



Centro
Universitario
de la Defensa

Lección 4

Ciclos de Potencia con Turbina de Vapor



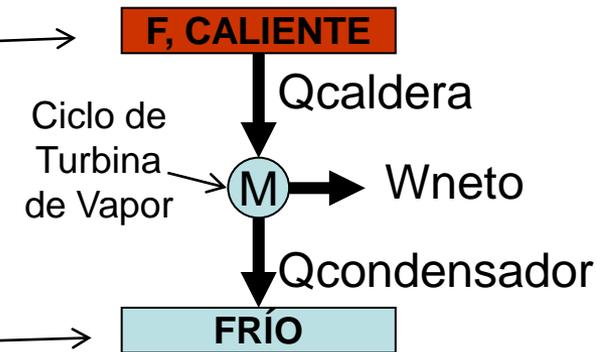
*Centro Universitario de la Defensa de San Javier
MDE-UPCT,*

UTILIZACIÓN:

- Producción de electricidad (centrales térmicas convencionales y nucleares)
- Centrales térmicas de ciclo combinado

NECIDADES Y CONDICIONANTES DE IMPLANTACIÓN:

- Necesitamos combustible cerca
- Refrigeración del condensador: una central de 1,000 MW necesita 50,000 l/s de agua de refrigeración



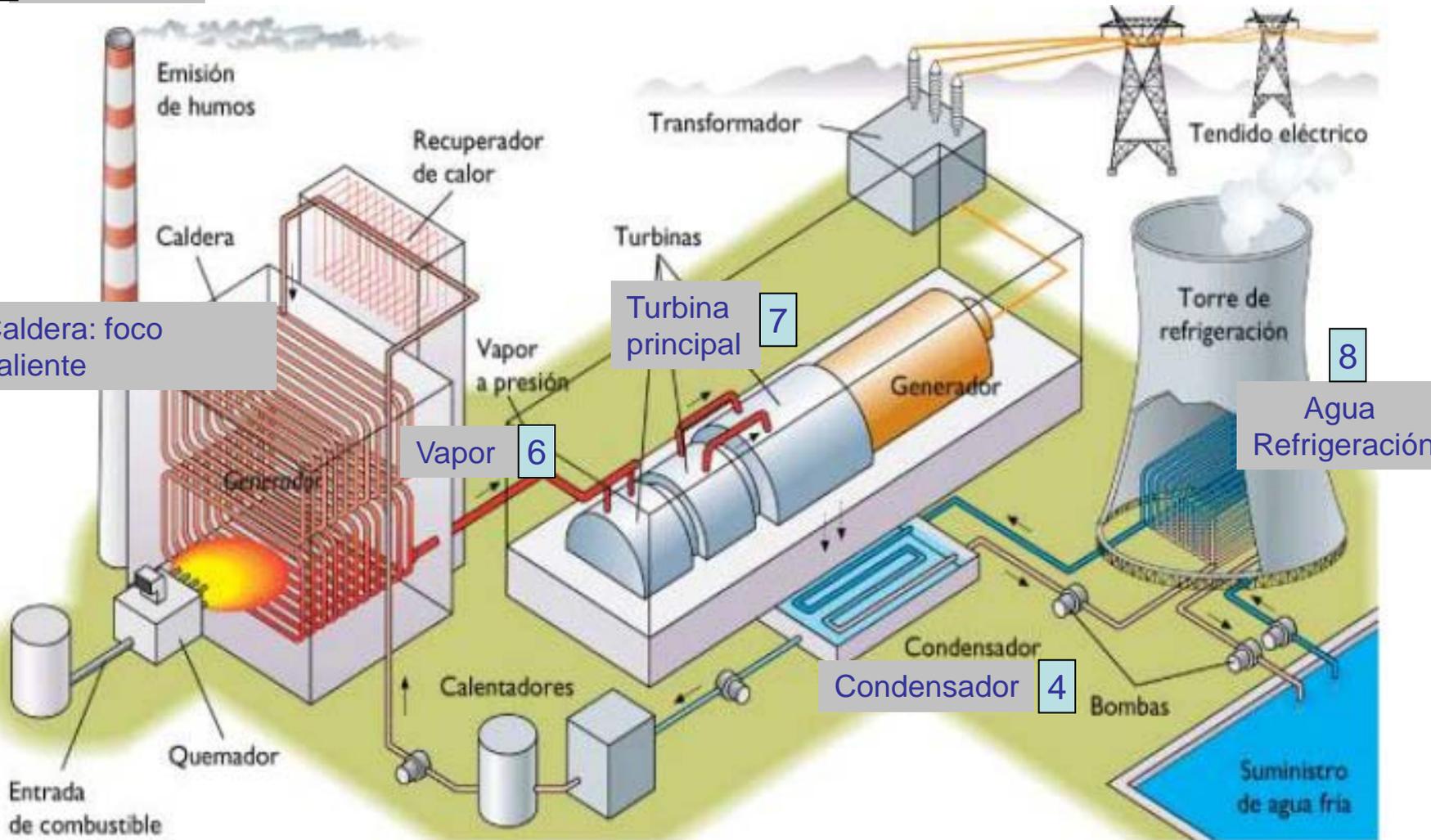
Sistemas y esquemas funcionales en una Central Térmica



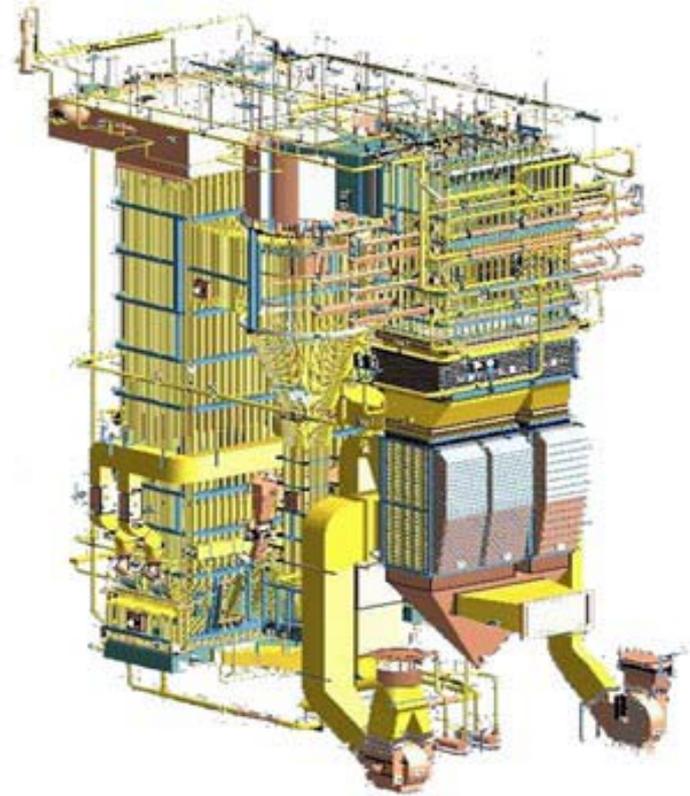
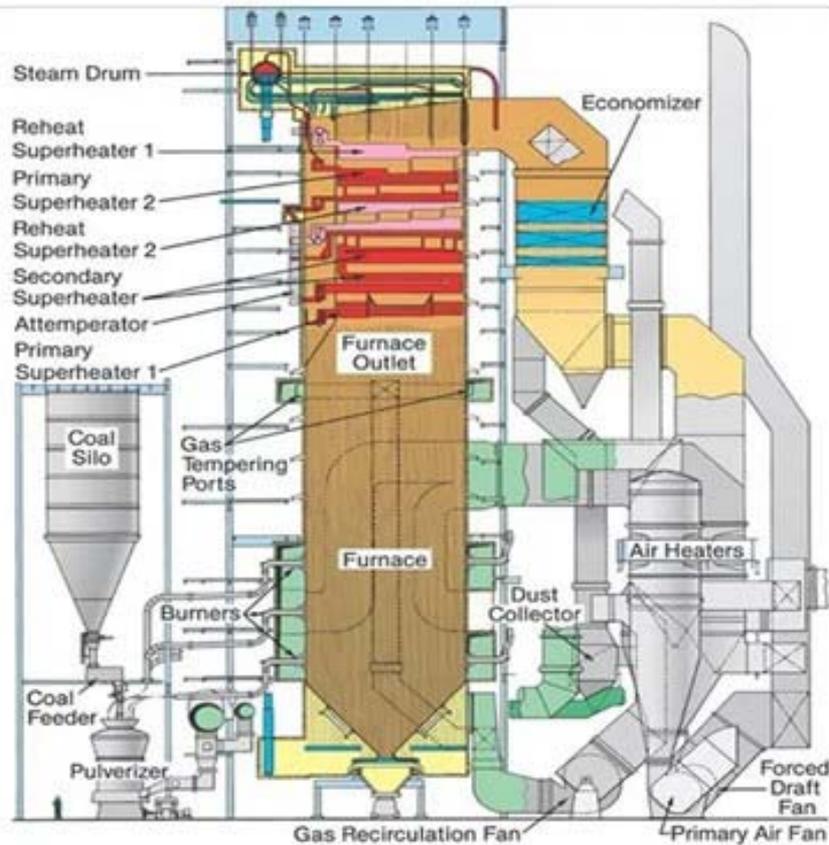
3 Aire - gases

2 Caldera: foco caliente

1 Combustibles



Foco Caliente: caldera (intercambiador de calor cerrado)



Se quema combustible, el calor calienta agua líquida y se genera vapor que va a la turbina
Por los tubos va agua que se calienta y pasa a vapor, por fuera van los gases de la combustión

Producción de Trabajo: Turbina de Vapor



El vapor generado se expande en la turbina, mueve los álabes y el eje, ese eje está unido a un alternador eléctrico y se produce electricidad

Es decir de la energía del vapor de agua, la turbina obtiene trabajo

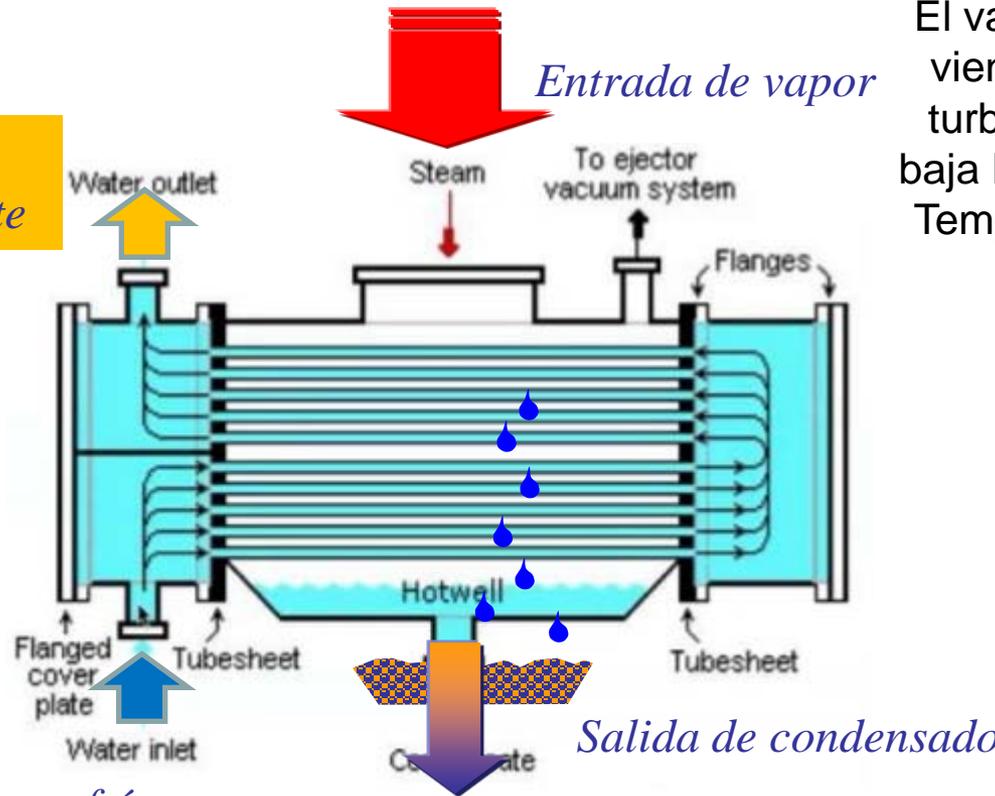


Foco frío: Condensador (intercambiador de calor cerrado)



El vapor que viene de la turbina con baja Presión y Temperatura

Salida de agua caliente



Entrada de agua fría

Salida de condensado

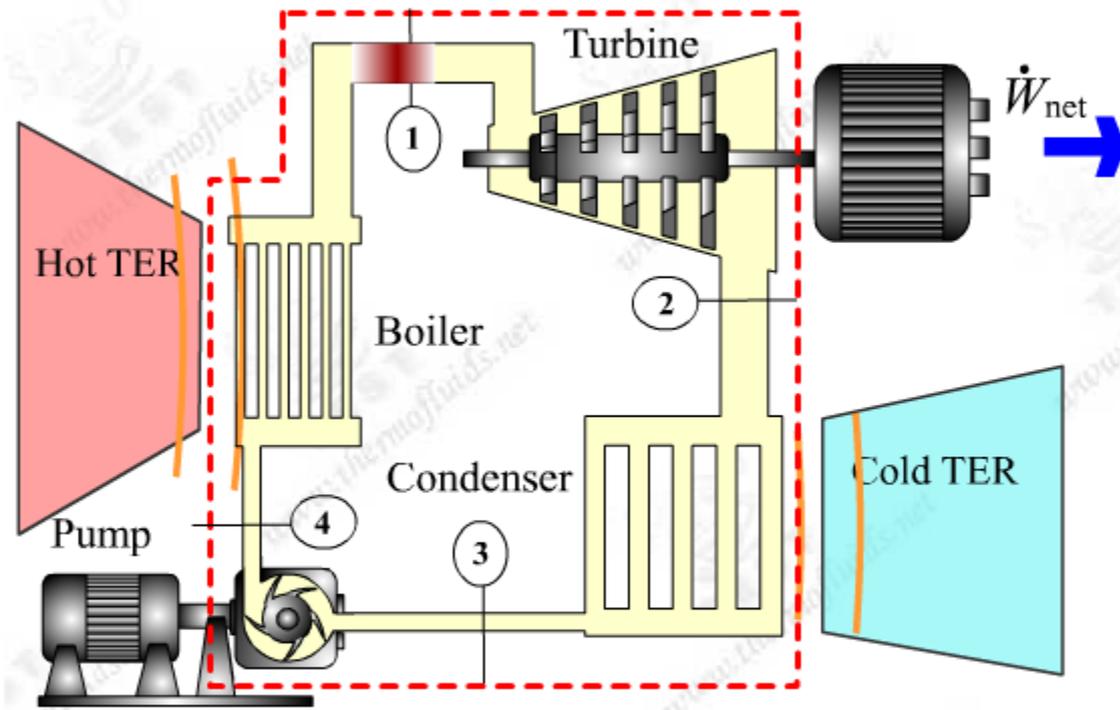
El vapor, que sale de la turbina con baja P y T, llega al condensador, donde se enfría y pasa a ser agua líquida

Por los tubos va agua fría que viene del río, mar o de la torre de refrigeración

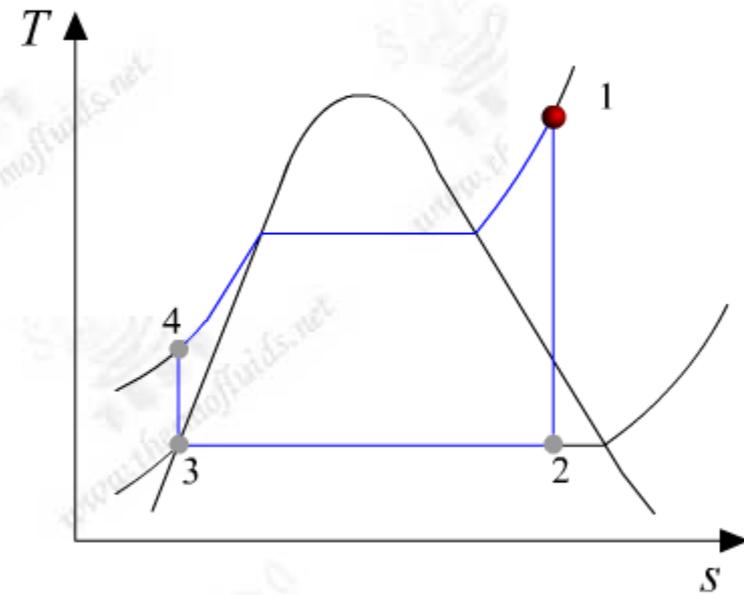
Por fuera va el vapor de agua de la turbina que se condensa, y sale como líquido

El agua líquida condensada (salida de condensado) va a una bomba donde se le aumenta la presión y de allí a la caldera (se reinicia el proceso)

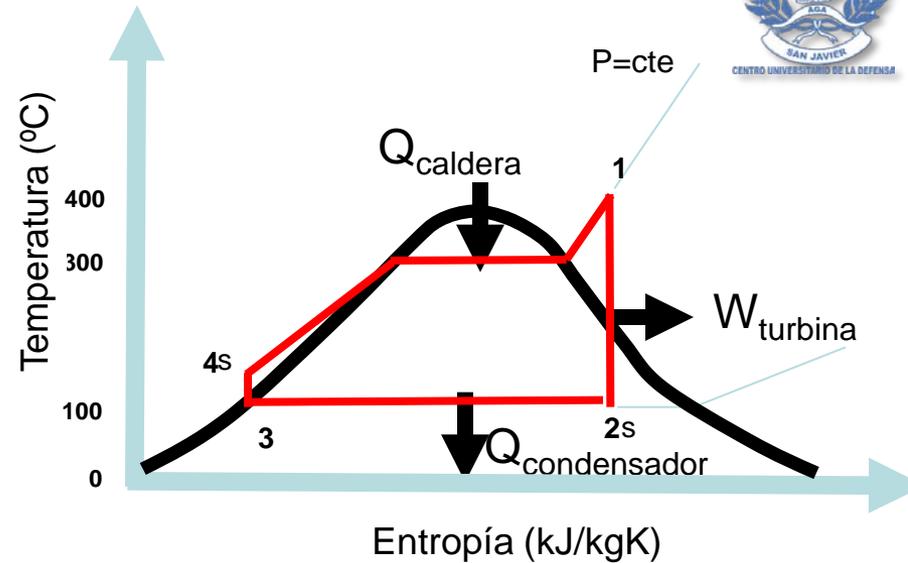
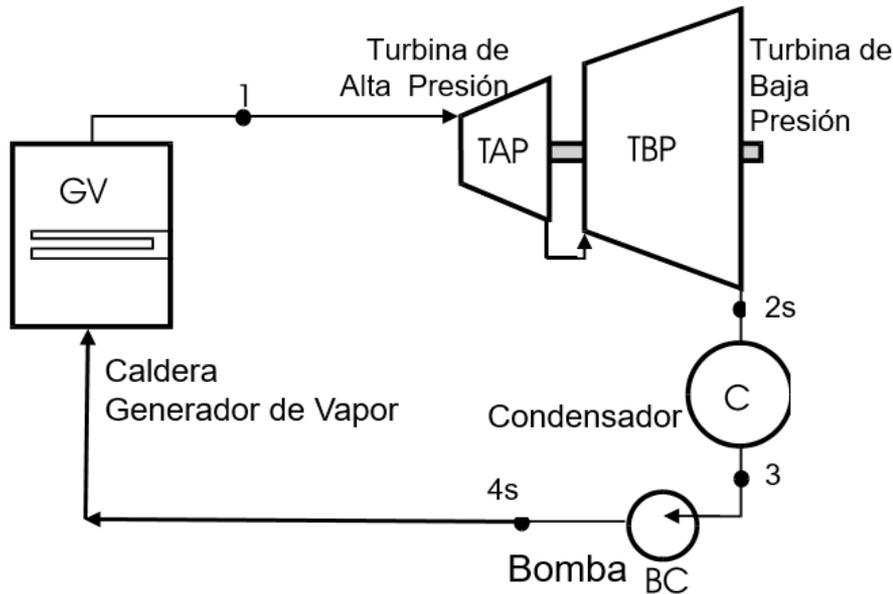
Ciclo de Rankine



* TER: Thermal Energy Reservoir



Ciclo de Rankine



El rendimiento del ciclo (se llama rendimiento térmico) será:

$$\eta_t = \frac{\dot{W}_u}{\dot{Q}_{caldera}} = \frac{\dot{Q}_{caldera} - \dot{Q}_{condensador}}{\dot{Q}_{caldera}} = \frac{q_{caldera} - q_{condensador}}{q_{caldera}} = \frac{W_{turbina} - W_{bomba}}{q_{caldera}}$$

Del primer principio obtenemos:

$$q_{caldera} = (h_1 - h_{4s})$$

$$q_{condensador} = (h_{2s} - h_3)$$

$$W_{turbina} = (h_1 - h_{2s})$$

$$W_{bomba} = (h_{4s} - h_3)$$

$$\eta_t = \frac{(h_1 - h_{2s}) - (h_{4s} - h_3)}{(h_1 - h_{4s})}$$

Ejemplo de Ciclo de Rankine básico:

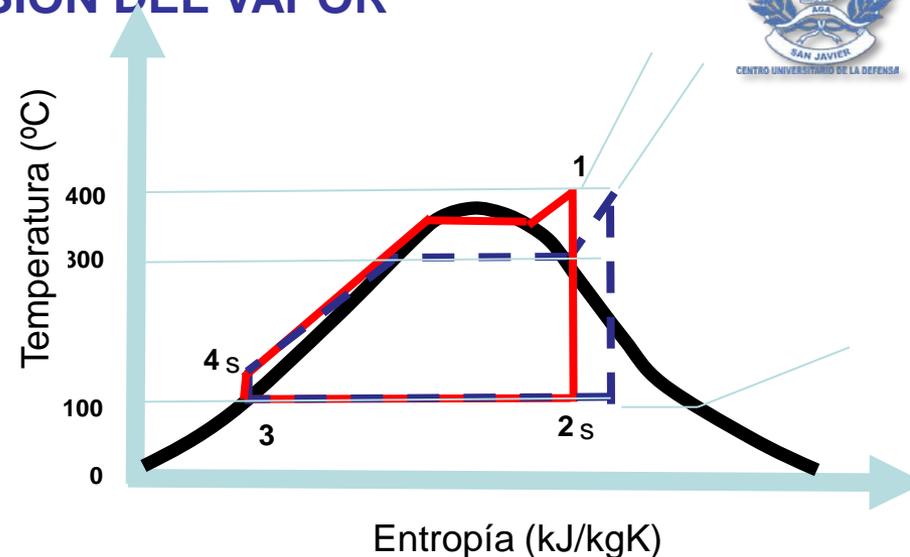
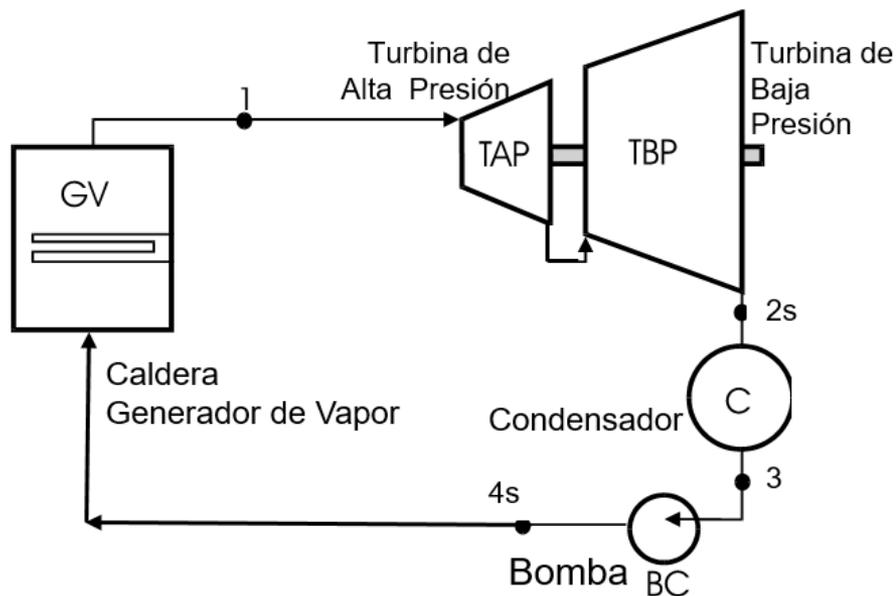
$p_{\text{cald}}=100 \text{ bar}$, $p_{\text{cond}}=1 \text{ bar}$, $T_1=400^\circ\text{C}$ (entrada turbina)

obtenemos un $\eta = 31,4 \%$

Realizando las siguientes mejoras conseguimos aumentar el rendimiento del ciclo:

- Aumento de la presión del vapor,
- Aumento de la temperatura del vapor,
- Disminución de presión del condensador,
- Recalentamiento del vapor,
- Ciclos regenerativos,
 - En cascada descendente,

AUMENTO DE LA PRESIÓN DEL VAPOR

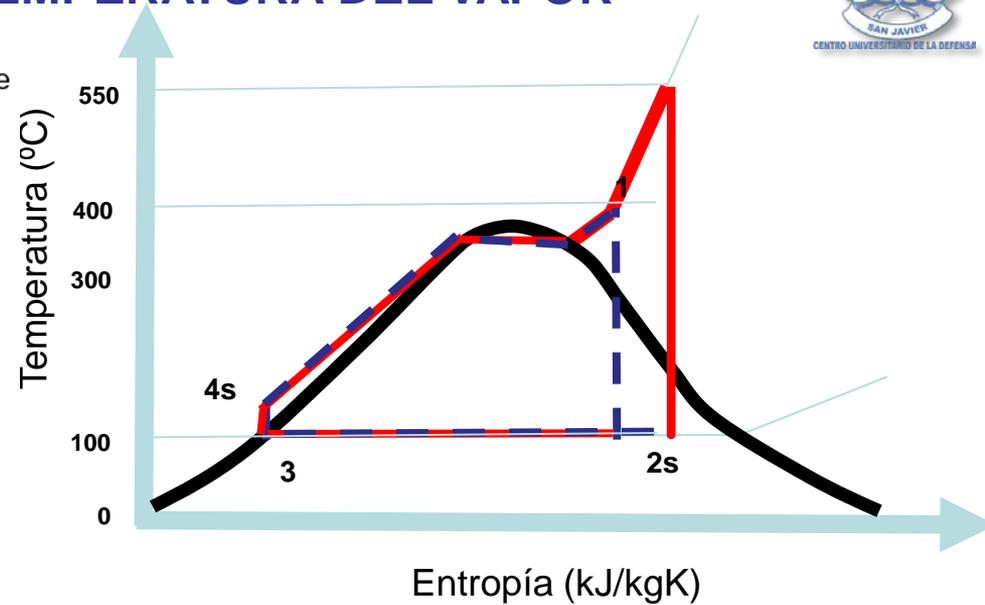
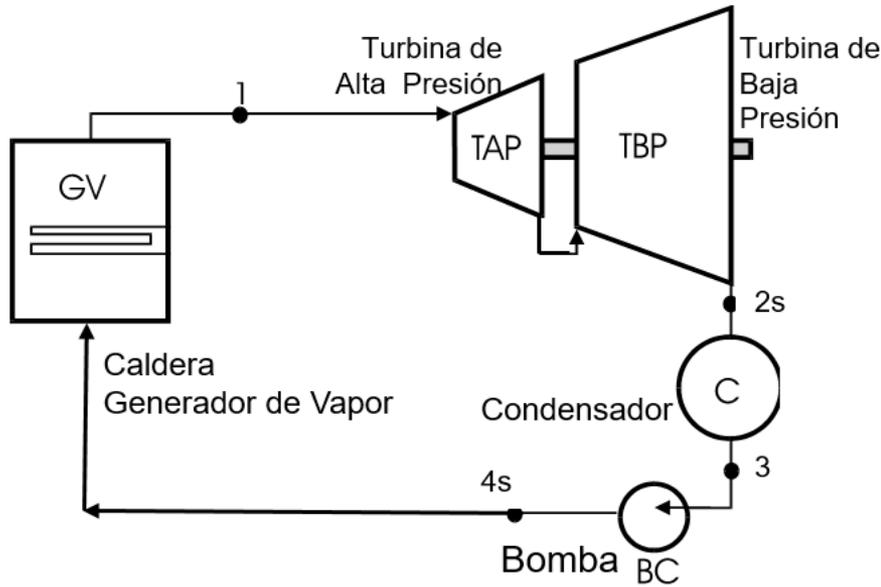


Si pasamos de $p_{\text{caldera}}=100 \text{ bar}$ a $p_{\text{caldera}}=180 \text{ bar}$
(manteniendo el resto de parámetros):

Sube el η ↑

- No aumenta el trabajo específico en turbina,
- Aumenta un poco el rendimiento por aumento de la temperatura media de absorción de calor en el ciclo (caldera),
- Empeora mucho el título del vapor en el escape de la turbina, Si el título es muy bajo las gotas de agua líquida en suspensión en el vapor pueden dañar los álabes de la turbina

AUMENTO DE LA TEMPERATURA DEL VAPOR



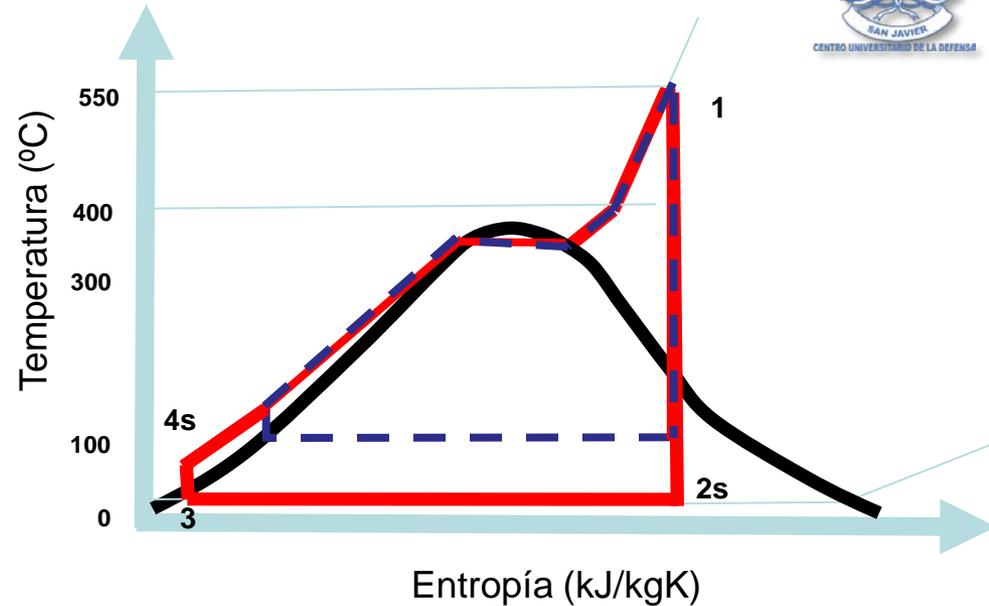
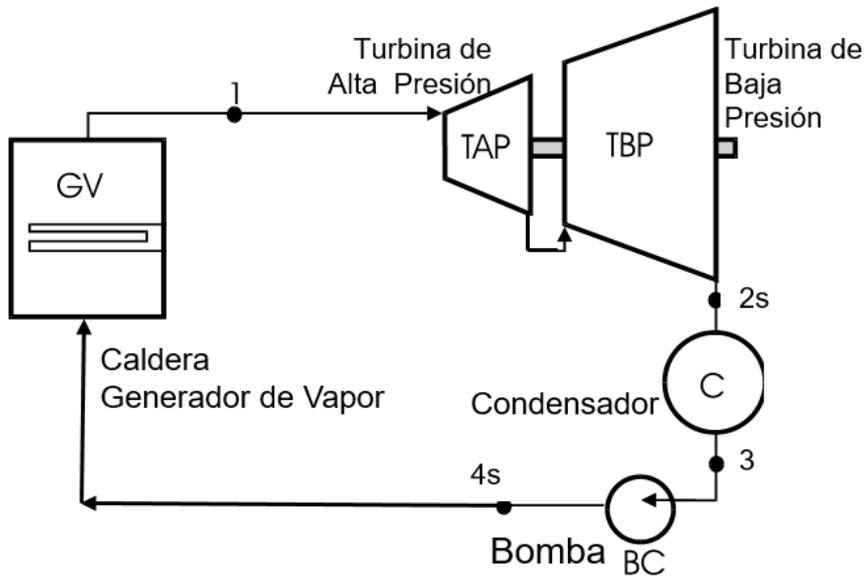
Si pasamos de una temperatura de entrada en turbina de $T_1=400^{\circ}\text{C}$ a $T_1=550^{\circ}\text{C}$

(manteniendo el resto de parámetros)

Sube el η ↑

- Aumenta el trabajo específico obtenido en la turbina,
- Aumenta el rendimiento por aumento de temperatura media de absorción de calor en el ciclo
- Mejora mucho el título del vapor en el escape de la turbina,
- Existe una limitación por la resistencia de los materiales ($\approx 550^{\circ}\text{C}$),

DISMINUCIÓN DE PRESIÓN DEL CONDENSADOR



Si bajamos la presión en el condensador de $p_{\text{cond}}=1 \text{ bar}$ a $p_{\text{cond}}=0,04 \text{ bar}$

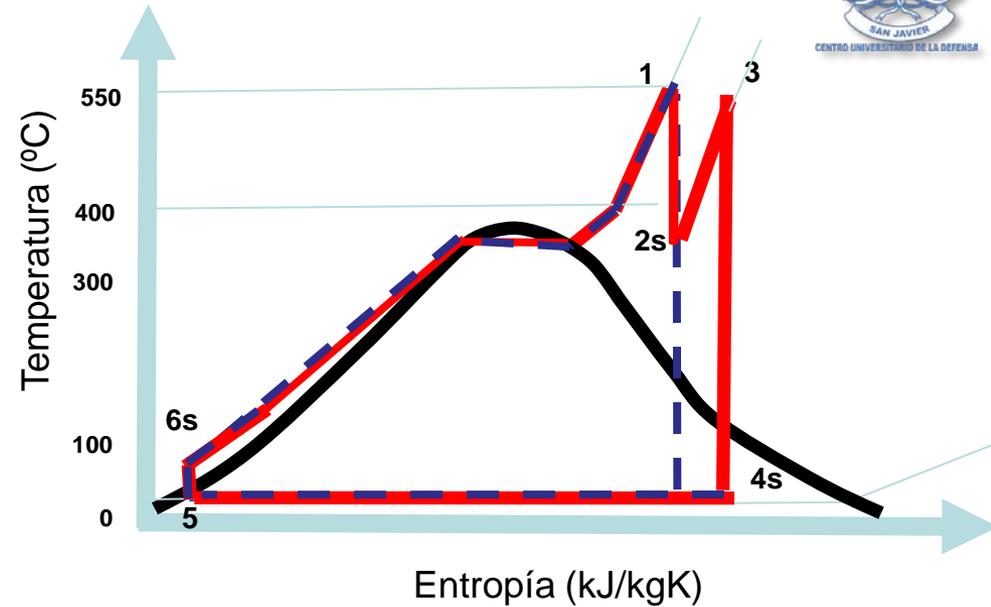
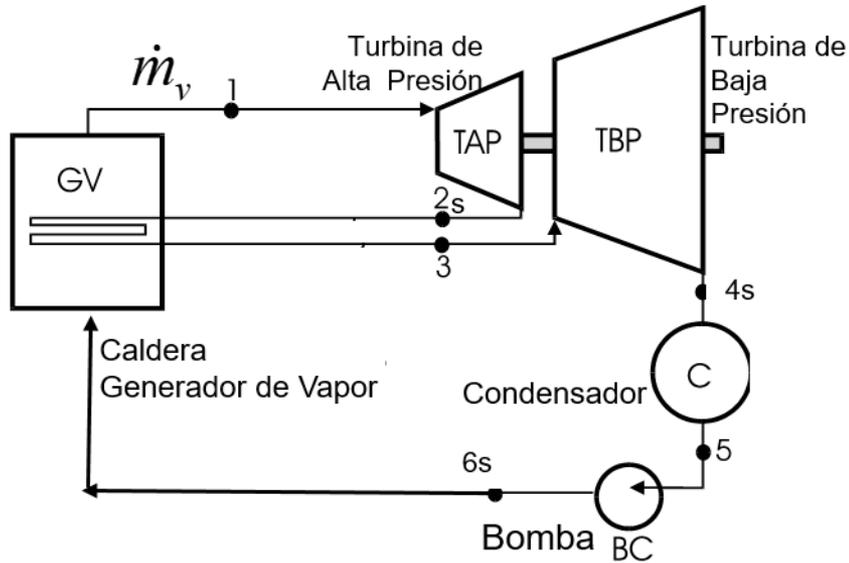
(manteniendo el resto de parámetros):

- Aumenta mucho el trabajo específico obtenido en la turbina
- Aumenta mucho el rendimiento por disminución de la temperatura media de cesión de calor,
- Empeora mucho el título del vapor en el escape de la turbina,
- Existe una limitación por la temperatura del ambiente ($T = 29^\circ\text{C}$, $p = 0,04 \text{ bar}$)

Sube el η
mucho



RECALENTAMIENTO DEL VAPOR



Sube el η



- Mejora mucho el título del vapor en el escape de la turbina,
- Puede aumentar un poco el rendimiento por aumento de la temperatura media de absorción del calor,
- Aumenta el trabajo específico obtenido en la turbina

Energía térmica total aportada al ciclo en ($\text{J/kg}_{\text{vapor}}$):

$$q_{\text{caldera}} = (h_1 - h_{6s}) + (h_3 - h_{2s})$$

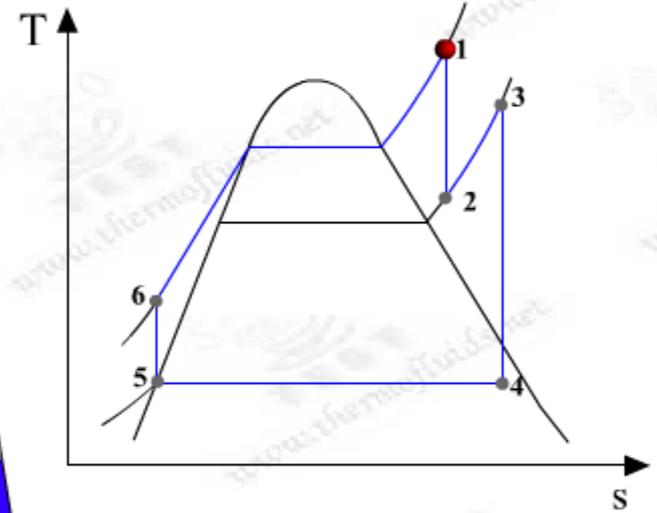
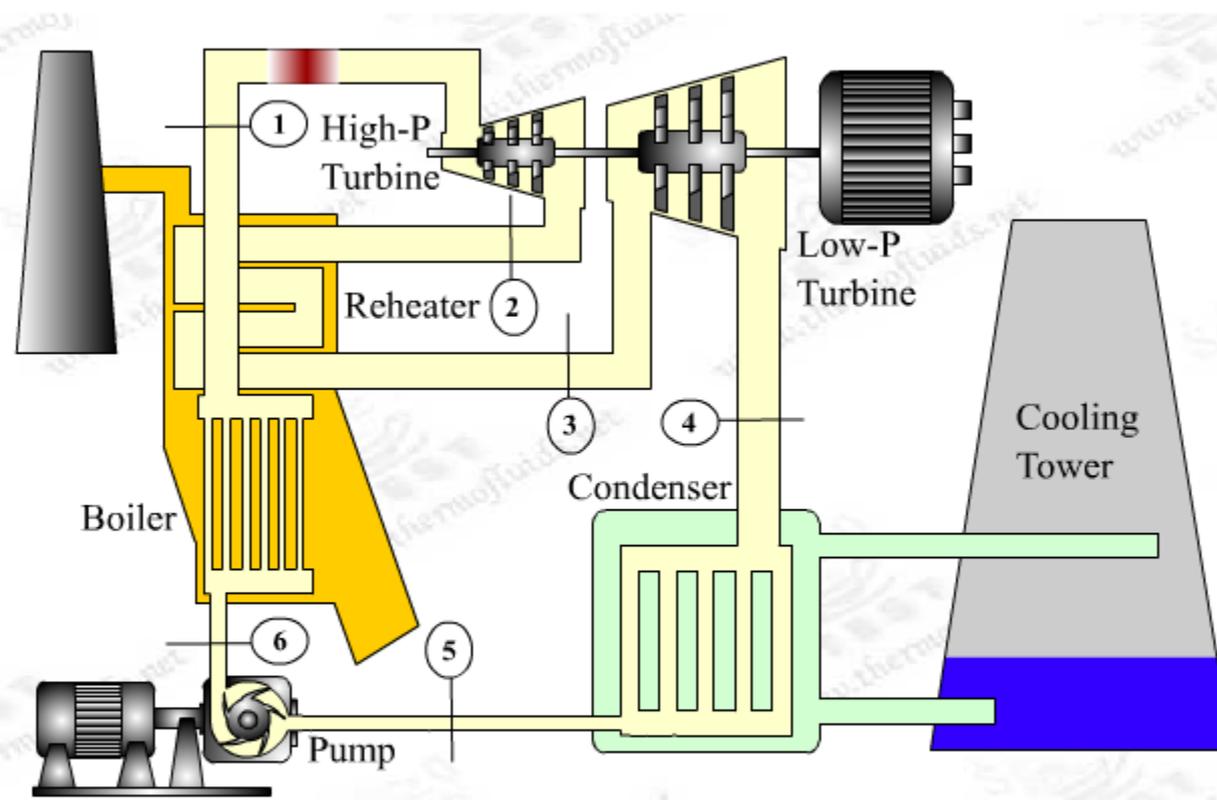
Trabajo de expansión en la turbina:

$$W_{\text{turbina}} = W_{1^{\text{a}}\text{etapa}} + W_{2^{\text{a}}\text{etapa}} = (h_1 - h_{2s}) + (h_3 - h_{4s})$$

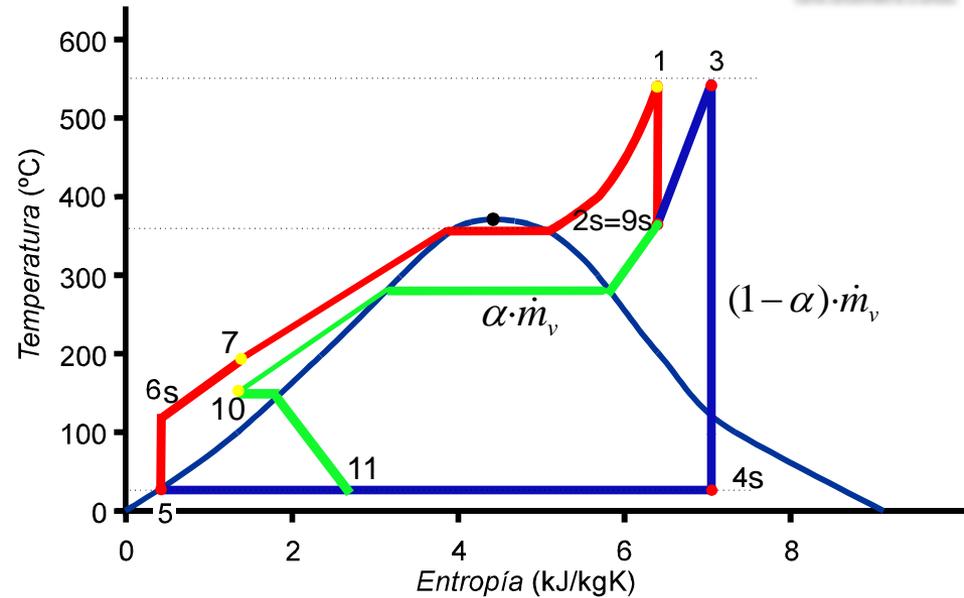
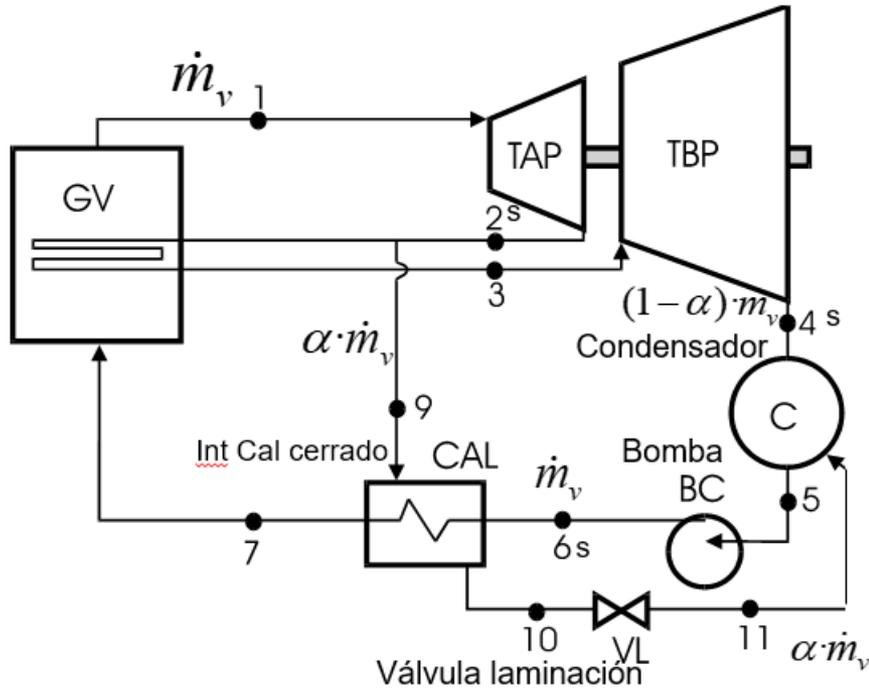
Rendimiento del ciclo:

$$\eta_t = \frac{W_{\text{turbina}} - W_{\text{bomba}}}{q_{\text{caldera}}}$$

Ciclo de Rankine con RECALENTAMIENTO



REGENERACIÓN EN CASCADA DESCENDENTE:



Sube el η

↑

Parte del vapor que sale de la turbina de alta se emplea para calentar el agua líquida antes de meterla en la caldera con intercambiador cerrado (sin mezclar agua y vapor)

- Aumenta el rendimiento
- Se reduce el trabajo neto

Normalmente $x_{10}=0$

En el intercambiador cerrado, aplicando el primer principio de la termodinámica obtenemos:

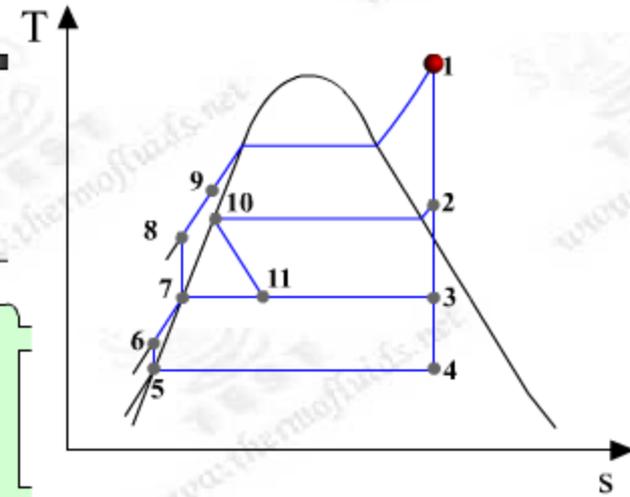
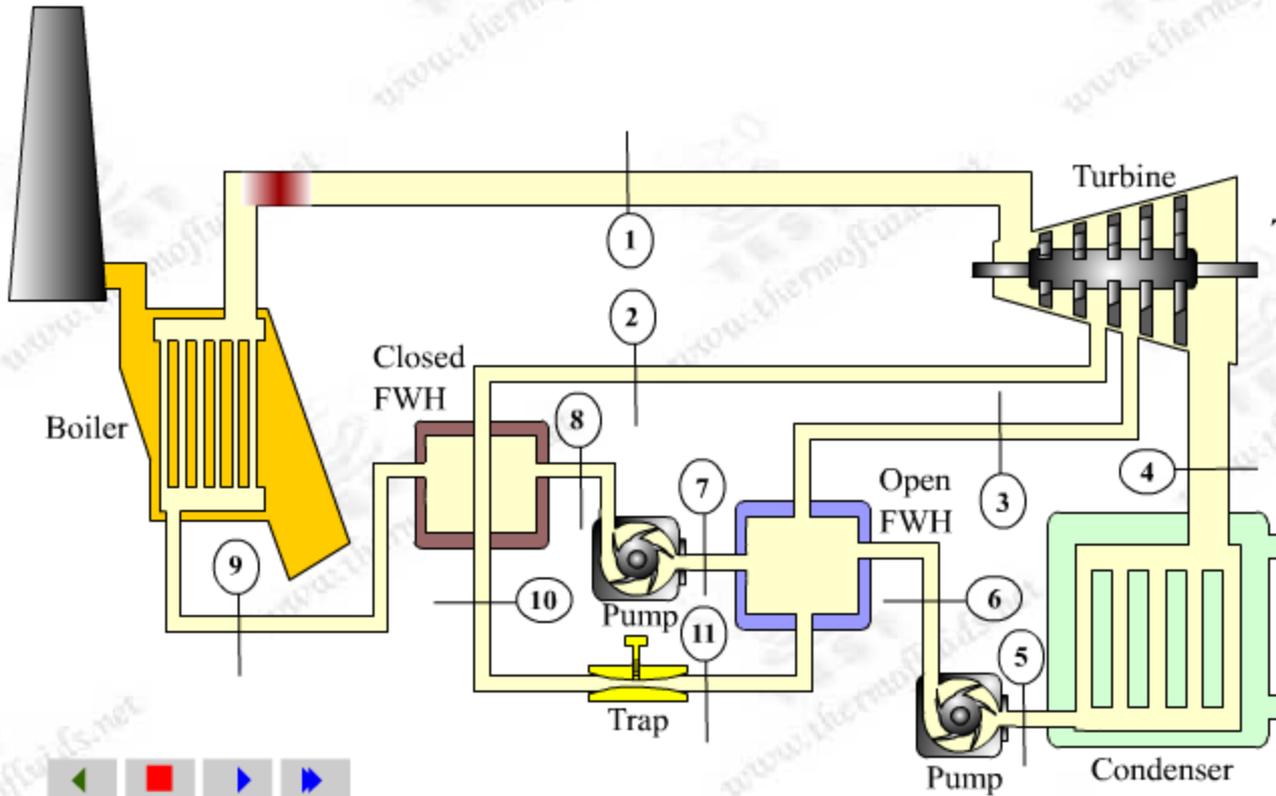
El calor que cede una rama entre 9 y 10 es el que obtiene capta la otra rama entre 6s y 7:

$$\alpha \cdot \dot{m}_v (h_9 - h_{10}) = \dot{m}_v (h_7 - h_{6s})$$

De esta ecuación se puede obtener la fracción extraída:

$$\alpha = \frac{h_7 - h_{6s}}{h_9 - h_{10}}$$

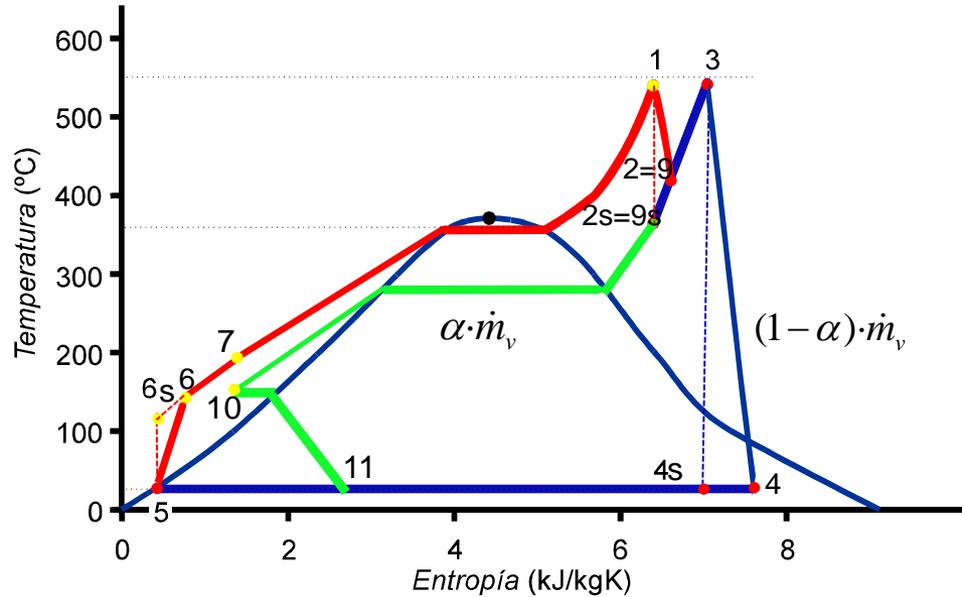
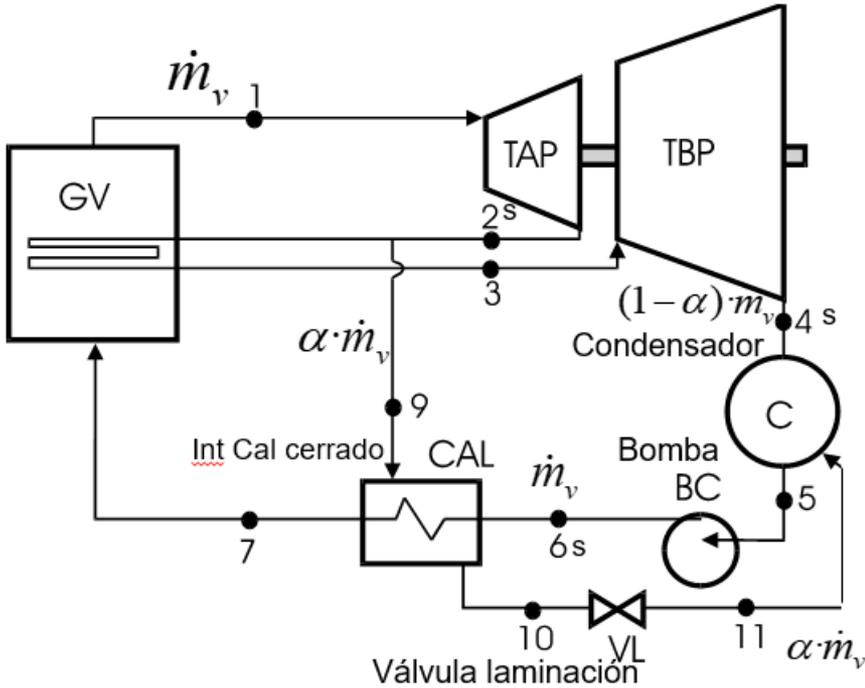
Ciclo de Rankine regenerativo



IRREVERSIBILIDADES INTERNAS



Para tenerlas en cuenta introducimos los rendimientos isentrópicos de turbina y compresor:



Si tenemos en cuenta los rendimientos por ejemplo:

$\eta_{ST} = 86\%$ y $\eta_{SC} = 73\%$ y mantenemos el resto de parámetros, llegamos a un rendimiento REAL del ciclo de:

$\eta = 40,4\%$



Al introducir los rendimientos isentrópicos de turbina y compresor, se pueden definir los puntos reales de salida de estos elementos a partir de los isentrópicos.

Nótese que ambos puntos (el real y su correspondiente isentrópico) están a la misma presión

Problema ejemplo



1,- Calcular el trabajo específico neto y el rendimiento de un ciclo de Rankine operando con vapor a 120 bar y 500 °C y descargando a un condensador a 0,1 bar, El rendimiento isentrópico de la turbina es de 85%. Nota: no despreciar el trabajo de la bomba

- 4,- El fluido de trabajo de un ciclo de Rankine ideal es vapor de agua, A la turbina entra vapor saturado a 8 MPa y del condensador sale líquido saturado a $p=0,008$ Mpa. La potencia neta obtenida es 100 MW. Calcular:
- Rendimiento térmico,
 - Flujo másico de vapor (kg/h),
 - Calor absorbido en la caldera y calor cedido en el condensador,
 - Flujo másico de agua necesario para la condensación del vapor, si el agua entra a 15°C y sale a 35°C ,
- 5,- En un ciclo de Rankine con sobrecalentamiento y recalentamiento se utiliza vapor de agua como fluido de trabajo, El vapor entra en la primera etapa de la turbina a 8,0 MPa, 480°C y se expande hasta 0,7 Mpa. Éste se recalienta entonces hasta 440°C antes de entrar en la segunda etapa de la turbina. donde se expande hasta la presión del condensador de 0,008 Mpa. La potencia neta obtenida es 100 MW. Determinar:
- Rendimiento térmico y Relación de trabajos entre turbina y bomba,
 - Flujo másico de vapor (kg/h),
 - Calor absorbido en la caldera y calor cedido en el condensador en MW,
 - Calcular la influencia que tiene en el rendimiento del ciclo el considerar el rendimiento de la turbinas isentrópico igual a 85%. Nota: considerar el rendimiento isentrópico de la bomba igual a la unidad,

6,- Una turbina de vapor trabaja según un ciclo regenerativo, con una extracción de vapor mediante un calentador cerrado. El ciclo trabaja sin recalentamiento. Se conocen como datos:

Presión y temperatura a la entrada de la turbina de alta: 80bar, 520°C

Presión de extracción: 7bar

Porcentaje de extracción: 5%

Potencia de la instalación: 8MW

Caudal de vapor que circula por la caldera: 7,2407 kg/s

Presión del condensador: 0,04bar

Título de vapor a la entrada del condensador: 0,9 y a la entrada de la válvula de laminación $x=0$

Despreciar el trabajo consumido por las bombas.

Se pide:

- Dibuja el diagrama T-s, h-s,
- Rendimiento interno de la etapa de alta y de baja de la turbina suponiendo que es el mismo para ambas etapas
- Rendimiento térmico del ciclo