



UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA

**TURBO MÁQUINAS TÉRMICAS. APLICACIONES NAVALES.
CURSO 2012/2013**

Tema 1: Características Generales. Clasificación de las plantas de potencia basadas en el uso de las turbomáquinas.

Tema 2: Ciclos básicos Rankine. Modificación del ciclo de vapor.

ISBN 978-84-16989-23-2

Juan Carlos Lozano

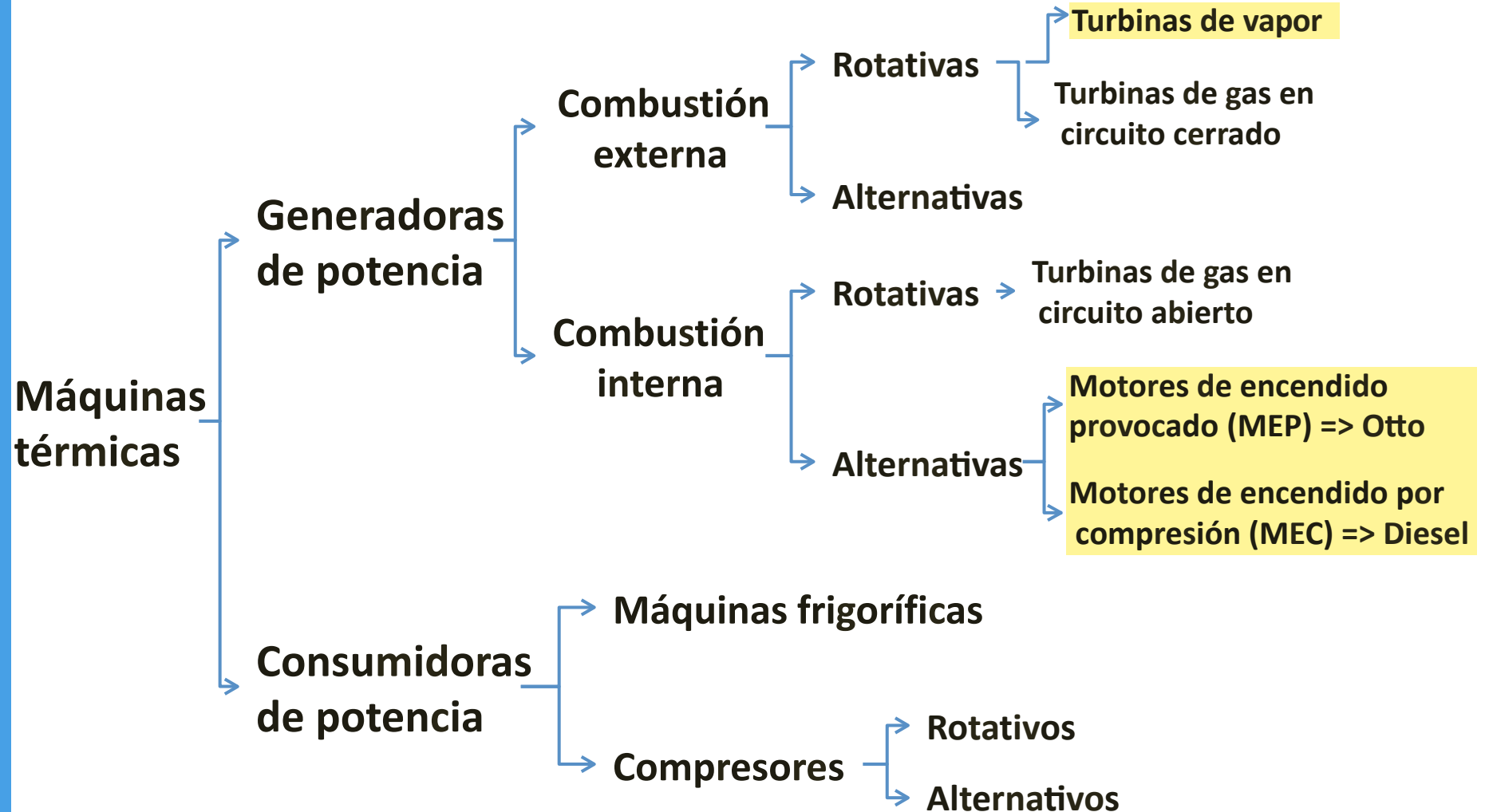
Índice de la presentación

- Introducción
- Ciclo de Carnot con vapor de agua
- Ciclo de Rankine
- Ciclo de Rankine con recalentamiento
- Ciclo de Rankine regenerativo



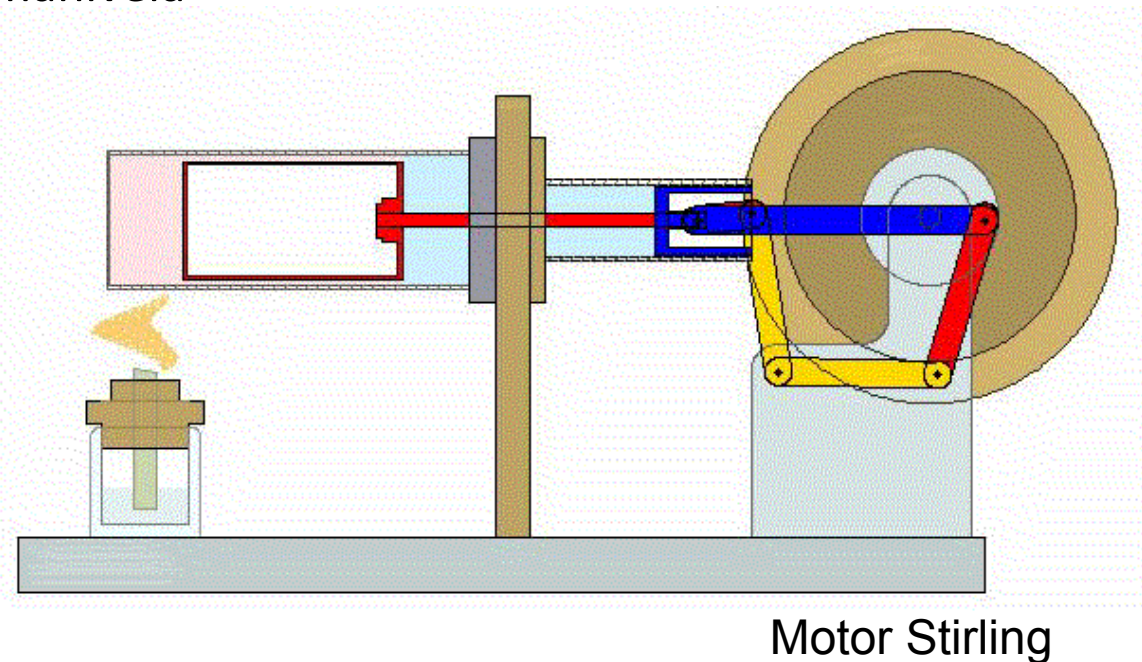
Introducción

Clasificación de las máquinas térmicas



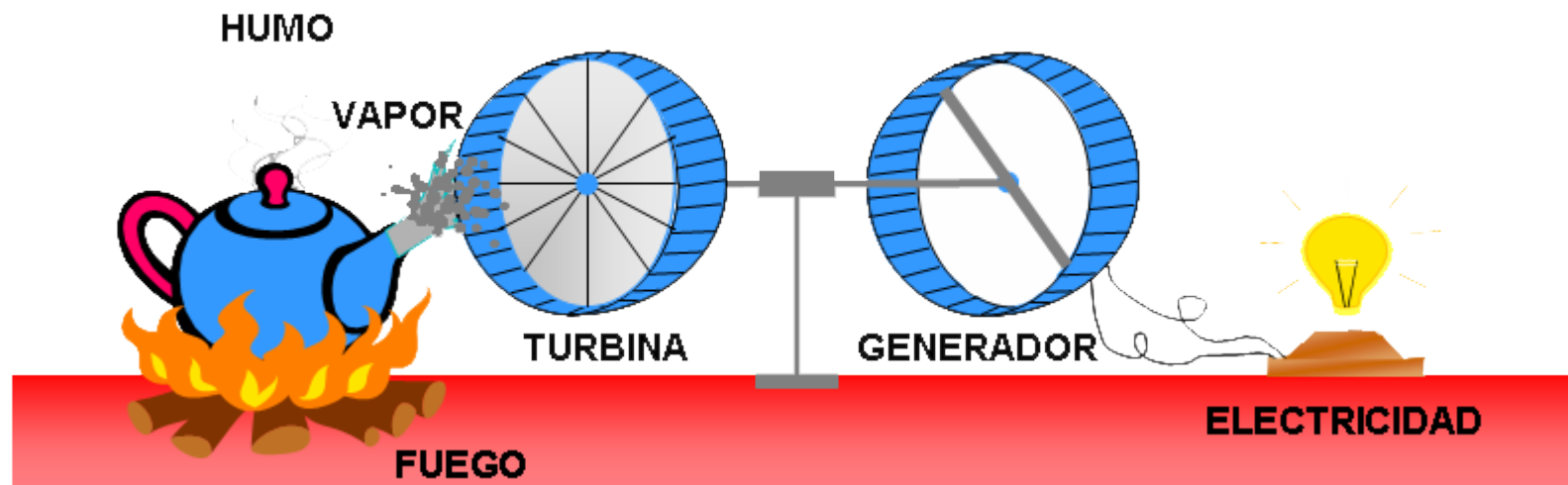
Clasificación de las máquinas térmicas

Máquinas alternativas: Un émbolo se mueve alternativamente en el interior de un cilindro y ese movimiento rectilíneo se convierte en circular mediante un juego de biela-manivela



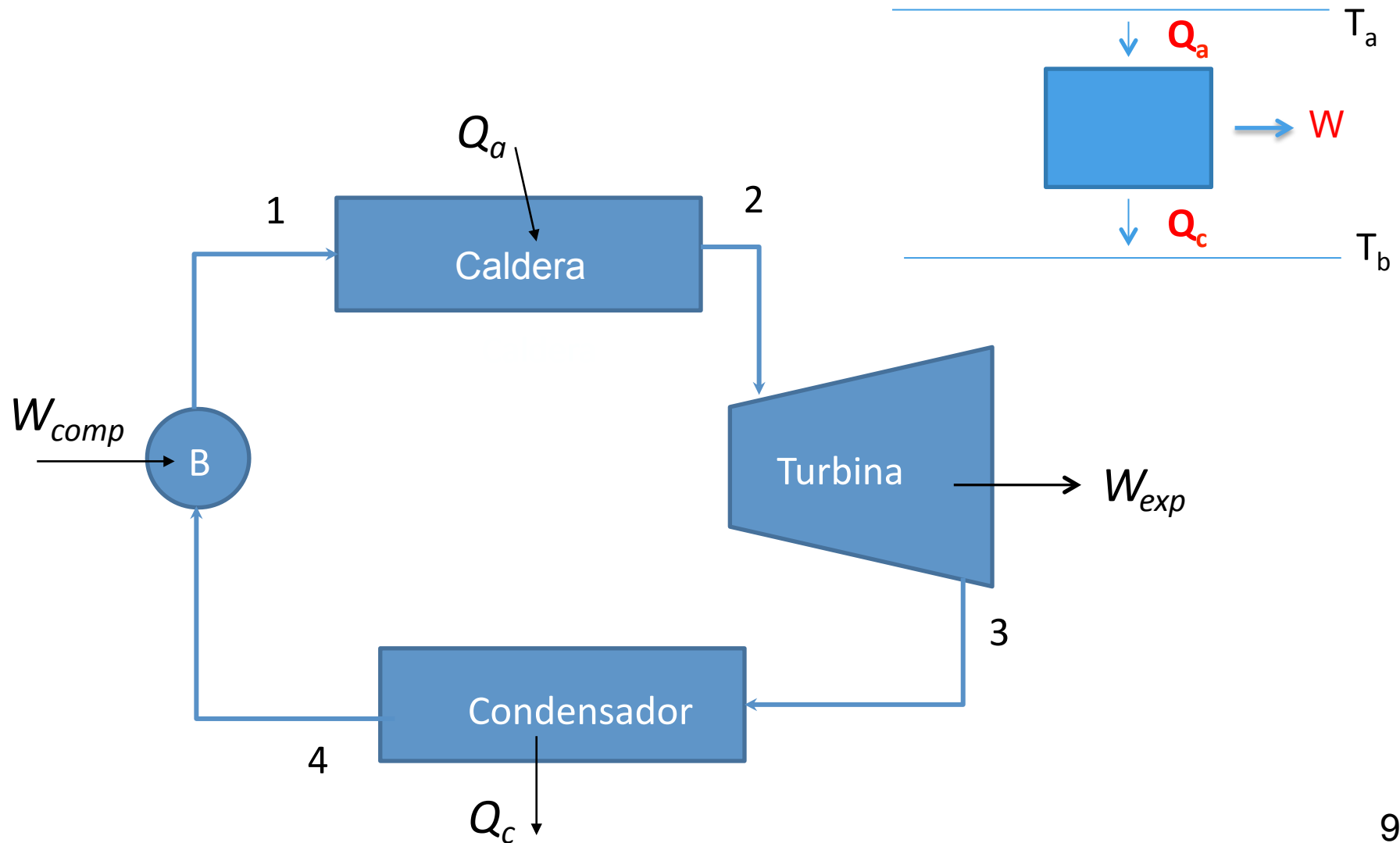
Clasificación de las máquinas térmicas

Máquinas rotativas: El fluido al incidir sobre los álabes de la turbina produce directamente el movimiento circular.



Esquema básico máquina térmica

Conversión de energía calorífica en energía mecánica (W) más eficiente

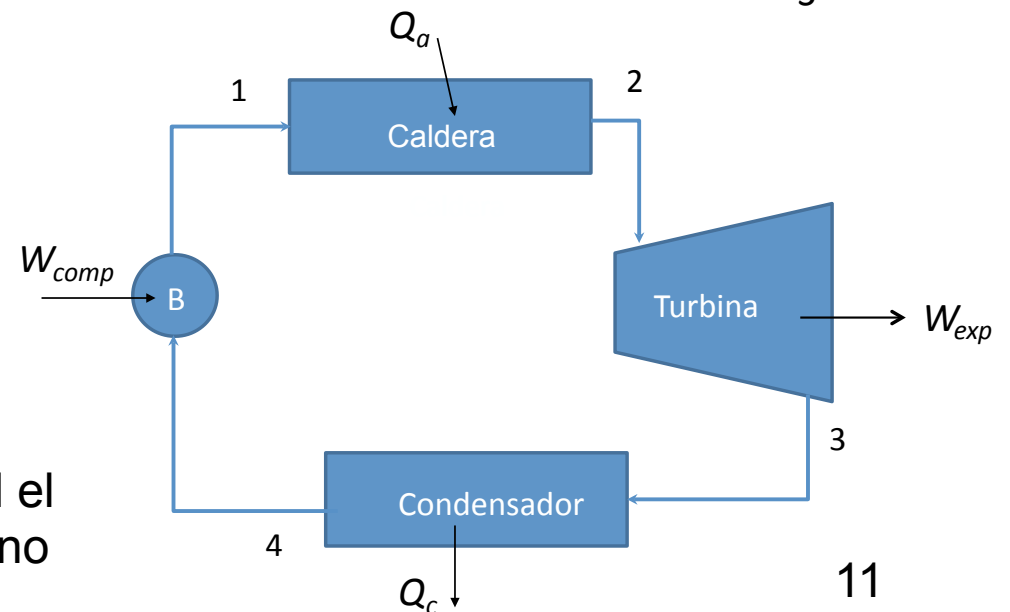
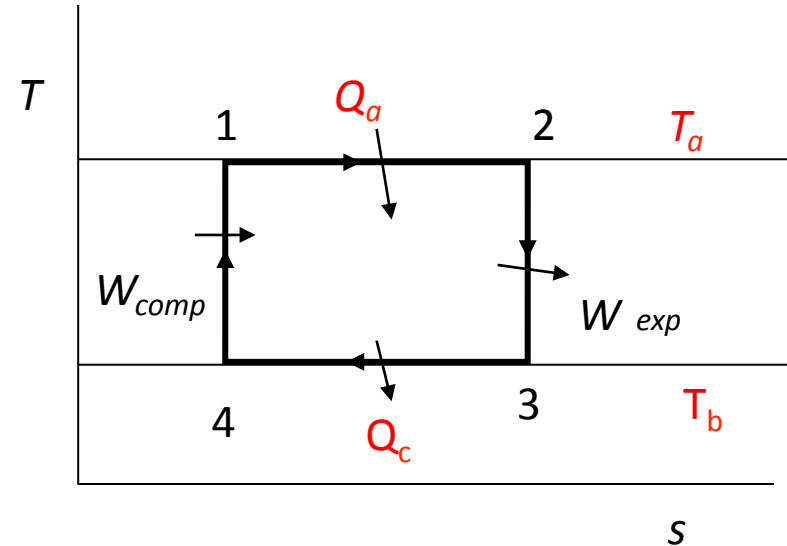
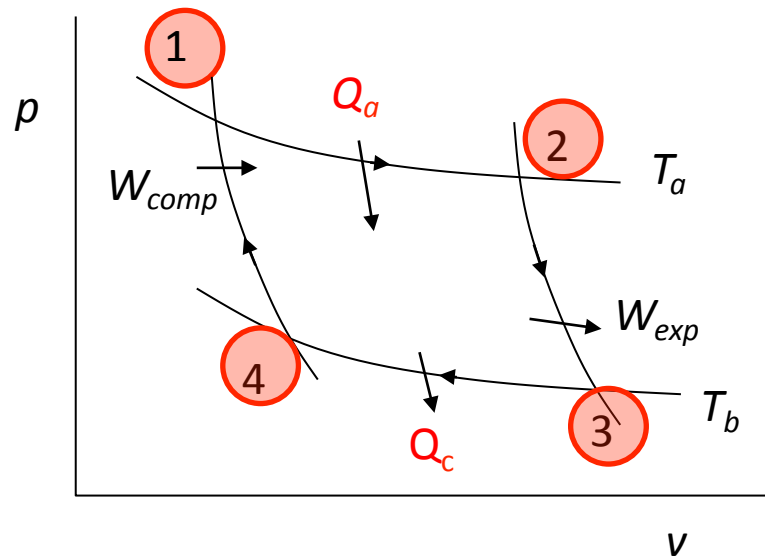




Ciclo de Carnot con vapor de agua

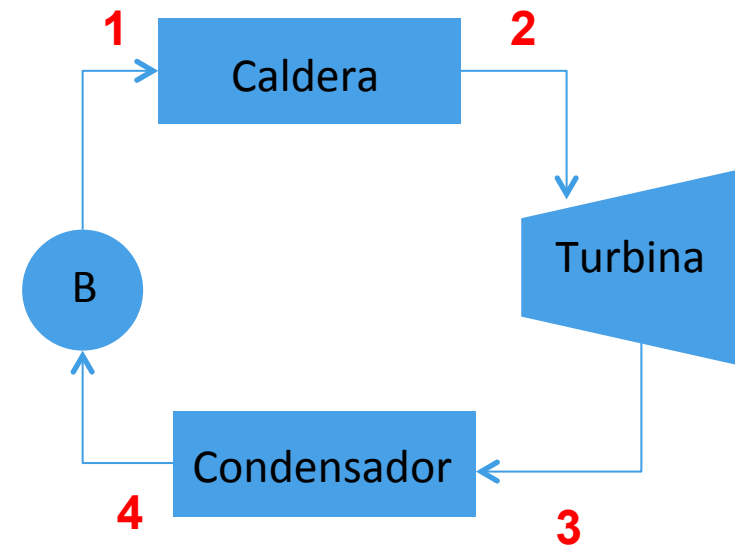
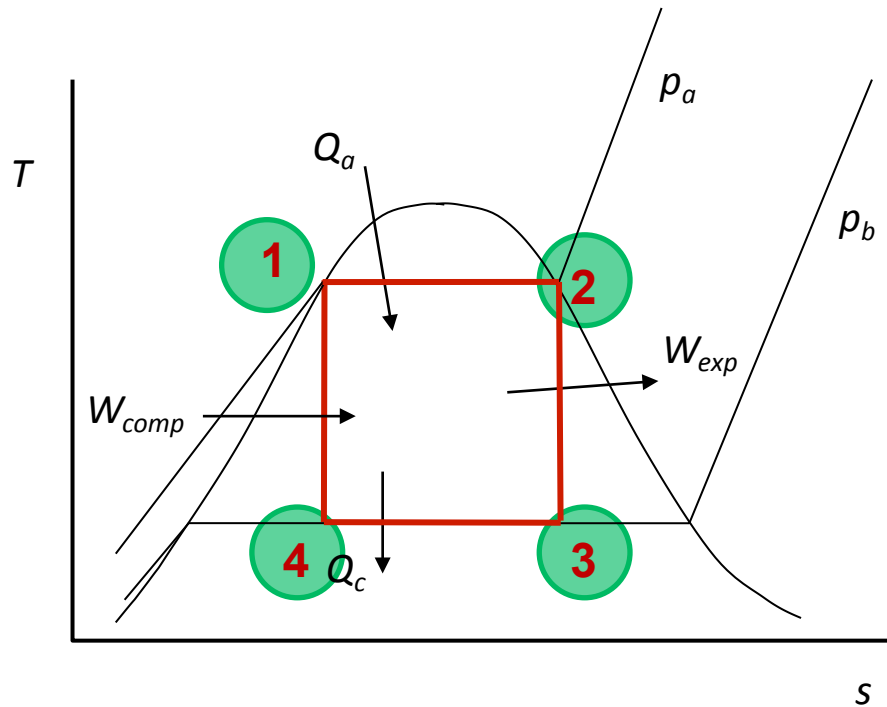
Ciclo de Carnot -> ciclo mayor rendimiento térmico

- 1→2 Expansión isotérmica reversible
- 2→3 Expansión adiabática reversible
- 3→4 Compresión isotérmica reversible
- 4→1 Compresión adiabática reversible



Proceso adiabático: aquél en el cual el sist. no intercambia calor con el entorno

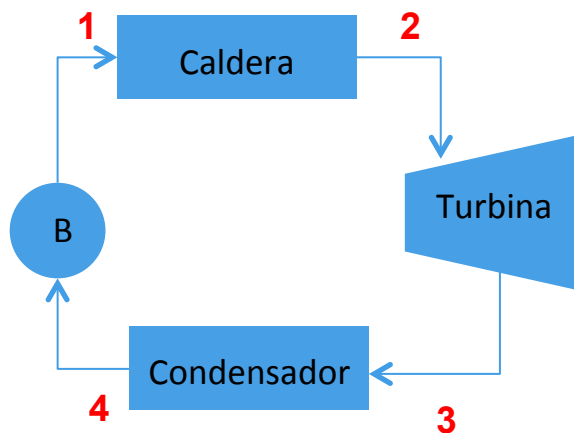
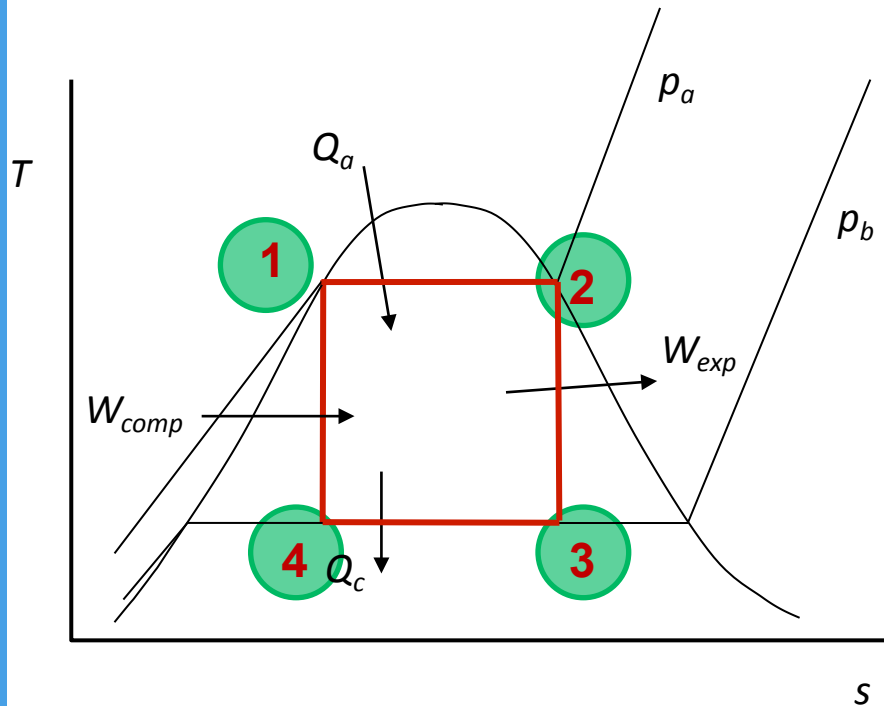
Ciclo de Carnot



$$\eta_t = 1 - \frac{T_b}{T_a} = \frac{\dot{W}_{neto}}{\dot{Q}_a} = \frac{W_T - W_{Bomba}}{\dot{Q}_a}$$

El ciclo de Carnot sólo se puede llevar a cabo si el fluido es vapor y el proceso se lleva a cabo íntegramente en la zona de vapor húmedo (sólo en esta zona se puede comunicar energía calorífica a P y T ctes => se está produciendo un cambio de fase → el calor intercambiado se denomina calor latente

Ciclo de Carnot



1

1 → Estado: liqu saturado ($P=P_a$)

1-2

1-2 → Proceso: absorbe $E_{\text{calorifica}}$ a p y T constantes

2

2 → Estado: vapor saturado

2-3

2-3 → Proceso: expansión isentrópica (adiabático, produce W)

3

3 → Estado: VH a $P=P_c$

3-4

3-4 → Proceso: cede $E_{\text{calorifica}}$ a p y T constantes (entra agua de mar/río y roba calor al fluido)

4

4 → Estado: VH a $P=P_c$ ($x_4 < x_3$)

4-1

4-1 → Proceso: compresión isentrópica (adiabático)

Rendimiento térmico del Ciclo de Carnot con vapor

Balance de energía en la turbina:

- consideración S.A., R.E.
- adiabático
- se desprecia ΔE_C y ΔE_P

$$h_2 = h_3 + W_T \quad \rightarrow \quad W_T = h_2 - h_3$$

Balance de energía en la bomba:

- consideración S.A., R.E.
- adiabático
- se desprecia ΔE_C y ΔE_P

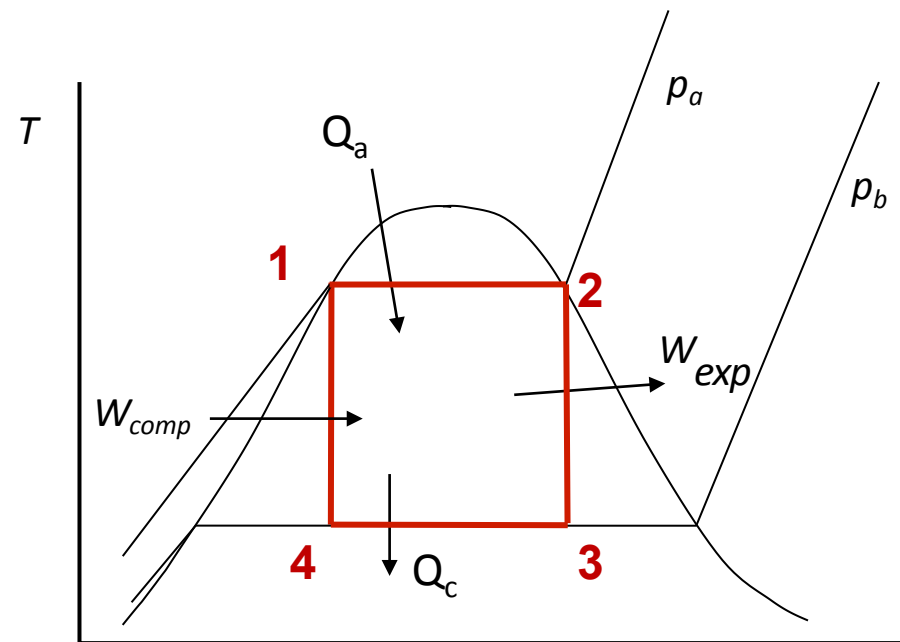
$$h_4 + W_B = h_1 \quad \rightarrow \quad W_B = h_1 - h_4$$

Calor absorbido en la caldera: (S.A., R.E., se desprecia ΔE_C y ΔE_P)

$$h_1 + q_a = h_2 \quad \rightarrow \quad q_a = h_2 - h_1$$

$$\eta_t = 1 - \frac{T_b}{T_a} = \frac{\dot{W}_{neto}}{\dot{Q}_a} = \frac{W_T - W_{Bomba}}{\dot{Q}_a}$$

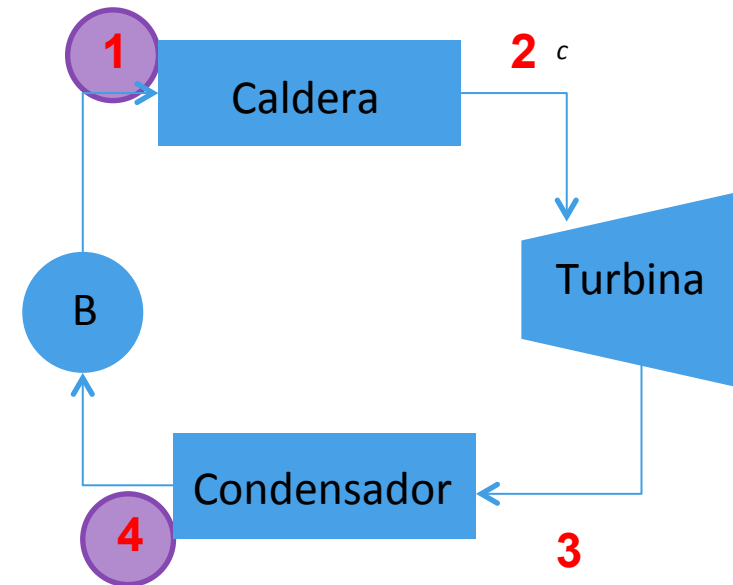
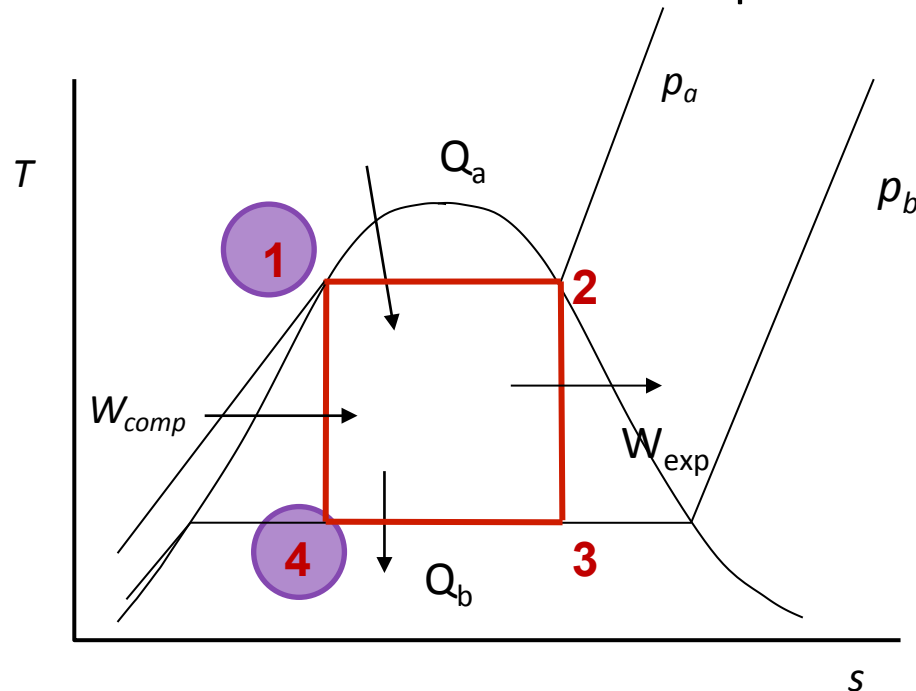
$$\eta_t = \frac{\dot{m}(h_2 - h_3) - \dot{m}(h_1 - h_4)}{\dot{m}(h_2 - h_1)}$$



s

Inconvenientes del ciclo de Carnot

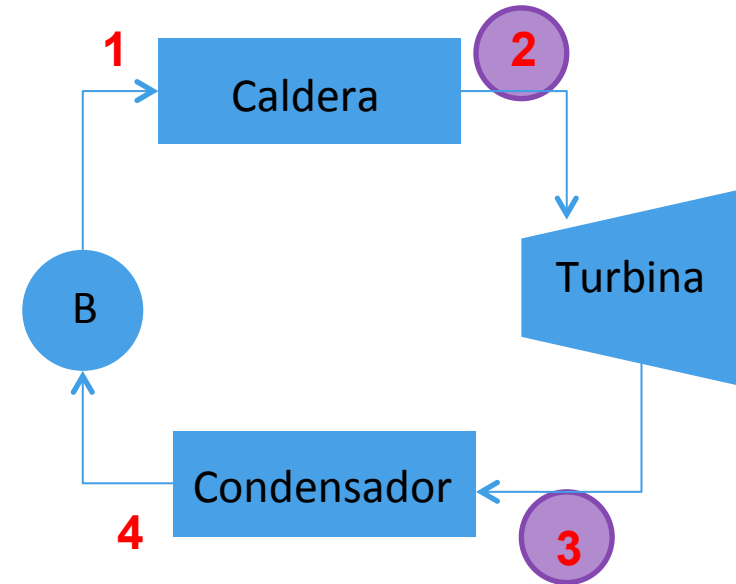
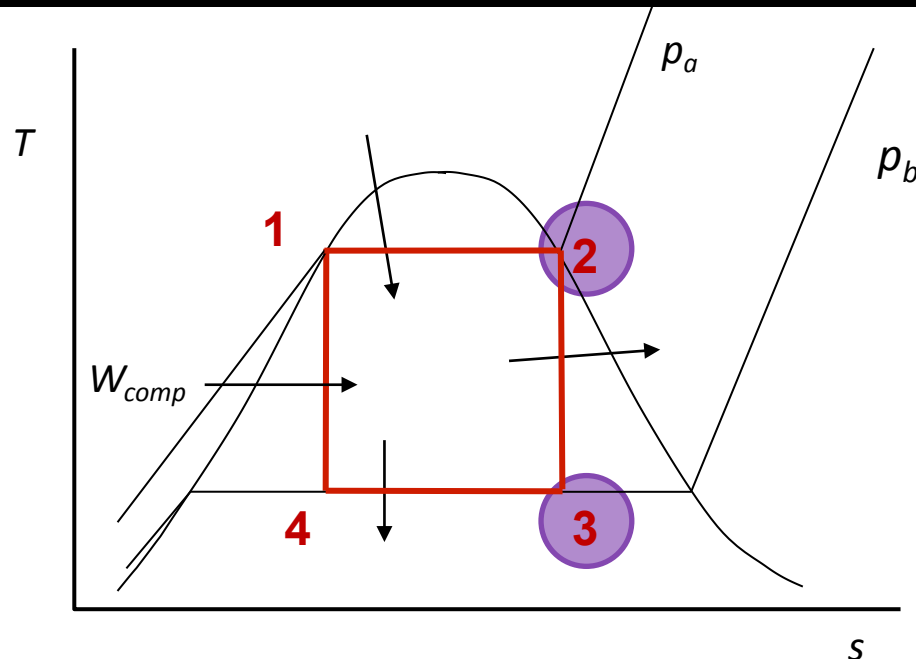
En centrales térmicas **NO** se emplea el ciclo de Carnot. Inconvenientes:



Estado 4: Es muy difícil que en un intercambiador de calor, el proceso se detenga exactamente en el estado representado en el punto 4 → **difícil diseño.**

Proceso 4→1: Compresión de un fluido en estado de vapor húmedo y descarga como líquido saturado → bomba o compresor ?¿

Inconvenientes del ciclo de Carnot

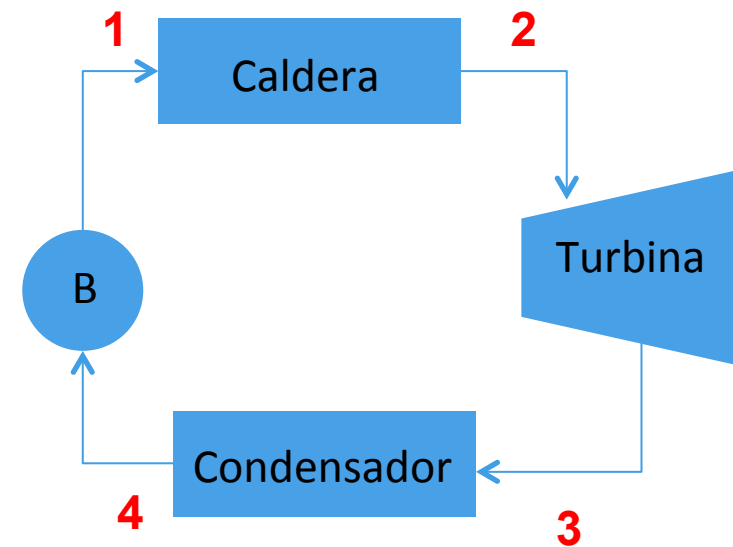
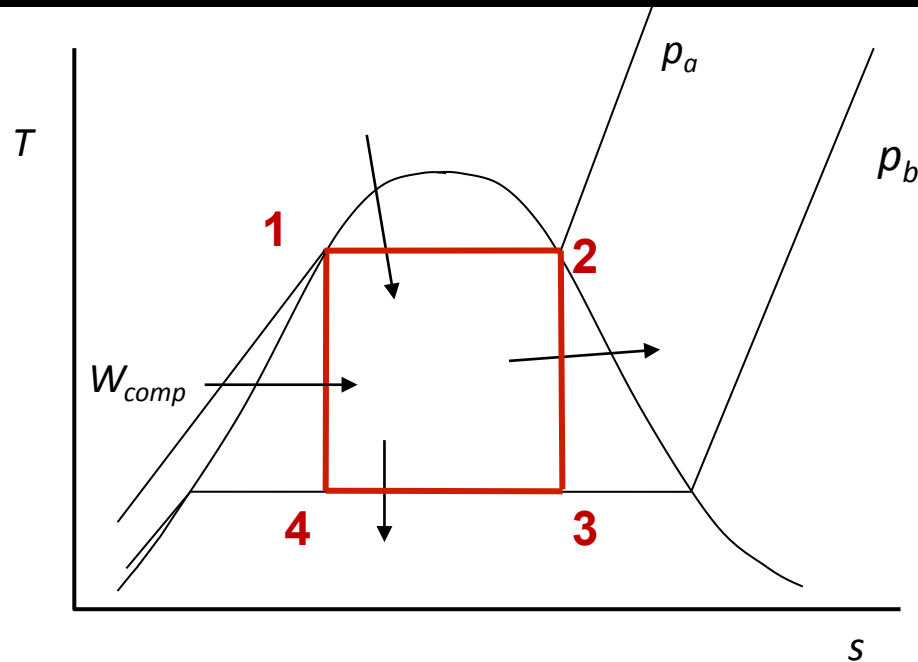


Proceso 2 → 3 Expansión en la turbina. El fluido se expande totalmente en la zona de vapor húmedo, a medida que se va expandiendo van apareciendo gotitas de líquido que van a erosionar los álabes de la turbina. → **Condiciones óptimas salida turbina:** $0,9 < x < 1$ => Diseño: álabes de Ti y turbinas troncocónicas

Además el trabajo que podemos obtener de la turbina será muy pequeño (al realizarse íntegramente en la zona de vapor húmedo) ya que el salto de entalpía es muy pequeño.

$$W_T = h_2 - h_3$$

Inconvenientes del ciclo de Carnot



3 → El rendimiento térmico de este ciclo de Carnot con vapor está limitado por la T_c del agua → porque el ciclo siempre se realiza dentro de la campana

Conclusiones

1. Jamás se utiliza un ciclo de Carnot en una central térmica
2. El **rendimiento máximo** que podemos alcanzar de cualquier ciclo siempre es el de Carnot , tomando como temperaturas la máxima y mínima alcanzadas:

$$\eta_t = 1 - \frac{T_{min}}{T_{máx}}$$

3. Cualquier mejora en el η_t de cualquier instalación o ciclo siempre ha de ir encaminada a aumentar la $T_{máx}$ y/o disminuir la T_{min} .

$$\eta_t = 1 - \frac{T_b}{T_a} = \frac{\dot{W}_{neto}}{\dot{Q}_a} = \frac{W_T - W_{Bomba}}{\dot{Q}_a}$$

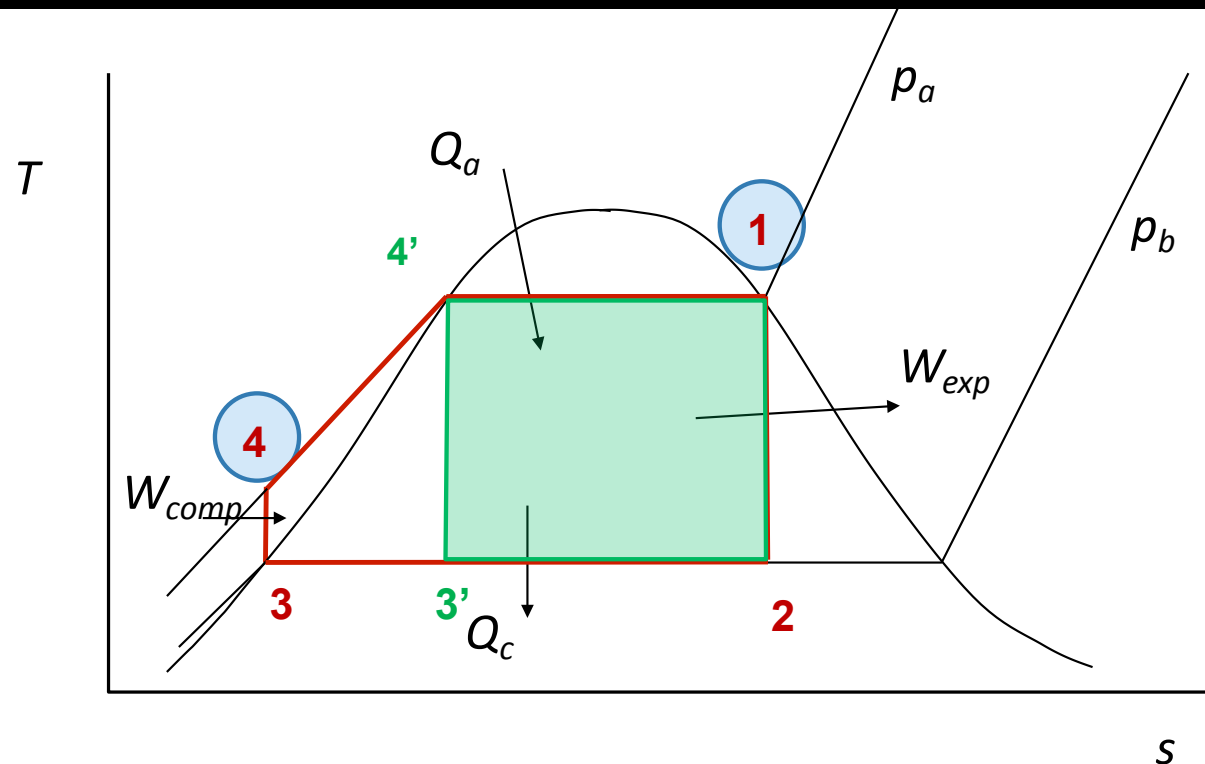
La bomba consume W, ese W se lo da la turbina. El W_{real} o neto será el producido por la turbina menos lo consumido por los distintos elementos.

Un compresor requiere más trabajo que una bomba, por lo que el η_t de una turbina de gas es más pequeño que el de una turbina de vapor ($t_{gas} \approx 25\%$; $t_{vapor} \approx 35\%$). Pero las turbinas de gas son más pequeñas (preferibles a veces).



Ciclo de Rankine

Ciclo básico de Rankine



Soluciona inconveniente del ciclo de Carnot:

Mayor ciclo de Carnot \rightarrow llegar al punto 3' y la posterior compresión (proceso 3 \rightarrow 4'). Inconveniente desaparece si prolongamos el proceso de condensación hasta alcanzar el estado de líquido saturado.

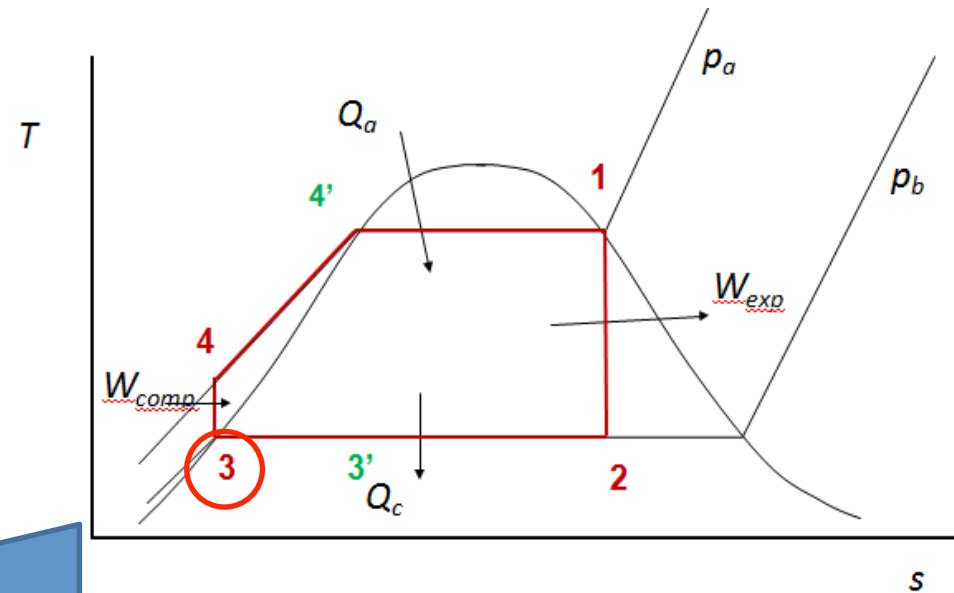
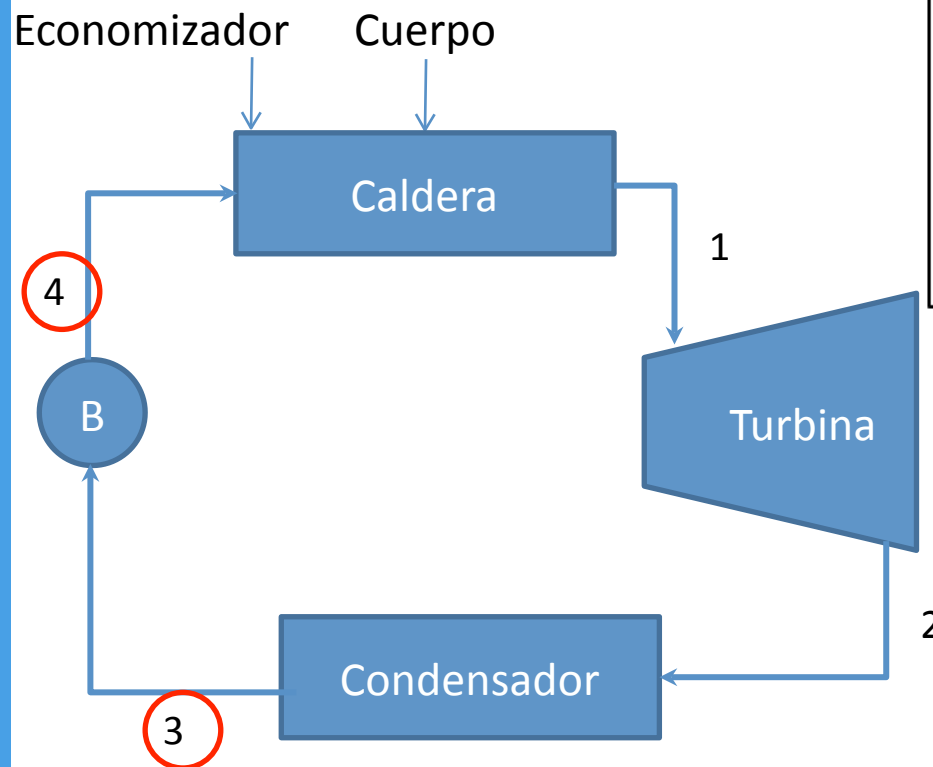
3 \Rightarrow la compresión se lleva a cabo en fase líquida \Rightarrow podría emplear una bomba.

El proceso 4 \rightarrow 1 no se realiza íntegramente a T constante pero sí a P constante.

El proceso 4 \rightarrow 4' es a P=cte y el 4' \rightarrow 1 a P y T = cte.

Ciclo básico de Rankine

Economizador: es un intercambiador de calor donde el agua es calentada mediante los gases procedentes de la combustión antes de ser canalizados a la chimenea



Rendimiento térmico del básico de Rankine

Turbina: (S.A., R.E. , adiabático, ΔE_C y $\Delta E_P \sim 0$)

$$h_1 = h_2 + W_T \rightarrow W_T = h_1 - h_2$$

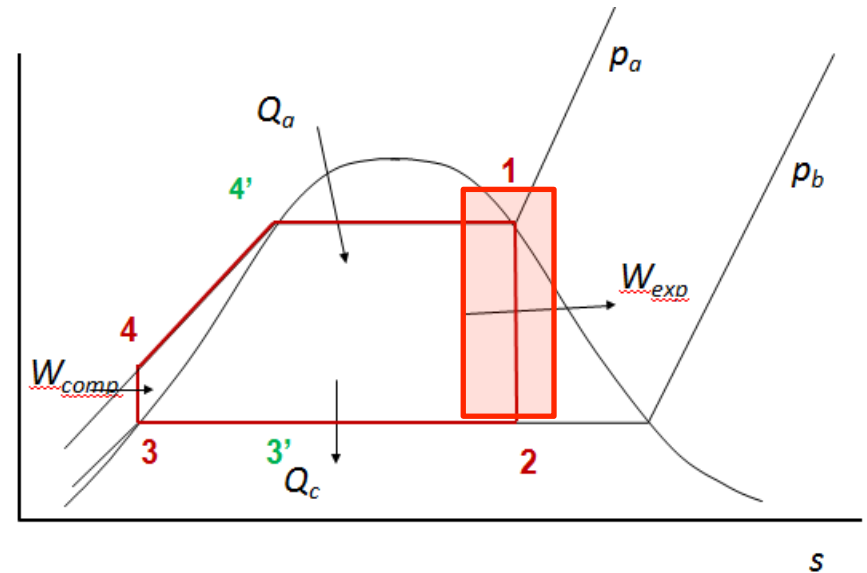
Bomba: (S.A., R.E. , adiabático, ΔE_C y $\Delta E_P \sim 0$)

$$h_4 = h_3 + W_B \rightarrow W_B = h_4 - h_3$$

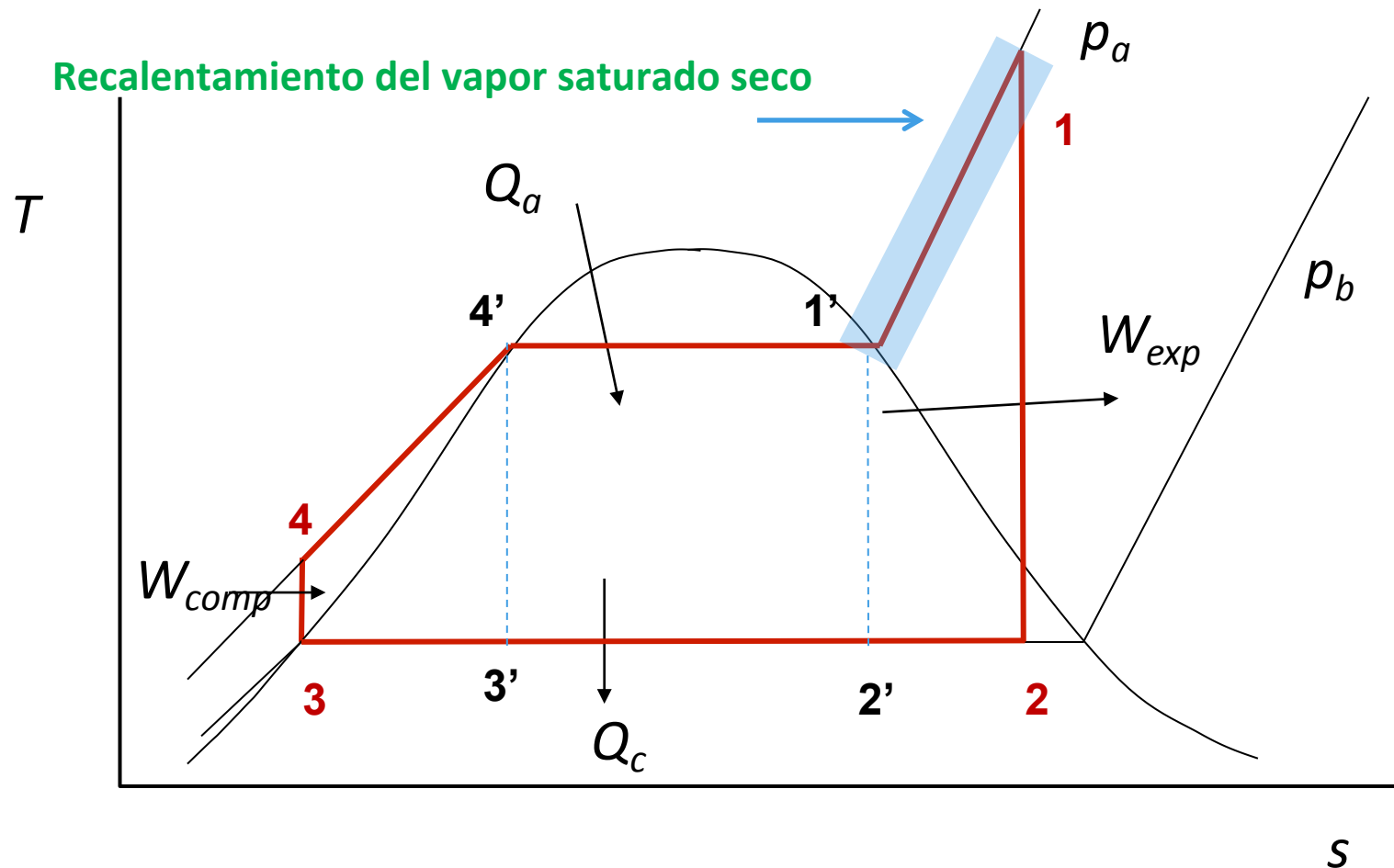
Calor absorbido en la caldera: (S.A., R.E, ΔE_C y $\Delta E_P \sim 0$)

$$h_1 = h_4 + q_a \rightarrow q_a = h_1 - h_4$$

$$\eta_t = \frac{\dot{W}_{neto}}{\dot{Q}_a} = \frac{W_T - W_{Bomba}}{\dot{Q}_a} = \frac{\dot{m}(h_1 - h_2) - \dot{m}(h_4 - h_3)}{\dot{m}(h_1 - h_4)}$$

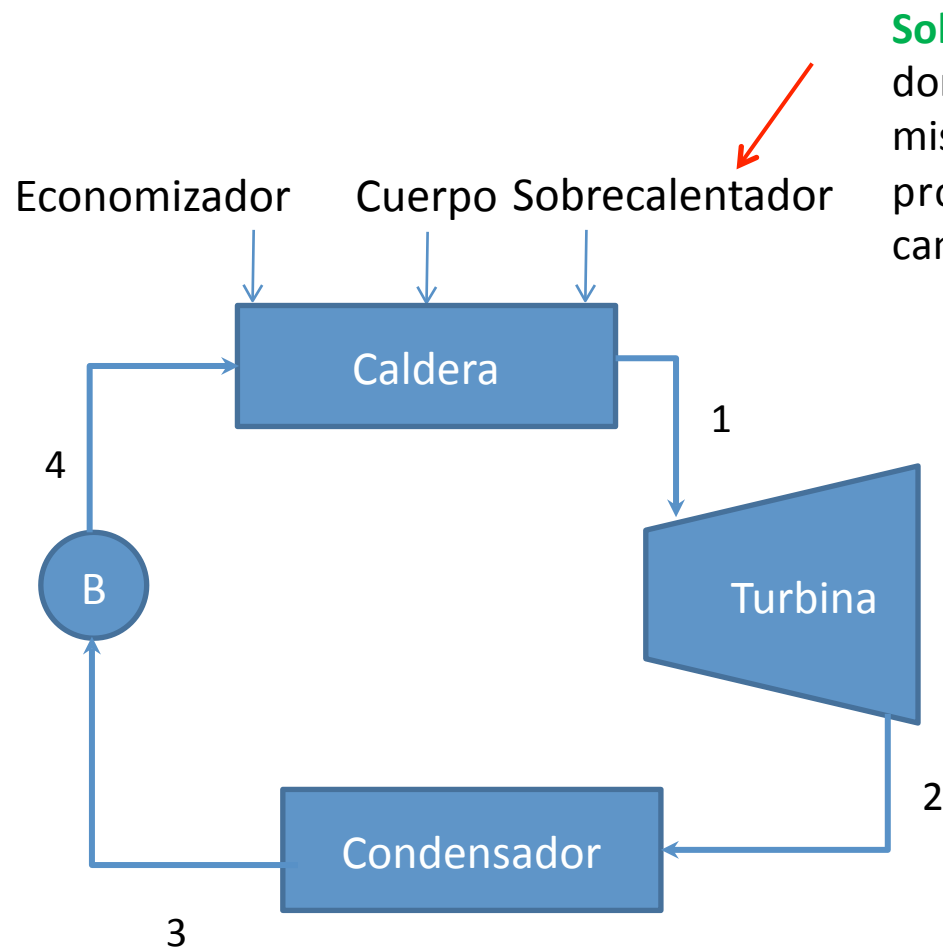


Ciclo de Rankine ideal

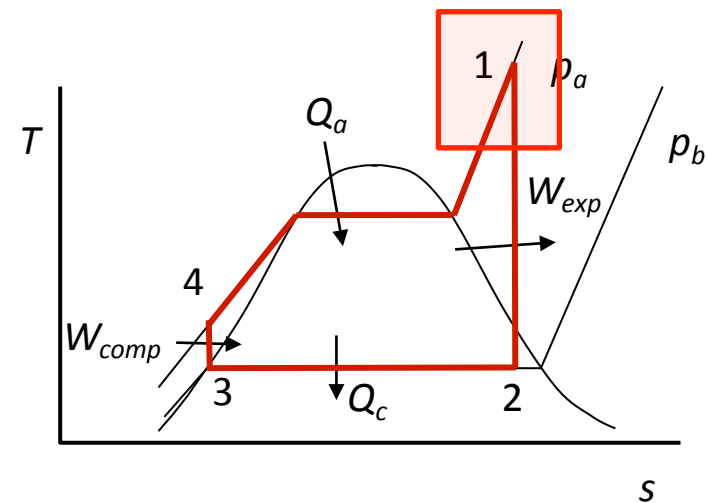


Proceso 1' → 1: Sobrecalentamiento de vapor saturado seco en el sobrecalentador, antes de que salga de la caldera
Obj.: aumentar el título en 2

Ciclo de Rankine ideal



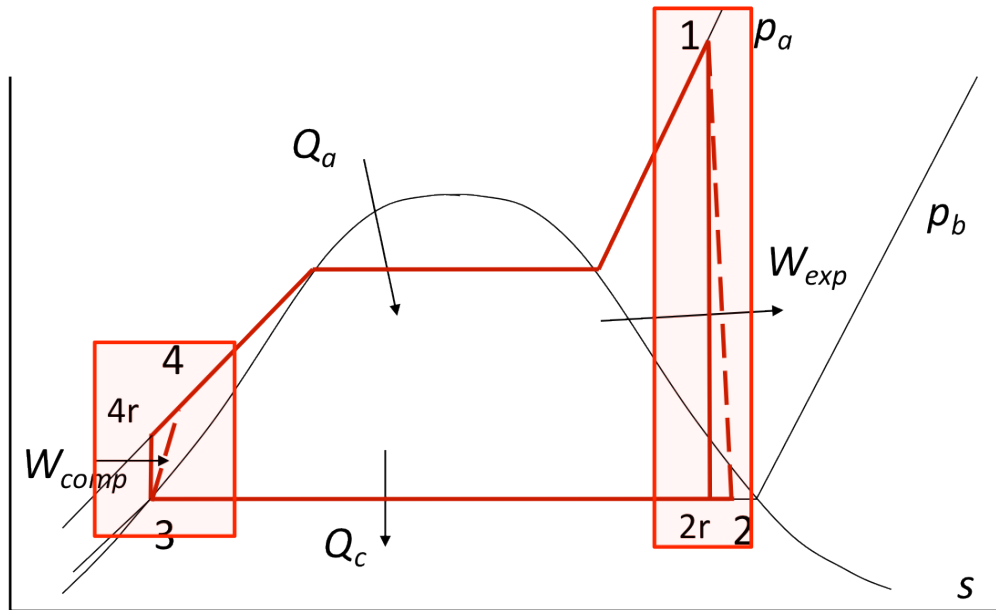
Sobrecalentador: es un intercambiador de calor donde el vapor saturado seco se recalienta a la misma P de la caldera mediante los gases procedentes de la combustión antes de canalizarlos a la chimenea



$$\eta_t = \frac{\dot{W}_{neto}}{\dot{Q}_a} = \frac{W_T - W_{Bomba}}{\dot{Q}_a} = \frac{\dot{m}(h_1 - h_2) - \dot{m}(h_4 - h_3)}{\dot{m}(h_1 - h_4)}$$

Ciclo de Rankine con irreversibilidades

T



Turbina → mayor irreversibilidad

Pérdida E_{cal} por no ser adiabática

Aumenta $s \Rightarrow$ disminuye W

Turbina (expansión): $W_{rev} > W_{real}$

$$\eta_{st} = \frac{W_{real}}{W_{rev}} = \frac{W_{irrev}}{W_{rev}} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2r}}$$

Bomba

Compresión real: irreversible

Aumenta $s \Rightarrow$ aumenta W

Bomba (compresión): $W_{real} > W_{rev}$

$$\eta_{SC} = \frac{W_{rev}}{W_{real}} = \frac{h_{4r} - h_3}{h_4 - h_3}$$

En un proceso adiabático la entropía sólo puede aumentar o permanecer constante

Otras pérdidas (irrev. Int.):

Pérdida E_{cal} en otros elementos de la instalación

Rozamiento fluidos al circular distintos conductos /.../

Irrev.ext. (en la central térmica):

Transmisión calor del proceso de combustión (gran pérdida E_{cal})

Pérdida E_{cal} : vapor en el condensador al agua de refrigeración

$$W_{turb} \gg \gg W_{bomb}$$



Mejoras del ciclo de Rankine



Ciclo de Rankine con recalentamiento intermedio

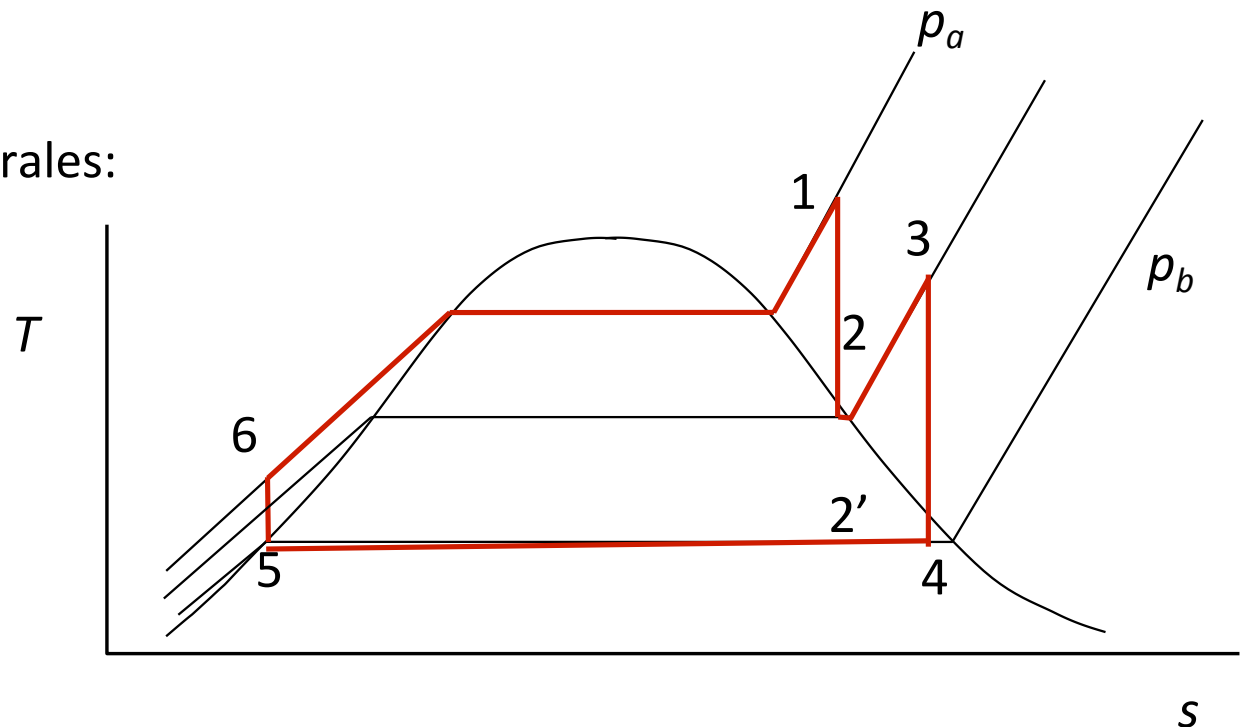
Ciclo de Rankine con recalentamiento intermedio

Una forma de aumentar en $\eta_t \Rightarrow$ aumentar P entrada a la turbina
Inconveniente: disminuye x a la salida \Rightarrow aumenta humedad

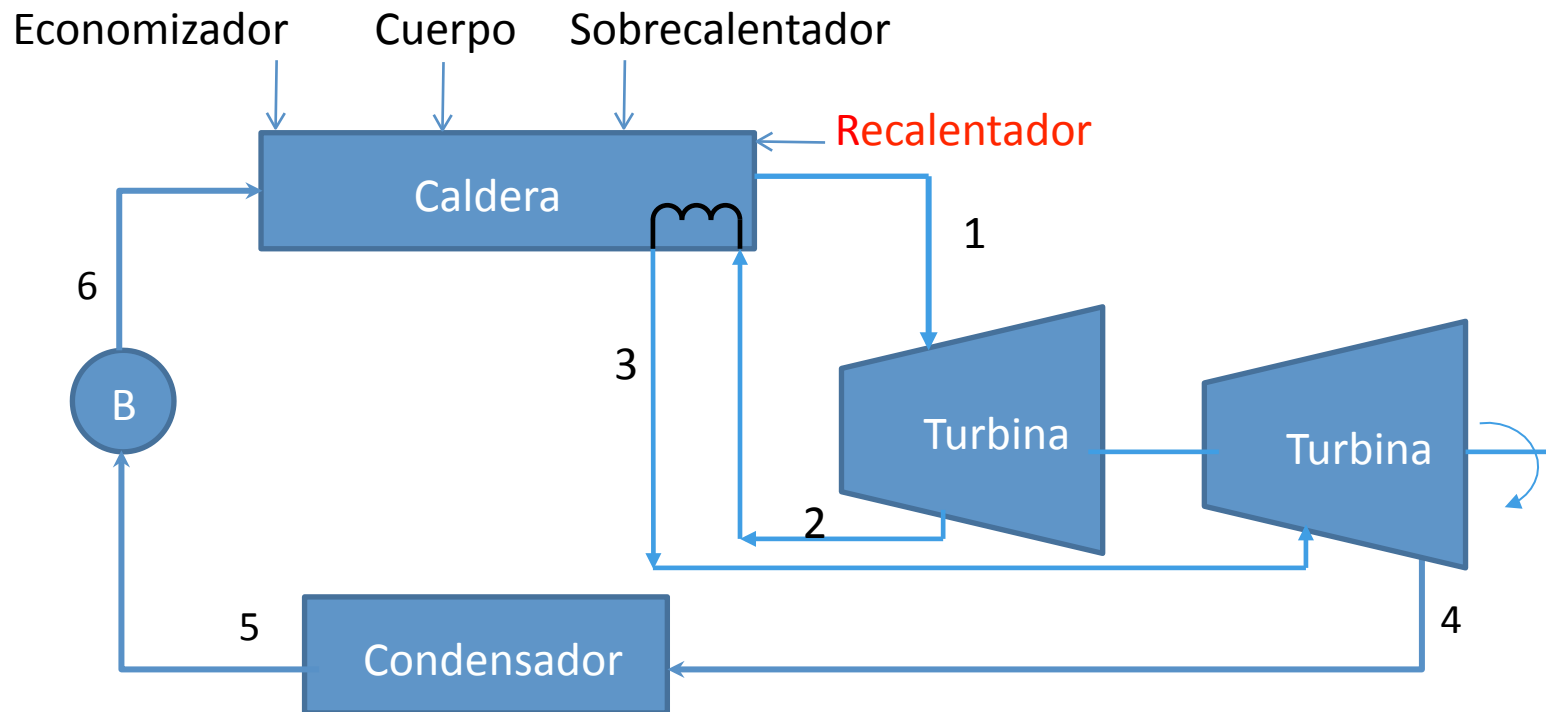
Solución: recalentamiento intermedio

Obj.: aumentar la presión de entrada a la turbina \Rightarrow aumento del salto entálpico potencial

Se suele instalar en centrales:
 $P > 50$ MW
 $P_{\text{entrada}} > 5$ MPa

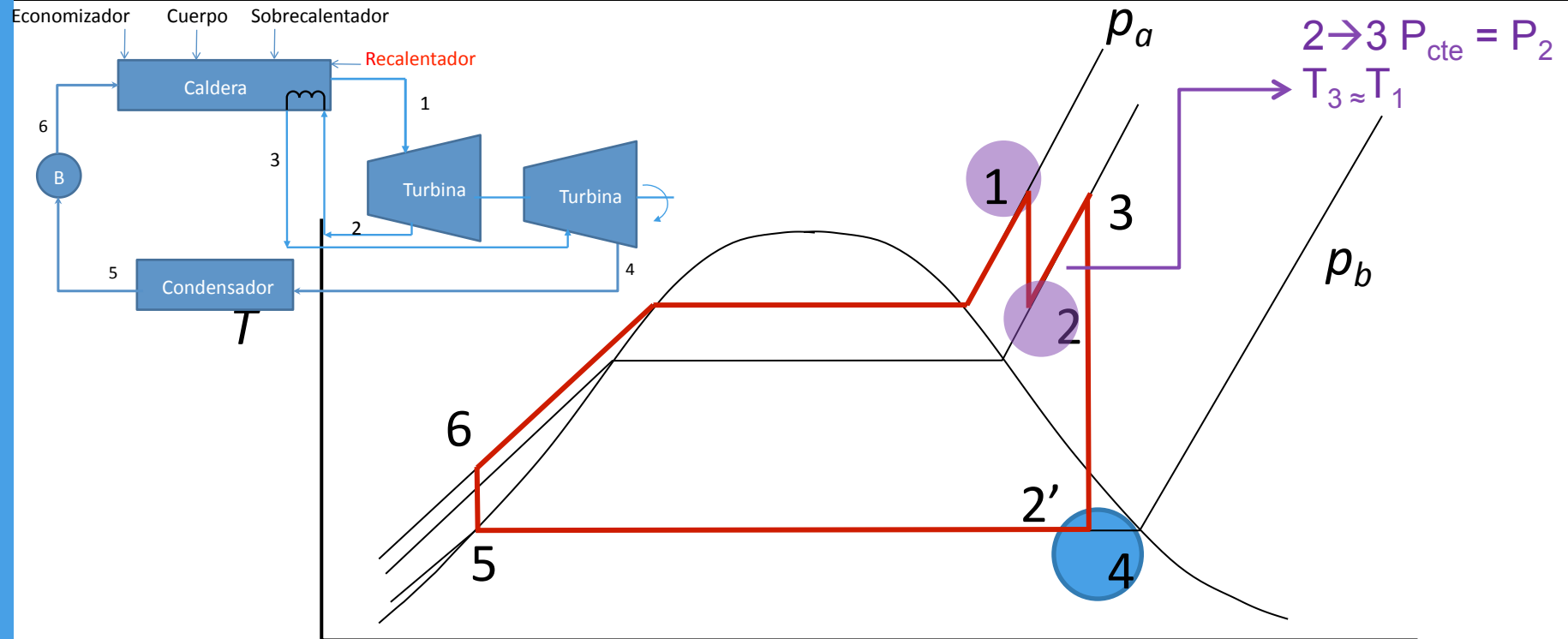


Ciclo de Rankine con recalentamiento intermedio



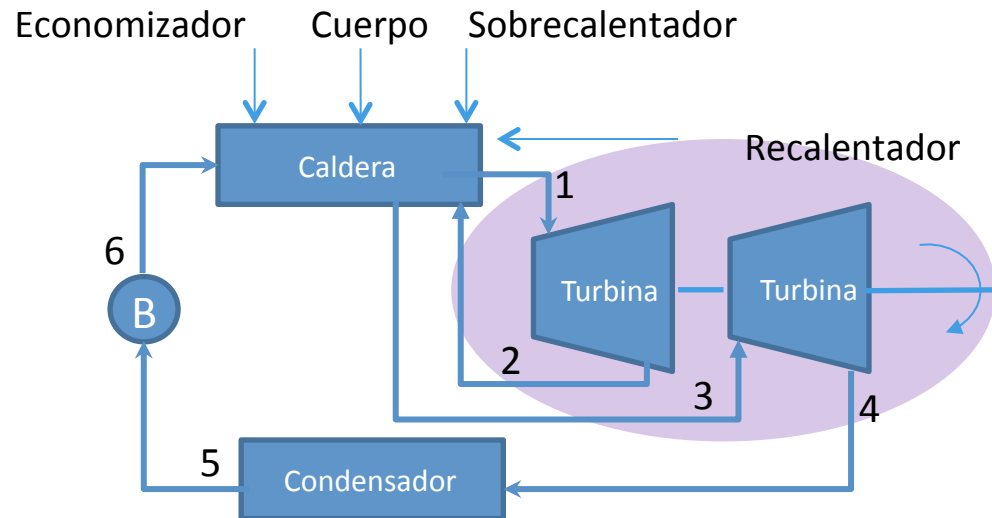
1. El vapor procedente de la caldera se deja expandir en la Turbina hasta una **presión determinada**, a esa presión determinada se extrae TODO el vapor y se lleva al recalentador (caldera) \rightarrow se recalienta a P cte. hasta $T_3 \approx T_{\text{entrada turb}} (T_1)$ (nunca superior \rightarrow encareceríamos el proceso \Rightarrow materiales más resistentes).
2. Se lleva de nuevo a la turbina \rightarrow expandir hasta $P_{\text{salida turb}}$

Ciclo de Rankine con recalentamiento intermedio



- 1-2: vapor entra en la turbina (1) como vapor recalentado \rightarrow expansión^S isoentrópica hasta P_2 (2 puede estar dentro o no de la campana)
- 2-3: recaliento vapor tal que aumenta la T (hasta $T \approx T_1$) a P constante.
- 3-4: vapor recalentado (3) vuelve a turbina \rightarrow expansión isoentrópica hasta 4.
- 4-5: fluido al condensador, se va enfriando y sale como líquido saturado
- 5-6: compresión desde P_5 (presión de baja) hasta la presión de alta P_6 .

Ciclo de Rankine con recalentamiento intermedio



El recalentador → intercambiador de calor donde el vapor se recalienta de 2 a 3 mediante los gases procedentes de la combustión antes de salir a la chimenea.
3 intercambiadores calor en caldera: economizador, sobrecalentador y recalentador
Los 3 intercambiadores funcionan con los gases de combustión la caldera, según orden de necesidad de calor.

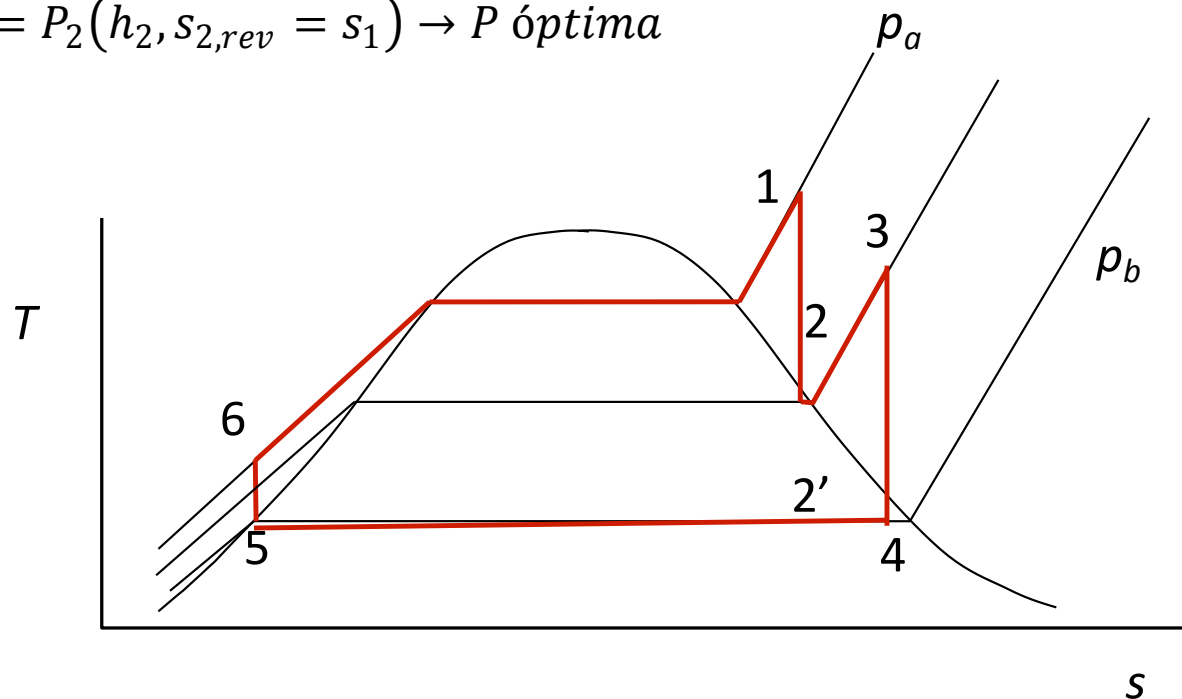
Antes: se solía montar un solo cuerpo de turbina → en desuso, porque los puntos 2 y 3 están muy próximos y el mismo material tiene que soportar diferentes temperaturas. Solución: construir dos cuerpos de turbina, acopladas al mismo eje (**turbina de alta presión y turbina de baja presión**).

Ciclo de Rankine con recalentamiento intermedio

La **p óptima de extracción** → se obtiene para una entalpía = 1/3 del salto entálpico en la expansión adiabática reversible desde la entrada a la turbina a la salida:

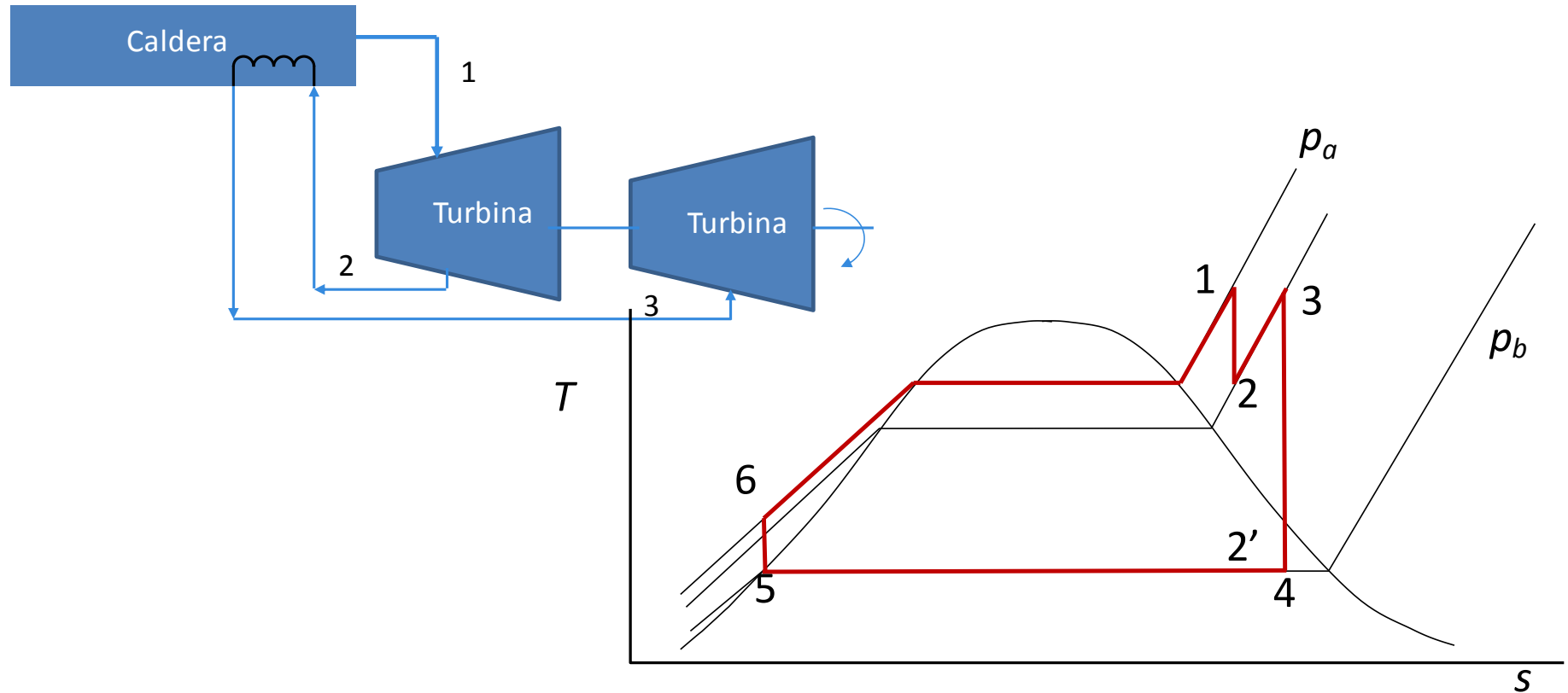
$$\frac{1}{3}(h_1 - h_{2'}) \rightarrow h_2 = h_1 - \frac{1}{3}(h_1 - h_{2'}) \rightarrow \text{Entalpía de } P \text{ óptima}$$

$$P_2 = P_2(h_2, s_{2,rev} = s_1) \rightarrow P \text{ óptima}$$



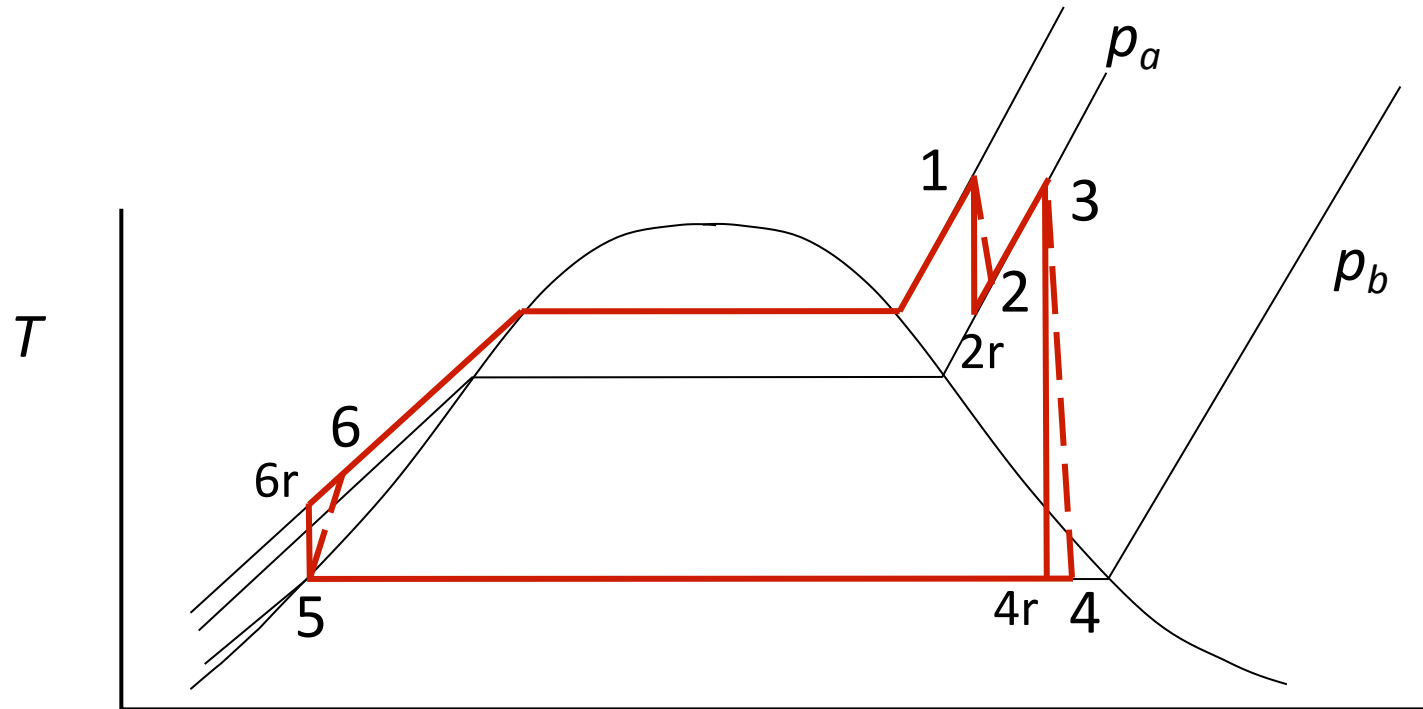
Si $p_{\text{extracción}}$ es muy baja $\Rightarrow \eta_t$ disminuye

Rendimiento del ciclo de Rankine con recalentamiento



$$\eta_t = \frac{W_{NETO}}{Q_A} = \frac{W_{TAP} + W_{TBP} - W_B}{Q_{A\ 6 \rightarrow 1} + Q_{A\ 2 \rightarrow 3}} = \frac{(h_1 - h_2) + (h_3 - h_4) - (h_6 - h_5)}{(h_1 - h_6) + (h_3 - h_2)}$$

Irreversibilidades del ciclo de Rankine con recalentamiento



$$\eta_{ST_{AP}} = \frac{W_{real}}{W_{reversible}} = \frac{(h_1 - h_2)}{(h_1 - h_{2r})}$$

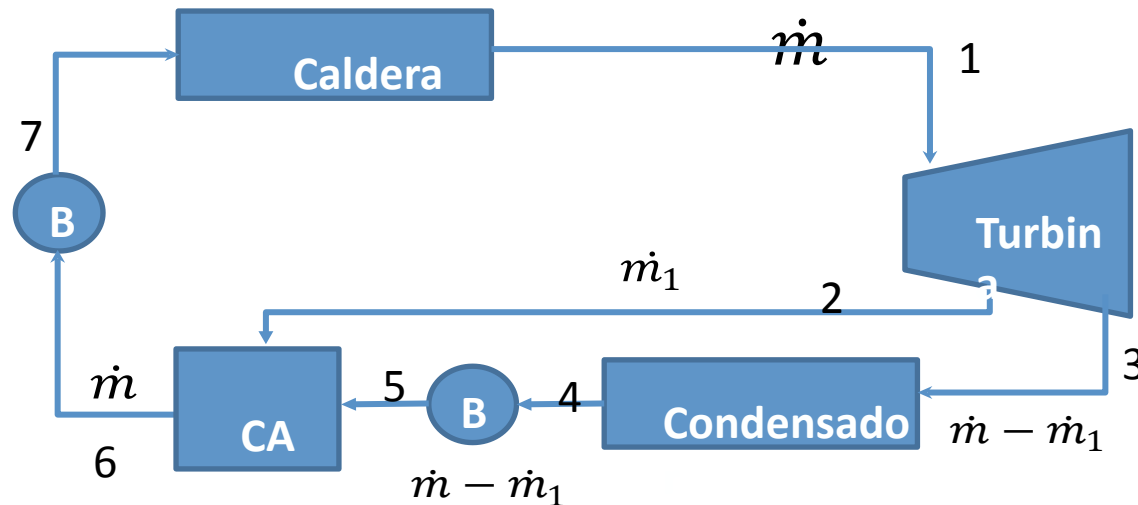
$$\eta_{ST_{BP}} = \frac{W_{real}}{W_{reversible}} = \frac{(h_3 - h_4)}{(h_3 - h_{4r})}$$

$$\eta_{SB} = \frac{W_{reversible}}{W_{real}} = \frac{(h_{6r} - h_5)}{(h_6 - h_5)}$$



Ciclo de Rankine con regeneración

Ciclo de Rankine regenerativo

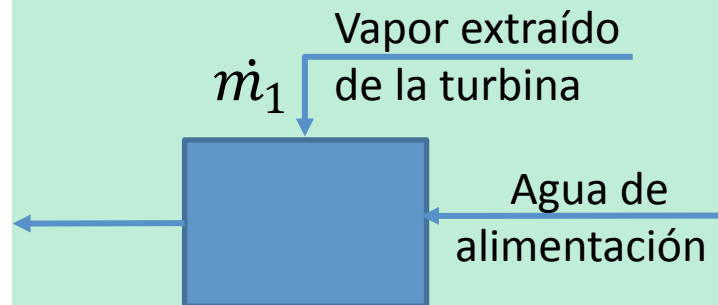


En Rankine (ciclo básico): agua entra en la caldera como líquido subenfriado (a T mucho menor que T de saturación a la entrada de la caldera). El economizador, donde se calienta el agua, es un proceso altamente irreversible (existe una diferencia significativa entre T del agua a calentar y los gases procedentes de la combustión que la calienta). Esta irreversibilidad \Rightarrow disminución del rendimiento. Para evitar esta irreversibilidad se calienta el agua de alimentación antes de entrar al economizador. Este calentamiento del agua se lleva a cabo en los calentadores, que son unos intercambiadores de calor que se instalan entre la salida del condensador y la entrada a la caldera. El agua se calienta gracias a pequeñas cantidades de vapor y se extraen de la turbina.

Tipos de calentadores

Existen dos tipos de calentadores: abiertos (o de contacto directo) y cerrados

Calentador abierto o de contacto directo

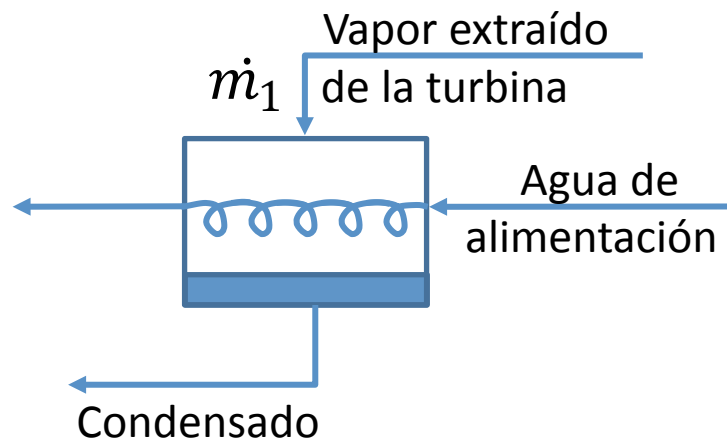


En los calentadores abiertos el agua de alimentación se mezcla con el vapor extraído de la turbina, cediendo el vapor su E. calorífica al agua y calentándola condensando el vapor. En condiciones óptimas de funcionamiento, el agua de alimentación sale del condensador como líquido saturado a la presión de extracción de la turbina

$$\text{Fracción másica: } Y = \frac{\text{vapor extraído de la turbina}}{\text{vapor que entra en la turbina}} = \frac{\dot{m}_1}{\dot{m}}$$

Tipos de calentadores

Calentador cerrado

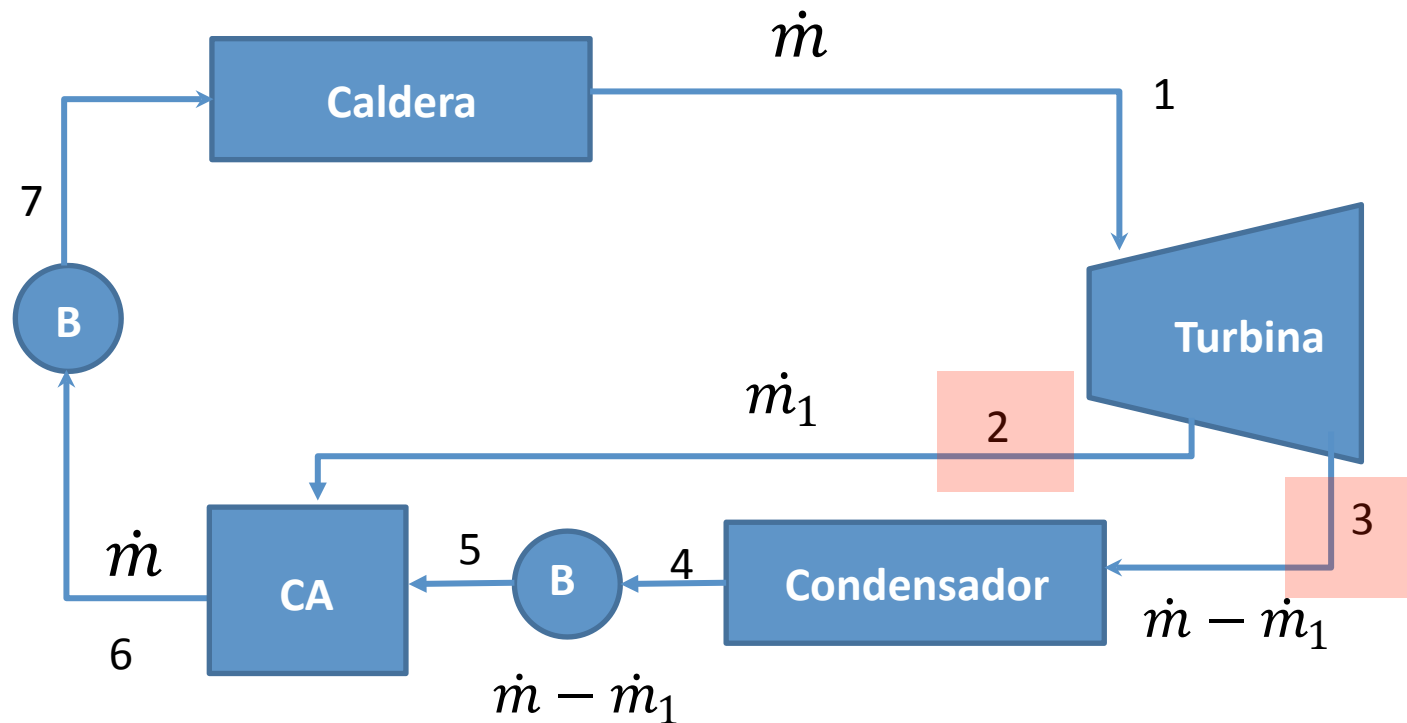


Aquí no se produce la mezcla del vapor de agua procedente de la turbina con el agua de alimentación. El agua de alimentación pasa por un serpentín y el vapor cede su E. Calorífica a través de las paredes del serpentín, condensándose y cayendo al fondo del calentador.

En este caso las 2 líneas están separadas y no es necesario que tengan la misma presión.

El condensado sale como líquido saturado a la presión de extracción de la turbina y el tras el paso del vapor extraído por el calentador, éste sale como líquido subenfriado a la misma temperatura que el condensado

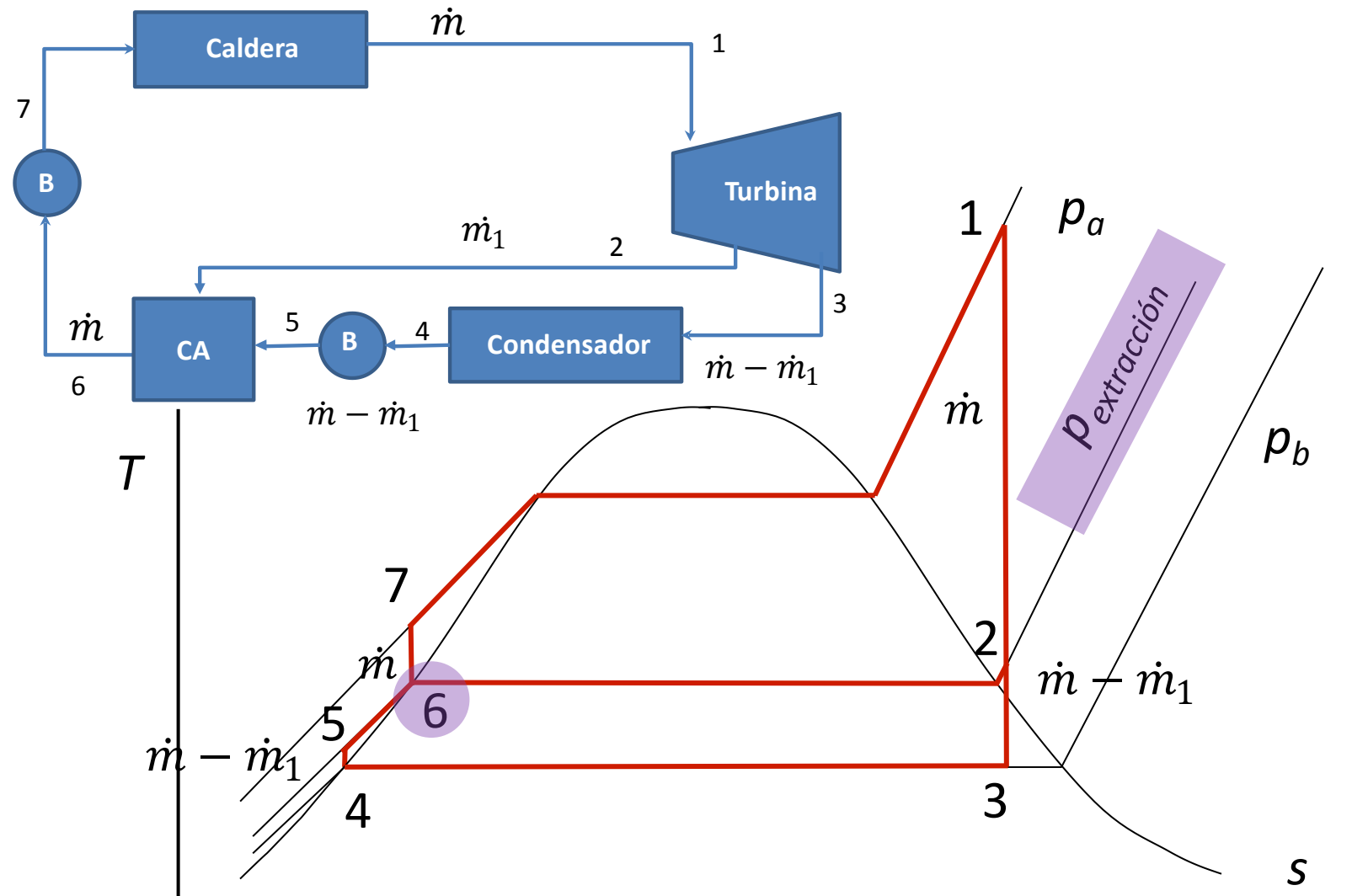
Ciclo de Rankine regenerativo con calentador abierto



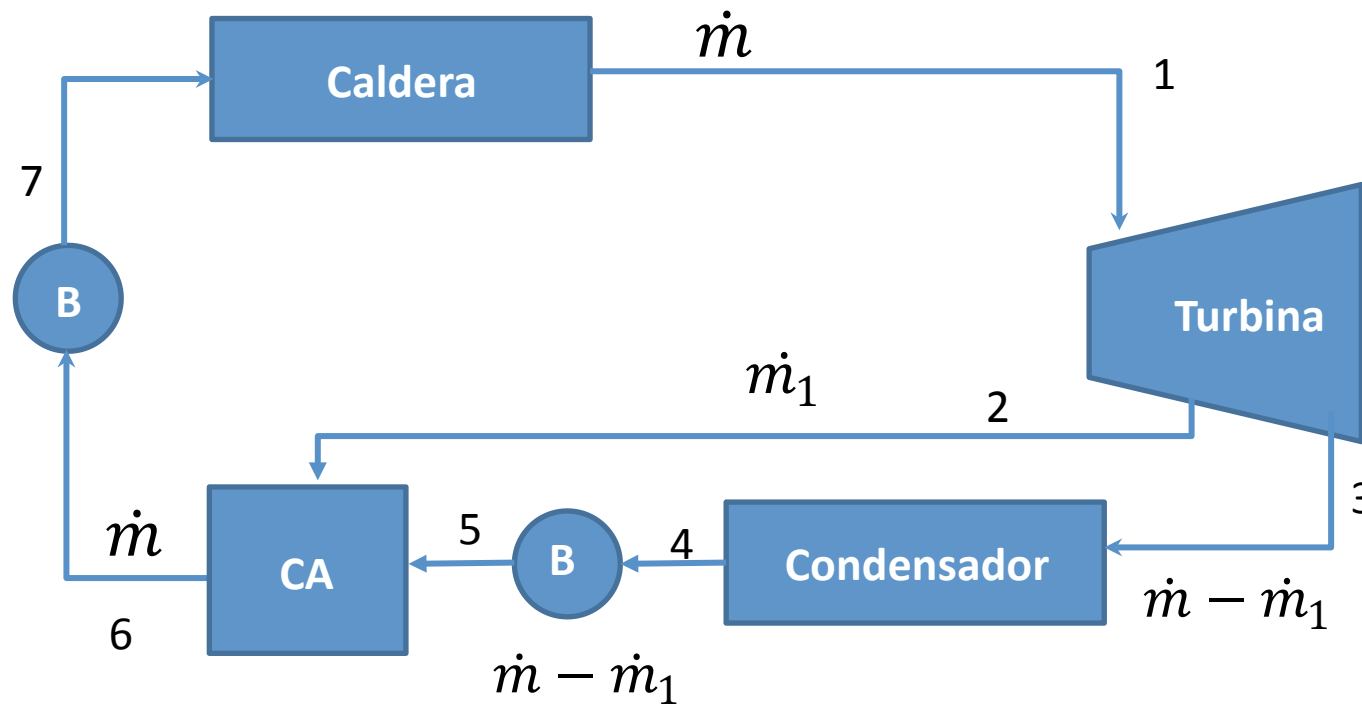
Entre el condensador y el calentador abierto necesitamos colocar una bomba para que se igualen las presiones ($P_{extracción}$ y P_3), puesto que sino el flujo se invertiría y no funcionaría la instalación.

Condiciones óptimas: 6 sale como líquido saturado a la presión de extracción de la turbina

Ciclo de Rankine regenerativo con calentador abierto



Ciclo de Rankine regenerativo con calentador abierto

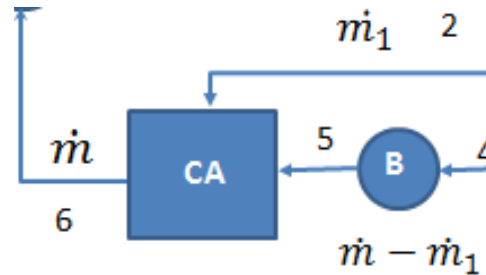


$$\eta_T = \frac{\dot{W}_{neto}}{\dot{Q}_A} = \frac{\dot{W}_T - \dot{W}_{B_1} - \dot{W}_{B_2}}{\dot{Q}_A}$$

$$\eta_T = \frac{\dot{m}(h_1 - h_2) + (\dot{m} - \dot{m}_1)(h_2 - h_3) - (\dot{m} - \dot{m}_1)(h_5 - h_4) - \dot{m}(h_7 - h_6)}{\dot{m}(h_1 - h_7)}$$

Ciclo de Rankine regenerativo con calentador abierto

Balace en el calentador:



$$(\dot{m} - \dot{m}_1)h_5 + \dot{m}_1 \cdot h_2 = \dot{m} \cdot h_6$$

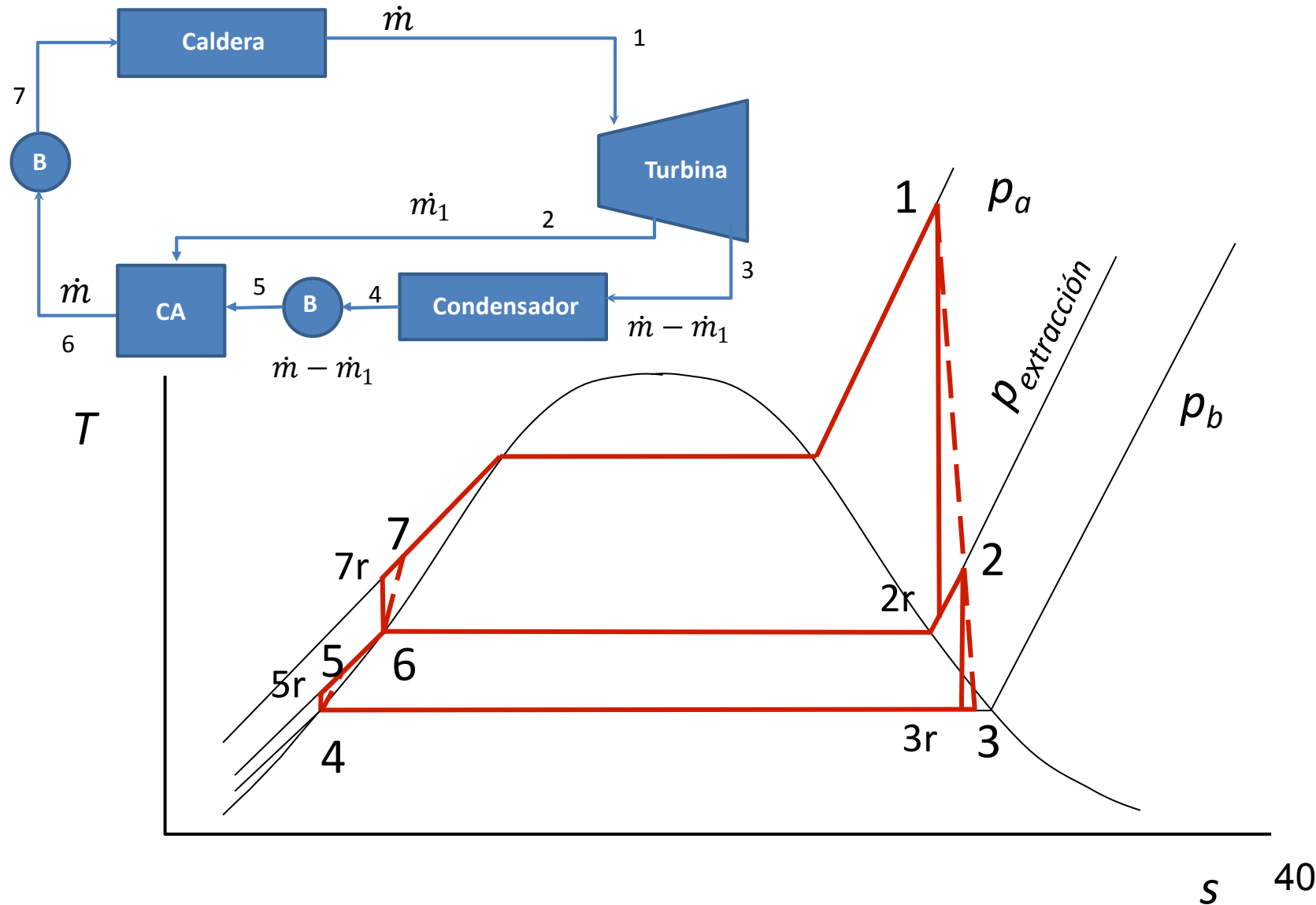
Si queremos calcular la fracción másica, Y: $Y_1 = \frac{\dot{m}_1}{\dot{m}} = \frac{\text{kg de vapor que se extraen}}{\text{kg vapor que entran}}$

$$(1 - Y_1)h_5 + Y_1 \cdot h_2 = h_6$$

Si no nos dan el valor del flujo másico (m) se podrían expresar el rendimiento en función de Y:

$$\eta_T = \frac{(h_1 - h_2) + (1 - Y_1)(h_2 - h_3) - (1 - Y_1)(h_5 - h_4) - (h_7 - h_6)}{(h_1 - h_7)}$$

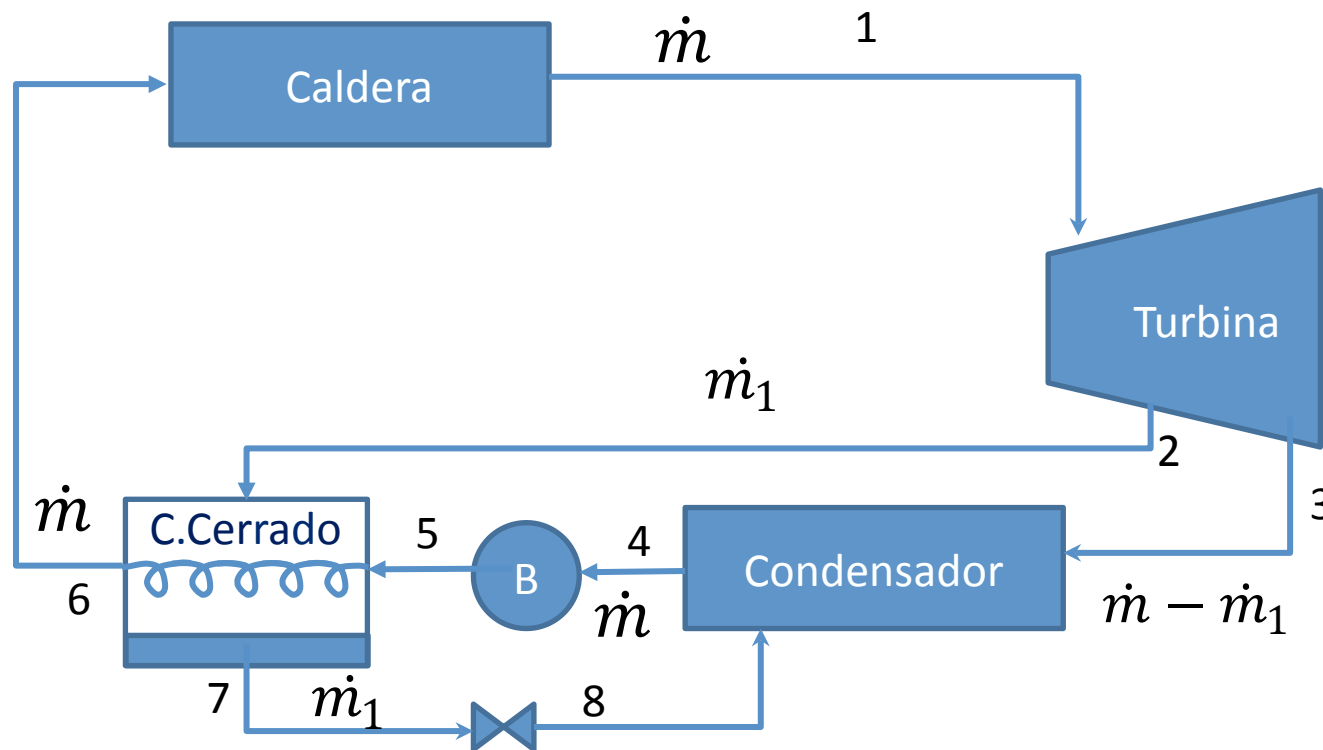
Ciclo de Rankine regenerativo con calentador abierto



Ciclo de Rankine regenerativo con calentador cerrado

Existen dos esquemas con calentador cerrado según a donde se envíe el condensado: condensado al condensador o a la línea de alimentación de la caldera

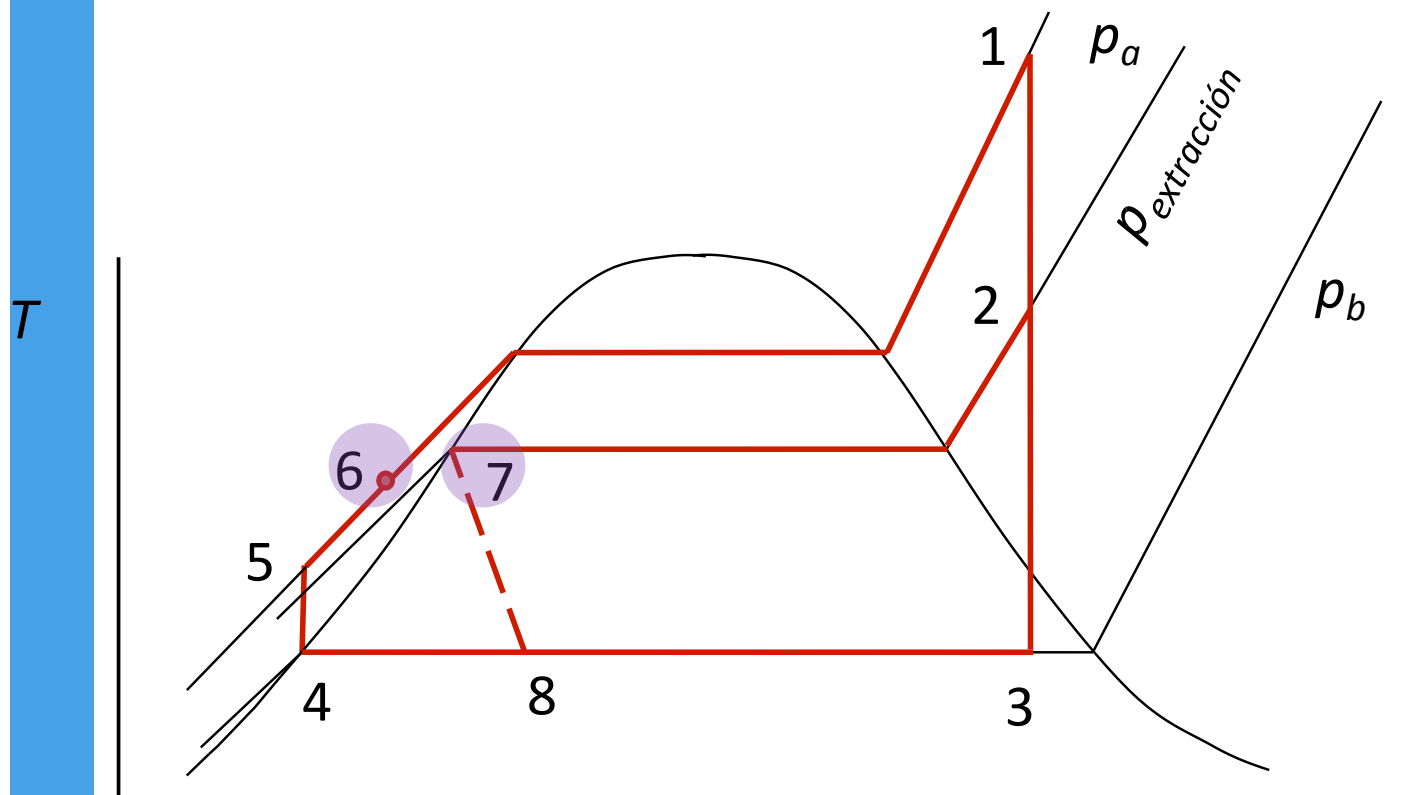
a) Envío del condensado al condensador:



Ciclo de Rankine regenerativo con calentador cerrado

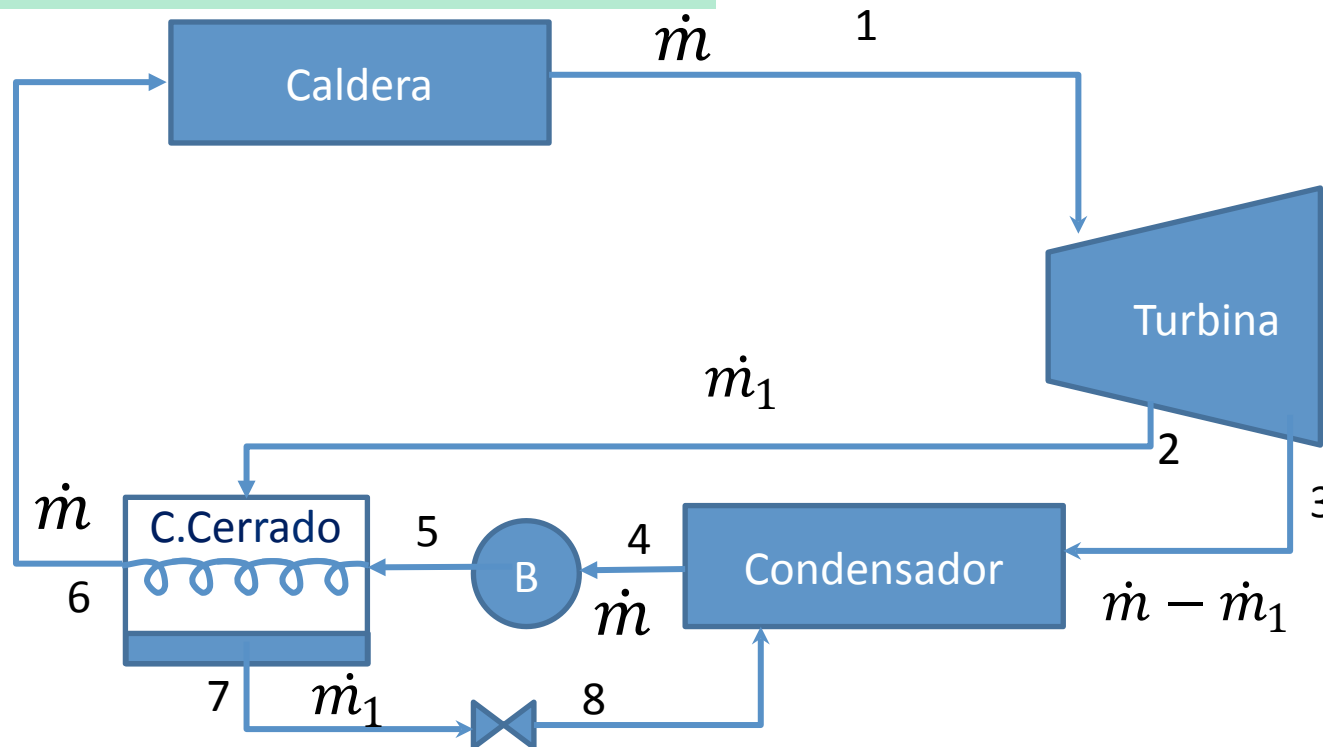
En condiciones óptimas de funcionamiento:

- 1) T agua alimentación a salida del calentador cerrado = T del condensado $\rightarrow T_6 = T_7$
- 2) $P_8 < P_7 \rightarrow$ colocó una válvula de expansión
- 3) En el punto 7 todo es líquido (líquido saturado), en 8 hay líquido y vapor al haber una pérdida de energía por rozamiento, esa E la absorbe el propio fluido y la invierte en pasar parte a vapor, por eso aparece en la salida como vapor húmedo



Ciclo de Rankine regenerativo con calentador cerrado

a) Envío del condensado al condensador:

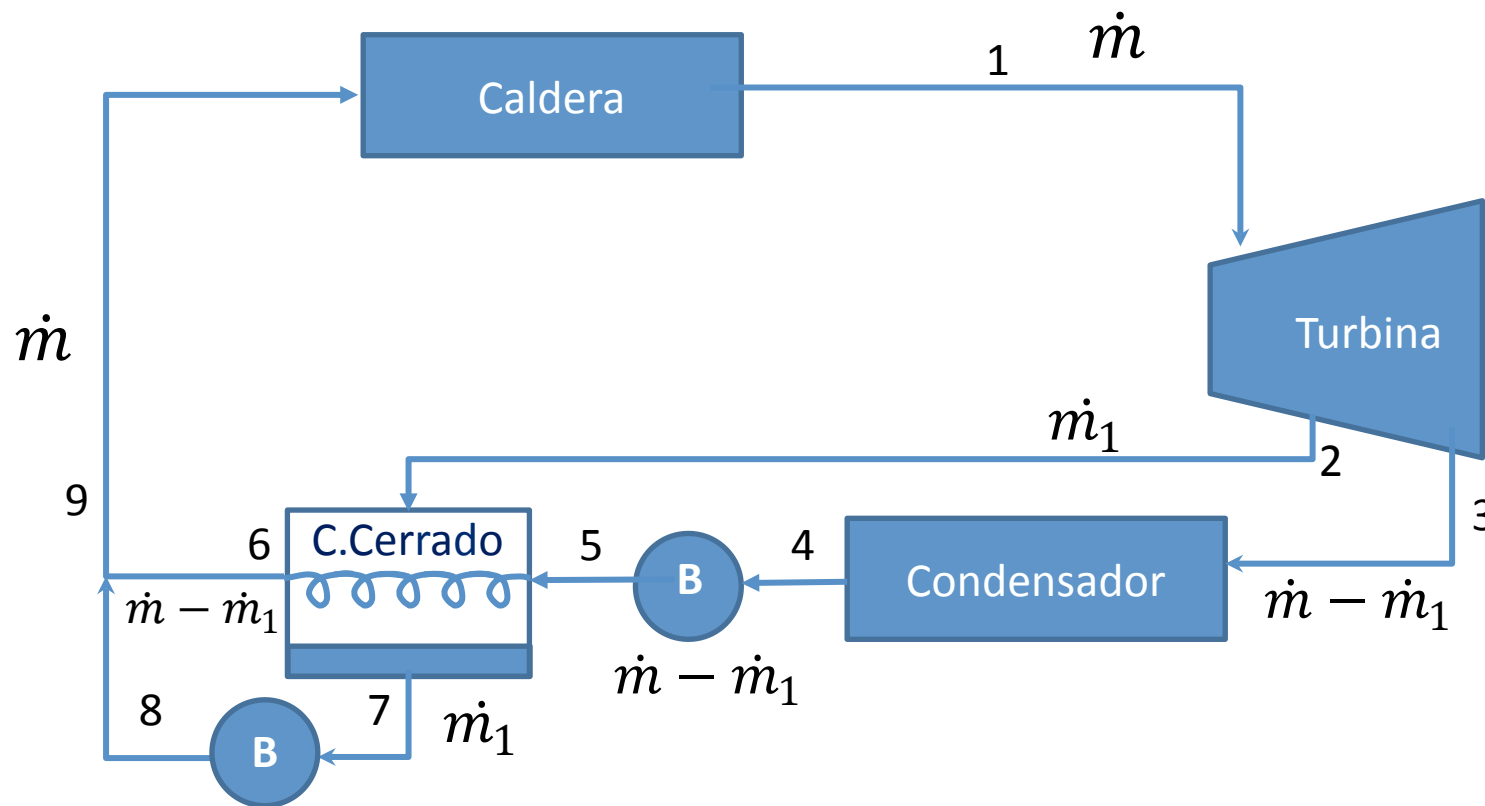


$$\eta_T = \frac{W_{neto}}{\dot{Q}_A} = \frac{\dot{W}_T - \dot{W}_B}{\dot{Q}_A}$$

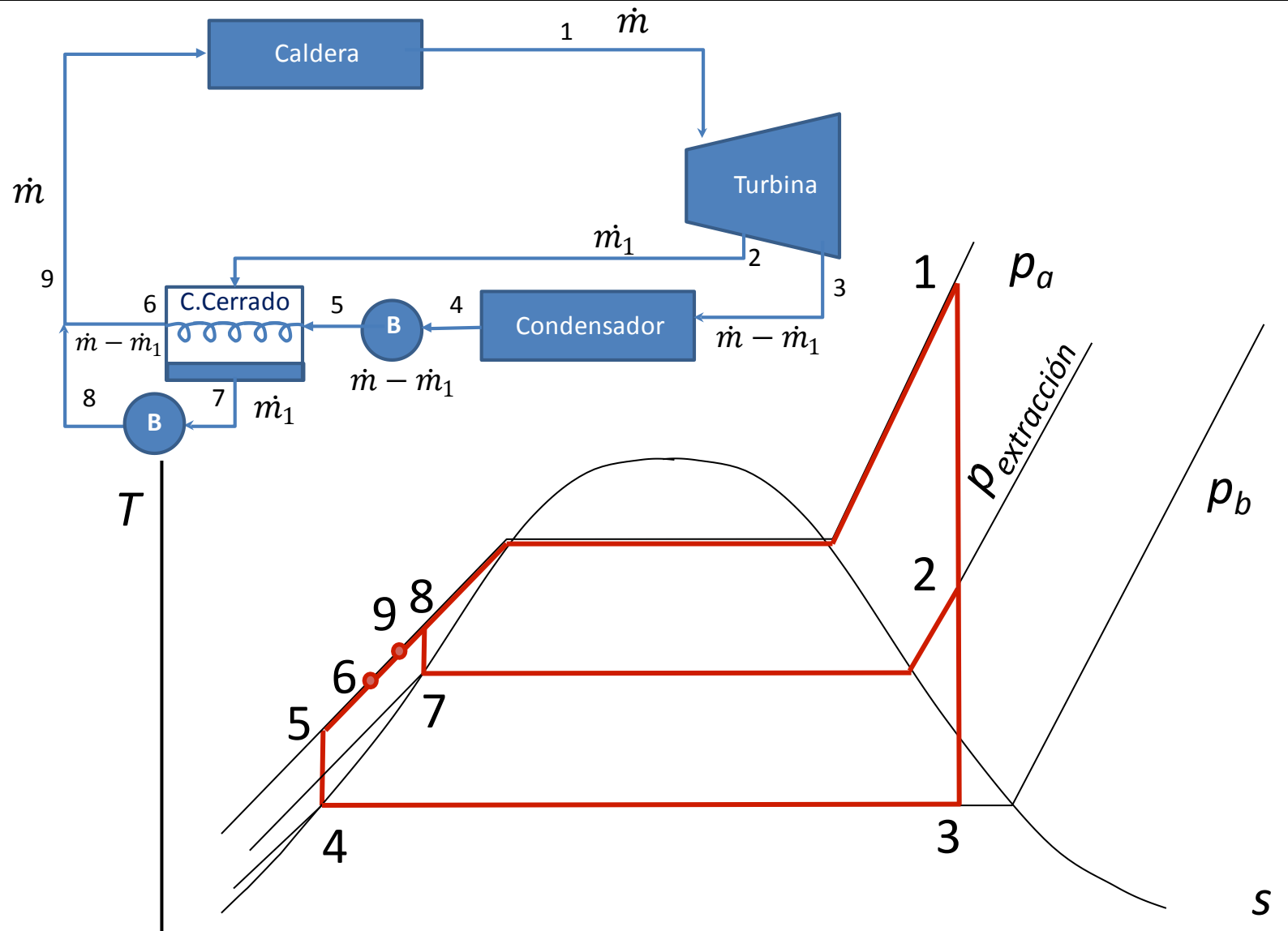
$$\eta_T = \frac{\dot{m}(h_1 - h_2) + (\dot{m} - \dot{m}_1)(h_2 - h_3) - \dot{m}(h_5 - h_4)}{\dot{m}(h_1 - h_6)}$$

Ciclo de Rankine regenerativo con calentador cerrado

b) Envío del condensado a la línea de alimentación de la caldera:

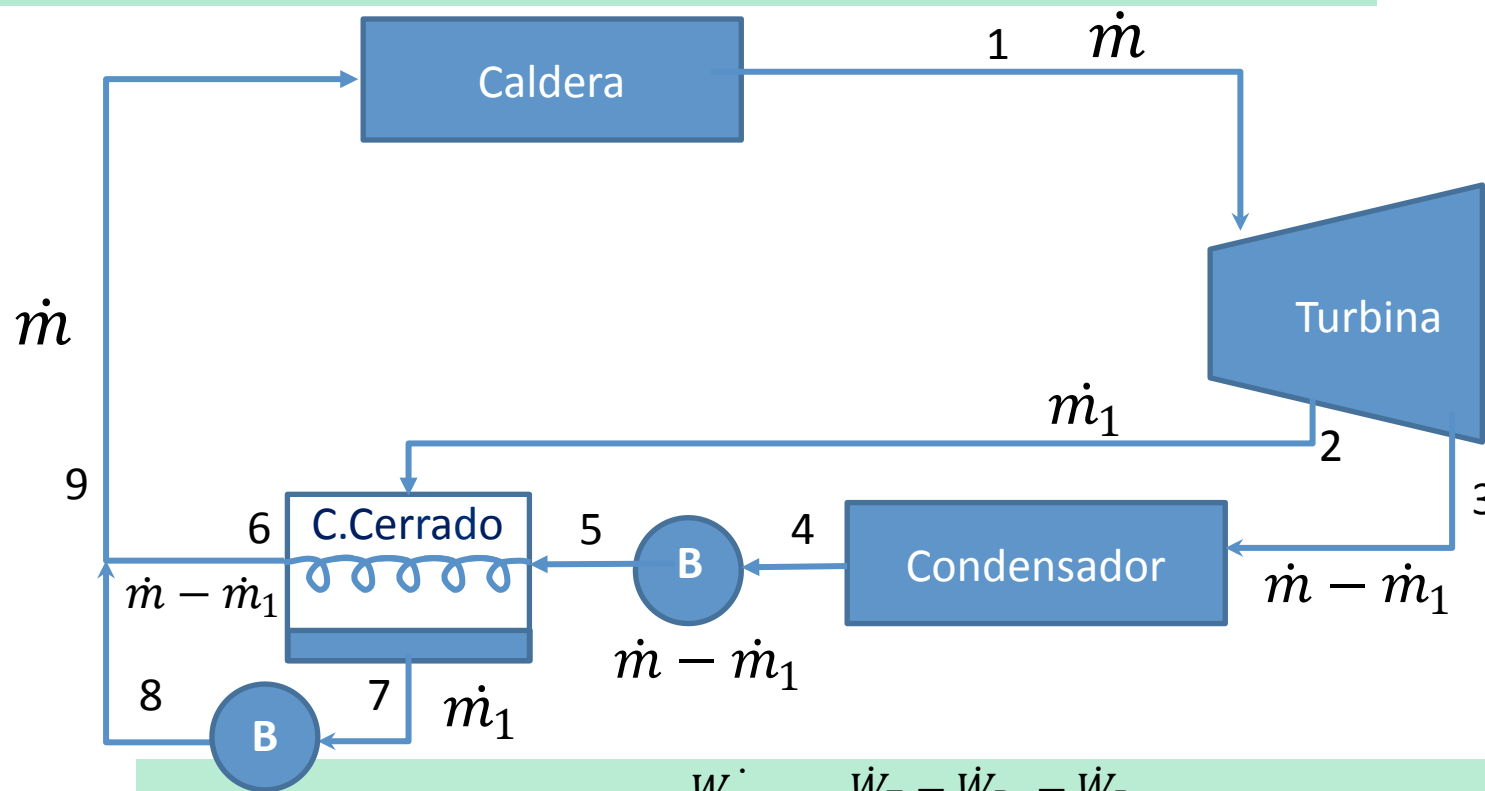


Ciclo de Rankine regenerativo con calentador cerrado



Ciclo de Rankine regenerativo con calentador cerrado

b) Envío del condensado a la línea de alimentación de la caldera:

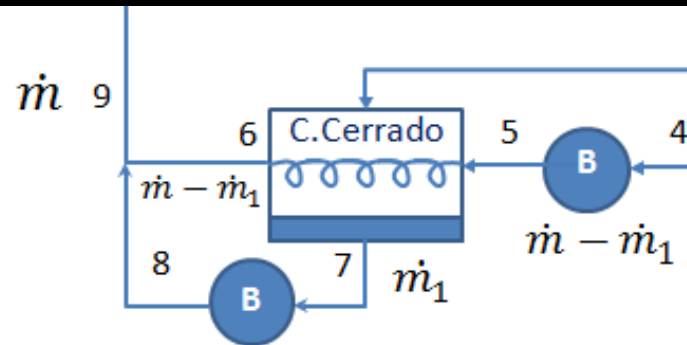


$$\eta_T = \frac{W_{neto}}{\dot{Q}_A} = \frac{\dot{W}_T - \dot{W}_{B_1} - \dot{W}_{B_2}}{\dot{Q}_A}$$

$$\eta_T = \frac{\dot{m}(h_1 - h_2) + (\dot{m} - \dot{m}_1)(h_2 - h_3) - (\dot{m} - \dot{m}_1)(h_5 - h_4) - \dot{m}_1(h_8 - h_7)}{\dot{m}(h_1 - h_9)}$$

Ciclo de Rankine regenerativo con calentador cerrado

Balance en el calentador:



$$(\dot{m} - \dot{m}_1)h_5 + \dot{m}_1 \cdot h_2 = \dot{m}_1 \cdot h_7 + (\dot{m} - \dot{m}_1)h_6$$

Si queremos calcular la fracción másica, Y : $Y_1 = \frac{\dot{m}_1}{\dot{m}} = \frac{\text{kg de vapor que se extraen}}{\text{kg vapor que entran}}$

$$(1 - Y)h_5 + Y \cdot h_2 = Y \cdot h_7 + (1 - Y)h_6$$

Rendimiento en función de Y :

$$\eta_T = \frac{(h_1 - h_2) + (1 - Y)(h_2 - h_3) - (1 - Y)(h_5 - h_4) - Y(h_8 - h_7)}{(h_1 - h_9)}$$

Ciclo de Rankine regenerativo con calentador cerrado

