

UNIVERSIDAD NACIONAL EXPERIMENTAL  
FRANCISCO DE MIRANDA  
COMPLEJO ACADÉMICO PUNTO FIJO  
PROGRAMA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL  
CÁTEDRA: CONVERSION DE ENERGIA

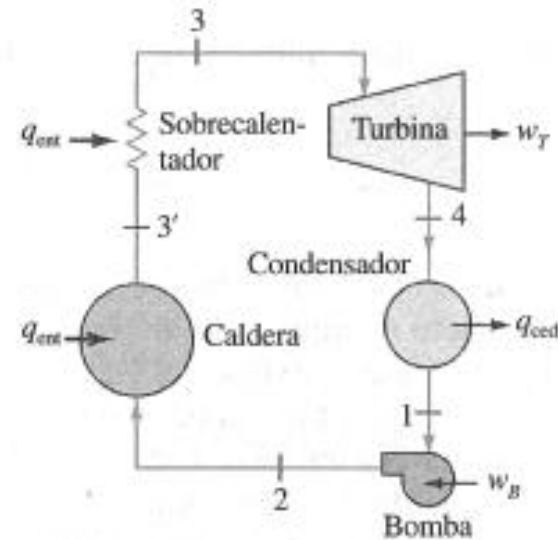
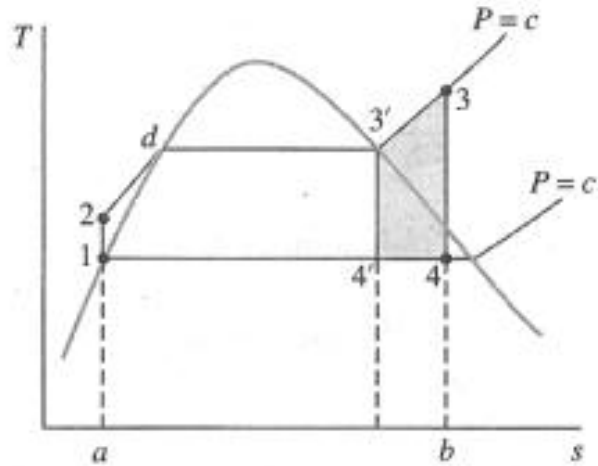
# TEMA1: GUIA 1

## CICLO RANKINE

- Ciclo Rankine.
- Efectos de la Presión, Temperatura y sobrecalentamiento en el ciclo Rankine.
- Divergencias entre el ciclo Real e Ideal.
- Ciclo Rankine con Recalentamiento.
- Ciclo Rankine con Regeneración.

# CICLO RANKINE

Puede decirse que es una modificación del ciclo de Carnot y consiste en Sobrecalentar el vapor en la caldera y condensarlo por completo en el Condensador.



## Procesos:

- Proceso 1-2. **Compresión Isentrópica:** El fluido de trabajo (agua) entra a la bomba a una presión y temperatura relativamente baja, incrementa su presión y sale como líquido comprimido
- Proceso 2-3. **Adición de Calor a Presión constante:** El fluido entra a la caldera proveniente de la bomba como líquido, producto del suministro de calor cambia de fase y sale como vapor a presión constante.

# CICLO RANKINE

## Procesos:

- Proceso 3-4. **Expansión Isentrópica:** El vapor proveniente de la caldera hace girar los alabes de la turbina, para producir trabajo, el eje rotor gira unido a un generador para producir electricidad.
- Proceso 4-1. **Rechazo de Calor a Presión constante:** El fluido expandido en la turbina entra al condensador donde intercambia calor con un fluido frío por contacto directo o indirecto, para producir un descenso en la temperatura del agua, producto de este enfriamiento el fluido cambia de fase y sale como líquido saturado para comenzar un nuevo ciclo.

Aplicando las ecuaciones de la energía por unidad de masa y régimen estacionario a cada componente por separado se obtiene las expresiones del calor y el trabajo del ciclo Rankine.

$$q + w = \Delta h + \Delta e_c + \Delta e_p$$

Despreciando las variaciones de energía cinética y potencial, la ecuación queda reducida en:

$$q + w = h_{sal} - h_{ent}$$

## CICLO RANKINE

El trabajo isentrópico de la bomba viene dado por:

$$w_{Bomba} = h_2 - h_1 \quad \Rightarrow \quad s_1 = s_2$$

El valor de  $h_2$  se puede obtener mediante la tabla de agua de líquido comprimido

Otro método apropiado y con resultados más exacto para el cálculo del trabajo isentrópico en la bomba, consiste en utilizar la ecuación del trabajo en régimen estacionario, dada por:

$$w_{est} = \int v dP \quad \Rightarrow \quad w_{B,ent} = v_{f,1} (P_2 - P_1) \quad s_1 = s_2$$

Siendo  $v_{f,1}$  el volumen específico del líquido saturado en el estado 1

## CICLO RANKINE

El calor suministrado por unidad de masa es:

$$q_{sum} = q_{2-3} = h_3 - h_2 \quad P_3 = P_2$$

El trabajo isoentrópico de la turbina es:

$$w_{T,sal} = h_3 - h_4 \quad s_3 = s_4$$

El calor cedido en el condensador es:

$$q_{cond,ced} = h_4 - h_1 \quad P_4 = P_1$$

Las relaciones del calor y trabajo pueden expresarse también referidas a la unidad de tiempo dado por:

$$\dot{Q} = \dot{m} q \quad \text{y} \quad \dot{W}_{net} = \dot{m} w_{net} \quad \Rightarrow \quad w_{net} = w_{turbina} - w_{bomba}$$

Siendo  $\dot{m}$  el flujo másico de vapor que atraviesa el dispositivo

## CICLO RANKINE

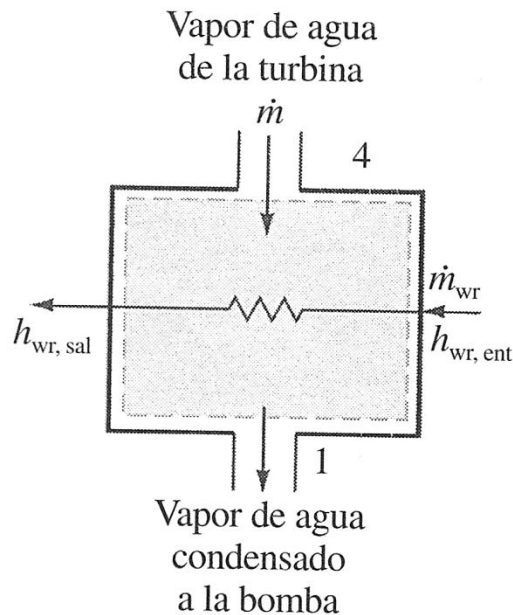
El rendimiento térmico de un ciclo de Rankine ideal puede escribirse entonces como:

$$\eta_T = \frac{W_{T,sal} - W_{B,ent}}{q_{sum}} = \frac{h_3 - h_4 - v_{f,1}(P_2 - P_1)}{h_3 - h_2}$$

El rendimiento térmico también puede expresarse de forma alternativa como:

$$\eta_t = 1 - \frac{q_{ced}}{q_{sum}} = 1 - \frac{h_4 - h_1}{h_3 - h_2}$$

El balance de energía aplicado al volumen de control situado alrededor del condensador se reduce a:



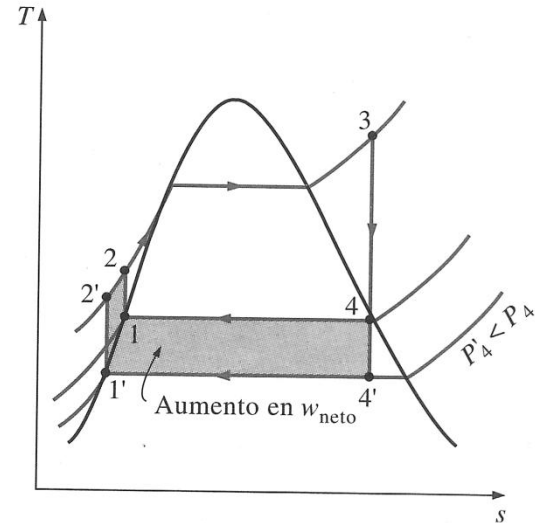
$$\dot{m}_{vapor} (h_1 - h_4)_{vapor} + \dot{m}_{ar} (h_{sal} - h_{ent})_{ar} = 0$$

## EFFECTOS DE LA PRESIÓN Y TEMPERATURA EN EL CICLO RANKINE

La idea básica detrás de todas las modificaciones para incrementar la eficiencia térmica de un ciclo de potencia es la misma; aumentar la temperatura promedio a la que el calor se transfiere al fluido de trabajo de la caldera, o disminuir la temperatura promedio a la que el calor se rechaza del fluido de trabajo en el condensador.

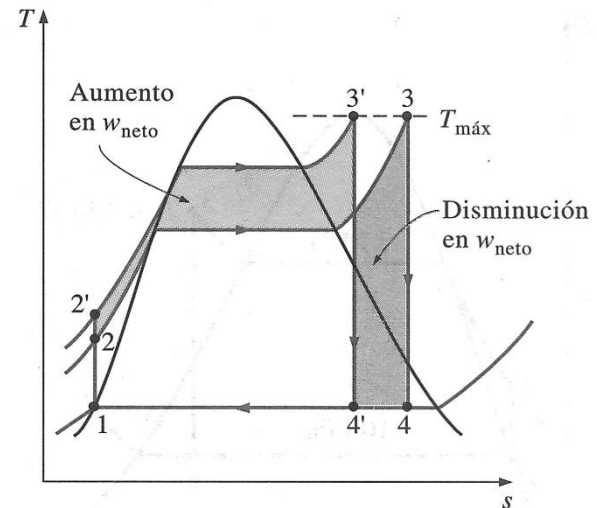
### Reducción de la presión del condensador:

La reducción de la presión de operación del condensador reduce automáticamente la temperatura del vapor y, en consecuencia, la temperatura a la cual el calor se rechaza.



### Incremento de la presión de la caldera:

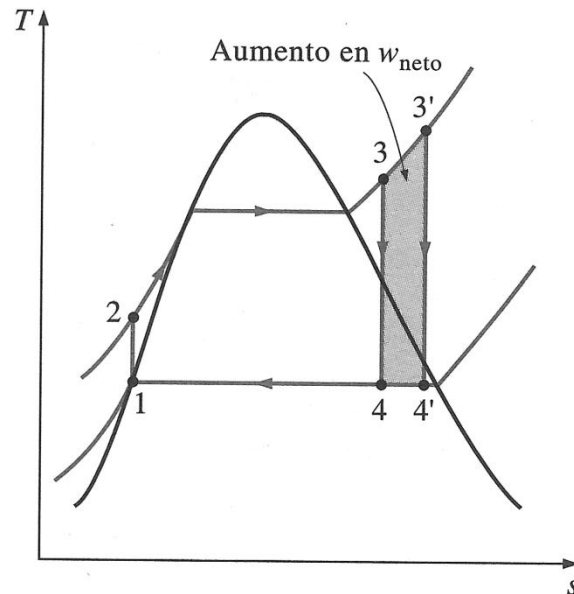
Una manera de aumentar la temperatura promedio durante el proceso de adición de calor es incrementar la presión de operación de la caldera, elevando la temperatura de ebullición. Esto, a su vez, incrementa la temperatura promedio a la que se añade calor al vapor.



# EFFECTOS DE LA PRESIÓN Y TEMPERATURA EN EL CICLO RANKINE

## Sobrecalentamiento del vapor a altas temperaturas:

Es posible elevar la temperatura promedio a la que se añade calor al vapor sin aumentar la presión de la caldera, y es con el sobrecalentamiento del vapor a altas temperaturas, logrando un incremento en el trabajo de la turbina.





# DIVERGENCIAS ENTRE EL CICLO REAL Y EL IDEAL

Estas divergencias están dadas debido principalmente a la presencia de irreversibilidades, lo cual ocasiona una eficiencia menor, respecto a la de un ideal. Además no todos los procesos pueden ser controlados de manera precisa. Las principales fuentes de irreversibilidades son:

## Perdidas por fricción:

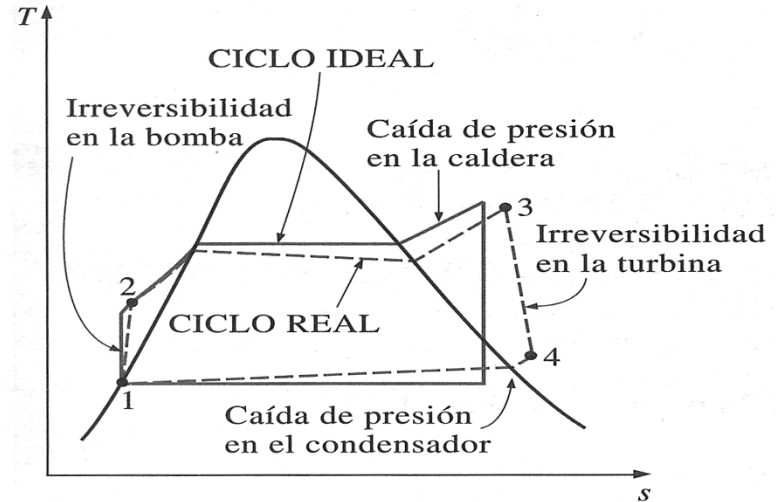
La fricción del fluido ocasiona caídas de presión en la caldera, el condensador y las tuberías entre los diversos componentes.

## Perdidas de calor:

Perdida de calor del vapor por los alrededores cuando éste circula por varios componentes.

## Irreversibilidades en las bombas y turbinas:

Existen variaciones de entropía entre la entrada y salida. Ocasionando un aumento o disminución de entropía.

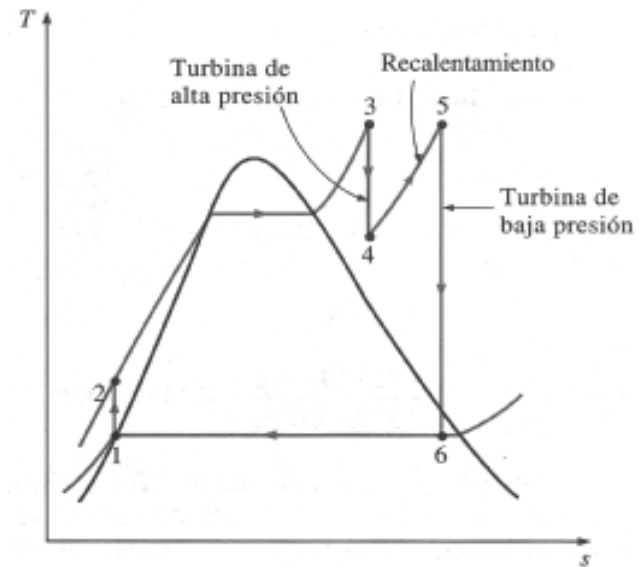
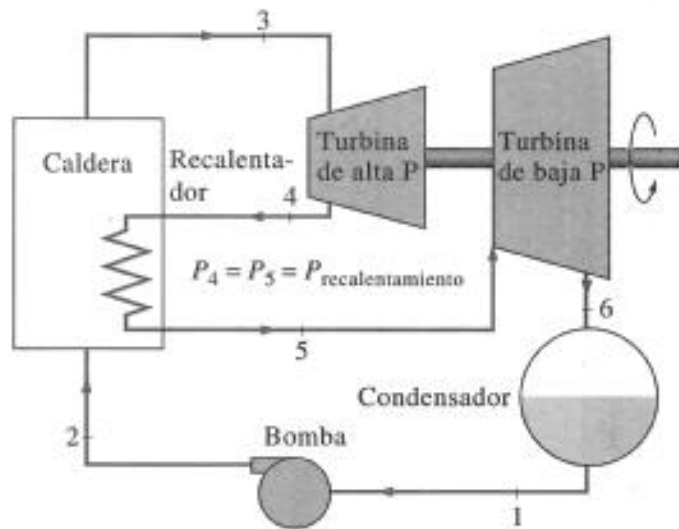


$$\eta_{Bomba} = \frac{w_{s,ideal}}{w_{a,real}} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_{2a} - h_1}$$

$$\eta_{Turbina} = \frac{w_{a,real}}{w_{s,ideal}} = \frac{h_3 - h_{4a}}{h_3 - h_{4s}}$$

# CICLO RANKINE CON RECALENTAMIENTO

Se desarrollo con el fin de sacar ventaja del incremento de la eficiencia con presiones excesivas. En el ciclo con recalentamiento el vapor , no se expande por completo en una sola etapa hasta la presión del condensador. Luego de expandirse parcialmente, el vapor se extrae de la turbina de alta presión y se recalienta a presión constante en el sistema caldera sobrecalentador. A continuación, se le devuelve a la turbina de baja presión para su expansión posterior hasta la presión de salida. Se puede considerar que la turbina esta constituida por dos etapas una de alta y otra de baja presión.



## Consideraciones generales:

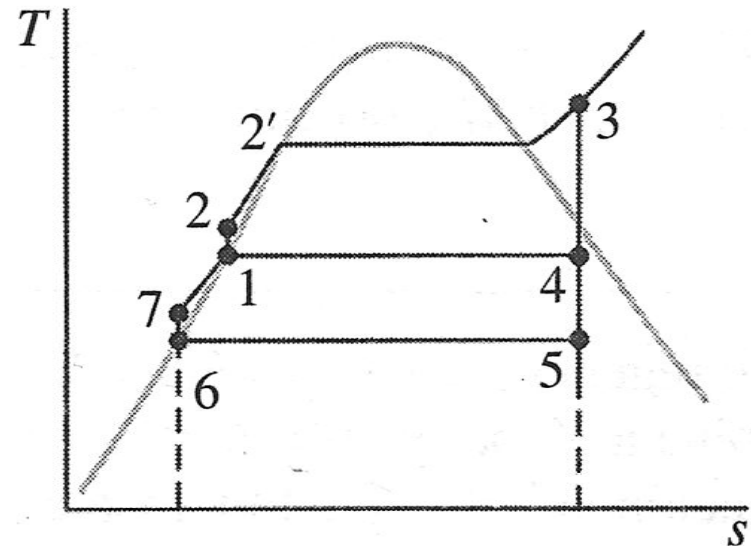
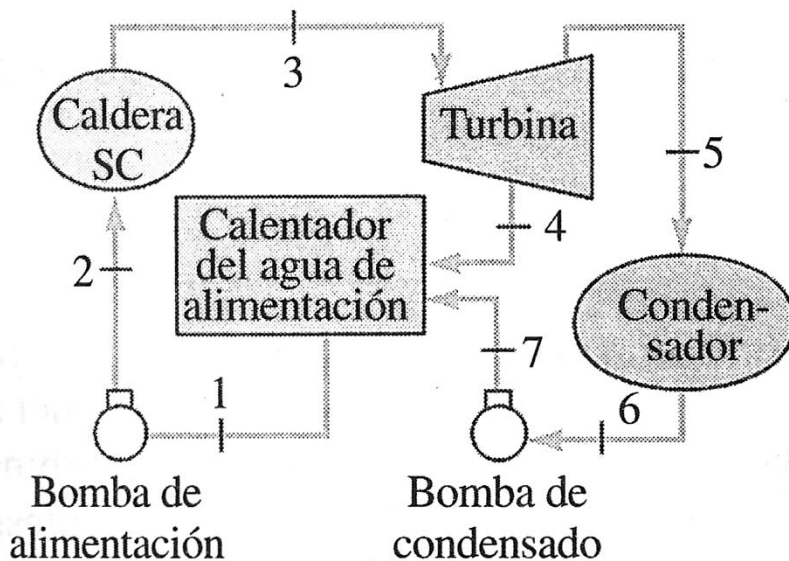
- A la salida de la turbina de alta presión, el vapor esta generalmente próximo a la línea de saturación.
- La temperatura tras el recalentamiento, es generalmente igual o algo inferior a la temperatura de entrada en la primera etapa de la turbina
- El máximo rendimiento térmico de un ciclo ideal con recalentamiento se obtiene cuando el cociente  $P_{sal}/P_{ent}$  en la turbina de alta presión, se encuentra dentro del intervalo de 0,15 a 0,35.

# CICLO RANKINE CON REGENERACIÓN

Consiste, en extraer parte del vapor expandido en la turbina y utilizarlo para suministrar calor al fluido de trabajo (mediante calentadores), aumentado su temperatura antes de pasar por la fuente principal de calor (Caldera) a una presión determinada. Existen dos tipos de calentadores uno denominado calentador abierto o de contacto directo y el calentador cerrado o cambiador de calor de carcasa y tubos.

## Calentadores abiertos:

El vapor extraído de la turbina se mezcla con el agua de alimentación que sale de la bomba. Se ajustan los flujos máxicos de las corrientes que entran al calentador, de manera que el resultado de la mezcla a la salida del calentador sea líquido saturado a una presión determinada.



## CICLO RANKINE CON REGENERACIÓN

El análisis teórico de un ciclo ideal regenerativo se emplean los principios de conservación de la masa y la energía aplicados al volumen de control.

$$\sum \dot{m}_{ent} = \sum \dot{m}_{sal} \Rightarrow \dot{m}_1 = \dot{m}_4 + \dot{m}_7$$

De la misma manera, el balance de energía con  $\dot{Q} = 0$  y  $\dot{W} = 0$  es:

$$\sum \dot{m}_{ent} h_{ent} = \sum \dot{m}_{sal} h_{sal} \Rightarrow \dot{m}_1 h_1 = \dot{m}_4 h_4 + \dot{m}_7 h_7$$

Eliminando  $\dot{m}_7$  al combinar estas dos ecuaciones:

$$\dot{m}_1 h_1 = \dot{m}_4 h_4 + (\dot{m}_1 - \dot{m}_4) h_7$$

Dividiendo todo entre la masa tota  $\dot{m}_1$  tenemos:

$$h_1 = \frac{\dot{m}_4}{\dot{m}_1} h_4 + \left( 1 - \frac{\dot{m}_4}{\dot{m}_1} \right) h_7$$

Si la fracción de vapor de agua extraída de la turbina  $\dot{m}_4/\dot{m}_1$ , en el estado 4 se representa por  $y_4$ , entonces:

$$1(h_1) = y_4 h_4 + (1 - y_4) h_7$$

# CICLO RANKINE CON REGENERACIÓN

El trabajo total que sale de la turbina, referido a la unidad de masa que atraviesa la zona de la caldera y el sobrecalentador, es:

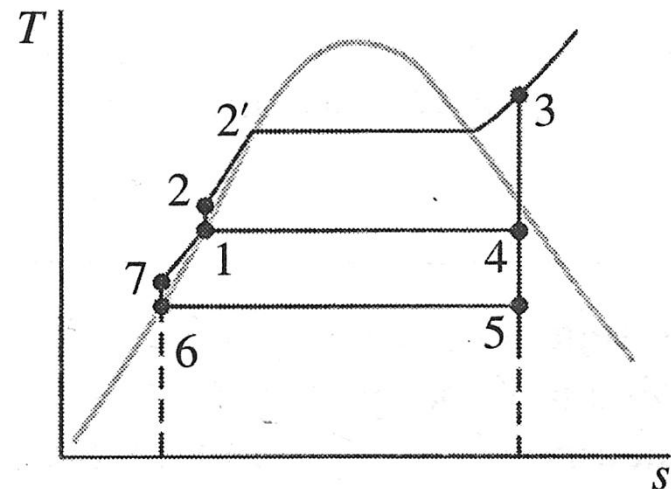
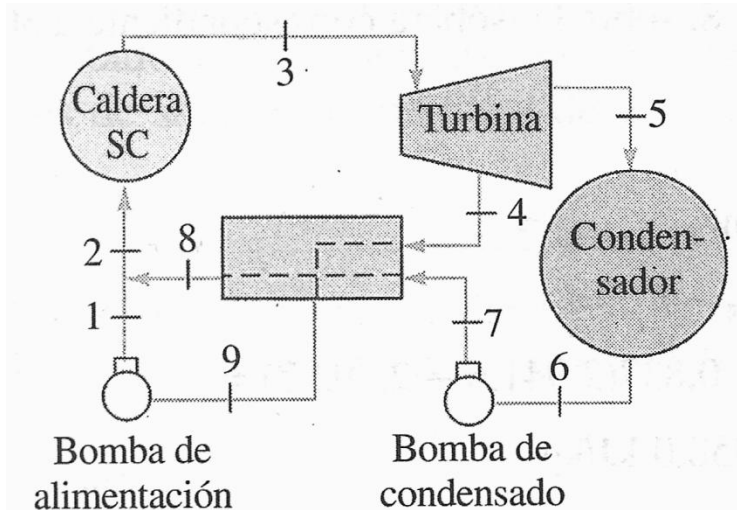
$$w_{T,sal} = \frac{\dot{W}_{T,sal}}{\dot{m}_1} = 1(h_3 - h_4) + (1 - y_4)(h_4 - h_5)$$

El trabajo de la bomba de líquidos en condiciones isoentrópicas, referido a la misma masa, es:

$$w_{B,ent} = v(P_7 - P_6)(1 - y_4)$$

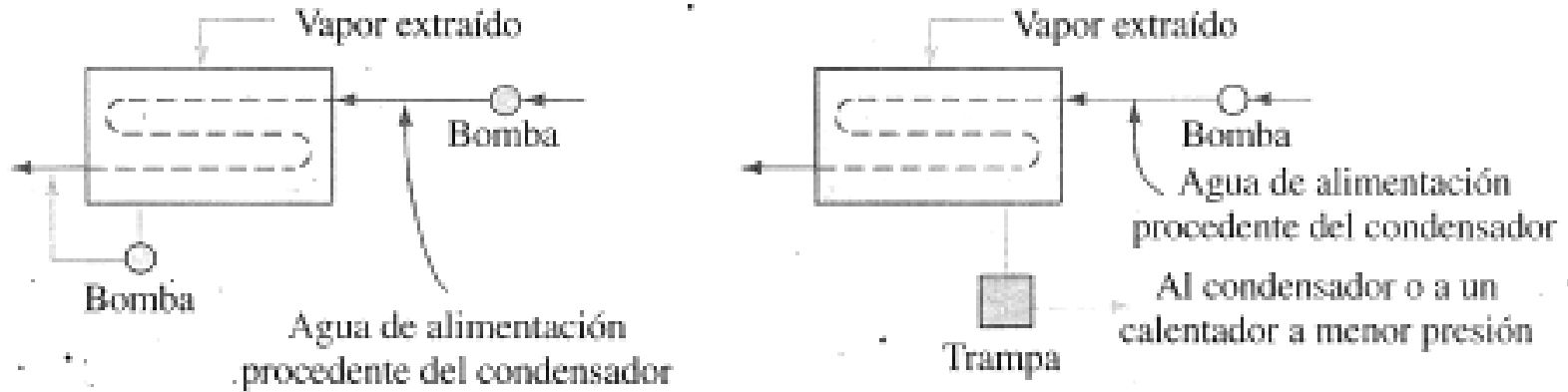
## Calentadores cerrados:

En un calentador cerrado no se mezclan las corrientes que entran. El agua de alimentación circula por el interior de los tubos que pasan por el calentador y el vapor extraído de la turbina para precalentar el agua, se condensa sobre los tubos.



## CICLO RANKINE CON REGENERACIÓN

En el caso ideal, se supone que el agua de alimentación proveniente del condensador sale del calentador como liquido comprimido a la misma temperatura que el vapor de agua extraído que ha condensado.



Para cualquiera de los arreglos de los calentadores cerrados, el balance de energía en régimen estacionario se supone que el calentador está aislado térmicamente y que las variaciones de la energía cinética y potencial de las corrientes son despreciables. Téngase en cuenta que los valores de esta ecuación no son iguales.

$$0 = (\dot{m} \Delta h)_{extr} + (\dot{m} \Delta h)_{alim}$$