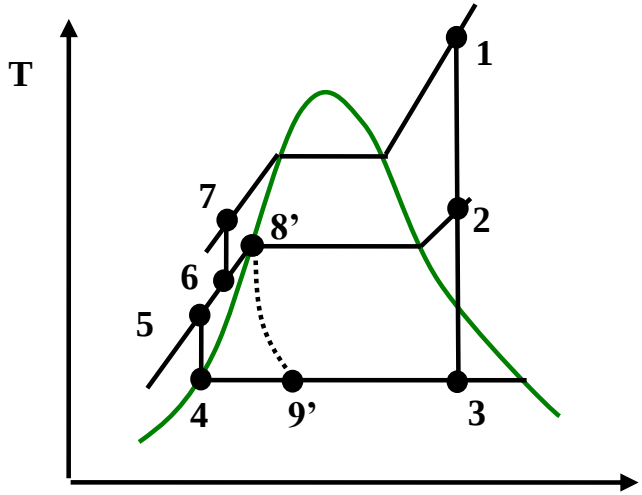
E. Regeneración

E.2 Cambiadores cerrados

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

OPCIÓN 2. Envío a condensador





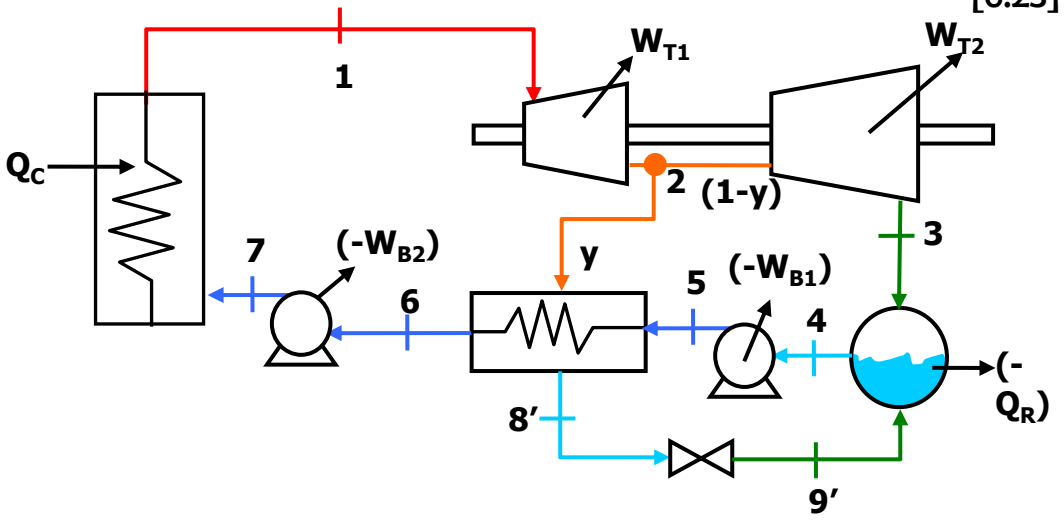
MODIFICIACIONES DEL CICLO RANKINE

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



[6.23]

$$\eta = \frac{W_{T1} + W_{T2} - \left[\left(-W_{B1}\right) + \left(-W_{B2}\right)\right]}{Q_C}$$

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

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

$$\left(-W_{B1}\right) = (h_5 - h_4)$$

$$\left(-W_{B2}\right) = (h_7 - h_6)$$

$$Q_C = h_1 - h_7$$

MODIFICIACIONES DEL CICLO RANKINE

E. Regeneración

E.2 Cambiadores cerrados

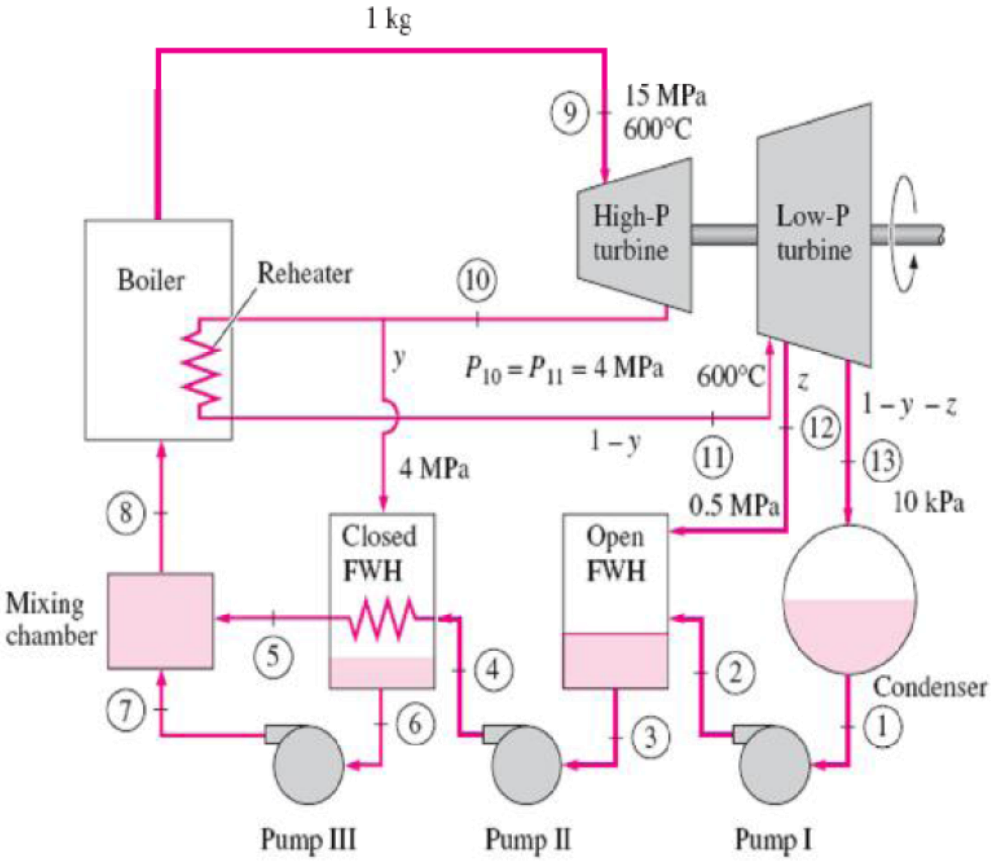
Sin contacto directo de las corrientes fría y caliente (cambiador de carcasa y tubos)

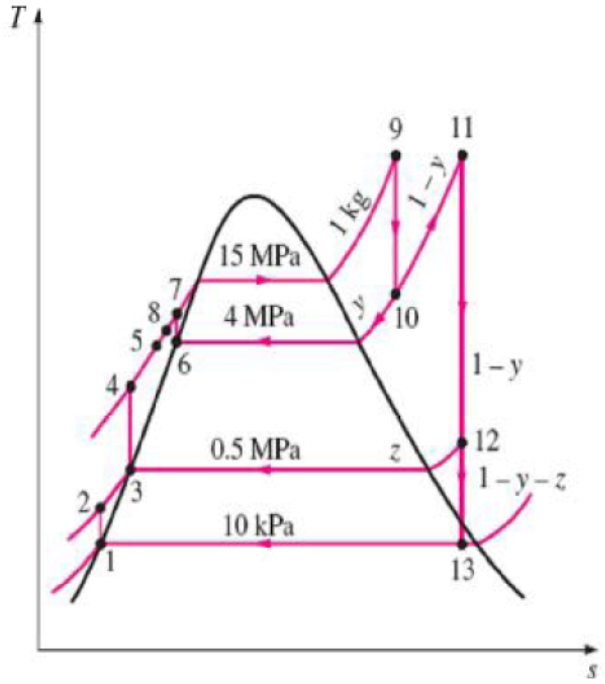
Balance de energía en calentador

$$m \cdot y \cdot h_2 + m \cdot h_5 = m \cdot y \cdot h_8 + m \cdot h_6 \quad \therefore \quad y = \frac{h_6 - h_5}{h_2 - h_8} \qquad [6.24]$$

MODIFICIACIONES DEL CICLO RANKINE

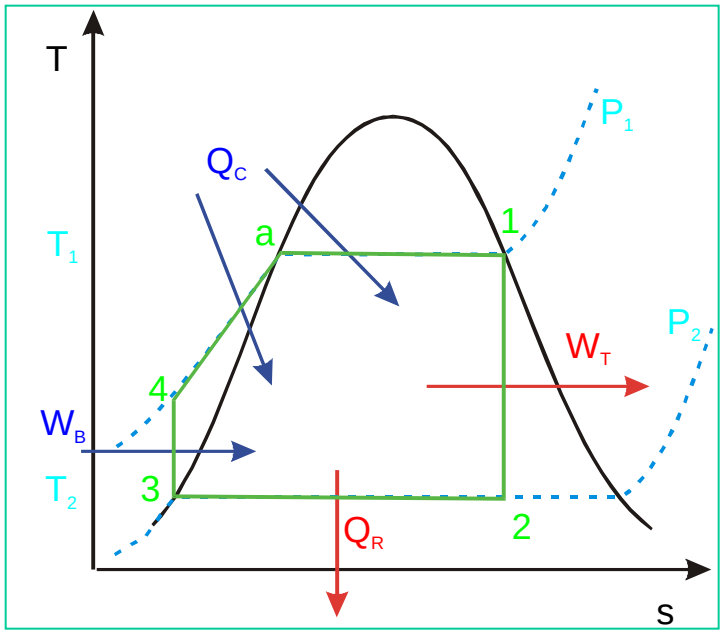
Combinación de modificaciones





Ejercicio Nº 1

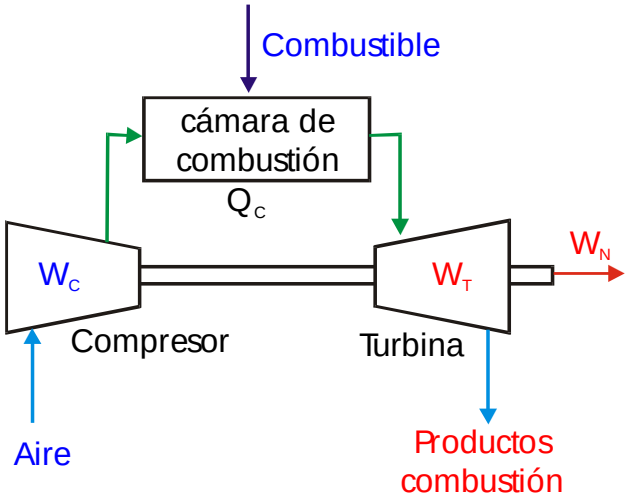
El fluido de trabajo de un ciclo Rankine Ideal es vapor de agua. A la turbina entra vapor saturado a 8,0 MPa y del condensador sale líquido saturado a la presión de 0,008 MPa. La potencia neta obtenida es de 100 MW. Determínese para el ciclo:



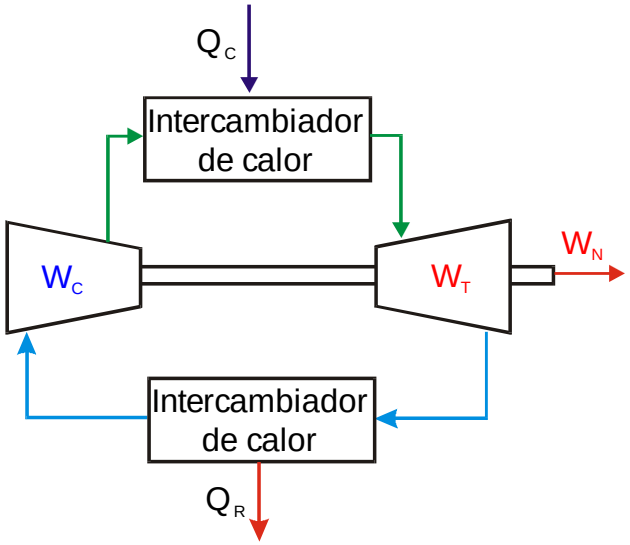
a) Rendimiento térmico
b) Relación de trabajos
c) Flujo másico de vapor en kg/h
d) Calor absorbido en el paso por caldera
e) El calor cedido en el condensador

Utilícese tablas de vapor de agua

	Rendimiento máximo	Rendimiento real
Turbinas de vapor (550 ºC)	65 %	40-45%
Turbinas de gas (1000-1400 ºC)	83 %	62 %

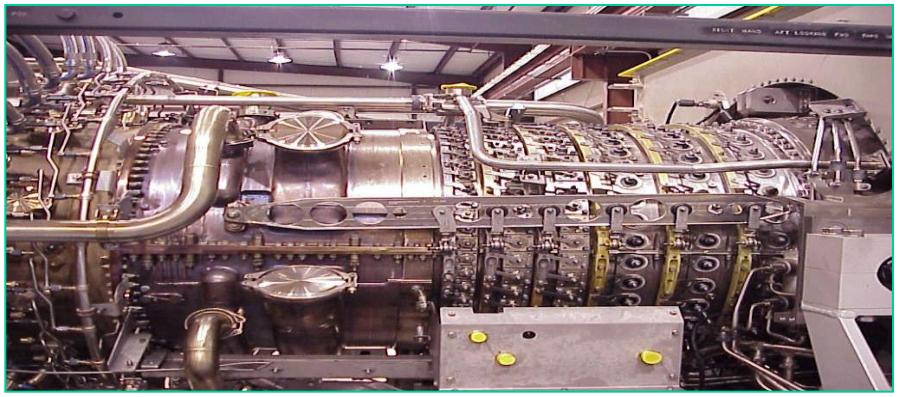


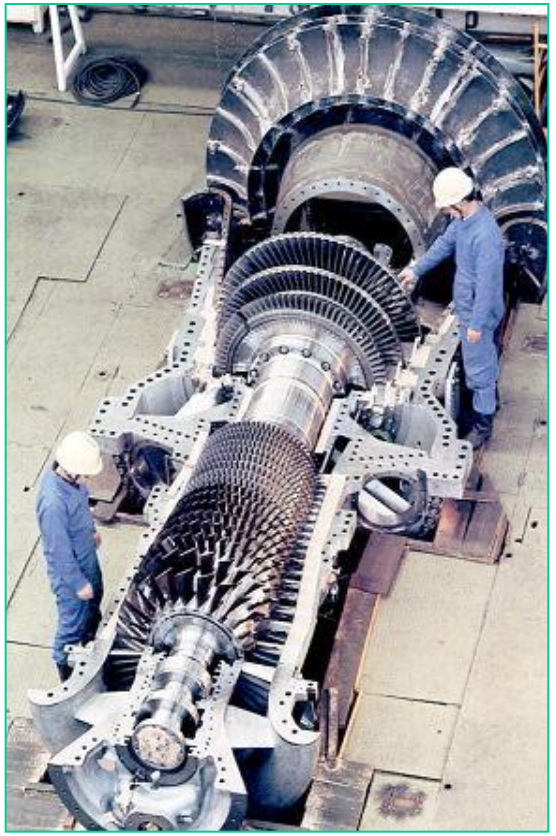
Ciclo abierto



Ciclo cerrado

Gas Turbines





CICLO DE BRAYTON IDEAL

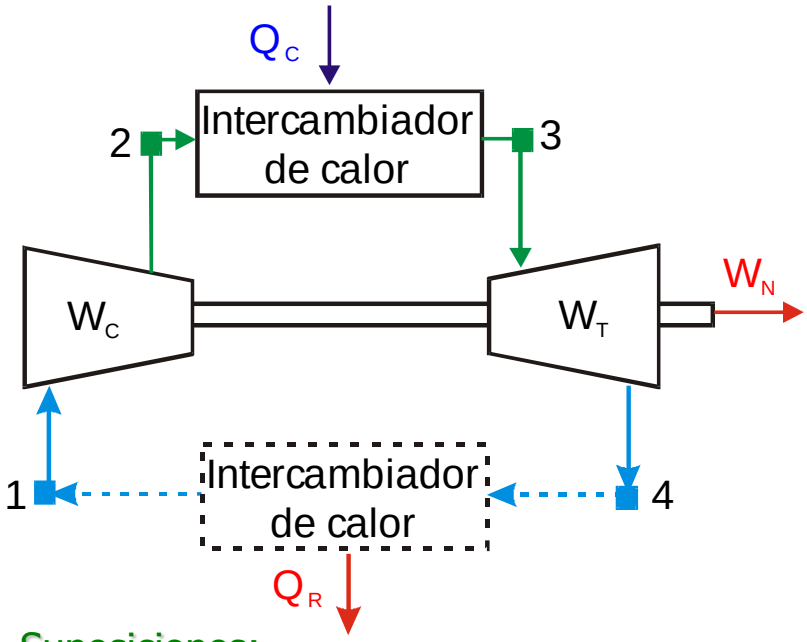
Ciclo abierto

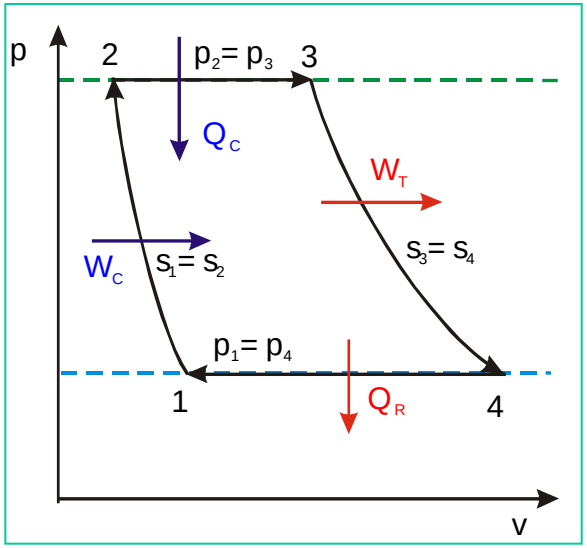
Inconveniente: el agente de transformación cambia de composición

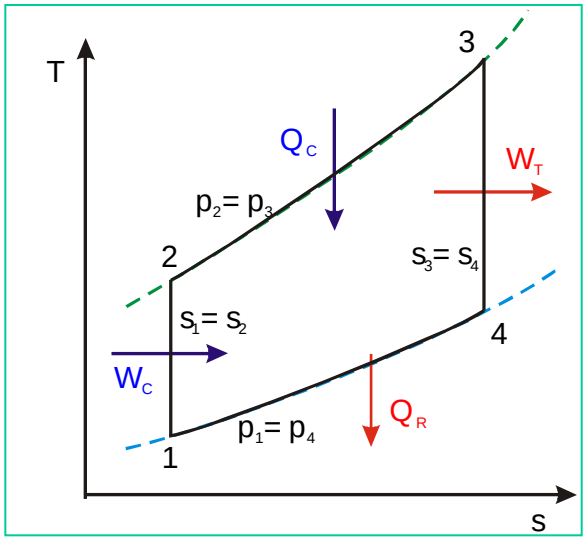
Análisis de aire estándar

- ✓ 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

CICLO DE BRAYTON IDEAL







Suposiciones:

- Todos los procesos son reversibles
- Sin pérdidas de presión en la circulación del AT
- Cambiadores a P = cte
- Turbina y compresor adiabáticos → isoentrópicos

CICLO DE BRAYTON IDEAL

Rendimiento Térmico de Ciclo:

$$\eta_{BRAYTON} = \frac{W_T - (-W_C)}{Q_C} = \frac{(h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)}{(h_3 - h_2)} \qquad [6.\ 14]$$

Relación de Trabajos:

$$RT = \frac{(-W_C)}{W_T} = \frac{h_2 - h_1}{h_3 - h_4} \qquad [6.\ 15]$$

	Relación de trabajos (RT)
Turbinas de vapor	1-3 %
Turbinas de gas	40-80 %

CICLO DE BRAYTON IDEAL

Análisis de Aire Estándar Frío:

Se supone C_P y C_V= cte $\rightarrow \gamma$ = cte

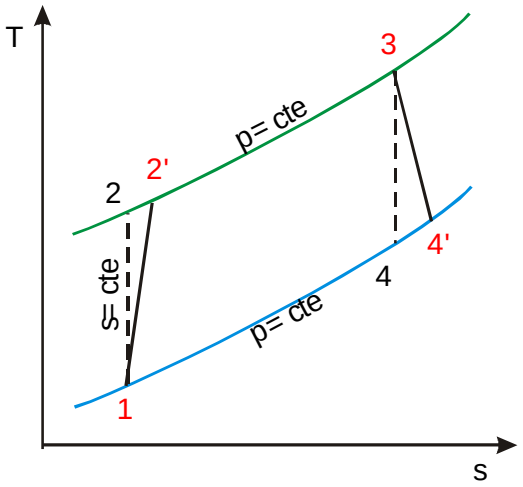
$$\eta = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \frac{T_4}{T_3} \qquad [6.16]$$

Compresión adiabática y reversible:

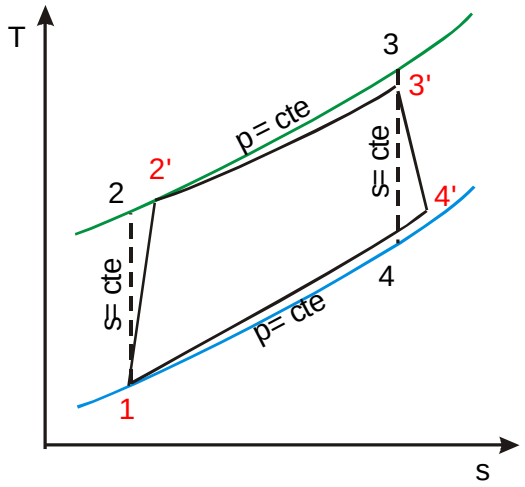
$$T_2 = T_1 \cdot \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \longrightarrow \eta = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \frac{1}{\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} \qquad [6.17]$$

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

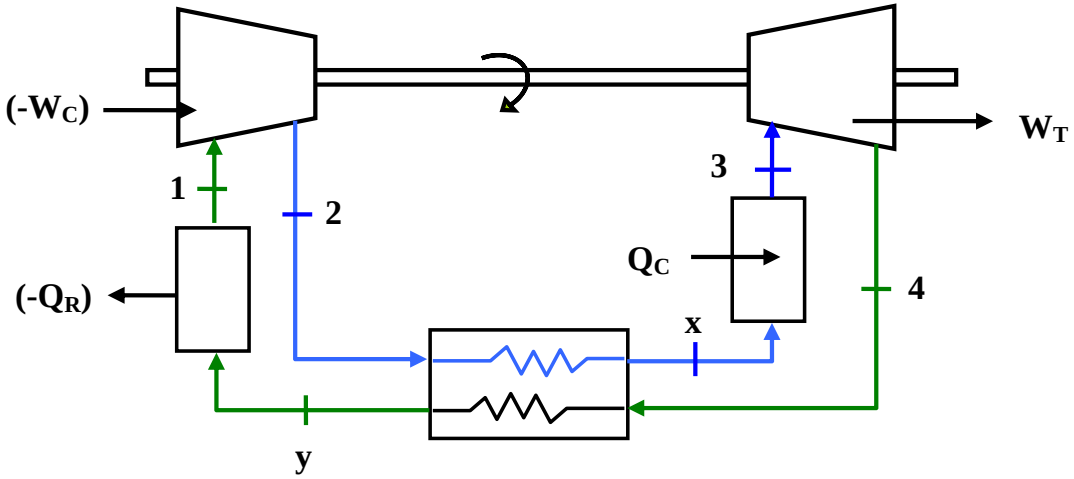
$$\eta_{TG} = \frac{W_T}{(W_T)_s} = \frac{h_3 - h_{4'}}{h_3 - h_4} \quad [6.18]$$

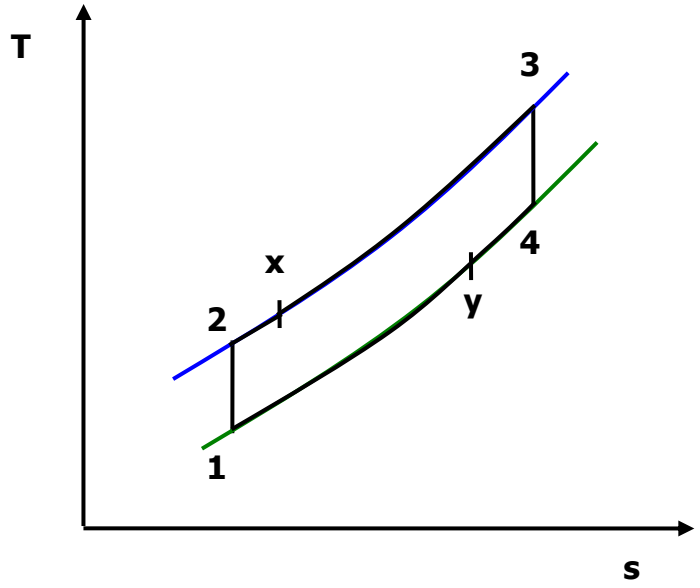
$$\eta_C = \frac{(-W_C)_s}{(-W_C)} = \frac{h_2 - h_1}{h_{2'} - h_1} \quad [6.19]$$

MODIFICIACIONES DEL CICLO BRAYTON

A. Regeneración

Objetivo: disminuir Q_C Requisito: $T_4 > T_2$



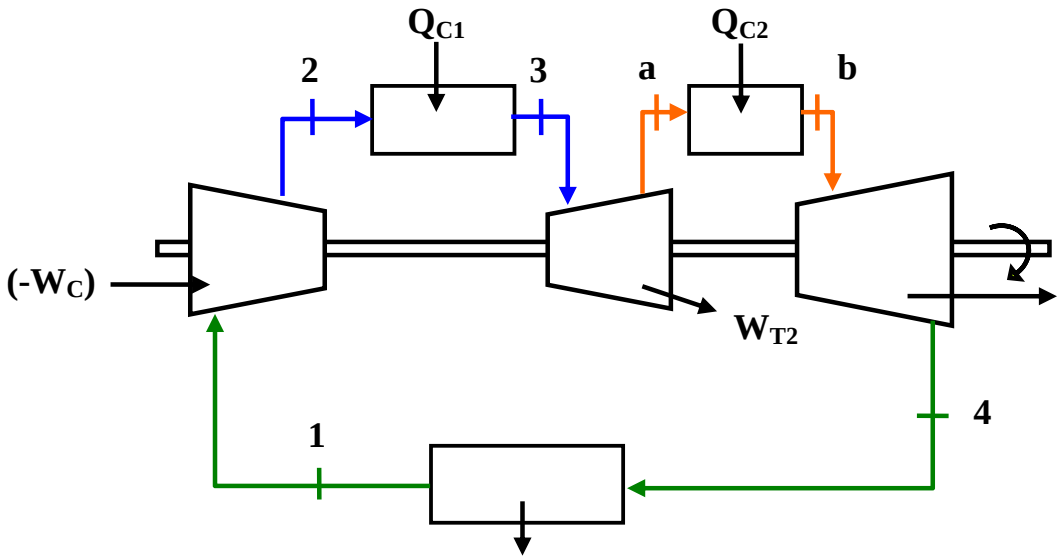


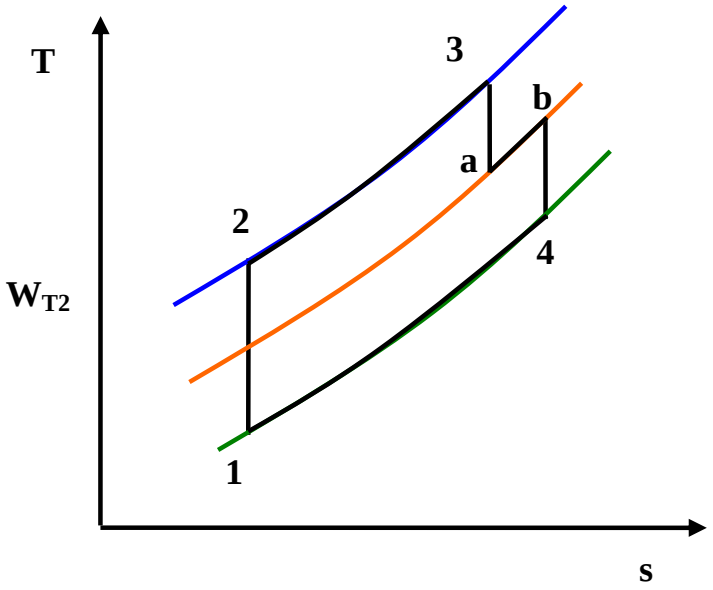
$$|Q_c| = h_3 - h_x \Rightarrow \eta_{reg} = \frac{h_x - h_2}{h_4 - h_2} \quad [6.25] \Rightarrow \eta_{REG} \sim 75\%$$

MODIFICIACIONES DEL CICLO BRAYTON

B. Doble aporte de calor (combustión en doble etapa)

Objetivo: Aumentar W_T





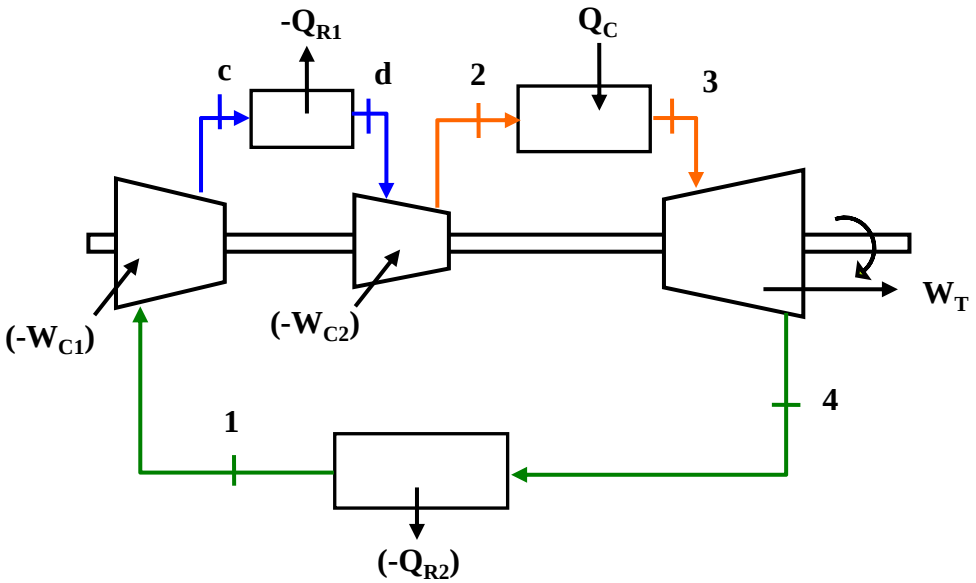
$$\eta = \frac{W_{T1} + W_{T1} - (-W_C)}{Q_{C1} + Q_{C1}} \qquad [6.26]$$

- η no necesariamente aumenta
- Mayor potencial de regeneración

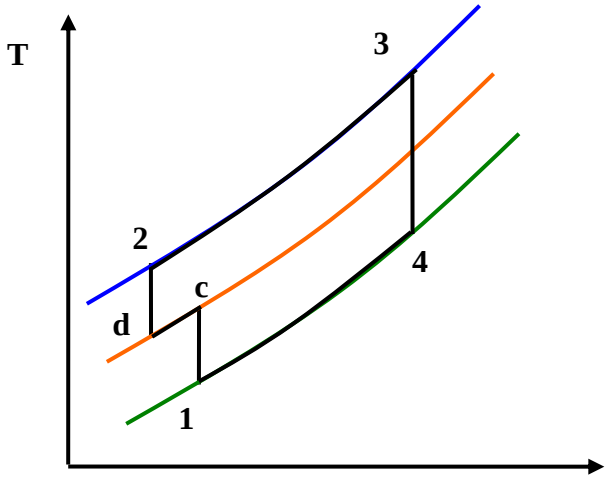
MODIFICIACIONES DEL CICLO BRAYTON

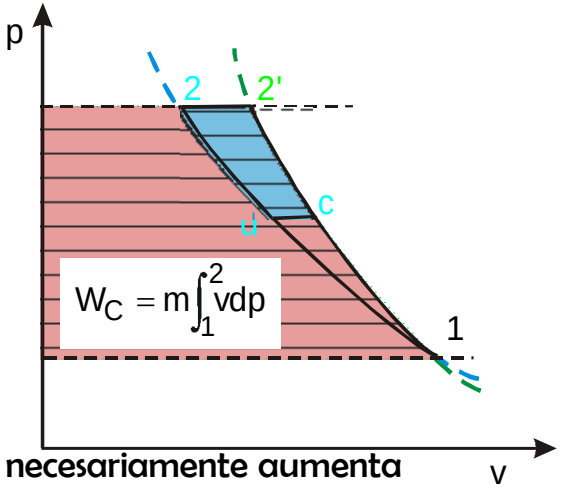
C. Compresión con refrigeración

Objetivo: Disminir W_C (aunque aumenta Q_C)



$$\eta_T = \frac{W_T - [(-W_{C1}) + (-W_{C2})]}{Q_C} \qquad [6.27]$$





- η no necesariamente aumenta
- Mayor potencial de regeneración