Pontificia Universidad Católica de Chile
Escuela de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Química y Bioprocesos
IIQ1003 - Termodinámica 2023-1

Examen

Pauta P2 Examen

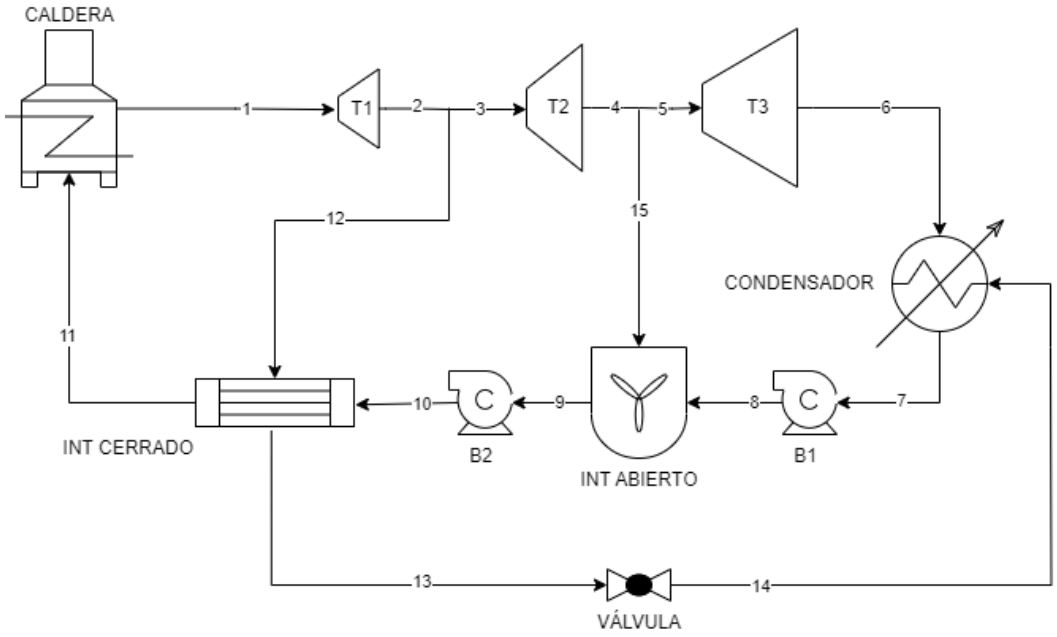
Se tiene un ciclo Rankine modificado. En este 1000 kg/min de vapor a 120 bar y 520 °C es generado en una caldera y alimenta a la primera turbina, la cual tiene una eficiencia del 75 %. En esta el vapor es expandido hasta 40 bar. Luego, una porción (12) de este flujo se dirige a un intercambiador cerrado mientras que el resto se expande en una segunda turbina hasta 10 bar. A la salida de esta turbina, una parte del flujo (15) se envía a un intercambiador abierto, mientras que la otra parte se expande en una tercera turbina hasta 1.5 bar. Suponga que del condensador y del intercambiador abierto sale liquido saturado. Por otro lado la corriente 11 y 13 del intercambiador cerrado salen en equilibrio térmico, con la corriente 13 saliendo como liquido saturado. Considere que las turbinas y las bombas se comportan idealmente a excepción de la primera turbina. Se le pide determinar:

a) La entalpía de todos las corrientes.

b) La potencia neta del ciclo.

c) El calor agregado por la caldera y la eficiencia del ciclo.

Hint: SOLO para el caso de la corriente 11 para evitar una interpolación doble, se tiene que $h_{11} = h_{13} + 1,39 \ \left[\frac{kJ}{kg}\right]$.


CALDERA
1
T1
2
3
T2
4
5
T3
6
12
15
CONDENSADOR
11
INT CERRADO
10
B2
9
INT ABIERTO
8
B1
7
13
VÁLVULA
14

Solución:

a) Entalpía de todas las corrientes.

Corriente 1: Entrada a T1. P_1= 120 bar y T_1= 520 °C. Se tiene de la tabla A-4 que h_1=3401,8 $\left[\frac{kJ}{kg}\right]$ y s_1= 6,5555 $\left[\frac{kJ}{kg \cdot K}\right]$. $(0,07pts)$

Corriente 2 ideal: Salida de T1. P_2= 40 bar, asumiendo proceso ideal s_{2s}=s_1= 6,5555 $\left[\frac{kJ}{kg \cdot K}\right]$. Verificando en las tablas se puede observar que esta como vapor sobrecalentado entre 320 y 360 °C, por ello se interpola y se tiene que h_{2s}=3076,77 $\left[\frac{kJ}{kg}\right]$.$(0,07pts)$

Corriente 2 real: Salida T1. Usando la eficiencia se tiene que:

$$\eta_1 = \frac{h_2 - h_1}{h_{2s} - h_1} \rightarrow h_2 = 0,75 \cdot (3076,77 - 3401,8) + 3401,8 = 3158,03 \left[\frac{kJ}{kg}\right]$$

Teniendo la entalpía de la corriente y P_2= 40 bar, se interpola y se tiene s_2= 6,6800 $\left[\frac{kJ}{kg \cdot K}\right]$.
En este caso, la corriente 3 y 12 tienen las mismas propiedades que 2 por tratarse de un divisor de flujo s_2=s_3=s_{12}, h_2=h_3=h_{12} y P_2=P_3=P_{12}, solamente cambian sus flujos. $(0,07pts)$

Corriente 4: Salida T2. P_4= 10 bar y al tratarse de una turbina ideal se tiene que $s_4 = s_3$, por lo tanto debemos calcular h_4 sabiendo que s_4= 6,6800 y P_4= 10 bar. Al revisar las condiciones se puede apreciar que es vapor sobrecalentado, y este valor de entropía esta entre 6,6940 (200 °C) y 6,5865 (179,91 °C). Por lo tanto interpolando se tiene h_4= 2821,41 $\left[\frac{kJ}{kg}\right]$. Nuevamente al tratarse de un divisor de flujo, la corriente 5 y 15 tienen las mismas propiedades que 4 s_4=s_5=s_{15}, h_4=h_5=h_{15} y P_4=P_5=P_{15}, solamente cambian sus flujos. $(0,07pts)$

Corriente 6: Salida T3. P_6= 1,5 bar y de nuevo al tratarse de una turbina ideal, se tiene que $s_6 = s_5 = 6,6800$ $\left[\frac{kJ}{kg \cdot K}\right]$, lo cual a 1,5 bar se encuentra en región de equilibrio líquido-vapor y se determina la calidad (Tabla A-3).

$$x_6 = \frac{s_6 - s_L}{s_V - s_L} = 0,91$$

$$h_6 = h_L + x_6(h_V - h_L) = 2493,22 \left[\frac{kJ}{kg}\right] (0,07pts)$$

Corriente 7: Salida del condensador. Se sabe que sale como líquido saturado y P_6=P_7= 1,5 y se tiene que $s_7 = 1,4336 \left[\frac{kJ}{kg \cdot K}\right]$, además $h_7 = 467,11 \left[\frac{kJ}{kg}\right]$ y $v_7 = 0,0010528 \left[\frac{m^3}{kg}\right]$. $(0,07pts)$

Corriente 8: Salida de B1. Se sabe que esta se comporta idealmente, por lo tanto es isoetrópica y sube la presión hasta 10 bar, que es la presión con la que entra 15 al intercambiador abierto. Por lo tanto se puede determinar la entalpía usando la aproximación de bombas:

$$h_8 = h_7 + v_7 \cdot (P_8 - P_7) = 467,11 \left[\frac{kJ}{kg}\right] + 0,0010528 \left[\frac{m^3}{kg}\right] \cdot (1000 - 150) kPa = 468 \left[\frac{kJ}{kg}\right] (0,07pts)$$

Corriente 9: Salida del intercambiador abierto. Se ha establecido que sale como líquido saturado y además P_9=P_8= 10 bar, se determina en la Tabla A-3 que $h_9 = 762,81 \left[\frac{kJ}{kg}\right]$ y $v_9 = 0,0011273 \left[\frac{m^3}{kg}\right]$ $(0,07pts)$.

Corriente 10: Salida de B2. Otra vez se sabe que esta se comporta idealmente, por lo tanto es isoetrópica y sube la presión hasta 120 bar, que es la presión con la que entra 12 al intercambiador cerrado y alimenta la caldera. Por lo tanto se puede determinar la entalpía usando la aproximación de bombas:

$$h_{10} = h_9 + v_9 \cdot (P_{10} - P_9) = 775,21 \left[\frac{kJ}{kg}\right] (0,07pts)$$

Corriente 13: Salida hacia abajo del intercambiador cerrado. Se sabe que hay equilibrio térmico entre 13 y 11 (T_{13}=T_{11}), y además que 13 esta cómo líquido saturado y P_{13}= 40 bar (ya que los intercambiadores son isobáricos). Por ende se tiene que T_{13}=T_{11}= 250,4 °C, $h_{13} = 1087,3 \left[\frac{kJ}{kg}\right]$. $(0,07pts)$

Corriente 11: Salida hacia la izquierda del intercambiador cerrado. Se sabe que T_{11}=T_{13}= 250,4 °C y P_{11}=P_{10}= 120 bar, y de la definición en el Hint $h_{11} = h_{13} +$

$1,39\ \left[\frac{kJ}{kg}\right] = 1088,7\ \left[\frac{kJ}{kg}\right]$. $(0,07pts)$

Corriente 14: Salida de la válvula. Se sabe que las válvulas son isoentálpicas, por ello h_{14}=h_{13}= 1087,3 $\left[\frac{kJ}{kg}\right]$ y P_{14}=P_6= 1,5 bar. $(0,07pts)$

b) Para determinar la potencia del ciclo, primero se deben caracterizar las corrientes.

Primero se realiza el balance de energía en el intercambiador de calor cerrado, para determinar el flujo 12 (igual al 13), sabiendo que $F_{11} = F_{10}$= 1000 kg/min. Se tiene que:

$$0 = F_{12} \cdot (h_{12} - h_{13}) + F_{11} \cdot (h_{10} - h_{11})$$

$$F_{12} = \left[\frac{-F_{11} \cdot (h_{10} - h_{11})}{h_{12} - h_{13}}\right]$$

$$F_{12} = F_{13} = F_{14} = 151,39 kg/min (0,07pts)$$

Ahora se determina $F_3 = F_4 = (1000 - 151,39) kg/min$=$848,61 kg/min$.
Ahora se plantea el balance de masa en el divisor de flujo a la salida de la T2. Se tiene que:

$$F_4 = F_5 + F_{15}$$

$$F_5 = F_4 - F_{15}$$

Ahora se el balance de energía en el intercambiador abierto, teniendo:

$$F_9 \cdot h_9 = F_{15} \cdot h_{15} + F_8 \cdot h_8$$

Se sabe que $F_8 = F_5 + F_{14}$ y que $F_5 = F_4 - F_{15}$, por lo tanto:

$$F_9 \cdot h_9 = F_{15} \cdot h_{15} + (F_5 + F_{14}) \cdot h_8$$

$$F_9 \cdot h_9 = F_{15} \cdot h_{15} + ((F_4 - F_{15}) + F_{14}) \cdot h_8$$

$$F_9 \cdot h_9 = F_{15} \cdot h_{15} + F_4 \cdot h_8 - F_{15} \cdot h_8 + F_{14} \cdot h_8$$

$$F_9 \cdot h_9 = F_{15} \cdot h_{15} + F_4 \cdot h_8 - F_{15} \cdot h_8 + F_{14} \cdot h_8$$

$$F_9 \cdot h_9 = F_{15} \cdot (h_{15} - h_8) + (F_4 + F_{14}) \cdot h_8$$

$$F_{15} = \left[\frac{F_9 \cdot h_9 - (F_4 + F_{14}) \cdot h_8}{h_{15} - h_8}\right]$$

Se sabe por balance de masa que $F_9 = F_4 + F_{14}$, por lo tanto:

$$F_{15} = \left[\frac{F_9 \cdot (h_9 - h_8)}{h_{15} - h_8}\right]$$

$$F_{15} = 125,27 kg/min (0,1 pts)$$

Por lo tanto:

$$F_5 = F_6 = (851,56 - 120,87) kg/min = 723,34 kg/min (0,07 pts)$$

$$F_7 = F_8 = (723,34 + 151,39) kg/min = 874,73 kg/min (0,07 pts)$$

La potencia generada por las turbinas y consumida por el compresor.

$$W_{T1} = F_1 \cdot (h_2 - h_1) = 1000 \frac{kg}{min} \cdot (3158,03 - 3401,8) = -243,77 \frac{MJ}{min} (0,07 pts)$$

$$W_{T2} = F_3 \cdot (h_4 - h_3) = 848,61 \frac{kg}{min} \cdot (2821,41 - 3158,03) = -285,66 \frac{MJ}{min} (0,07 pts)$$

$$W_{T3} = F_5 \cdot (h_6 - h_5) = 723,34 \frac{kg}{min} \cdot (2493,22 - 2821,41) = -237,39 \frac{MJ}{min} (0,07 pts)$$

$$W_{B1} = F_7 \cdot (h_8 - h_7) = 874,73 \frac{kg}{min} \cdot (468 - 467,11) = 0,779 \frac{MJ}{min} (0,07 pts)$$

$$W_{B2} = F_9 \cdot (h_10 - h_9) = 1000 \frac{kg}{min} \cdot (775,21 - 762,81) = 12,4 \frac{MJ}{min} (0,07 pts)$$

$$W_{Neto} = W_T + W_B = (-766,82 + 13,179) \frac{MJ}{min} = -753,641 \frac{MJ}{min} (0,1 pts)$$

$c)$ El calor en la caldera se determina:

$$Q = F_1 \cdot (h_1 - h_{11}) = 2313,11 \frac{MJ}{min} (0,2 pts)$$

Ahora la eficiencia de esta maquina sería:

$$\eta = 100 \cdot \frac{|W_{Neto}|}{Q} = 32,58\,\%(0,2pts)$$