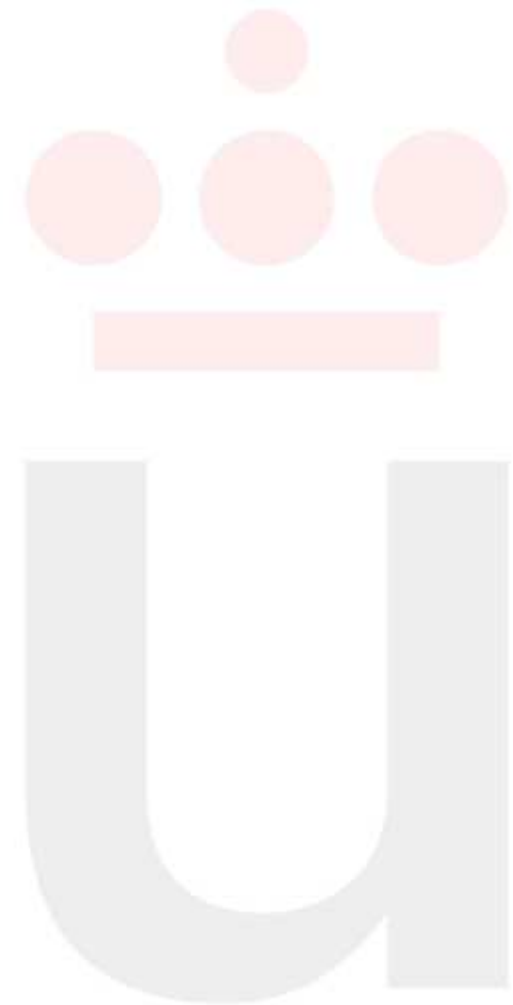


Bloque I: Termotecnia

Tema 3. Máquinas Térmicas II

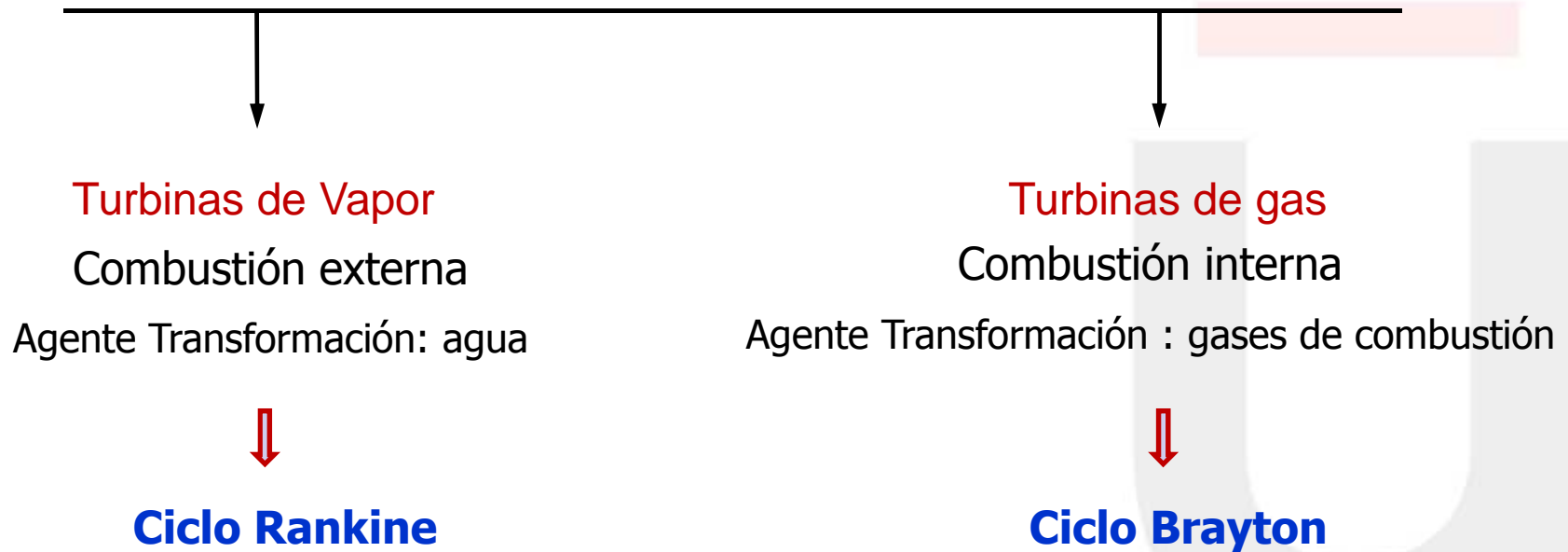
1. Motores Rotativos
2. Motores de Potencia (Turbina) de Gas: Ciclo Brayton
3. Motores de Potencia (Turbina) de Vapor: Ciclo Rankine



Tema 3. Ciclos de gas y vapor

Motores Rotativos

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



Tema 3. Ciclos de gas y vapor

ZONA B: Foco caliente.

Generación de calor.

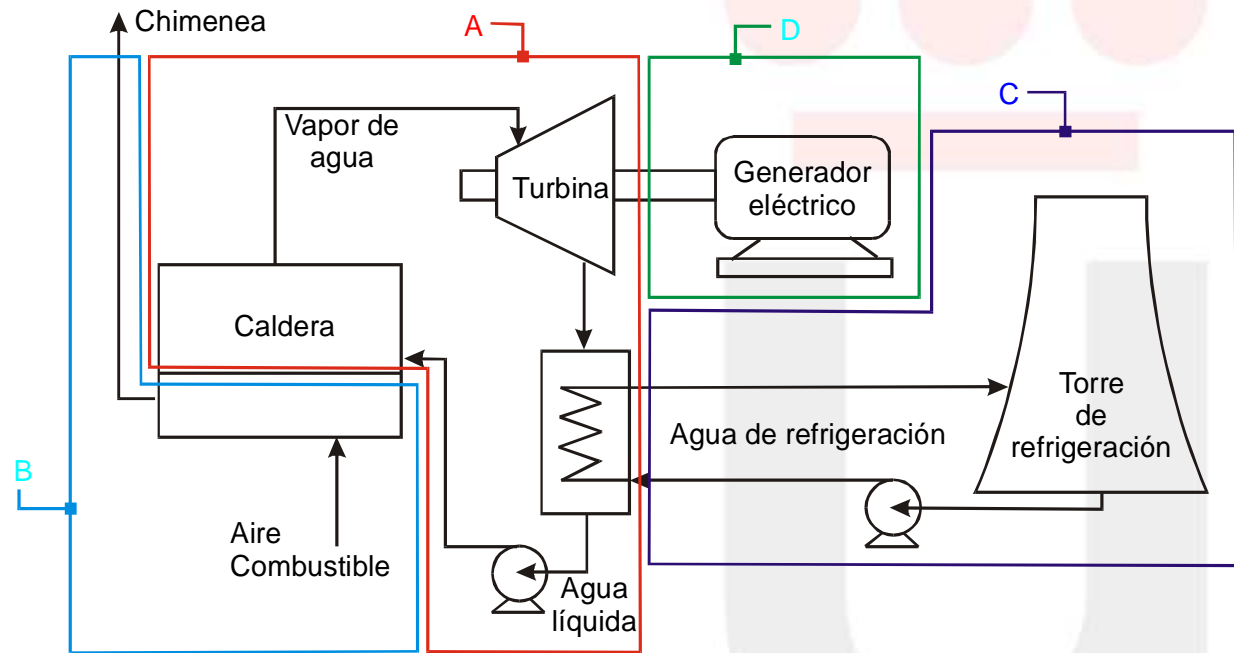
ZONA A: Ciclo termodinámico del agente de transformación (AT).

Transformación de la entalpía del vapor en energía cinética en el 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

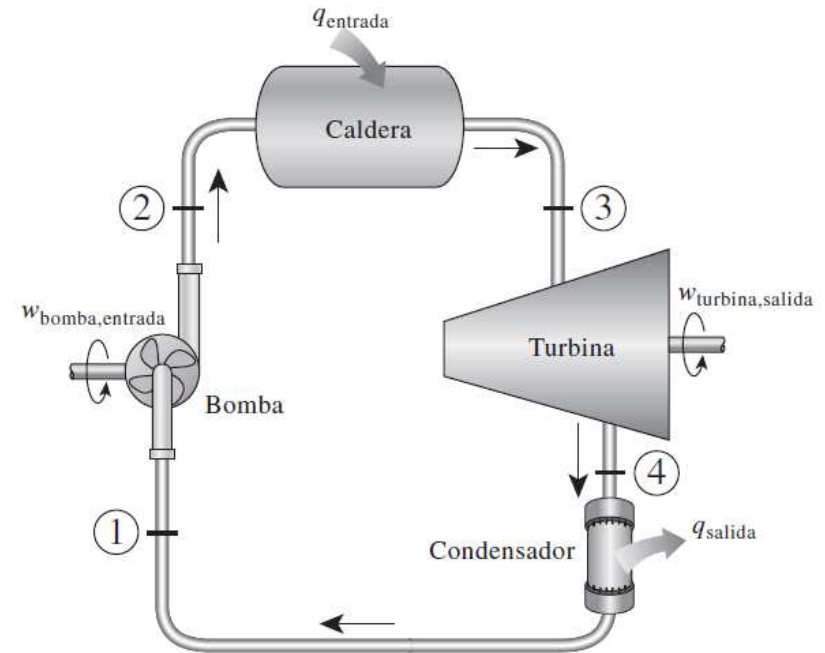
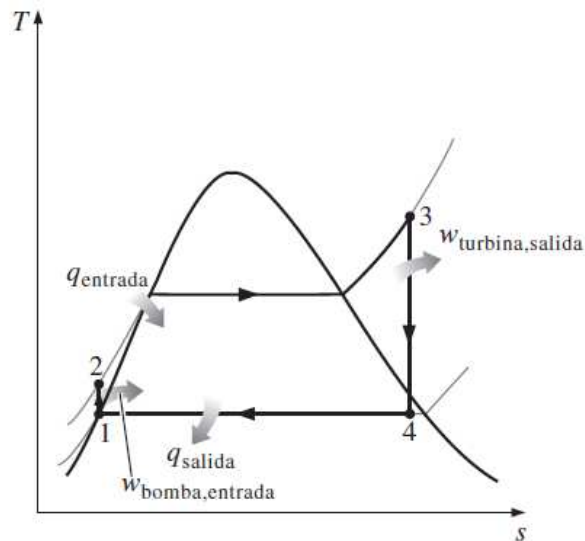


Tema 3. Ciclos de gas y vapor

Ciclo Rankine: Ideal para ciclos de potencia de vapor

Cuatro procesos reversibles internamente:

- 1-2 Compresión isoentrópica en una bomba
- 2-3 Adición de calor a presión constante en una caldera
- 3-4 Expansión isoentrópica en una turbina.
- 4-1 Rechazo de calor a presión constante en un condensador



Ciclo Rankine Ideal Simple

Tema 3. Ciclos de gas y vapor

Ciclo Rankine

1-2 Compresión isentrópica en una bomba

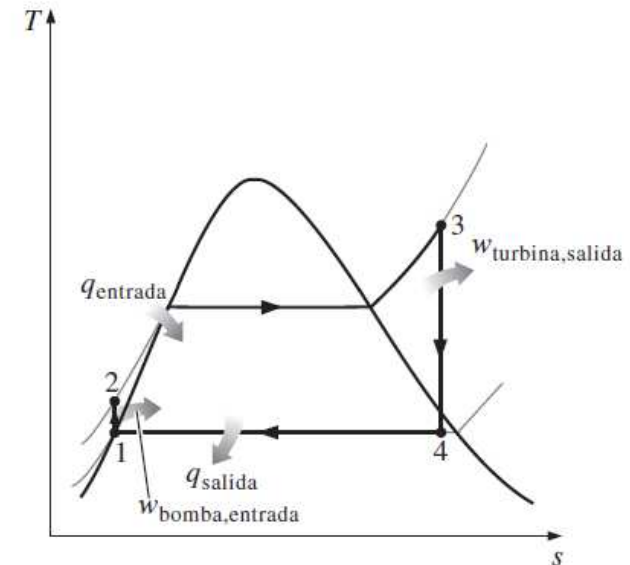
Entrada a la bomba: líquido saturado

- Se condensa isentrópicamente hasta la presión de operación de la caldera
- La temperatura del agua aumenta
- Ligera disminución en el volumen específico del agua

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

Generación de trabajo por la bomba , w_{bomba}

$$\begin{cases} q_{bomba} = 0 \\ w_{bomba} = h_2 - h_1 > 0 \end{cases} \quad w_{bomba} = v(p_2 - p_1)$$



La distancia de 1 a 2 no es real!!!

Tema 3. Ciclos de gas y vapor

Ciclo Rankine

2-3 Adición de calor a presión constante en una caldera

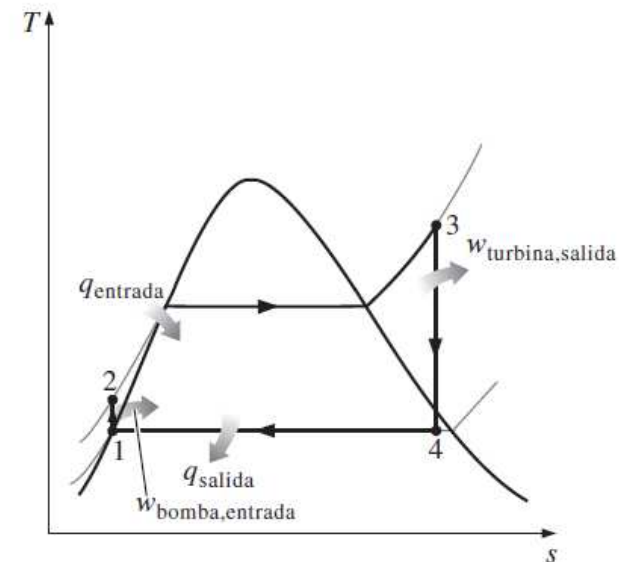
Entrada a la caldera: líquido comprimido subenfriado

- La caldera es un gran intercambiador de calor.
- El calor de los gases de combustión se transfiere al agua (líquida).

Salida de la caldera: vapor sobrecalentado

Aporte de calor a presión constante, $q_{caldera}$

$$\begin{cases} w_{caldera} = 0 \\ q_{caldera} = h_3 - h_2 > 0 \end{cases} \quad q_{in} = h_3 - h_2$$



Tema 3. Ciclos de gas y vapor

Ciclo Rankine

3-4 Expansión isentrópica en una turbina.

Entrada a la turbina: vapor sobrecalentado (seco)

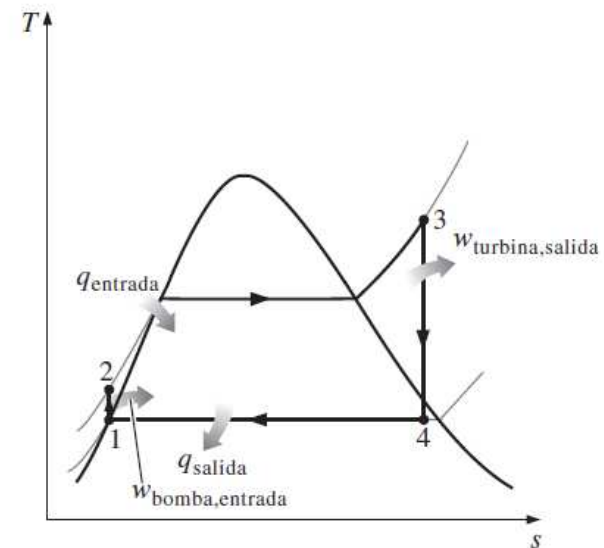
- El vapor se expande isentrópicamente.
- El vapor produce trabajo al hacer girar el eje conectado a un generador eléctrico.
- La presión y la temperatura disminuyen hasta los valores del condensador.

Salida de la turbina: vapor húmedo de alta calidad

Generación (salida) de trabajo de la turbina, $w_{turbina}$

$$\begin{cases} w_{turbina} = h_4 - h_3 < 0 \\ q_{turbina} = 0 \end{cases}$$

$$w_{turbina, salida} = h_4 - h_3$$



Tema 3. Ciclos de gas y vapor

Ciclo Rankine

4-1 Rechazo de calor a presión constante en un condensador

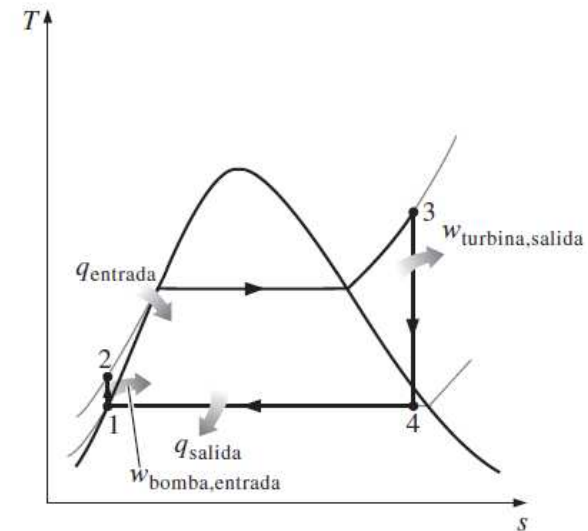
Entrada al condensador: vapor húmedo de alta calidad

- El vapor se condensa a presión constante.
- El condensador es un gran intercambiador de calor.
- El condensador rechaza el calor hacia un foco frío (lago, río o la atmósfera).
- En lugares donde el agua es muy valiosa; las centrales eléctricas son enfriadas con aire en vez de agua.

Salida del condensador: líquido saturado

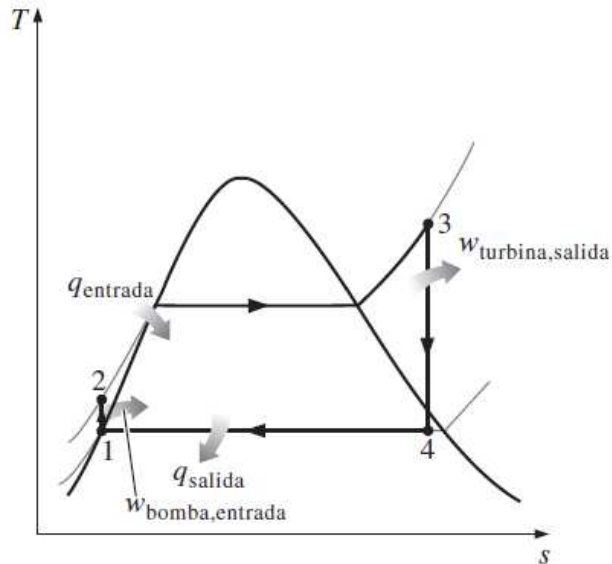
Extracción de calor (salida) a presión constante, $q_{condensador}$

$$\begin{cases} w_{condensador} = 0 \\ q_{condensador} = h_1 - h_4 < 0 \end{cases} \quad q_{out} = h_1 - h_4$$



Tema 3. Ciclos de gas y vapor

Ciclo Rankine



Rendimiento Térmico de Ciclo

$$\eta_{Rankine} = \frac{w_{net}}{q_{in}} = 1 - \frac{q_{out}}{q_{in}}$$

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

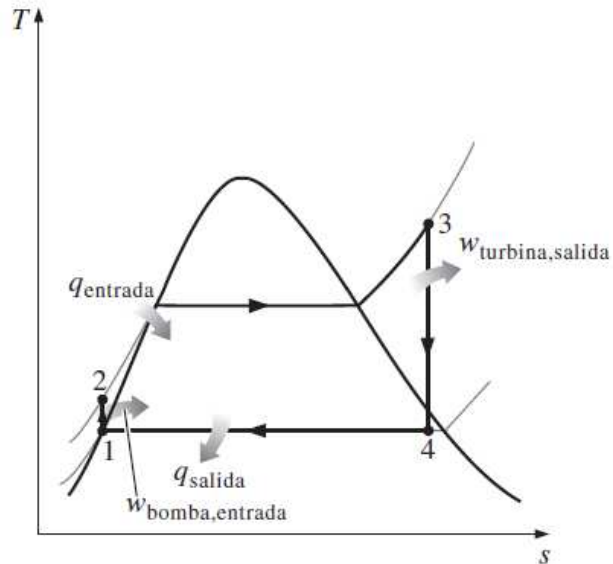
$$q_{in} = \Delta h_{2 \rightarrow 3} = (h_3 - h_2)$$

$$q_{out} = \Delta h_{4 \rightarrow 1} = -(h_1 - h_4)$$

$$\eta_{Rankine} = \frac{w_{net}}{q_{in}} = 1 - \frac{(h_4 - h_1)}{(h_3 - h_2)}$$

Tema 3. Ciclos de gas y vapor

Ciclo Rankine



Rendimiento Térmico de Ciclo

Aplicando 2º Principio de la Termodinámica

$$W_{neto} = W_{bomba,entrada} - W_{turbina,salida}$$

$$q_{neto} = q_{entrada} - q_{salida}$$

$$q_{neto} = W_{neto} \Rightarrow \eta_{Rankine} = 1 - \frac{(-q_{salida})}{q_{entrada}}$$

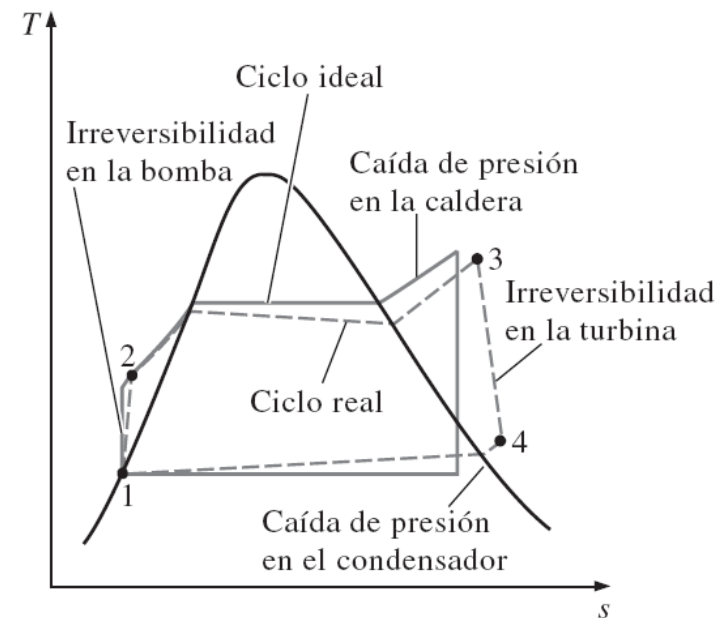
$$\eta_{Rankine} = 1 - \frac{(-q_{Condensador})}{q_{Caldera}} = 1 - \frac{T_4 \cdot (s_4 - s_1)}{\bar{T}_C \cdot (s_3 - s_2)} = 1 - \frac{T_4}{\bar{T}_C}$$

Tema 3. Ciclos de gas y vapor

Desviación de los ciclos reales de potencia de vapor en comparación con los idealizados

Irreversibilidades y Pérdidas

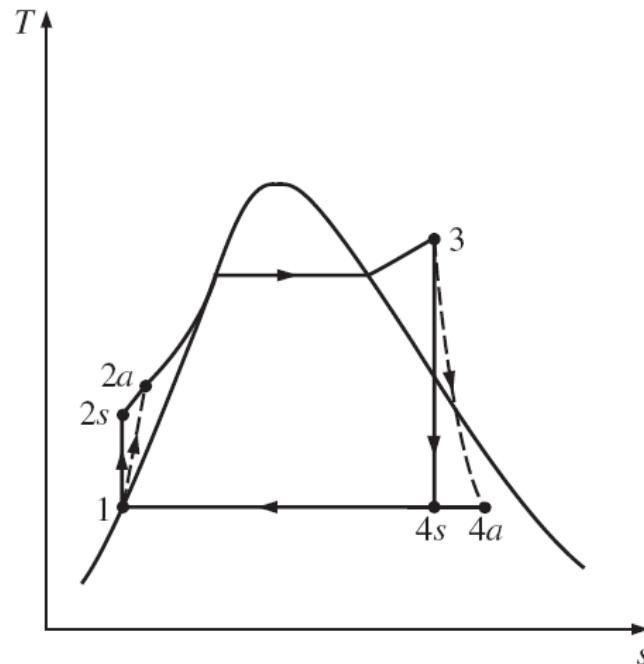
- Pérdidas de calor en el condensador y la caldera por cesión de calor al exterior
- Pérdidas de presión por rozamiento del fluido en el condensador, caldera y tuberías
- Irreversibilidades en la turbina y en la bomba
 - Procesos no adiabáticos
 - Pérdidas de energía por rozamiento



Tema 3. Ciclos de gas y vapor

Desviación de los ciclos reales de potencia de vapor en comparación con los idealizados

Irreversibilidades y Pérdidas



Rendimientos isoentrópicos

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

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

Otras pérdidas

- En los condensadores el líquido suele subenfriarse para evitar la cavitación
- Pérdidas en las partes móviles por fricción.

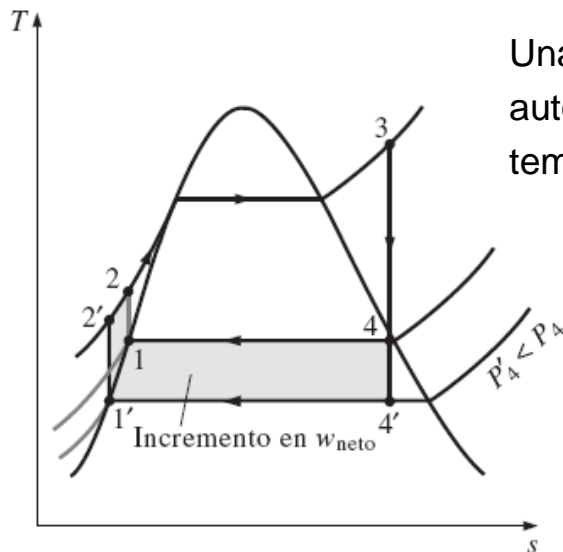
Tema 3. Ciclos de gas y vapor

Modificaciones para aumentar la eficiencia térmica del ciclo

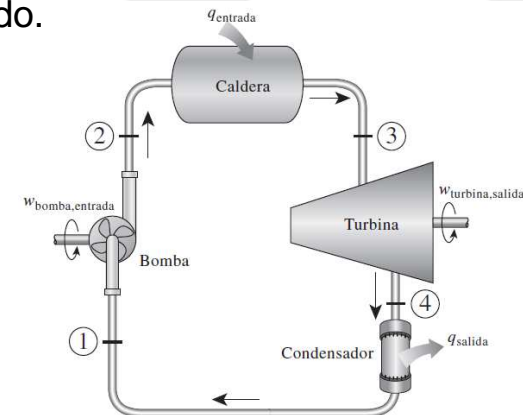
Objetivo: *incrementar la temperatura promedio a la que el calor se transfiere al fluido de trabajo en la caldera, o disminuir la temperatura promedio a la que el calor se rechaza del fluido de trabajo en el condensador.* Es decir, la temperatura promedio del fluido debe ser lo más alta posible durante la adición de calor y lo más baja posible durante el rechazo de calor.

Reducción de la presión del condensador

Una reducción de la presión de operación del condensador reduce automáticamente la temperatura del vapor, y por lo tanto la temperatura a la cual el calor es rechazado.



$$\eta_{Rankine} = 1 - \frac{T_4}{\bar{T}_C}$$

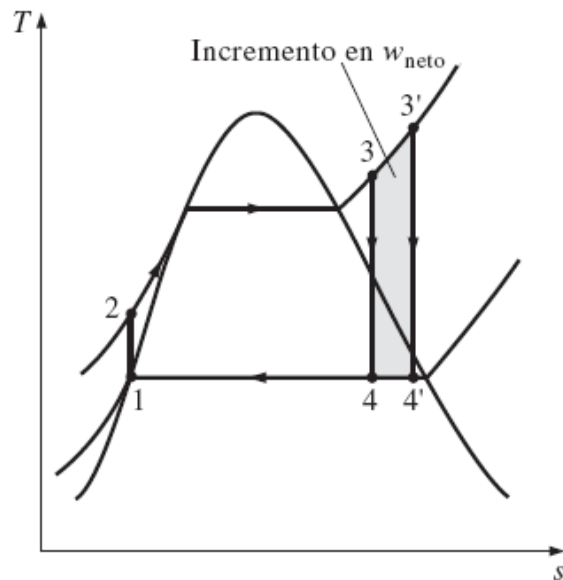


Tema 3. Ciclos de gas y vapor

Modificaciones para aumentar la eficiencia térmica del ciclo

Sobrecalentamiento del vapor a altas temperaturas

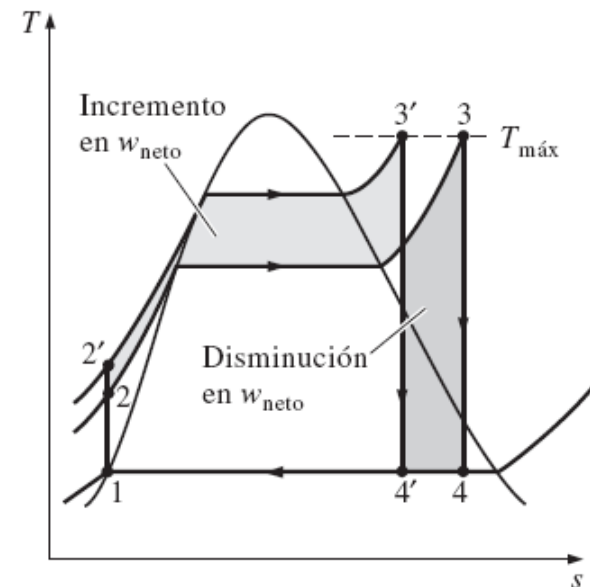
Obtención de vapor recalentado en la caldera a temperatura superior a la de saturación.



Incremento de la presión de la caldera

Al aumentar la presión de operación de la caldera, se eleva la temperatura a la que sucede la ebullición.

$$\eta_{Rankine} = 1 - \frac{T_4}{\bar{T}_C}$$

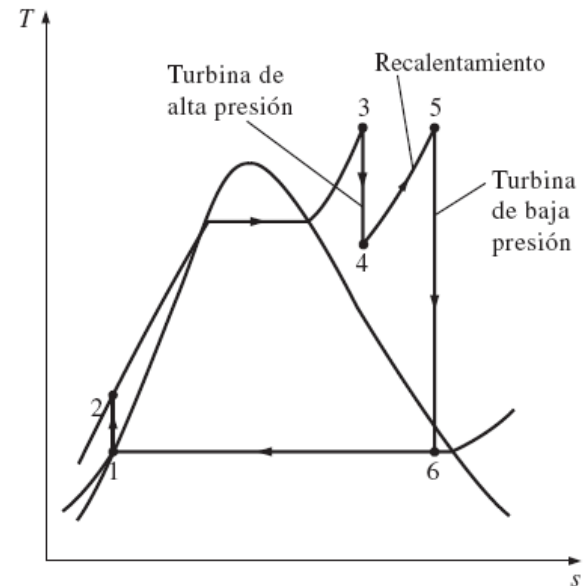
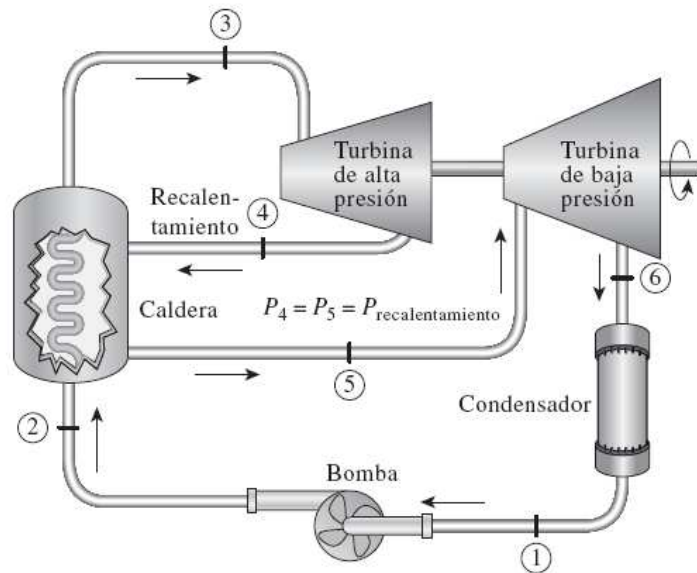


Tema 3. Ciclos de gas y vapor

Modificaciones para aumentar la eficiencia térmica del ciclo

¿Cómo podemos aprovechar las mayores eficiencias a presiones más altas de la caldera sin tener que enfrentar el problema de humedad excesiva en las etapas finales de la turbina?

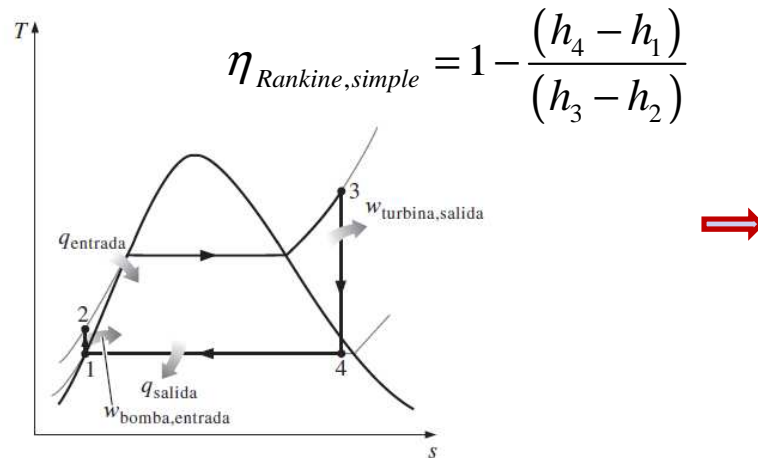
El ciclo Rankine ideal con recalentamiento



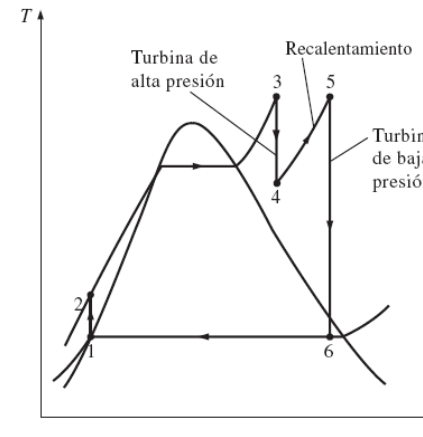
Tema 3. Ciclos de gas y vapor

Rendimiento Térmico de Ciclo

El ciclo Rankine ideal simple



El ciclo Rankine ideal con recalentamiento



$$\eta_{Rankine,recalentamiento} = 1 - \frac{(h_6 - h_1)}{(h_3 - h_2) + (h_5 - h_4)}$$

La eficiencia mejora hasta un 5%

$$q_{entrada} = q_{primario} + q_{recalentamiento}$$

$$q_{entrada} = (h_3 - h_2) + (h_5 - h_4)$$

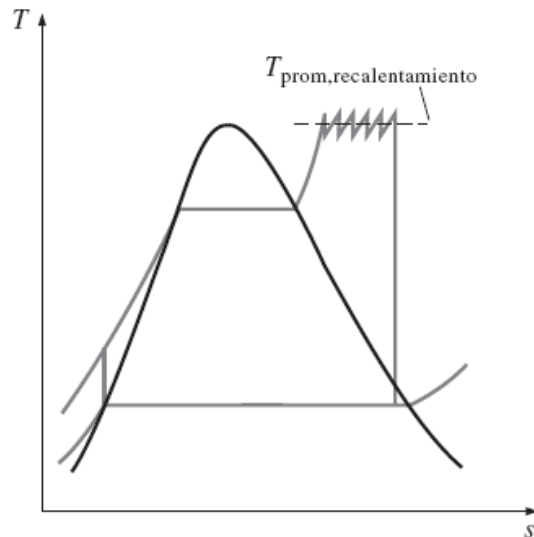
$$w_{turbina,salida} = w_{turbina,I} + w_{turbina,II} = (h_3 - h_4) + (h_5 - h_6)$$

Tema 3. Ciclos de gas y vapor

Modificaciones para aumentar la eficiencia térmica del ciclo

El Ciclo Rankine Ideal con Recalentamiento

Límite de aplicación: *Se utiliza solamente en centrales eléctricas de presión supercrítica: ($p = 22,06$ MPa)*



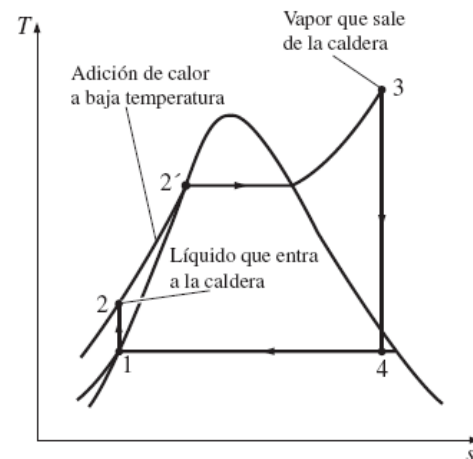
- Una tercera etapa de recalentamiento incrementa la eficiencia del ciclo en casi la mitad de la mejora alcanzada por el segundo recalentamiento. *La ganancia es muy pequeña.*
- La presión de recalentamiento óptima se acerca a un cuarto de la presión máxima del ciclo.
- Si se contara con materiales que soportaran temperaturas suficientemente altas, no habría necesidad del ciclo de recalentamiento.

Limitación: *Resistencia térmica y mecánica de los materiales de construcción.*

Tema 3. Ciclos de gas y vapor

Modificaciones para aumentar la eficiencia térmica del ciclo

El Ciclo Rankine Ideal Regenerativo



El calor que se transfiere al fluido de trabajo (proceso 2-2') se realiza a una temperatura relativamente baja, reduciendo la eficiencia del ciclo.



Incrementar la temperatura del agua de alimentación



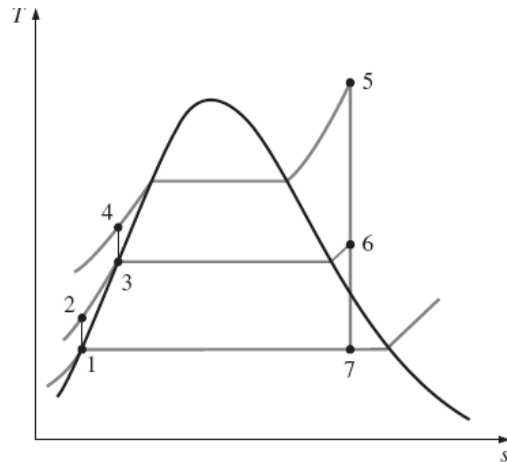
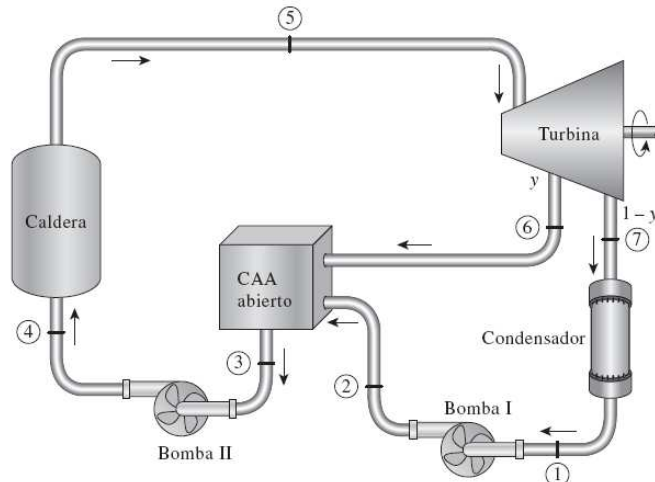
Diseño: Introducir un calentador de agua de alimentación (CAA)

Un calentador del agua de alimentación (CAA o regenerador) es un intercambiador de calor donde éste (el calor) se transfiere del vapor al agua de alimentación mediante la mezcla de ambos flujos de fluido (calentadores de agua de alimentación abiertos) o sin mezclarlos (calentadores de agua de alimentación cerrados).

Tema 3. Ciclos de gas y vapor

El Ciclo Rankine Ideal Regenerativo

Calentadores abiertos de agua de alimentación



5-6 Expansión isentrópica del vapor de la caldera (5) hasta una presión intermedia (6).

Se extrae un poco de vapor de agua y se envía al CAA, el vapor restante continúa expandiéndose hasta la presión del condensador (7).

7-1 Rechazo de calor a presión constante en un condensador (1).

El vapor sale de éste como líquido saturado.

1-2 Compresión isentrópica del agua condensada (alimentación) en la bomba I

El agua se comprime a la presión del CAA (2) y se mezcla con el vapor extraído de la turbina.

La mezcla sale del calentador como líquido saturado (3).

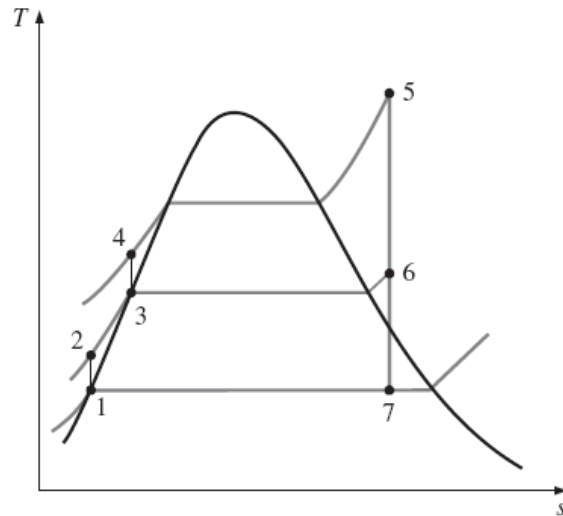
3-4 Compresión isentrópica del agua saturada en la bomba II hasta la caldera (4).

4-5 Adición de calor a presión constante en una caldera.

Tema 3. Ciclos de gas y vapor

El Ciclo Rankine Ideal Regenerativo

Calentadores abiertos de agua de alimentación



$$q_{\text{entrada}} = h_5 - h_4$$

$$q_{\text{salida}} = (1 - y)(h_7 - h_1)$$

$$W_{\text{turbina, salida}} = (h_5 - h_6) + (1 - y)(h_6 - h_7)$$

$$W_{\text{bomba, entrada}} = (1 - y)W_{\text{bomba I, entrada}} + W_{\text{bomba II, entrada}}$$

$$y = \dot{m}_6 / \dot{m}_5 \quad (\text{fracción de vapor extraído})$$

$$W_{\text{bomba I, entrada}} = v_1(P_2 - P_1)$$

$$W_{\text{bomba II, entrada}} = v_3(P_4 - P_3)$$

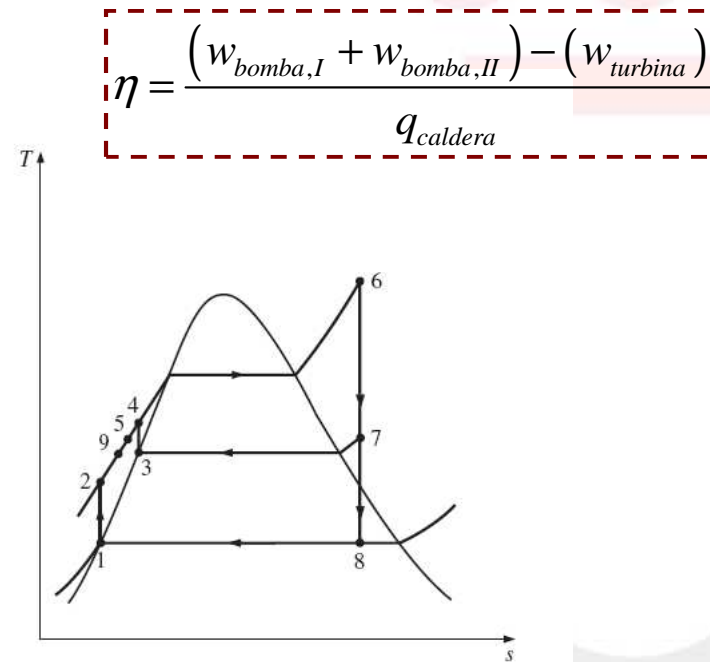
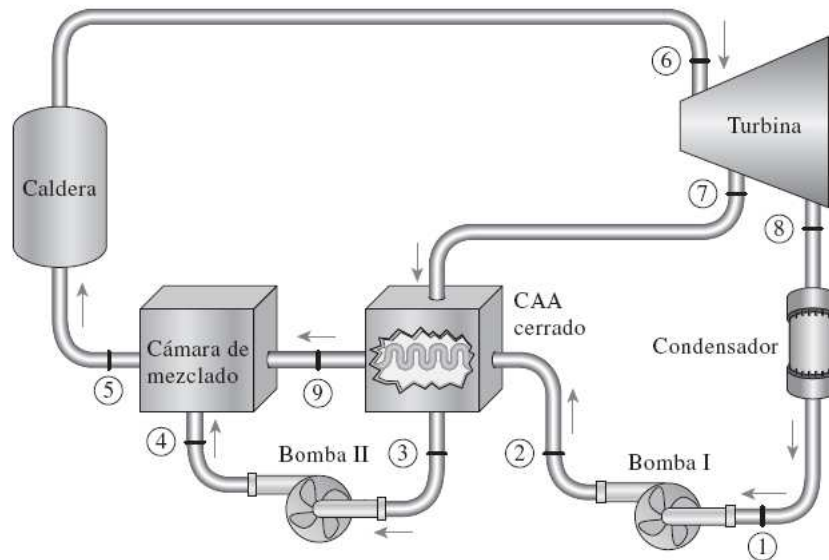
$$\eta_{\text{Rankine, regenerativo}} = 1 - \frac{(1 - y) \cdot (h_7 - h_1)}{(h_5 - h_4)}$$

$$\eta_{\text{Rankine, recalentamiento}} = 1 - \frac{(h_6 - h_1)}{(h_3 - h_2) + (h_5 - h_4)}$$

Tema 3. Ciclos de gas y vapor

El Ciclo Rankine Ideal Regenerativo

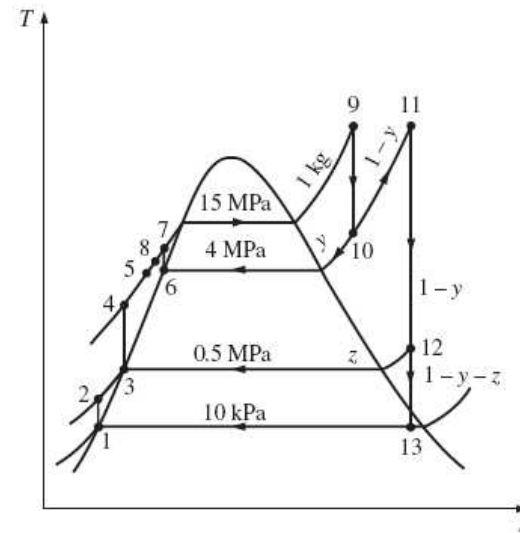
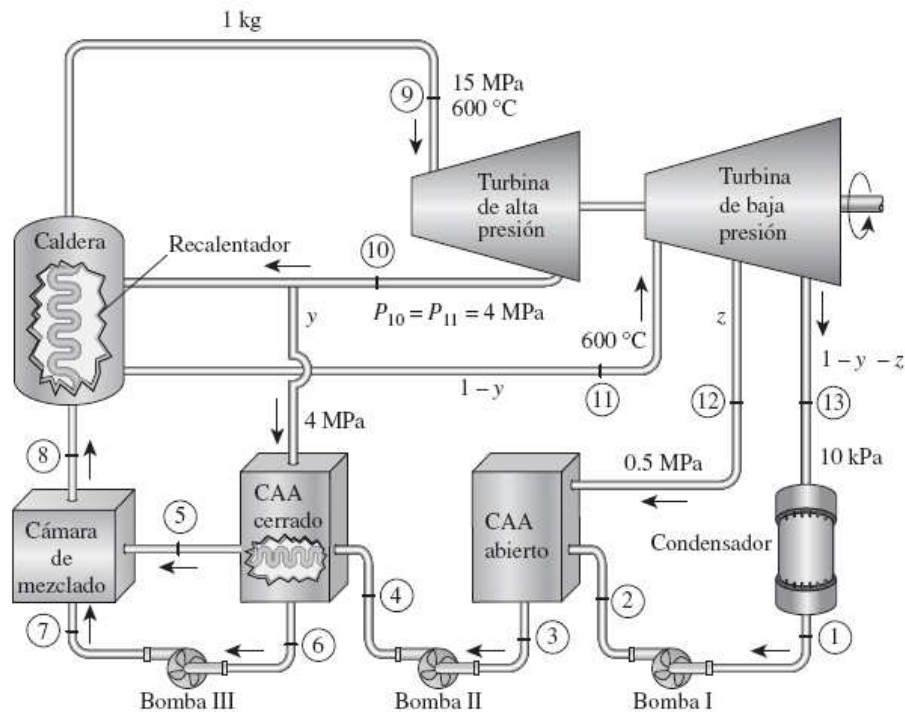
Calentadores cerrados de agua de alimentación



Tema 3. Ciclos de gas y vapor

El Ciclo Rankine Ideal Regenerativo

Combinación de modificaciones



Tema 3. Ciclos de gas y vapor

Ciclos Combinados

	$\eta_{\text{máximo}}$	η_{real}
T. de vapor (550 °C)	65 %	45 %
T. de gas (1000-1400 °C)	83 %	62 %

