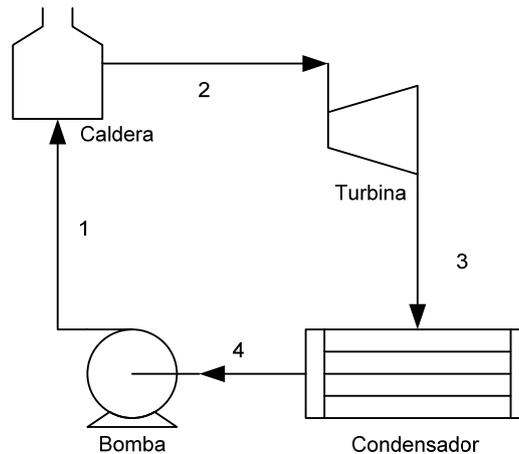




Problema Ciclo Rankine Ideal

Calcule la eficiencia térmica y la salida de trabajo neta del siguiente ciclo de potencia Rankine ideal. El vapor sale de la caldera como vapor sobrecalentado a 6 MPa y 360°C y se condensa a 10 kPa. Estudie las diferentes modificaciones operacionales propuestas en clase para mejorar la eficiencia térmica del ciclo, compare entre las opciones.



Solución

Suposiciones: 1. Proceso en estado estacionario 2. Cambio de energía cinética y potencial despreciable. 3. Como el ciclo es ideal la bomba y la turbina son isentrópicas. 4. Sale líquido saturado del condensador.

Planteamiento:

1. El trabajo neto de salida se obtiene por la diferencia entre el trabajo producido en la turbina y el requerido por la bomba. Del balance de energía para estado estacionario:

Se tiene para la turbina isentrópica, adiabática y reversible:

$$q_t - w_t + h_{entra} - h_{sale} = 0 \quad q_t - w_t + h_2 - h_3 = 0$$

De manera que:

$$w_t = h_2 - h_3$$

Para la bomba en cambio se tiene que:

$$q_b - w_b + h_{entra} - h_{sale} = 0$$

El trabajo requerido por la bomba es:

$$w_b = h_4 - h_1$$

El trabajo neto de salida es:

$$w_{neto} = w_t + w_b$$

2. La eficiencia térmica del ciclo es la relación entre la salida deseada y la entrada requerida, es decir, la relación entre el trabajo neto de salida y el calor suministrado en la caldera:

$$\eta_{\text{ciclo}} = \frac{|w_{\text{neto}}|}{|q_{\text{cal}}|}$$

Donde el calor de la caldera se obtiene también del balance de energía:

$$q_{\text{cla}} - w_{\text{cal}} + h_{\text{entra}} - h_{\text{sale}} = 0$$

Así:

$$q_{\text{cal}} = h_2 - h_1$$

Definición de estados

Ahora sólo queda definir los estados para hallar las entalpías

Estado 4

- Como el condensador es isobárico y se conoce que el “vapor ... se condensa a 10 kPa” se tiene entonces que: $P_3 = P_4 = P_{\text{cond}} = 10 \text{ kPa}$
- Se asume que del condensador sale líquido saturado: $x_4 = 0$

Con estas propiedades entramos a las tablas de vapor saturado y leemos:

$$h_4 = h_{f@10\text{kPa}} = 191,81 \text{ kJ/kg}$$

$$v_4 = v_{f@10\text{kPa}} = 0,001010 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$T_4 = T_{\text{sat}@10\text{kPa}} = 45,81^\circ \text{C}$$

$$s_4 = s_{f@10\text{kPa}} = 0,6492 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$$

Estado 1

- La caldera también es isobárica, por lo que se debe cumplir que:
 $P_{\text{cal}} = P_1 = P_2 = 6 \text{ MPa}$
- La bomba es isentrópica, por lo que se tiene que: $s_4 = s_1$

Debemos notar que el estado a la salida de la bomba debe ser líquido comprimido ya que esta opera sólo con líquidos. Con las dos especificaciones de arriba se puede ir a la tabla de líquido comprimido y obtener las propiedades de la corriente 2. Sin embargo, es más corto y más fácil considerar que el agua en estado líquido es incompresible, por lo que la condición de proceso isentrópico se transforma en:

$$s_1 = s_4 \Rightarrow h_1 - h_4 = v_4 (P_1 - P_4) \Rightarrow h_1 = h_4 + v_4 (P_1 - P_4)$$

Reemplazando los valores que ya tenemos (recuerden colocar la Presión en kPa)

$$h_1 = 191,81 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 0,001010 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} (6000 - 10) \text{ kPa} = 197,86 \text{ kJ/kg}$$

Estado 2

- Se sabe que a la turbina ingresa vapor sobrecalentado a $T_2 = 360^\circ \text{C}$ y
 $P_2 = 6 \text{ MPa}$
- De tablas de vapor sobrecalentado se lee:
 $h_2 = 3069,8 \text{ kJ/kg}$
 $s_2 = 6,3749 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$

Estado 3

- Esta corriente está a la misma presión del condensador: $P_3 = P_{cond} = 10 \text{ kPa}$
- La turbina es isentrópica, por lo que se cumple que: $s_3 = s_2 = 6,3749 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$

Determinamos el estado yendo a las tablas de saturación y comparando a 10 kPa los valores de entropía del líquido y vapor saturado: $s_{f@10\text{kPa}} = 0,6492 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ y

$s_{g@10\text{kPa}} = 8,1501 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$, por lo tanto: $s_f < s_4 < s_g$, el agua sale de la turbina como una mezcla líquido-vapor. Para determinar las propiedades calculamos la calidad:

$$x_3 = \frac{s_4 - s_f}{s_g - s_f} = 0,7633 \text{ (este valor de calidad a la salida de la turbina es muy bajo)}$$

La entalpía viene dada por:

$$\left. \begin{array}{l} h_{f@10\text{kPa}} = 191,81 \text{ kJ/kg} \\ h_{g@10\text{kPa}} = 2584,6 \text{ kJ/kg} \end{array} \right\} h_3 = h_g + x_3(h_g - h_f) = 2018,23 \text{ kJ/kg}$$

Cálculo de trabajo y eficiencia

El trabajo de la turbina se calcula como:

$$w_t = h_2 - h_3 = 1051,57 \text{ kJ/kg}$$

El trabajo de la bomba es:

$$w_b = -6,05 \text{ kJ/kg}$$

El trabajo neto:

$$w_{neto} = w_t + w_b = 1045,5 \text{ kJ/kg}$$

El calor suministrado a la caldera es:

$$q_{cal} = h_2 - h_1 = 2871,98 \text{ kJ/kg}$$

La eficiencia térmica sería:

$$\eta_{ciclo} = \frac{|w_{neto}|}{|q_{cal}|} = 0,364$$

Es decir, el 36,4% del calor total suministrado se transforma en trabajo.

Modificaciones

1. Reducción de la presión en el condensador: se propone reducir la presión del condensador en un 50%

- Se tiene ahora que la presión del condensador es: $P_3 = P_4 = 5 \text{ kPa}$, debemos redefinir los estados 1,3 y 4:

Estado 4: Líquido saturado

$$\left. \begin{array}{l} P_4 = 5 \text{ kPa} \\ x_4 = 0 \end{array} \right\} \begin{array}{l} h_4 = 137,79 \text{ kJ/kg} \\ v_4 = 0,001005 \text{ m}^3/\text{kg} \end{array}$$

Estado 1: Líquido comprimido

$$\left. \begin{array}{l} P_1 = 6 \text{ MPa} \\ s_1 = s_4 \end{array} \right\} h_1 = h_4 + v_4(P_1 - P_4) = 143,81 \text{ kJ/kg}$$

Estado 3: Mezcla líquido vapor:

$$\left. \begin{array}{l} s_{f@5\text{kPa}} = 0,4763 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} \\ s_{g@5\text{kPa}} = 8,395 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} \end{array} \right\} \begin{array}{l} s_3 = s_2 = 6,3749 \\ x_3 = 0,7449 \end{array}$$

La calidad sigue siendo muy baja

La entalpía viene dada por:

$$\left. \begin{aligned} h_{f@5\text{kPa}} &= 137,8 \text{ kJ/kg} \\ s_{g@5\text{kPa}} &= 2561 \text{ kJ/kg} \end{aligned} \right\} h_3 = 1943,14 \text{ kJ/kg}$$

- Recalculando el trabajo neto y la eficiencia se tiene:

$$w_{\text{neto}} = 1120,64 \text{ kJ/kg} \quad \text{Un aumento del 7,19 \%}$$

$$\eta_{\text{ciclo}} = 38,3 \%$$

2. Sobre calentamiento del vapor a altas temperaturas: se propone doblar la temperatura a la entrada de la turbina

- Se tiene ahora que: $T_2 = 720^\circ\text{C}$. Esto obliga a redefinir los estados 2 y 3

Estado 2, vapor sobrecalentado

$$\left. \begin{aligned} T_2 &= 720^\circ\text{C} \\ P_2 &= 6 \text{ MPa} \end{aligned} \right\} \begin{aligned} h_2 &= 3940,18 \text{ kJ/kg} \\ s_2 &= 7,4700 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K} \end{aligned}$$

Esta temperatura puede ser muy elevada para una turbina real

Estado 3, mezcla líquido vapor

$$\left. \begin{aligned} s_{f@10\text{kPa}} &= 0,6492 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K} \\ s_{g@5\text{kPa}} &= 8,1501 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K} \end{aligned} \right\} \begin{aligned} s_3 &= s_2 = 7,4700 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K} \\ x_3 &= 0,9093 \end{aligned}$$

La entalpía viene dada por:

$$h_3 = 2367,57 \text{ kJ/kg}$$

Calidad Aceptable

- Recalculando el trabajo neto y la eficiencia se tiene:

$$w_{\text{neto}} = 1566,56 \text{ kJ/kg} \quad \text{Un aumento del 50 \%}$$

$$\eta_{\text{ciclo}} = 41,9 \%$$

3. Incremento de la presión en la caldera: se lleva la caldera hasta 10 MPa

- Se debe redefinir los estados 1, 2 y 3

Estado 1, Líquido comprimido

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= 10 \text{ MPa} \\ s_1 &= s_4 \end{aligned} \right\} h_1 = h_4 + v_4 (P_1 - P_4) = 201,9 \text{ kJ/kg}$$

Estado 2, Vapor sobrecalentado

$$\left. \begin{aligned} T_2 &= 360^\circ\text{C} \\ P_2 &= 10 \text{ MPa} \end{aligned} \right\} \begin{aligned} h_2 &= 2958,02 \text{ kJ/kg} \\ s_2 &= 5,9977 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K} \end{aligned}$$

Estado 3, mezcla líquido vapor

$$\left. \begin{aligned} s_{f@10\text{kPa}} &= 0,6492 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K} \\ s_{g@5\text{kPa}} &= 8,1501 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K} \end{aligned} \right\} \begin{aligned} s_3 &= s_2 = 5,9977 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K} \\ x_3 &= 0,7130 \end{aligned}$$

La entalpía viene dada por:

$$h_3 = 1897,87 \text{ kJ/kg}$$

La calidad disminuyó aún más

- Recalculando el trabajo neto y la eficiencia se tiene:

$$w_{\text{neto,sale}} = 1050,06 \text{ kJ/kg} \quad \text{Un aumento del 0,5 \%}$$

$$\eta_{\text{ciclo}} = 38,1 \%$$