ESCUELA DE INGENIERÍA

IIQ1003 - Termodinámica

Compilado de Problemas

Joaquín Meruane Anich



Contacto: jameruane@uc.cl

Segunda Edición - agosto 2021

Índice general

1. Primera Ley de la Termodinámica **2**

2. Gas Ideal y Primera Ley **26**

3. Gases Reales y Ecuaciones de Estado **33**

4. Entropía y Segunda Ley **40**

5. Termodinámica de Procesos **59**

6. Ciclo Rankine **76**

7. Ciclo de Refrigeración y Bomba de Calor **93**

Capítulo 1

Primera Ley de la Termodinámica

1.1. Problemas Resueltos

Problema 1.1.1) Primera Ley para Mezclador adiabático

Del balance de energía, determine y justifique los términos que se van a cero/se eliminan (puede ser mas de uno), para un mezclador adiabático y agitado que recibe dos corrientes de agua a diferentes temperaturas y las mezcla en una sola corriente que sale estacionariamente para el regadío del campo.

$$\frac{dU}{dt} = \sum_{i=1}^{N} \dot{m}_i u_i + \sum_{i=1}^{N} \dot{m}_i (Pv)_i + \dot{Q} + \dot{W}_s - P\frac{dV}{dt}$$

Solución

$$\cancel{\frac{dU}{dt}}^{0} = \sum_{i=1}^{N} \dot{m}_i u_i + \sum_{i=1}^{N} \dot{m}_i (Pv)_i + \cancel{\dot{Q}}^{0} + \dot{W}_s - P\cancel{\frac{dV}{dt}}^{0}$$

- $\frac{dU}{dt}$ y $-P\frac{dV}{dt}$ se van a 0 pues en un sistema que opera de manera estacionaria las propiedades no dependen del tiempo.
- Como el mezclador es adiabático $\dot{Q} = 0$
- Como el mezclador esta agitado, existe trabajo de eje $W_s \neq 0$
- Las sumatorias no se eliminan pues existen flujos de entrada y salida.
- Además $h = u + Pv$, por lo que se puede juntar las sumatorias.

Luego la ecuación final es:

$$0 = \sum_{i=1}^{N} \dot{m}_i h_i + \dot{W}_s$$

Problema 1.1.2) Primera Ley Cilindro Pistón

Del balance de energía, determine los términos que se van a cero/se eliminan (puede ser mas de uno), para un sistema cilindro pistón que es está en una fuente a temperatura constante y es sometido a una compresión reversible.

$$\frac{dU}{dt} = \sum_{i=1}^{N} \dot{m}_i u_i + \sum_{i=1}^{N} \dot{m}_i (Pv)_i + \dot{Q} + \dot{W}_s - P\frac{dV}{dt}$$

Solución

$$\frac{dU}{dt} = \sum_{i=1}^{N} \dot{m}_i u_i + \sum_{i=1}^{N} \dot{m}_i (Pv)_i + \dot{Q} + \dot{W}_s - P\frac{dV}{dt}$$

- $\frac{dU}{dt}$ no se elimina pues la energía interna cambia durante la compresión. **Que sea isotérmico solo afectaría en caso de ser gas ideal.**
- $\sum_{i=1}^{N} \dot{m}_i u_i$ y $\sum_{i=1}^{N} \dot{m}_i (Pv)_i$ se eliminan pues no existen flujos de entrada ni de salida.
- $Q \neq 0$ pues no mencionan que el sistema sea adiabático.
- $W_s = 0$ pues el sistema no se encuentra agitado y tampoco existe algún movimiento rotacional.
- $W = -P\frac{dV}{dt} \neq 0$ pues existe un trabajo de compresión.

Luego si se integra el balance se obtiene la primera ley para un sistema cerrado:

$$Q + W = \Delta U$$

Problema 1.1.3) Cilindro Pistón 1

2 kg de vapor se encuentra dentro de un cilindro pistón inicialmente a 1 bar y 100°C. Se calienta el vapor a presión constante hasta 200 °C. Calcule el trabajo realizado por el gas y el calor absorbido en kJ.

Solución

Primero se plantea el balance de energía para un sistema cerrado sin agitación

$$\frac{dU}{dt} = \sum_{i=1}^{N} \dot{m}_i h_i + \dot{Q} + \dot{W}_s + \dot{W}$$

Luego integrando:

$$\Delta U = Q + W$$

El trabajo realizado por el gas a presión constante:

$$W = -m \int_{v_1}^{v_2} P dv = -m \cdot P(v_2 - v_1)$$

El calor a presión constante es:

$$Q = \Delta H = m\Delta h$$

Primer estado, $P_1 = 1$ bar, $T_1 = 100°$C. De la tabla del agua A-4:

- $v_1 = 1.696$ m^3/kg
- $h_1 = 2676.2$ kJ/kg

Segundo estado, $P_2 = 1$ bar, $T_2 = 200°$C. De la tabla del agua A-4

- $v_2 = 2.172$ m^3/kg
- $h_2 = 2875.3$ kJ/kg

Luego:

$$W = -2 \cdot 1 \times 10^2 \cdot (2.172 - 1.696) = -95.2 \text{ kJ}$$

$$Q = 2 \cdot (2875.3 - 2676.2) = 398.2 \text{ kJ}$$

Problema 1.1.4) Cilindro pistón 2

Un sistema cilindro-pistón contiene agua inicialmente a 10 bar y 400°C. El agua es enfriada a volumen constante hasta 150°C. Luego el agua es condensada de forma isotérmica hasta ser completamente líquido saturado. Calcule el trabajo realizado por el sistema y el calor transferido en kJ/kg.

Solución

Primero se plantea la primera ley para un sistema cerrado sin agitación:

$$\frac{dU}{dt} = \sum_{i=1}^{N} \dot{m}_i h_i + \dot{Q} + \dot{W}_s + \dot{W}$$

(los términos $\sum_{i=1}^{N} \dot{m}_i h_i$ y $\dot{W}_s$ se anulan, marcados con 0)

Lo que lleva a la primera ley de la termodinámica para un sistema cerrado en unidades especificas (kJ/kg)

$$q + w = \Delta u$$

En este sistema se tienen 2 procesos y 3 estados que se analizarán uno a uno.

- $1 \rightarrow 2$: Enfriamiento a volumen constante desde el estado 1 al estado 2
- $2 \rightarrow 3$: Condensación (la que es isotérmica) desde el estado 2 hasta el estado 3.

Estado 1: en este caso como del estado 1 al 2 es un proceso a volumen constante, interesa el volumen especifico y la energía interna.

- $P_1 = 10$ bar
- $T_1 = 400$°C
- Fase: VSC
- u_1=2957,3 kJ/kg
- $v_1 = 0,3066$ m^3/kg

Estado 2: Volumen igual a volumen del estado 1, de nuevo, interesa la energía interna.

- $T_2 = 150$°C
- $v_2 = v_1 = 0,3066$ m^3/kg
- Fase: en 150 °C el volumen especifico se encuentra entre el liquido saturado y vapor saturado, por ende es mezcla L-V
- $x_2 = \frac{v - v^L}{v^V - v^L} = \frac{0,3066 - 1,0905 \cdot 10^{-3}}{0,3928 - 1,0905 \cdot 10^{-3}} = 0,7799$
- $u_2 = u^l + x * (u^g - u^l) = 631,68 + 0,7799 * (2559,5 - 631,68) = 2135,26$ kJ/kg
- $h_2 = 2281,2$ kJ/kg

Estado 3: Se condenso a temperatura constante, y además los cambios de fase a temperatura constante son a presión constante, por ende las propiedades son las de liq sat a 150°C.

- $T_3 = 150$°C
- $P_3 = 4,758$ bar
- $u_3 = 631,68$ kJ/kg
- $v_3 = 1,0905 \cdot 10^{-3}$ m^3/kg
- $h_3 = 632,2$ kJ/kg

Ahora que se conocen todos los estados se puede calcular el trabajo y calor por cada proceso y global.

1. Proceso 1-2: Como es volumen constante $dW = -PdV = 0 \longrightarrow q = \Delta u$

   $q_{1,2} = \Delta u_{1,2} = u_2 - u_1 = 2135,26 - 2957,3 = -822,03$ kJ/kg

2. Proceso 2-3: Como es a temperatura y presión constante se tienen dos alternativas para calcular el calor y trabajo:

   Alternativa 1:

   A presión constante: $q = \Delta h$, luego:

   $$q_{2,3} = h_3 - h_2 = 632,2 - 2281,2 = -1649 \text{ kJ/Kg}$$

   $$\Delta u_{2,3} = u_3 - u_2 = 631,68 - 2135,26 = -1503,58 \text{ kJ/Kg}$$

   $$w = \Delta u - q = 145,36 \text{ kJ/Kg}$$

   Alternativa 2:

A presión constante: $w = -P\Delta v$, luego:

$$w_{2,3} = -4,758 \cdot 10^2 \cdot (1,0905 \cdot 10^{-3} - 0,3066) = 145,36 \text{ kJ/Kg}$$

Se debe tener cuidado ya que se debe pasar la presión a kPa, para que el trabajo este en kJ.

$$q = \Delta u - w = -1648,9 \text{ kJ/Kg}$$

Luego el trabajo total es $w = 145,36$ kJ/kg y el calor total es $q = -2470,98$ kJ/kg.

Problema 1.1.5) Cilindro Pistón 3

Considere un sistema cilindro pistón con topes en la parte superior. En su interior se encuentra una mezcla liquido vapor de agua con 30 % de calidad a 100 kPa. El diámetro del pistón es de 150 cm. La presión de los alrededores es de 100 kPa. Inicialmente el pistón se encuentra a una altura de 20 cm y el sistema se calienta de manera a presión constante (procesos 1-2) hasta que el pistón choca con los topes a una altura de 80 cm. Luego el calentamiento continua hasta que la presión llega a 140 kPa (proceso 2-3). Considere que todos los procesos se realizan de manera reversible y desprecie cualquier efecto del roce como también la energía potencial y cinética. Se le pide:

a) Determinar la masa de agua en el sistema.

b) Determinar la presión, temperatura, volumen y energía interna y fase de cada estado.

c) Calcular el calor y el trabajo para cada proceso y el global para el proceso.

d) Denotar el proceso en un diagrama P-V, mostrando la posición de cada estado.

Solución

a) Primero se debe caracterizar el estado 1.

Estado 1:

- $P_1 = 100$ kPa $= 1$ bar
- $x_1 = 0.3$
- Mezcla L-V
- $L_1 = 20$ cm

  A partir de la tabla A-3 (se debe mostrar cálculos si corresponde para el puntaje completo)

- $T_1 = 99.63°$C
- $v_1 = v_L + x(v_V - v_L) = 0.5089$ m^3/kg
- $u_1 = u_L + x(u_V - u_L) = 1043.982$ kJ/kg

Para encontrar la masa del agua:

$$m = \frac{V_{\text{pistón}}}{v_1}$$

$$V = \frac{\pi D^2}{4} L = \frac{\pi 1.5^2}{4} \dot{0}.2 = 0.3534 \text{ m}^3$$

$$m = \frac{0.3534}{0.5089} = 0.6945 \text{ kg}$$

b) Ya se tiene el estado 1, se debe caracterizar el resto.

Estado 2: El calentamiento desde 1 es a presión constante

- $P_2 = P_1 = 100$ kPa
- $L_2 = 80$ cm

  Se puede calcular el volumen especifico con:

$$v_2 = \frac{V_{\text{Pistón}}}{m} = \frac{(\pi D^2/4)L}{m}$$

$$v_2 = \frac{(\pi 1.5^2/4) \cdot 0.8}{0.6945} = 2.0357 \text{ m}^3/\text{kg}$$

- Luego $v_2 > v_{V,sat}(@P = 100 \text{ kPa})$ por ende es VSC.

  A partir de la tabla A-4, por medio de interpolación doble
- $T_2 = 171$ °C
- $u_2 = 2614.39$ kJ/kg

Estado 3: Luego de un calentamiento a volumen constante.

- $v_3 = v_2 = 2.0357$ m^3/kg
- $P_3 = 140$ kPa $= 1.4$ bar
- VSC

  A partir de la tabla A-4 por medio de interpolación doble
- $T_3 = 346.1$ °C
- $u_3 = 2883.8$ kJ/kg

c) Para calcular el trabajo y calor para cada proceso se debe plantear la primera ley en cada uno.

Proceso 1-2: Proceso cerrado sin agitación a presión constante.

$$\frac{dU}{dt} = \sum_{i=1}^{N} \dot{m}_i h_i + \dot{Q} + \dot{W}_s - P\frac{dV}{dt}$$

(0 sobre $\sum$, 0 sobre $\dot{W}_s$)

Luego integrando:

$$\Delta U = Q + W$$

El trabajo realizado por el gas a presión constante:

$$W_{1,2} = -m \int_{v_1}^{v_2} P dv = -m \cdot P(v_2 - v_1)$$

$$W_{1,2} = -0.6945 \cdot 100(2.0357 - 0.5089) = -106.03 \text{ kJ}$$

Luego se puede calcular el calor

$$Q_{1,2} = \Delta U - W = m(u_2 - u_1) - W$$

$$Q_{1,2} = 0.6945 \cdot (2614.39 - 1043.982) + 106.03 = 1196.6 \text{ kJ}$$

Nota: También el calor a presión constante se podría calcular como:

$$Q_{1,2} = \Delta H = m\Delta h$$

Proceso 2-3: Proceso cerrado sin agitación a volumen constante ($W_{2,3} = 0$).

$$\frac{dU}{dt} = \sum_{i=1}^{N} \dot{m}_i h_i + \dot{Q} + \dot{W}_s - P\frac{dV}{dt}$$

(los términos $\sum \dot{m}_i h_i$, $\dot{W}_s$ y $P\frac{dV}{dt}$ se anulan a 0)

Luego integrando:

$$\Delta U_{2,3} = Q_{2,3}$$

$$Q_{2,3} = m(u_3 - u_2) = 0.6945 \cdot (2883.8 - 2614.39) = 187.12 \text{ kJ}$$

Luego finalmente el calor y trabajo total:

$$Q = Q_{1,2} + Q_{2,3} = 1383.7 \text{ kJ}$$

$$W = W_{1,2} = -106.03 \text{ kJ}$$

d) El diagrama esta en la Figura 1.1

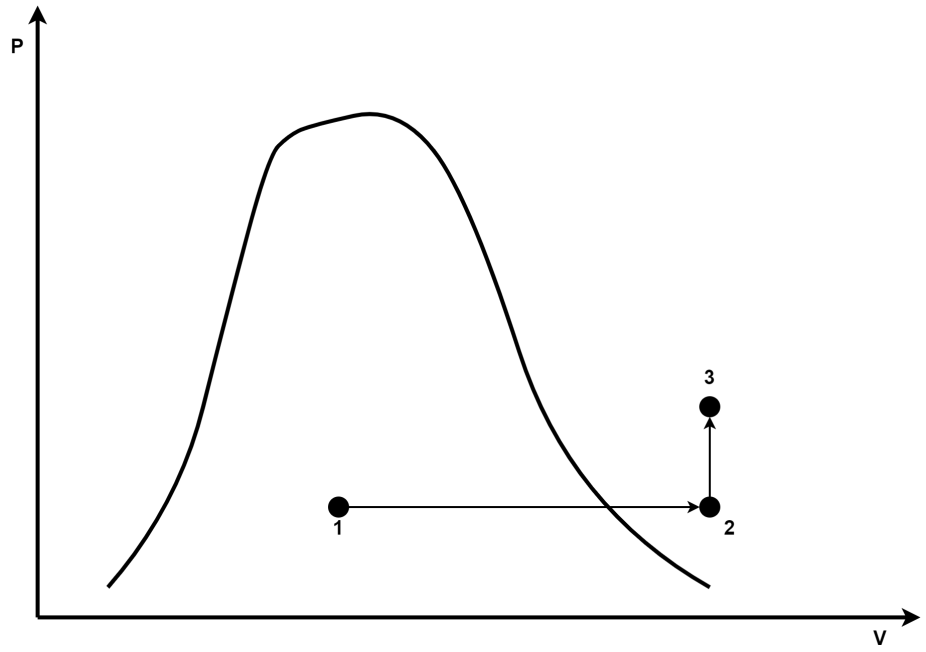


Figura 1.1: Diagrama PV del Proceso

Problema 1.1.6) Estanque y Cilindro Pistón

Un estanque rígido con un volumen de 0.5 m^3 está conectado a un cilindro pistón mediante una válvula como se muestra en la figura 1.2. Ambos contienen agua pura. El sistema está inmerso en un baño de temperatura constante a 200°C y 600 kPa. Inicialmente la válvula está cerrada y el pistón está en equilibrio termodinámico con los alrededores (el baño) y el estanque en equilibrio térmico con los alrededores. El estanque contiene vapor de agua con una calidad del 95 %. El cilindro pistón inicialmente tiene un volumen de 0.1 m3.

En un momento dado, la válvula se abre hasta que el sistema alcanza el equilibrio termodinámico con los alrededores nuevamente.

Determine:

a) La masa que hay dentro del pistón y el estanque respectivamente (en kg).

b) El volumen final (luego de alcanzar el equilibrio) del pistón (en m3)

c) El trabajo del sistema, sea consecuente con el signo y la dirección del trabajo.

d) El calor que se transfiere, sea consecuente con el signo y la dirección del calor.

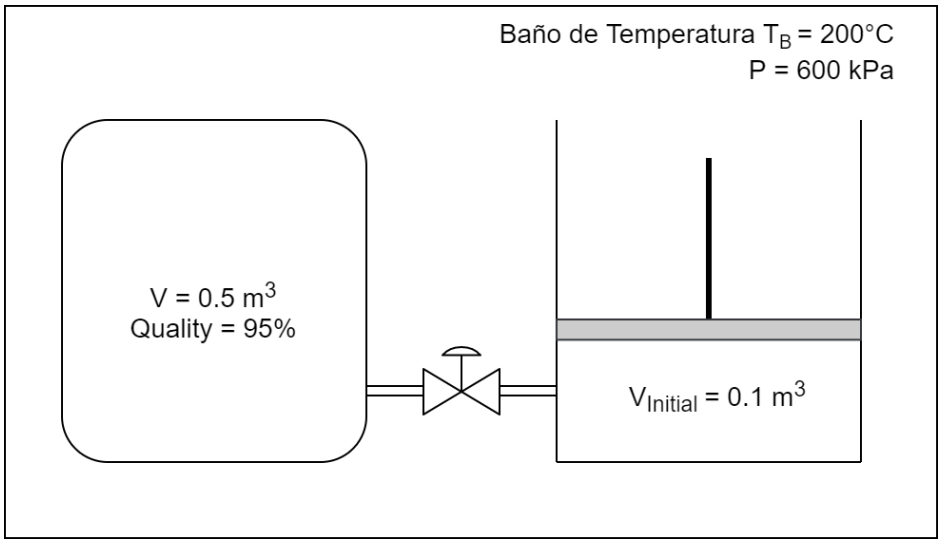


Figura 1.2: Estanque rígido conectado a cilindro pistón

Solución

a) Primero, como el pistón esta en equilibrio termodinámico con el baño:

$$P_P = P_b = 600 \text{ kPa} \quad T_P = T_B = 200°C$$

Tambien como el estanque esta en equilibrio térmico con el baño:

$$T_E = T_B = 200°C$$

Ahora si se va a la tabla a buscar los volúmenes específicos:

De la regla de la palanca con x=0.95:

$$v_{E,1} = v_L + x(v_V - v_L) = 0.1211 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Mediante interpolación doble:

$$v_{P,1} = 0.36195 \text{ m}^3/\text{kg}$$

También como se necesita la energía interna después (No es necesario sacarla ahora):

De la regla de la palanca con x=0.95:

$$u_{E,1} = 2508 \text{ kJ/kg}$$

Por interpolación doble:

$$u_{P,1} = 2638.85 \text{ kJ/kg}$$

Finalmente para las masas:

$$m_i = \frac{V_i}{v_i} \quad \forall i$$

$$m_{E,1} = \frac{V_E}{v_{E,1}} = \frac{0.5}{0.1211} = 4.129 \text{ kg}$$

$$m_{P,1} = \frac{V_{P,1}}{v_{P,1}} = \frac{0.1}{0.36195} = 0.276 \text{ kg}$$

$$m_T = m_E + m_P = 4.4055 \text{ kg}$$

b) Cuando se abre la válvula el liquido fluirá del estanque (mayor presión) al pistón (menor presión). Luego el sistema completa alcanzará el equilibrio termodinámico con el baño. Por ende:

$$P_2 = 600 \text{ kPa} \quad T_2 = 200°C$$

En este punto además:

$$v_2 = 0.36195 \text{ kg}$$

$$u_2 = 2638.85 \text{ kJ/kg}$$

De esta manera se puede calcular el volumen final del sistema:

$$V_T = v_2 m_T = 1.5945\text{m}^3$$

El volumen que usa el pistón es:

$$V_{P,2} = V_T - V_E = 1.0945\text{m}^3$$

c) Para el trabajo:

$$W = -\int_{V_1}^{V_2} PdV$$

Como la presión externa es constante:

$$W = -P_{ext}(V_{P,2} - V_{P,1})$$

$$= 600 \cdot (1.0945 - 0.1) = -596.7 \text{ kJ}$$

También se puede calcular como:

$$W = -P_{ext}(V_{T,2} - V_{T,1})$$

d) Si se realiza el balance de energía para el sistema cerrado:

$$\frac{dU}{dt} = \cancelto{0}{\sum_{i=1}^{N} \dot{m}_i h_i} + \dot{Q} + \cancelto{0}{\dot{W}_s} - P\frac{dV}{dt}$$

Integrando:

$$\Delta U = Q + W$$

Luego:

$$\Delta U = m_T u_2 - m_{E,1} u_{E,1} - m_{P,1} u_{P,1} = 540.03 \text{ kJ}$$

Finalmente:

$$Q = \Delta U - W = 1136.77 \text{ kJ}$$

Problema 1.1.7) Capacidad Calorifica

Se quiere llevar 3 kg de metanol desde 20°C hasta 100°C a presión atmosférica.

a) Calcule la cantidad de calor necesario para el proceso. **Utilice las Capacidades Caloríficas del compuesto para su cálculo**.

b) Para el proceso anterior se tienen 3 opciones de calentamiento:

- Agua a 50°C
- Amoniaco a 80°C
- Hexano a 150 °C

¿Cuál de estas 3 opciones usaría y por qué?

Solución

A presión constante el calor necesario es:

$$Q = \Delta H = \frac{m}{PM}\left(\int_{T_1}^{T_{eb}} C_{P,L} dT + \Delta H_{lv} + \int_{T_{eb}}^{T_2} C_{P,G} dT\right)$$

Del archivo propiedades de compuestos:

- PM= 32 g/mol
- $\Delta H_{lv} = 35270$ J/mol
- $T_{eb} = 337.7$ K

Del archivo capacidades caloríficas.

$$C_{P,L} = a_L + b_L T + c_L T^2 + d_L T^3$$

$a_L = -258.25,\ b_L = 3.3582,\ c_L = -0.0116388,\ d_L = 1.40516 \times 10^{-5}$

$$C_{P,G} = a_G + b_G T + c_G T^2 + d_G T^3 + e_G T^4$$

$a_G = 34.4925,\ b_G = -0.029189,\ c_G = 2.86844 \times 10^{-4},\ d_G = -3.125 \times 10^{-7}, e_G = 1.09833 \times 10^{-10}$

Además recordar que se debe pasar a Kelvin las temperaturas, $T_1 = 293.15$ K, $T_2 = 373.15$ K.

Luego:

$$Q = \frac{m}{PM}\left(\int_{293.15}^{337.15} C_{P,L}dT + \Delta H_{lv} + \int_{337.7}^{373.15} C_{P,G}dT\right)$$

$$Q = \frac{3000}{32}(3754.73 + 35270 + 1704.42) = 3818357 \text{ J} = 3818.35 \text{ kJ}$$

Con respecto a las alternativas, se debe utilizar la alternativa 3 pues es la única que cumpliría la ley 0 de la termodinámica.

Problema 1.1.8) Caldera Estacionaria

Considere una caldera a la que le entran 3 corrientes de agua (F_1, F_2, F_3), las que salen en solo una corriente (F_{out}). El proceso opera de manera estacionaria y recibe calor de la combustión de gas natural. ¿Cuánto calor se transfiere hacia la caldera en MJ/min?

Datos de las corrientes:

- F_1: 75 kg/min de liquido saturado a 150°C
- F_2: 150 kg/min de liquido saturado a 180°C
- F_3: 50 kg/min de liquido saturado a 6 bar.
- F_{out}: T=300 °C y P=7 bar.

Solución

El balance de materia para un sistema estacionario:

$$\cancelto{0}{\frac{dm}{dt}} = \sum_{in} \dot{m}_i - \sum_{out} \dot{m}_{out}$$

Expandiendo:

$$m_1 + m_2 + m_3 = m_{\text{out}} = 275$$

El balance de energía para un sistema abierto estacionario y sin trabajo de eje

$$\cancelto{0}{\frac{dU}{dt}} = \sum_{i=1}^{N} \dot{m}_i h_i + \dot{Q} + \cancelto{0}{\dot{W}_s} - P\cancelto{0}{\frac{dV}{dt}}$$

Expandiendo:

$$0 = m_1 h_1 + m_2 h_2 + m_3 h_3 - m_{\text{out}} h_{\text{out}} + \dot{Q}$$

Se buscan las entalpías de los flujos de entrada

- $F_1 \longrightarrow$ tabla A-2, se encuentra $h_1 = 632.2\ \frac{kJ}{kg}$
- $F_2 \longrightarrow$ tabla A-2, se encuentra $h_2 = 763.22\ \frac{kJ}{kg}$
- $F_3 \longrightarrow$ tabla A-3, se encuentra $h_3 = 670.56\ \frac{kJ}{kg}$

Para la salida se debe interpolar:

$$h_{\text{out}} = \frac{3100.9 - 3017.1}{320 - 300}(320 - 300) + 3017.1 = 3059 \text{ kJ/kg}$$

Luego:

$$\dot{Q} = 275 \cdot 3059 - 75 \cdot 632.2 - 150 \cdot 763.22 - 50 \cdot 670.56 = 645799 \text{ kJ/min} = 645.8 \text{ MJ/min}$$

Problema 1.1.9) IdC con Cp

Se quiere calentar en un intercambiador de calor una corriente de 100 mol/s metano para la producción de hidrógeno. Para esto se utilizara 1 kg/s de vapor saturado a 10 bar. Se sabe que el metano entra a 300K y sale a 700K. ¿Cuál es la calidad de salida de la corriente de vapor? Considere que no hay caída de presión en el intercambiador. ¿Es posible realizar este proceso?

Considere $C_P/R = a_0 + a_1 T + a_2 T^2 + a_3 T^3 + a_4 T^4$, donde T esta en Kelvin y $a_0 = 4,568$; $a_1 = -8,975 \times 10^{-3}$; $a_2 = 3,631 \times 10^{-5}$; $a_3 = -3,407 \times 10^{-8}$; $a_4 = 1,091 \times 10^{-11}$

Solución

Un intercambiador de calor es un equipo que transfiere calor entre dos corrientes, cuyas paredes exteriores son adiabáticas, no tiene trabajo de eje y funciona de manera estacionaria.

Luego el balance de energía para en intercambiador de calor es:

$$\cancel{\frac{dU}{dt}}^{0} = \sum_{i=1}^{N} \dot{m}_i h_i + \cancel{\dot{Q}}^{0} + \cancel{\dot{W}_s}^{0} - P\cancel{\frac{dV}{dt}}^{0}$$

Luego desarrollando, donde el subíndice A, representa al agua y el subíndice M al metano.

$$0 = m_A(h_{A,in} - h_{A,out}) + m_M(h_{M,in} - h_{M,out}) \Longrightarrow m_A(h_{A,in} - h_{A,out}) = m_M(h_{M,out} - h_{M,in})$$

Para la entalpía del metano:

$$\Delta h_M = \int_{300}^{700} C_p dT = \int_{300}^{700} R(a_0 + a_1 T + a_2 T^2 + a_3 T^3 + a_4 T^4) dT$$

$$= R\left(a_0 T + \frac{a_1}{2}T^2 + \frac{a_2}{3}T^3 + \frac{a_3}{4}T^4 + \frac{a_4}{5}T^5\right)\Big|_{300}^{700} = 18641 \text{ J/mol} = 18.641 \text{ kJ/mol}$$

La entalpía de entrada del agua se obtiene de la tabla A-3:

$$h_{A,in} = h(\text{Vap. sat.}@P = 10 \text{ bar}) = 2778.1 \text{ kJ/kg}$$

Luego resolviendo el balance de energía:

$$100 \cdot 18.641 = 1 \cdot (2778.1 - h_{A,out})$$

$$h_{A,out} = 2778.1 - 1864.1 = 914 \text{ kJ/kg}$$

Luego por regla de la palanca y con los datos de la tabla A-3:

$$h_{A,out} = h^L + x(h^V - h^L) \longrightarrow x = 0,075$$

Respondiendo a la pregunta de si se puede llevar a cabo este proceso, la respuesta es No. Esto se debe a que se rompe la ley 0 de la termodinámica. Esto ya que el metano entra a 300K (27°C) y sale a 700K (423°C) mientras que el agua entra y sale (recordar que el cambio de fase es isotérmico) a 179.9°C, por lo que en cierto punto el agua estaría en equilibrio con el metano y luego transfiriendo calor a algo que esta mas caliente lo que rompe la ley 0.

Problema 1.1.10) Hervidor

Se tiene un estanque rígido de 0.06 m^3 que contiene una mezcla de liquido vapor de agua a una presión de 15 bar y con una calidad de 20 %. El estanque es calentado y una válvula reguladora de presión mantiene la presión constante mediante la liberación de vapor saturado. Determine la masa en kg en el estanque y la cantidad de calor agregado en kJ cuando la calidad alcanza 50 %.

Solución

El balance de materia para el sistema transiente sin entrada

$$\frac{dm}{dt} = \sum_{in} \dot{m}_i^{\,0} - \sum_{out} \dot{m}_o$$

Luego integrando el balance (donde m_f y m_i representan la masa final e inicial respectivamente):

$$\frac{dm}{dt} = -\dot{m}_{out} \Longrightarrow m_f - m_i = -m_{\text{out}}$$

Como el proceso el estanque es rígido su volumen es constante:

$$V = 0.06 = m_i v_i = m_f v_f$$

Para v_i, a 15 bar y $x_i = 0.2$ de la tabla A-3:

$$v_i = (1 - x_i)v^L + x_i \cdot v^V = 0.8 \cdot 1.1539 \times 10^{-3} + 0.2 \cdot 0.1318 = 0.02728 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Para v_f a 15 bar y $x_f = 0.5$, de la tabla A-3:

$$v_i = (1 - x_i)v^L + x_i \cdot v^V = 0.5 \cdot 1.1539 \times 10^{-3} + 0.5 \cdot 0.1318 = 0.06648 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Luego:

$$m_i = \frac{V}{v_i} = 2.199 \text{ kg}$$

$$m_f = \frac{V}{v_i} = 0.9026 \text{ kg}$$

$$m_{out} = m_i - m_f = 1.2964 \text{ kg}$$

El balance de energía para un sistema abierto transiente, sin trabajo de eje y un estanque rígido:

$$\frac{dU}{dt} = \sum_{i=1}^{N} \dot{m}_i h_i + \dot{Q} + \cancelto{0}{\dot{W}_s} - P\cancelto{0}{\frac{dV}{dt}}$$

Luego:

$$\frac{dU}{dt} = -\dot{m}_{\text{out}} h_{\text{out}} + \dot{Q}$$

Dado que h_{out} es constante e igual a la entalpía de vapor saturado se puede integrar la ecuación con respecto al tiempo:

$$(m_f \cdot u_f - m_i \cdot u_i) = -m_{\text{out}} h_{\text{out}} + Q$$

De las tabla A-3:

- $u_i = (1 - x_i)u^L + x_i \cdot u^V = 0.8 \cdot 843.16 + 0.2 \cdot 2594.5 = 1193.43 \text{ kJ/kg}$
- $u_f = (1 - x_f)u^L + x_f \cdot u^V = 0.5 \cdot 843.16 + 0.5 \cdot 2594.5 = 1718.83 \text{ kJ/kg}$
- $h_{out} = 2792.2 \text{ kJ/kg}$

Finalmente:

$$Q = (m_f \cdot u_f - m_i \cdot u_i) + m_{\text{out}} h_{\text{out}} = 2547.2 \text{ kJ}$$

Problema 1.1.11) Llenado de Estanque

Se tiene un estanque adiabático de 10 m^3 el cual va ser llenado con vapor de agua a 280°C y 15 bar. En un inicio el estanque esta vació.

a) Calcule la cantidad de masa en estanque y la temperatura en su interior cuando la presión alcanza los 15 bar.

b) Haga un gráfico de al menos 4 puntos donde se muestra la variación de la masa y uno para la temperatura en el estanque cuando se encuentra a presiones entre 1 y 15 bar.

c) Si el estanque no fuera adiabático y el entorno estuviese a 25°C, la cantidad de masa dentro del estanque cuando se alcancen los 15 bar sera menor o mayor que su respuesta en a? Comente basado en su conocimiento P-V-T.

Solución

Se debe partir de la primera ley en su forma general, ya que el sistema es transiente.

$$\frac{dU}{dt} = \sum_{i=1}^{N} \dot{m}_i h_i + \cancelto{0}{\dot{Q}} + \cancelto{0}{\dot{W}_s}$$

Como el sistema es adiabático no hay calor, además el estanque en rígido por ende no hay trabajo de compresión/expansión y no hay trabajo de eje.

$$\frac{dU}{dt} = \sum_{k=1}^{K} \dot{m}_k h_k$$

Expresando la sumatoria en las entradas y salidas, solo queda la entrada de vapor de agua:

$$\frac{dU}{dt} = \dot{m}_{in} h_{in}$$

Como la corriente entrante no varia con el tiempo (280 °C y 15 bar) la ecuación es una EDO simple que se resuelve con variables separables. (Notar que $m = \dot{m}_{in} * t$)

$$U_2 - U_1 = m \cdot h_{in}$$

Además como el estanque esta vació en t=0, $U_1 = 0$. Podemos expresar U_2 en energía especifica y la masa en el estanque: $U_2 = m_2 \cdot u_2$. Además por balance de masa: $m = m_2$. Luego:

$$u_2 = h_i n$$

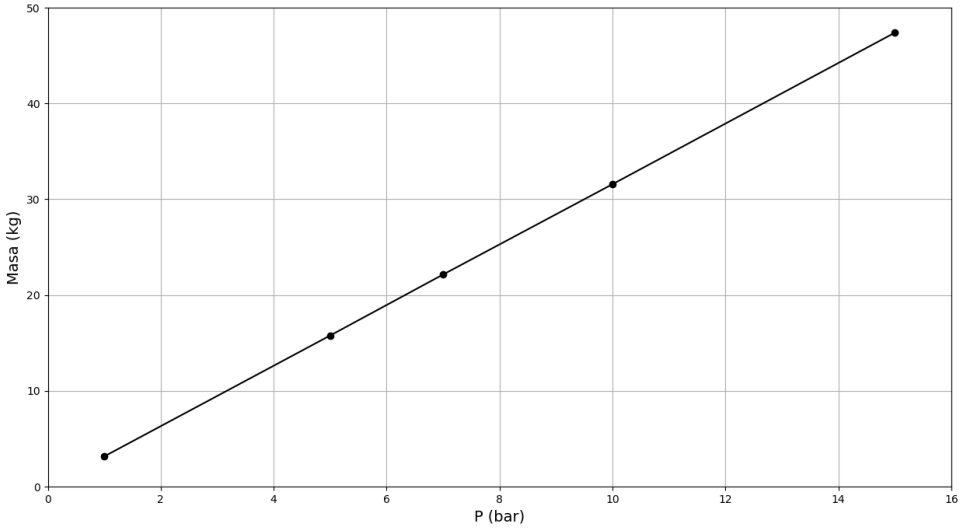
Luego debemos encontrar las condiciones tal que se cumpla lo anterior.

En P=15 bar y T=280 °C: h=2992,7. Entonces en 15 bar, se debe buscar un $u_2 = 2992,7$. Esto se encuentra interpolando, obteniendo $T \approx 425$°C. En este punto además: $v_2 = 0,211$. Luego para sacar la masa dentro del estanque:

$$m = \frac{V_{tank}}{v_2} = \frac{10}{0,21} = 47,39 \text{ kg}$$

b) Para el apartado b, se debe repetir el procedimiento anterior en 4 presiones distintas y hacer un gráfico similar al siguiente:

P (bar)	**v** (m^3/kg)	m (kg)
1	3.17	3.15
5	0.63	15.77
7	0.45	22.14
10	0.32	31.57
15	0.21	47.39



c) Si el estanque no es adiabático y el exterior esta a 25 °C, sabemos que habrá calor saliendo del estanque. Esto significa que los contenidos del estanque se enfriaran y por ende su volumen especifico sera menor al alcanzar la misma presión. Esto causa que la cantidad dentro del estanque sea mayor.

Problema 1.1.12) CSTR Transiente

Considere la Figura 1.3. En la figura se observa un estanque que opera de manera transiente y está siendo calentado. El estanque contiene inicialmente 100 kg de acetona a 15°C. El estanque cuenta con una chaqueta de calentamiento la que provee calor a una tasa de 0.85 kW. Además, se agrega acetona a 20°C a una velocidad de 40 kg/h. El solvente calentado es descargado fuera del estanque a la misma velocidad. Suponga que el estanque esta perfectamente mezclado en todo momento. **Utilice la capacidad calorífica de la acetona liquida del archivo "Capacidades Calorificas de Gas y Liquido.pdf"** de Canvas.

a) Planteé el balance de energía para el sistema de la forma mas detallada y específica para este sistema.

b) Realizar un gráfico que muestre la variación de la temperatura del estanque en el tiempo.

c) ¿Qué sucede cuando el tiempo tiende a infinito? ¿Cuál es el valor de la temperatura cuando se llega al estado estacionario?

d) En la industria de procesos es infactible el "infinito" por ende se le pide calcular el tiempo cuando se llega a un 99.9 % del valor de la temperatura en estado estacionario.

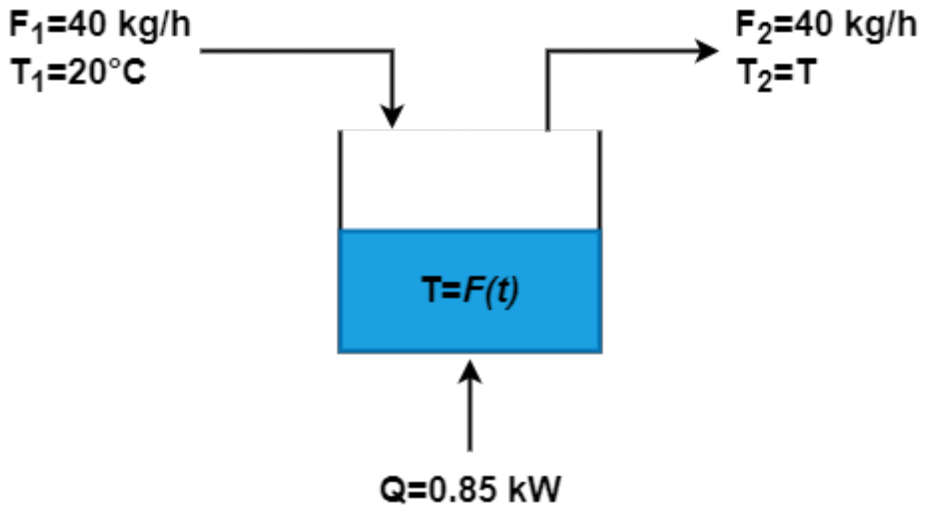


Figura 1.3: Estanque de calentamiento transiente

Solución

a) Primero se plantea el balance de energía para el sistema. Este es transiente, con transferencia de calor, sin agitación y sin trabajo de expansión compresión.

$$\frac{dU}{dt} = \sum_{i=1}^{N} \dot{m}_i h_i + \dot{Q} + \cancelto{0}{\dot{W}_s} - P\cancelto{0}{\frac{dV}{dt}}$$

Luego se desarrolla cada termino. Para el termino de energía interna, como la masa dentro del estanque no cambia con el tiempo y el C_P no depende del tiempo:

$$\frac{dU}{dt} = \frac{d(m\int C_P dT)}{dt} = mC_p\frac{dT}{dt}$$

El Cp de la acetona es el siguiente:

$$C_P = a + b \cdot T + c \cdot T^2 + d \cdot T^3$$

Donde T esta en Kelvin, C_P en J/mol K y $a = 16.8022\ \mathrm{J/mol \cdot K}$, $b = 8.48409{\times}10^{-1}\mathrm{J/mol \cdot K^2}$, $c = -2.64114 \times 10^{-3}\mathrm{J/mol \cdot K^3}$, $d = 0.33914 \times 10^{-5}\mathrm{J/mol \cdot K^4}$.

Sin embargo recordar que C_P esta en J/mol=kJ/kmol, por lo que se debe cambiar a kJ/kg con el peso molecular (PM=58 g/mol=58 kg/kmol).

$$\frac{dU}{dt} = m\frac{C_p}{PM}\frac{dT}{dt}$$

Para las entradas y salidas. Como la masa que entra es la misma que la que sale.

$$\sum_{i=1}^{N} \dot{m}_i h_i = F(h_{in} - h_{out})$$

Además $h_{in} - h_{out}$ se puede expresar en términos de C_P (recuerden pasarlo a kJ/kg)

$$F(h_{in} - h_{out}) = F \int_{T}^{T_1} \frac{C_P}{PM} dT$$

Finalmente el calor es $\dot{Q} = 0.85$ kW$= 3060$ kJ/h.

Luego combinado:

$$m \frac{C_P}{PM} \frac{dT}{dt} = F \int_{T}^{T_1} \frac{C_P}{PM} dT + \dot{Q}$$

$$T(0) = 288.15 \text{ K}$$

b) Esta es una EDO sin solución analítica pues C_P es un polinomio de 4^{to} grado. Por ende se debe usar Wolfram Mathematica y el resolvedor de EDOS númerico (comando NDSolve). De esta forma se obtiene el siguiente gráfico:

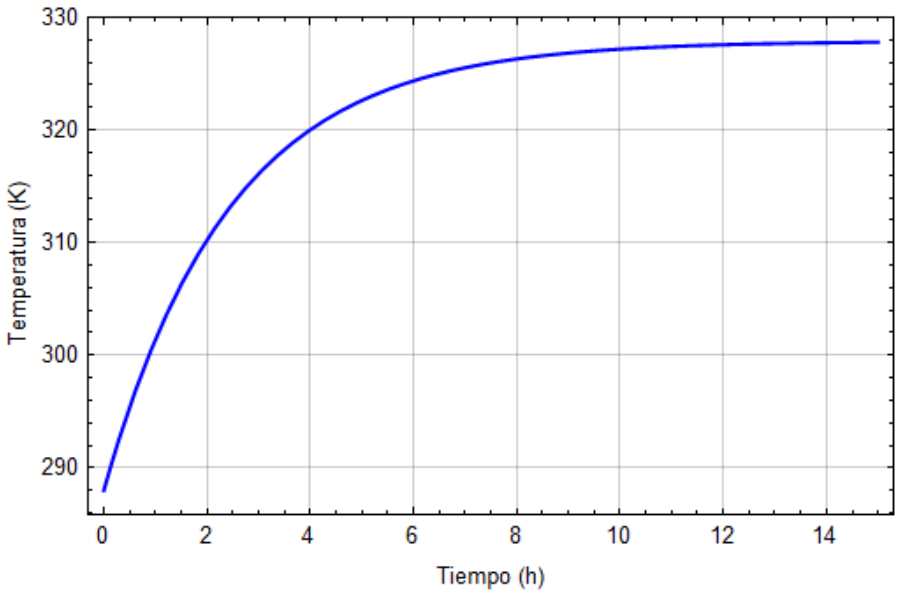


Figura 1.4: Variación de Temperatura en el Estanque

c) En el infinito se llega al estado estacionario. Es decir $\frac{dT}{dt} = 0$. Luego:

$$F \int_{T_2}^{T_1} \frac{C_P}{PM} dT + \dot{Q} = 0$$

Resolviendo esto en Wolfram, se obtiene:

$$T_{2,\infty} = 327.89 \text{ K} = 54.79°C$$

d) En la industria de procesos, como el infinito no es posible, generalmente se pregunta cuando llegara a un valor cercano al estacionario. En este caso el 99.9 %. Es decir se pide el tiempo tal que la Temperatura llegue a:

$$T_2 = 0.999 T_{2,\infty} = 327.56$$

Resolviendo con Wolfram:

$$t_{99.9\,\%} = 11.92 \text{ h}$$

1.2. Propuestos

Problema 1.2.1) Proceso Cerrado

Se va a realizar un proceso cerrado con 100 mol agua que inicialmente esta a 45 bar y 460°C. Esta sufre los siguientes procesos:

- El agua se enfría a presión constante hasta obtener un vapor saturado.
- El agua luego se condensa hasta obtener una mezcla liquido-vapor con un 55 % de calidad.
- El agua se calienta a volumen constante hasta que la presión marca 10 MPa.
- El agua finalmente se expande de manera isotérmica hasta 25 bar.

a) Determine la temperatura, presión, volumen especifico del agua en cada estado.

b) Realice un diagrama PV denotando los procesos y la localización de cada estado.

c) Calcule el trabajo y el calor para los procesos 1-2, 2-3 y 3-4.

Respuesta:

a)

- $P_1 = 45$ bar, $T_1 = 460°$ C, $v_1 = 0.07423$ m^3/kg, $u_1 = 3022.85$ kJ/kg
- $P_2 = 45$ bar, $T_2 = 257.5°$ C, $v_2 = 0.04406$ m^3/kg, $u_2 = 2600.15$ kJ/kg
- $P_3 = 45$ bar, $T_3 = 257.5°$ C, $v_3 = 0.0248$ m^3/kg, $u_3 = 1932.35$ kJ/kg
- $P_4 = 100$ bar, $T_4 = 379.28°$ C, $v_4 = 0.0248$ m^3/kg, $u_4 = 2778.885$ kJ/kg
- $P_5 = 25$ bar, $T_5 = 379.28°$ C, $v_5 = 0.1208$ m^3/kg,

b) El diagrama es el siguiente:

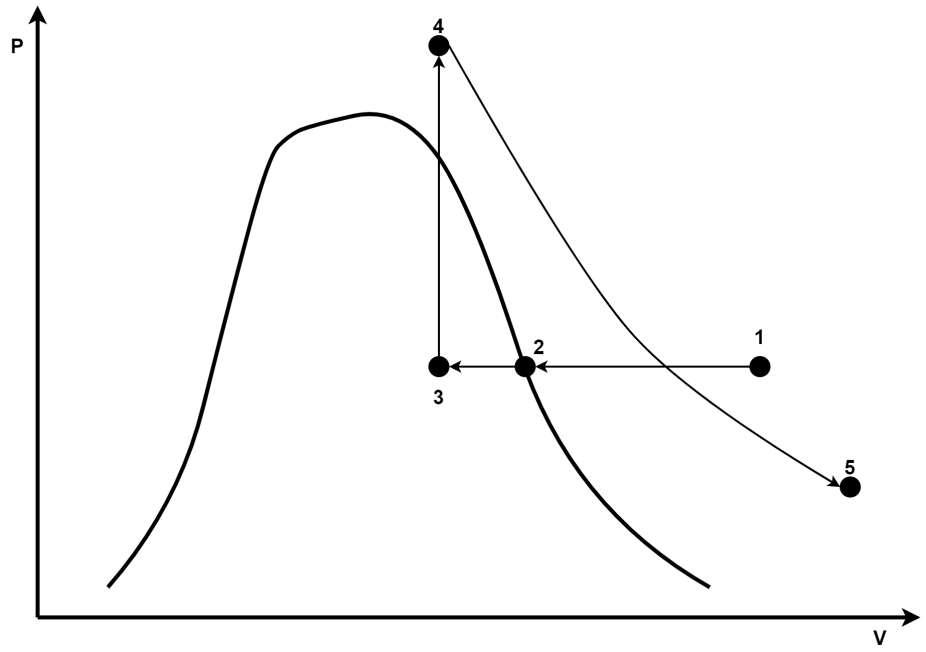


Figura 1.5: Diagrama PV del proceso cerrado

c)

Proceso 1-2:

$$W = 244.33 \text{ kJ}$$

$$Q = -1005.24 \text{ kJ}$$

Proceso 2-3:

$$W = 155.97 \text{ kJ}$$

$$Q = -1357.93 \text{ kJ}$$

Proceso 3-4:

$$W = 0 \text{ kJ}$$

$$Q = 1523.77 \text{ kJ}$$

Problema 1.2.2) Oxigeno en Cilindro Pistón

Oxigeno gaseoso dentro de un sistema cilindro pistón sufre una expansión desde un volumen $V_1 = 0.01$ m^3 hasta un volumen $V_2 = 0.03$ m^3. Considere que la relación entre la presión y el volumen es:

$$P = \frac{A}{V} + B$$

Donde A=0.06 bar $\cdot$ m^3 y $B = 3$ bar. Determine la presión inicial, final y el trabajo realizado.

Respuesta:

$P_1 = 9$ bar, $P_2 = 5$ bar, $W = -12.59$ kJ

Problema 1.2.3) Cilindro Pistón 4

Un sistema cilindro pistón contiene 1 kg de agua. Inicialmente el agua ocupa un volumen de 0.5 m^3 y esta a 1 bar. Calor se transfiere hacia al agua resultando en una expansión a temperatura constante, hasta un volumen final de 1.694 m^3. Calcule el trabajo en kJ y el calor en kJ para el proceso.

Respuesta:

$W = -119.4$ kJ, $Q = 1592$ kJ

Problema 1.2.4) Turbina

Se tiene una turbina que se usa para producir trabajo y que opera de manera estacionaria. A esta máquina le entran 2 corrientes distintas de agua (F1 y F2) y las que salen como 2 corrientes de agua (F3 y F4). La máquina produce 300 MJ/min de trabajo y además pierde 25 MJ/min de calor hacia el ambiente. Determine la entalpía específica de la corriente F2 en kJ/kg.

Datos Corrientes:

- F1: 100 kg/min de vapor a P=30 bar, T=540°C,
- F3: 130 kg/min de líquido saturado a P=3 bar.
- F4: 50 kg/min de vapor saturado a P=3 bar.

Respuesta:

$h_2 = 2244$ kJ/kg

Problema 1.2.5) Sintesis de Amoniaco

La forma clásica de sintetizar amoniaco es mediante el proceso de Haber:

$$N_2 + 3H_2 \rightarrow 2NH_3 \tag{1.1}$$

Esta reacción es muy exotérmica por lo que el amoniaco sale a una alta temperatura de 600K. Para el almacenamiento y posterior venta del amoniaco es necesario enfriar la corriente de salida que corresponde a 350 kg/h. Para esto se utilizara como corriente de refrigeración 1000 kg/h de liquido saturado del refrigerante 134a a 3 bar. El proceso opera de manera estacionaria.

a) Si el refrigerante sale como vapor sobre calentado a 36 °C, ¿Cuál es la temperatura de salida del amoniaco?

b) Si ahora como corriente de refrigeración se utilizan 110 kg/h de agua como liquido saturado a 2 bar y esta sale como vapor a 140 °C y la misma presión, ¿Cuál es la nueva temperatura de salida del amoniaco?

c) Comente los resultados obtenidos de la parte a y b. ¿Tienen sentido según lo aprendido en clases? Si tuviera que escoger entre el agua y el refrigerante ¿cuál escogería?

Hint: Para el amoniaco utilice C_p polinómicos (disponibles en el libro guía del curso) **Nota:** Para esta pregunta se debe utilizar algún software como Wolfram Mathematica para resolver las ecuaciones pues queda un polinomio de 5to grado.

Respuesta:

a) $T_{\text{out}} = 326\text{K}$.

b) $T_{\text{out}} = 303.6\text{K}$.

c) Se puede ver que en el caso del refrigerante 134a, este entra a 0.625°C = 273.78 K y sale a 36°C = 309.15 K. Por otro lado el amoniaco entra a 600 K y sale a 326 K, por lo que los resultados hacen sentido, una corriente se calienta y la otra se enfría.

Sin embargo en el caso del agua, esta entra a 110 °C = 393,15 K y sale a 140 °C = 413,15 K. Aquí es donde surge un problema, en este caso el amoniaco esta saliendo a 303,6 K, es decir se esta enfriando un compuesto con otro que esta a temperatura mayor, o en otras palabras, el calor esta yendo desde un compuesto a menor temperatura hacia una con mayor temperatura. Esto rompe la ley 0 de la termodinámica, por lo que el resultado no es correcto.

Sin embargo, claramente el utilizar agua es mas eficiente debido a que es capaz de absorber mas calor en su cambio de fase que el refrigerante, lo que se traduce en un menor flujo másico y menor costo. Por eso lo mas eficiente seria utilizar un sistema múltiple que primero enfriara con agua y luego con refrigerante, con tal de cumplir con la Ley 0 de la termodinámica. En caso de solo poder utilizar un fluido, se tendría que usar el refrigerante.

Problema 1.2.6) Torre de Destilación

Considere una torre de destilación que opera de manera estacionaria para separar benceno y tolueno. Esta torre de destilación tiene en el tope un condensador y en el fondo un rehervidor. La columna opera de la siguiente manera:

- 10 mol/s de tolueno entra al rehervidor como liquido saturado a 1.1 bar. En este, 80 % del tolueno es vaporizado y devuelto a la columna como vapor saturado. El remanente se retira como liquido saturado (producto de fondo).
- 8 mol/s de benceno entra al condensador como vapor saturado a 0.9 bar. Todo el vapor es condensado hasta liquido saturado. De este, 75 % es recirculado a la columna y el resto se retira como producto de tope.

a) Determine la cantidad de calor que recibe el tolueno en el rehervidor.

b) Considere que para ceder este calor en el rehervidor se puede utilizar vapor de agua saturado a 1 bar, 3 bar o 5 bar, los que salen como liquido saturado a esa presión. Calcule el flujo másico de vapor necesario en cada caso.

c) Como corriente de refrigeración en el condensador se propone utilizar agua a 1 bar y 25°C. Si esta sale a una temperatura 10°C menor que la temperatura del benceno, ¿cuál es el flujo másico necesario? Considere $Cp_{agua} = 4.184$ kJ/kg.

d) Considere ahora que como corriente de refrigeración se utiliza aire a 1 bar y 25°C, el que sale a una temperatura 10°C menor que la temperatura del benceno. ¿Cuál es el flujo másico necesario? Puede asumir que $Cp_{aire} = 0.21 \cdot Cp_{O_2} + 0.79 \cdot Cp_{N_2}$, $\text{PM}_{\text{aire}} = 29$ g/mol.

Datos:

- Benceno: $T_{sat}(0.9 \text{ bar}) = 349,44$ K, $H_{vap} = 31.042$ kJ/mol
- Tolueno: $T_{sat}(1.1\text{bar}) = 386,66$ K, $H_{vap} = 33.059$ kJ/mol

Hint: Para (d) utilice C_P polinómicos (disponibles en el libro guía del curso)

Respuesta:

a) $Q = 264.47$ kJ/s

b) Los Flujos son:

- Vap Sat a 1 bar $\longrightarrow F = 0,117$ kg/s
- Vap Sat a 3 bar $\longrightarrow F = 0,122$ kg/s
- Vap Sat a 5 bar $\longrightarrow F = 0,125$ kg/s

c) $F_{\text{agua}} = 1.44$ kg/s

d) $F_{\text{aire}} = 5.8$ kg/s

Problema 1.2.7) Vaciado de Cilindro Pistón

Un sistema cilindro-pistón inicialmente contiene 2 kg de refrigerante 134a a 800 kPa y 80°C. En este estado el pistón esta tocando un par de topes en la cima. La masa del pistón es tal que una presión de 500 kPa es necesaria para moverlo. Una válvula al fondo del estanque es abierta y el refrigerante es retirado del cilindró. Luego de un rato, el pistón se empieza a mover hacia abajo. La válvula se cierra una vez que ha salido la mitad del refrigerante del estanque y la temperatura final es de 20°C. Determine:

a) El trabajo realizado.

b) La transferencia de calor.

Respuesta:

a) $W = 11,7$ kJ

b) $Q = 63.9$ kJ

Problema 1.2.8) Estanque Transiente

Un tanque contiene $m = 45$ kg de agua líquida a 45 °C. El estanque posee una entrada y una salida a través de las cuales fluye una misma cantidad de masa. Agua entra a razón de $F = 270$ kg/h a 45°C. Un serpentín de enfriamiento inmerso en el seno del fluido le retira 7.6 kW energía al agua del tanque. Un agitador de poca potencia (0.6 kW) garantiza un mezclado perfecto dentro del mismo. Determine una ecuación para variación de la temperatura del agua con el tiempo. Considere que la capacidad calorífica del agua es $C_P = 4.18$ kJ/kg.

Nota: Este tipo de estanques son comúnmente llamados CSTR (Continuous Stirred-Tank Reactor) y se usan como reactores para reacciones en fase liquida diluidas.

Respuesta:

$$T(t) = T_0 + \frac{Q+W}{FC_P} + \left(\frac{FC_P(T_{\text{in}} - T_0) + Q + W}{FC_P}\right) \exp\left(-\frac{F}{m}t\right)$$

$$T(t) = 295.8 + 22.3 \exp\left(-\frac{t}{600}\right)$$

Capítulo 2

Gas Ideal y Primera Ley

2.1. Problemas Resueltos

Problema 2.1.1) Presión con GI

Un tanque cerrado y rígido se llena con un gas modelado como un gas ideal, inicialmente a 27°C y una presión de medición de 300 kPa. Si el gas se calienta a 77°C, determine la presión final, en kPa.

Solución

La ecuación de gas ideal es:

$$Pv = RT$$

En este caso v es constante pues el estanque es rígido. Luego:

$$v_1 = v_2 = \frac{RT_1}{P_1} = \frac{RT_2}{P_2}$$

$$\Longrightarrow P_2 = \frac{T_2 P_1}{T_1} = \frac{300 \cdot 350}{300} = 350 \text{ kPa}$$

Problema 2.1.2) Compresor Adiabático con GI

Se tienen 2 mol de un gas ideal a 1 bar y 300 K que se comprime en un compresor adiabático y reversible. Si se sabe que el compresor utiliza 15 kJ, ¿a qué presión en bar se encuentra el gas? Asuma $\gamma = 1,4$.

Solución

Nota: Este problema tiene muchas formas de ser resuelto, en este caso se mostrara una.

Para un proceso adiabático se tiene que:

$$Pv^{\gamma} = \text{cte} = C$$

$$W = -n \cdot \int_{v_1}^{v_2} P dv = -n \int_{v_1}^{v_2} \frac{C}{v^\gamma} dv$$
$$= - n \cdot C \left[\frac{1}{1-\gamma} v^{1-\gamma} \right] \Bigg|_{v_1}^{v_2}$$

Para el volumen inicial y el valor de C:

$$Pv = RT \rightarrow v = \frac{RT}{P} = 0.024942 \text{ m}^3/\text{mol}$$

$$C = Pv^\gamma = 569.78$$

Luego para v_2:

$$\left(\frac{W(1-\gamma)}{-n \cdot C} + v_1^{1-\gamma} \right)^{\frac{1}{1-\gamma}} = v_2 = 3.463 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{mol}$$

Finalmente:

$$P_2 = \frac{C}{v_2^\gamma} = \frac{569.78}{3.463 \times 10^{-3}} = 15,87 \times 10^5 \text{ Pa} = 15,87 \text{ bar}$$

Problema 2.1.3) Expansión-Compresión

Se tienen 10 mol de un gas ideal inicialmente a 20 bar y 700°C . Este gas luego se expande de manera adiabática hasta 0.5 bar en un motor para producir trabajo. El trabajo producido se utiliza para comprimir 20 mol de otro gas ideal de manera isotérmica que inicialmente esta a 2 bar y 20°C. ¿Cuál es la presión en bar luego de la compresión isotérmica?

Asuma $\gamma = 1.4$

Solución

Recordar pasar T a Kelvin

Para el proceso adiabático:

$$\left(\frac{T_2}{T_1} \right) = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \longrightarrow T_2 = 339.19 \text{ K}$$

Luego, para el gas ideal en un proceso adiabático y cerrado:

$$W = \frac{n_1}{\gamma - 1} R(T_2 - T_1) = -131777 \text{ J}$$

Para la parte isotérmica (**Nota se debe cambiar el signo debido a que ahora este trabajo entra**)

$$W = n_2 RT \ln \frac{P_1}{P_2} \longrightarrow P_2 = 29.85 \text{ bar}$$

Problema 2.1.4) Ciclo Diesel

El ciclo Diesel corresponde a una serie de 4 procesos que se aplican a un gas con el fin de generar trabajo. Este ciclo es el que se utiliza en los motores Diesel, comunes en autos y camiones. Considere el siguiente ciclo con un aire que inicialmente esta a 300 K y 95 kPa

- 1-2: Una compresión adiabática y reversible hasta 7,2 MPa.
- 2-3: Un calentamiento a presión constante hasta 2150 K
- 3-4: Una expansión adiabática y reversible
- 4-1: Enfriamiento a volumen constante hasta volver al estado inicial (300 K y 95 kPa)

Suponiendo que el aire es un gas ideal, calcule el volumen, presión y temperatura en cada estado y el trabajo y calor que se transfieren en cada proceso y el total para el ciclo kJ/kg. Haga un diagrama cualitativo P-V para denotar el ciclo. Además calcule la eficiencia térmica del ciclo. Considere $C_P = 1.005$ kJ/kg K, $\gamma = 1.4$ y PM=29 g/mol.

Solución

Cada uno de los procesos se debe analizar utilizando las ecuaciones de gas ideal. Se calculará la presión y temperatura en cada estado y luego se calculara el calor y trabajo para cada proceso.

Estado 1:

$$v_1 = \frac{RT}{P} = \frac{8.314 \cdot 300}{95 \cdot 1000} = 0.02625 \text{ m}^3/\text{mol}$$

- $T_1 = 300$ K,
- $P_1 = 95$ kPa.
- $v_1 = 0.02625$ m^3/mol

Estado 2: Como se hace una compresión adiabática y reversible:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \longrightarrow T_2 = 300 \cdot \left(\frac{7200}{96}\right)^{\frac{1.4-1}{1.4}} = 1033.12 \text{ K}$$

$$v_2 = \frac{RT_2}{P_2} = \frac{8.314 \cdot 1033}{7200 \cdot 1000} = 0.00119 \text{ m}^3/\text{mol}$$

- $T_2 = 1033$ K,
- $P_2 = 7200$ kPa.
- $v_2 = 0.00119$ m^3/mol

Estado 3: Como se hace un calentamiento a presión constante:

$$v_3 = \frac{RT_3}{P_3} = \frac{8.314 \cdot 2150}{7200 \cdot 1000} = 0.002482 \text{ m}^3/\text{mol}$$

- $T_3 = 2150$ K,
- $P_3 = P_2 = 7200$ kPa.

- $v_3 = 0.002482$ m^3/mol

Estado 4: Como se hace una expansión adiabática y reversible y además el volumen en el estado 1 es el misma que el estado 4.

$$\frac{T_4}{T_3} = \left(\frac{v_3}{v_4}\right)^{\gamma-1} \longrightarrow T_4 = 2150 \cdot \left(\frac{0.002485}{0.02625}\right)^{1.4-1} = 836.99 \text{ K}$$

$$P_4 = \frac{RT_4}{v_4} = \frac{8.314 \cdot 837.4}{0.02625} = 265047 \text{ Pa} = 265 \text{ kPa}$$

- $T_4 = 836.99$ K
- $P_4 = 265$ kPa
- $v_4 = v_1 = 0.02625$ m^3/mol

Ahora que se tiene cada estado se puede calcular el trabajo y el calor en cada proceso:

- **Proceso 1-2**:

  Por ser adiabático $Q = 0 \longrightarrow W = \Delta U$. Además en gas ideal, la energía interna solo depende la temperatura. Por otro lado:

  $$\frac{C_P}{C_V} = \gamma \longrightarrow C_V = \frac{C_P}{\gamma} = 0.718 \text{ kJ/kg}$$

  Luego:

  $$\Delta u = w = \int_{T_1}^{T_2} C_V dT = \int_{300}^{1033} 0.718 dT = 526 \text{ kJ/kg}$$

- Proceso 2-3:

  Se tiene que el proceso por ser a presión constante:

  $$q = \Delta h = \int_{T_2}^{T_3} C_P dT = \int_{1033}^{2150} 1,005 = 1122 \text{ kJ/kg}$$

  Para el trabajo también se debe dividir por el peso molecular para pasar a kJ/kg

$$w = -\int_{v_2}^{v_3} P dv = -P\Delta v = -7200 \cdot (0.002485 - 0.00119) = -9.3024 \text{ kJ/mol} = -9302.4 \text{ kJ/kmol}$$

$$w = \frac{-9302.4 \text{ [kJ/}\cancel{\text{kmol}}\text{]}}{29 \text{ [kg/}\cancel{\text{kmol}}\text{]}} - 320.2 \text{ kJ/kg}$$

- Proceso 3-4:

  Como el proceso es adiabático $q = 0 \longrightarrow w = \Delta u$.

  $$\Delta u = w = \int_{T_3}^{T_4} C_V dT = \int_{2150}^{836.99} 0.718 dT = -942.7 \text{ kJ/kg}$$

- Proceso 4-1:

  Como el proceso es isocórico $w = 0 \longrightarrow q = \Delta u$ y para gas ideal:

$$q = \Delta u = \int_{T_4}^{T_1} C_V = \int_{836.99}^{300} 0.718 dT = -385.5 \text{ kJ/kg}$$

Luego el calor total es $Q_T = 736,89$ kJ/kg y el trabajo total es $W_T = -736,55$ kJ/kg.

Para la eficiencia térmica (donde $Q_{in} = Q_{2,3}$)

$$\eta = \frac{|W_T|}{Q_{in}} = \frac{736,55}{1122} = 0.656 = 65.6\,\%$$

Finalmente el diagrama PV es el de la figura 2.1.

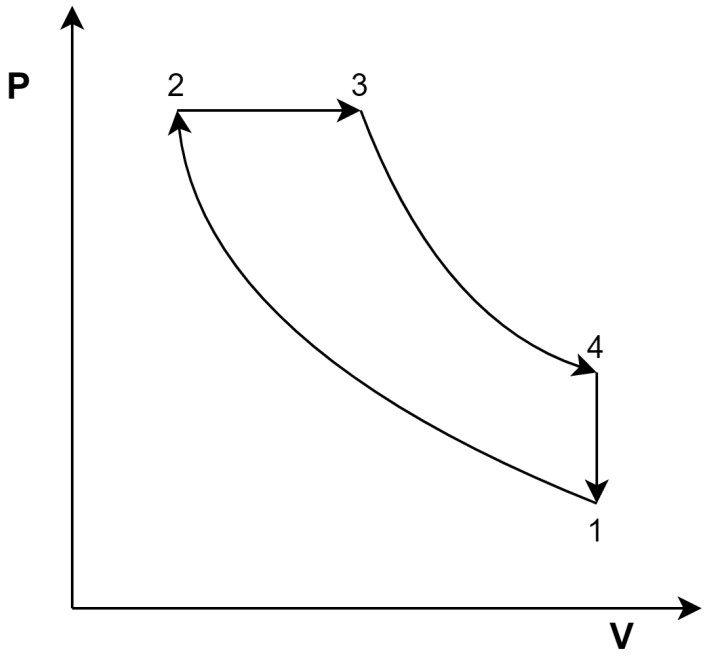


Figura 2.1: Diagrama PV del Ciclo Diesel del problema 2.1.4

2.2. Propuestos:

Problema 2.2.1) Expansión Isobárica

Un cilindro contiene 2 moles de un gas ideal monoatómico a 1 MPa y 300 K el cual se expande de forma isobárica hasta el doble de su volumen. Calcule el trabajo realizado en el proceso en kJ.

Respuesta:

$W = -4.988$ kJ

Problema 2.2.2) Compresión Isotérmica

2 moles de un gas ideal inicialmente a 300 K y 40.53 kPa son comprimidos isotérmicamente hasta tener una presión de 121.59 kPa. Calcule la energía transferida en el proceso en kJ.

Respuesta:

$W = 5.48$ kJ

Problema 2.2.3) Ciclo Dual

El ciclo dual es una serie de 5 procesos que utilizan los motores de combustión interna. Considere los siguientes procesos del ciclo, que utiliza aire que inicialmente esta a 300 K y 95 kPa.

- 1-2: Una compresión adiabática y reversible tal que $V_1/V_2 = 16$.
- 2-3: Un calentamiento isocórico hasta hasta que $P_3/P_2 = 2.2$
- 3-4: Un calentamiento isobarico hasta que $V_4/V_3 = 1.15$
- 4-5: Una expansión adiabática y reversible.
- 5-1: Un enfriamiento a volumen constante hasta volver al estado inicial (300 K y 95 kPa)

Suponiendo una masa de aire de 0.8 kg y que se comporta como un gas ideal, calcule el volumen molar, presión y temperatura de los 5 estados. Además calcule el trabajo y calor que se transfiere en cada proceso, y el trabajo total producido para el ciclo. También, realice un diagrama P-V para denotar cada proceso. Considere $C_P = 1.005$ kJ/kg K, $\gamma = 1.4$ y $PM = 29$ g/mol.

Respuesta:

- $P_1 = 95$ kPa, $T_1 = 300$ K , $v_1 = 0.026255$ m^3/mol
- $P_2 = 4607.8$ kPa, $T_2 = 909.4$ K, $v_2 = 0.001641$ m^3/mol
- $P_3 = 10137.1$ kPa, $T_3 = 2000.7$ K, $v_3 = 0.001641$ m^3/mol
- $P_4 = 10137.1$ kPa, $T_4 = 2300.9$ K, $v_4 = 0.001887$ m^3/mol
- $P_5 = 254.167$ kPa, $T_5 = 802.6$ K, $v_5 = 0.026255$ m^3/mol

Proceso 1-2:

$$Q_{1,2} = 0 \quad \text{y} \quad W_{1,2} = 349.91\text{kJ}$$

Proceso 2-3:

$$W_{2,3} = 0 \quad \text{y} \quad Q_{2,3} = 626.75 \text{ kJ}$$

Proceso 3-4:

$$Q_{3,4} = 241.36 \text{ kJ} \quad \text{y} \quad W_{3,4} = -68.831\text{kJ}$$

Proceso 4-5:

$$Q_{4,5} = 0 \quad \text{y} \quad W_{4,5} = 860.405\text{kJ}$$

Proceso 5-1:

$$W_{5,1} = 0 \quad \text{y} \quad Q_{5,1} = -288.65 \text{ kJ}$$

Luego el trabajo total:

$$W_T = \sum_i W_i = -579 \text{ kJ}$$

Finalmente el diagrama P-V:

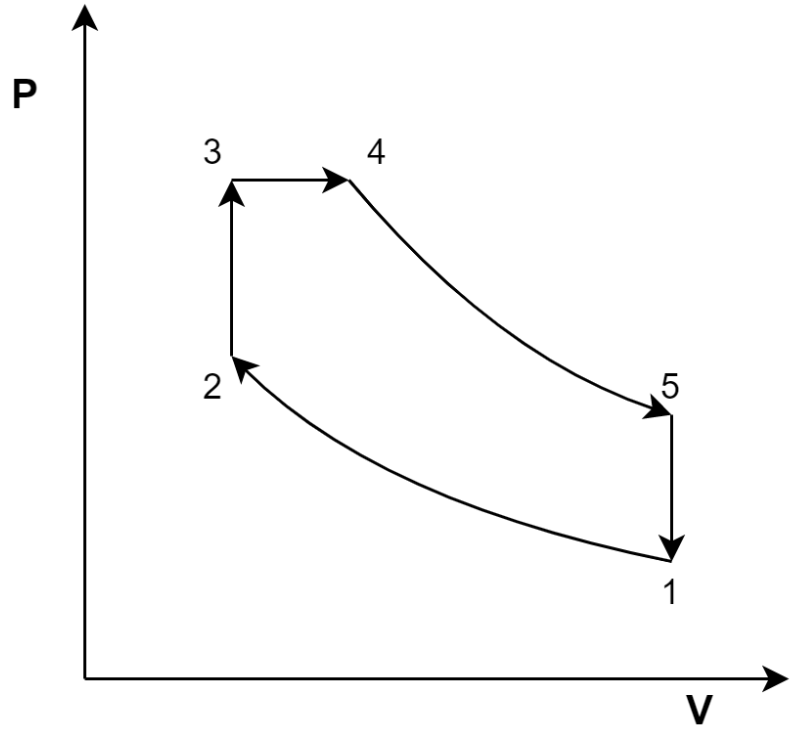


Figura 2.2: Diagrama P-V del ciclo Dual

Capítulo 3

Gases Reales y Ecuaciones de Estado

3.1. Problemas Resueltos

Problema 3.1.1) Lee Kesler 1

Se quiere guardar metano en un estanque de 170 litros a 255 bar y a temperatura constante de 200 K. ¿Cuántos kg de metano es posible almacenar en el estanque a estas condiciones? Utilice el método de Pitzer con Lee-Kesler. Datos: $P_c = 46$ bar; $T_c = 190,4$ K $\omega = 0,011$ PM=16 g/mol

Solución

Se calcula temperatura y presión reducida:

$$P_r = \frac{P}{P_c} = 5.5; \quad T_r = \frac{T}{T_c} = 1.05$$

Con eso se obtiene de los gráficos que:

$$Z^{(0)} = 0.75; \quad Z^{(1)} = -0.15$$

Luego:

$$Z = Z^{(0)} + \omega \cdot Z^{(1)} = 0.748$$

Para calcular el volumen:

$$Z = \frac{Pv}{RT} = \frac{255 \cdot v}{0.08314 \cdot 200} \longrightarrow v = 0.04878 \text{ L/mol}$$

Finalmente para la masa:

$$n = \frac{V^{\text{tank}}}{v} = \frac{170}{0.04878} = 3485 \text{ mol}$$

$$m = n \cdot PM = 55765 \text{ g} = 55.765 \text{ kg}$$

Problema 3.1.2) Lee Kesler 2

Se quiere guardar 200 kg de CO2 gaseoso en un estanque rígido a 7.5 MPa y 320 K. ¿Cuál es el volumen del estanque en litros? Utilice el método de Pitzer y los gráficos generalizados de Lee Kesler.

Datos:

- P_c=73.82 bar
- T_c =304.2 K
- ω=0.228
- PM=44 g/mol

Solución

Primero se calcula P_r y T_r:

$$P_r = 1.015 \quad T_r = 1.05$$

De los gráficos:

$$Z^{(0)} = 0.6 \quad Z^{(1)} = 0.02$$

Luego

$$Z = Z^{(0)} + \omega Z^{(1)} = 0.6046$$

Para el volumen especifico, (lo más fácil es usar R=0.08314 bar $\cdot$ L/mol $\cdot$ K).

$$v = \frac{ZRT}{P} = \frac{0.6046 \times 0.08314 \times 320}{75} = 0.214 \text{ L/mol}$$

Finalmente:

$$V = \frac{m}{PM} \cdot v = \frac{200 \times 10^3}{44} \cdot 0.214 = 972.72 \text{ L}$$

Problema 3.1.3) SRK

500 kg de isobutano liquido son almacenados en un estanque rígido a 4.14 bar y 21°C. Las propiedades del isobutano son las siguientes: P_c= 36.48 bar, T_c= 408.1 K, ω=0.181, PM= 58.123 g/mol. Si se utilizó la ecuación cúbica de SRK y se encontraron los siguientes valores para Z: Z_1= 0.01856, Z_2= 0.100577 y Z_3= 0.880866.

Dado que la temperatura en el verano puede llegar a los 35 °C, ¿Cuánta sería la presión en bar que el tanque debiese soportar para evitar la ruptura? ¿Cómo cambiaría el ejercicio en caso de que el isobutano estuviera inicialmente gaseoso?

Solución

Como la ecuación es cubica y tiene 3 raíces reales debemos elegir la que tenga sentido físico. **Como se esta en fase liquida, se selecciona la raíz más pequeña**. En el caso de que se

estuviese inicialmente gaseoso luego se debe elegir la raíz mas grande. **La raíz de al medio nunca tiene sentido físico**.

Luego:

$$Z = 0.01856 = \frac{P_1 v_1}{RT_1} \longrightarrow v = \frac{ZR_1T}{P_1}$$

$$v = \frac{0.001856 \cdot 8.314 \cdot 294}{4.14 \times 10^5} = 1.0958 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{mol}$$

Como el estanque es rígido, luego el proceso es a volumen constante, $v_1 = v_2$, por lo que ahora solo queda calcular la presión en el estado final. Para calcular usando SRK, primero se sacan sus parámetros:

$$\Omega = 0,480 + 1,574\omega - 0,176\omega^2 = 0,759$$

$$T_r = \frac{308,15}{408,1} = 0,755$$

$$a = 0.42748 \frac{R^2 T_c^2}{P_c} \left[1 + \Omega \left(1 - T_r^{1/2}\right)\right]^2 = 1,6319$$

$$b = 0.08664 \frac{RT_c}{P_c} = 8,058 \times 10^{-5}$$

Finalmente:

$$P = \frac{RT}{V_m - b} - \frac{a}{V_m \left(V_m + b\right)} = 10043169 \text{ Pa} = 100,43 \text{ bar}$$

Problema 3.1.4) Peng Robinson

Su supervisor le pide diseñar un estanque para guardar 800 moles de un gas a 277°C. Por temas de espacio en la planta solo se puede utilizar un estanque de un tamaño máximo de 1000 litros. Determine qué presión en bar deben soportar las paredes del estanque utilizando la EOS de Peng Robinson.

Datos:

- P_c=30 bar
- T_c=500 K
- ω=0.45

Solución

Primero se calcula el volumen especifico:

$$v = \frac{V}{n} = 1.25\text{L/mol}$$

Para los parámetros de PR, (utilizar R=0.08314 bar $\cdot$ L/mol $\cdot$ K si se desea trabajar en bar y litros):

$$\Omega = 0.37464 + 1.54226\omega - 0.26992\omega^2 = 1.014$$

$$b = 0.07780\frac{RT_c}{P_c} = 0.108 \text{ L/mol}$$

$$a = 0.45724\frac{R^2T_c^2}{P_c}\left[1 + \Omega\left(1 - T_r^{1/2}\right)\right]^2 = 23.788 \text{ bar} \cdot \text{L}^2/\text{mol}^2$$

Finalmente:

$$P = \frac{RT}{V_m - b} - \frac{a}{V_m^2 + 2bV_m - b^2} = 26.98 \text{ bar}$$

Problema 3.1.5) Expansión Isotérmica VDW

4 moles de cloro benceno son expandidos de manera isotérmica a 600 K desde 5.5 L a 55 L. Este gas se puede modelar con la EOS de Van der Waals. Además se tiene que: $P_C = 45.2$ bar y $T_C = 632.4$ K. Calcule el trabajo generado en kJ y compare con la ecuación de gas ideal.

Solución

Primero se sabe que el trabajo se calcula como:

$$W = -n\int_{v_1}^{v-2} Pdv$$

Luego como la presión varia y la temperatura es constante se debe dejar la presión expresada como una función de el volumen. Esto se puede hacer con la EOS de VDW:

$$P = \frac{RT}{v - b} - \frac{a}{v^2}$$

Combinando e integrando:

$$W = -n\int_{v_1}^{v-2} Pdv = -n\int_{v_1}^{v_2}\left(\frac{RT}{v-b} - \frac{a}{v^2}\right)dV$$

$$= -n\left(RT\ln(v-b) + \frac{a}{v}\right)\Bigg|_{v_1}^{v_2} = -n\left[RT\ln\left(\frac{v_2 - b}{v_1 - b}\right) + a\left(\frac{1}{v_2} - \frac{1}{v_1}\right)\right]$$

Luego se debe calcular primero los valores de las constantes a, b y calcular los volúmenes molares.

$$a = \frac{27}{64}\frac{(RT_C)^2}{P_C} = \frac{27}{64}\cdot\frac{(8.314\cdot 632.4)^2}{45.2\times 10^5} = 2.5802 \text{ m}^6\text{Pa/mol}^2$$

$$b = \frac{1}{8}\frac{RT_C}{P_C} = \frac{1}{8}\cdot\frac{8.314\cdot 632.4}{45.2\times 10^5} = 0.0001454 \text{ m}^3/\text{mol}$$

$$v_1 = \frac{V_1}{n} = \frac{5.5\times 10^{-3}}{4} = 0.001375 \text{ m}^3/\text{mol}$$

$$v_2 = \frac{V_2}{n} = \frac{55\times 10^{-3}}{4} = 0.01375 \text{ m}^3/\text{mol}$$

Finalmente:

$$W = -n\left[RT\ln\left(\frac{v_2-b}{v_1-b}\right) + \left(\frac{a}{v_2}-\frac{a}{v_1}\right)\right]$$

$$W = -4\left[8.314\cdot 600\ln\left(\frac{0.01375-0.0001454}{0.001375-0.0001454}\right) + \left(\frac{2.5802}{0.01375}-\frac{2.5802}{0.001375}\right)\right]$$

$$W = -41207 \text{ J} = -41.207 \text{ kJ}$$

Por otro lado el trabajo con gas ideal esta dado por:

$$W^{\text{ig}} = -n\int_{v_1}^{v_2}\frac{RT}{v}dv = nRT\ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right) = 45945 \text{ J} = 45.945 \text{ kJ}$$

Luego el % de error al usar gas ideal seria de:

$$e = 100\cdot\frac{W^{\text{ig}}-W}{W} = 11.5\,\%$$

3.2. Propuestos:

Problema 3.2.1) Presión con EOS

500 g de Amoniaco se agregan en un estanque rígido con un volumen de 30.000 cm^3. El estanque es mantenido a 65°C. Estimar la presión del estanque usando:

a) Ecuación de gas ideal.

b) Ecuación de estado Virial truncada en el segundo coeficiente (Apendix B, De Pablo and Schieber).

c) Ecuación de Van der Waals.

d) Ecuación de Peng-Robinson.

e) Ecuación de Carnahan-Starling.

Respuesta:

a) 2.756 MPa

b) 2.377 MPa

c) 2.450 MPa

d) 2.337 MPa

e) 2.429 MPa

Problema 3.2.2) Flujo Volumétrico con EOS

Dióxido de carbono gaseoso entra a una tubería a 3 MPa y 500 K a una tasa de 2 kg/s. El CO_2 es enfriado a presión constante mientras fluye en la tubería y su temperatura cae hasta 450 K en la salida. Determine el flujo volumétrico y la densidad del dióxido de carbono en la entrada y el flujo volumétrico en la salida de la tubería usando:

a) Gas Ideal

b) Utilizando el método de Pitzer con los diagramas de Lee Kesler.

c) La EOS de Van der Waals.

d) La EOS de Redlich Kwong.

Hint: Las propiedades criticas las puede encontrar en el libro Guia.

Respuesta:

a) $\rho_1 = 31.76 \text{kg/m}^3$, $\dot{V}_1 = 0.063\ \text{m}^3/\text{s}$, $\dot{V}_2 = 0.0567\ \text{m}^3$

b) $\rho_1 = 32.40 \text{kg/m}^3$, $\dot{V}_1 = 0.0617\ \text{m}^3/\text{s}$, $\dot{V}_2 = 0.0549\ \text{m}^3$

c) $\rho_1 = 32.82 \text{kg/m}^3$, $\dot{V}_1 = 0.0609\ \text{m}^3/\text{s}$, $\dot{V}_2 = 0.0542\ \text{m}^3$

d) $\rho_1 = 32.67 \text{kg/m}^3$, $\dot{V}_1 = 0.0612\ \text{m}^3/\text{s}$, $\dot{V}_2 = 0.0544\ \text{m}^3$

Nota: Para la resolución con VDW y RK se necesita de un Software como Mathematica para despejar las ecuaciones cubicas.

Problema 3.2.3) Compresión Isotérmica con EOS

La reacción de síntesis catalizada de metanol corresponde a la siguiente:

$$\text{CO}_{(g)} + 2\text{H}_{2(g)} \rightarrow \text{CH}_3\text{OH}_{(g)} \tag{3.1}$$

Para aumentar la conversión del proceso, se utilizan gases a altas presiones de entre 50 a 150 bar para favorecer el equilibrio termodinámico. Por esto se desea comprimir una corriente de 100 kg/h de monóxido de carbono a 1 bar y 200 °C de manera isotérmica hasta 120 bar. Se le pide calcular la potencia necesaria para el proceso utilizando:

a) La ecuación de gas ideal

b) La ecuación virial truncada en el 2do coeficiente (Hint: utilice el método de Pitzer)

c) La ecuación de SRK

Respuesta:

a) $\dot{W} = 18683$ W

b) $\dot{W} = 18685$ W

c) $\dot{W} = 18671$ W

Capítulo 4

Entropía y Segunda Ley

4.1. Problemas Resueltos

Problema 4.1.1) Evaluar Reversibilidad

En un proceso cerrado el cambio de entropía del sistema es 5.51 J/K. Se sabe que en este proceso se agregaron 1.5 kJ de calor desde un reservorio a 300K. Determine si este proceso es, reversible, irreversible o imposible.

Solución

Para que el proceso sea reversible luego se debe cumplir que $S_{gen} = 0$. Para que el proceso sea irreversible luego $S_{gen} \geq 0$. Para que el proceso sea imposible luego $S_{gen} \leq 0$

Además:

$$S_{\text{gen}} = \Delta S_{\text{sis}}^{\text{tot}} + \Delta S_{\text{alr}}^{\text{tot}}$$

Luego para el sistema: $\Delta S_{\text{sis}}^{\text{tot}} = 5.51$ J/K.

Para los alrededores:

$$\frac{Q}{T} = \frac{-1.5 \times 10^3}{300} = -5 \text{ J/K} \tag{4.1}$$

Es importante que el calor tiene valor negativo pues este sale desde el reservorio. Finalmente:

$$S_{\text{gen}} = \Delta S_{\text{sis}}^{\text{tot}} + \Delta S_{\text{alr}}^{\text{tot}} = 5.51 - 5 = 0.51 \geq 0$$

Luego el proceso es irreversible.

Problema 4.1.2) Evaporación

Calcule el cambio de entropía, en J/K, cuando 3.6 g de un compuesto x que esta como liquido saturado se evapora completamente a 100 °C. $h_{vap} = 2269$ kJ/kg

Solución

Para el calculo de entropía:

$$\Delta S = \int \frac{dQ_{\text{rev}}}{T}$$

Como T es constante e igual 100°C y además los cambios de fase son a presión constante, luego:

$$dQ = dH \longrightarrow m\Delta h_{vap}$$

$$\Delta S = \frac{m\Delta h_{vap}}{T} = \frac{3.6 \cdot 2269}{373.15} = 21.89 \text{ J/K}$$

Problema 4.1.3) Compresión Isotérmica GI

Un gas ideal inicialmente a 300 K y 1 bar utiliza 15 L. Este es comprimido isotermicamente. Cual es el volumen final en litros si el cambio de entropía para el gas es -5 J/K.

Solución

Primero se plantea el cambio de entropía para un gas ideal isotérmico:

$$\Delta S_{12}^{\text{ig}} = n \int_{T_1}^{T_2} \frac{C_V^{ig}}{T} dT + n \cdot R \ln \frac{V_2}{V_1} \Longrightarrow \Delta S_{12}^{\text{ig}} = n \cdot R \ln \frac{V_2}{V_1}$$

Luego se calcula la cantidad de masa en moles con la ecuación de gas ideal:

$$PV = nRT \longrightarrow n = \frac{PV}{RT} = \frac{1 \cdot 15}{0.08314 \cdot 300} = 0.6 \text{ mol}$$

Luego despejando el volumen final

$$\Delta S = n \cdot R \ln \frac{V_2}{V_1}$$

$$V_2 = V_1 \exp\left(\frac{\Delta S}{n \cdot R}\right)$$

$$V_2 = 15 \exp\left(\frac{-5}{0.6 \cdot 8.314}\right) = 5.5 \text{ L}$$

Problema 4.1.4) Gas Ideal isoentrópico

Considere un proceso isoentrópico de 1 mol de gas ideal. Este va desde 1 bar y 27°C hasta 927°C. Calcule la presión final del gas en bar. Considere $Cp = \frac{5}{2}R$

Solución

Primero se plantea el cambio de entropía para un gas ideal:

$$\Delta S_{12}^{\text{ig}} = n \int_{T_1}^{T_2} \frac{C_P^{\text{ig}}}{T} dT - n \cdot R \ln \frac{P_2}{P_1}$$

Como es isoentrópico, $\Delta S_{12} = 0$. Además como C_P es constante se integra fácilmente. Luego:

$$\Delta S = 0 = n \cdot C_P \ln \frac{T_2}{T_1} - n \cdot R \ln \frac{P_2}{P_1}$$

Luego se elimina el termino común de los moles y se despeja P_2:

$$P_2 = P_1 \exp\left[\frac{C_P}{R} \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right)\right]$$

$$P_2 = 1 \cdot \exp\left[\frac{(5/2)R}{R} \ln\left(\frac{1200}{300}\right)\right] = 32 \text{ bar}$$

Problema 4.1.5) Expansión Isotérmica GI

Un gas ideal inicialmente a 320°C y 10 bar utiliza 8 L. Este es expandido isotérmicamente hasta que utiliza un volumen de 20 L. Calcule el cambio de entropía para el gas en J/K.

Solución

Primero se plantea el cambio de entropía para un gas ideal isotérmico:

$$\Delta S_{12}^{\text{ig}} = n \int_{T_1}^{T_2} \frac{C_V^{ig}}{T} dT + n \cdot R \ln \frac{V_2}{V_1} \Longrightarrow \Delta S_{12}^{\text{ig}} = n \cdot R \ln \frac{V_2}{V_1}$$

Luego se calcula la cantidad de masa en moles con la ecuación de gas ideal:

$$PV = nRT \longrightarrow n = \frac{PV}{RT} = \frac{10 \cdot 8}{0.08314 \cdot 593.15} = 1.622 \text{ mol}$$

Finalmente:

$$\Delta S_{12}^{\text{ig}} = n \cdot R \ln \frac{V_2}{V_1} = 1.622 \cdot 8.314 \ln \frac{20}{8} = 12.358 \text{ J/K}$$

Problema 4.1.6) Entropía Generada con Baño Térmico

Calcule la entropía generada en J/K cuando se calienta 2 kg de agua desde 25°C a 60°C usando un baño térmico a 100°C. $C_P = 4184$ J/kg K.

Solución

Primero se plantea la ecuación para entropía generada de un sistema cerrado:

$$S_{\text{gen}} = \Delta S_{\text{sis}}^{\text{tot}} + \Delta S_{\text{alr}}^{\text{tot}}$$

Para el sistema que es el agua se plantea el cambio de entropía para un liquido:

$$\Delta S_{\text{agua}} = m \int_{T_1}^{T_2} \frac{C_P}{T} dT$$

Como C_P es constante:

$$\Delta S_{\text{agua}} = m \cdot Cp \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} = 2 \cdot 4184 \cdot \ln \frac{333}{298} = 929.25 \text{ J/K}$$

Para el baño se tiene que:

$$\Delta S_{\text{Baño}} = \frac{Q_{\text{Baño}}}{T_{\text{Baño}}} = \frac{-Q_{\text{Sis}}}{T_{\text{Baño}}}$$

Para calcular el calor:

$$Q_{\text{Sis}} = mC_P\Delta T = 2 \cdot 4184 \cdot (60 - 25) = 292880 \text{ J}$$

Luego:

$$\Delta S_{\text{Bao}} = \frac{-Q_{\text{Sis}}}{T_{\text{Baño}}} = \frac{-292880}{373} = -785.2 \text{ J/K}$$

Finalmente:

$$S_{\text{gen}} = \Delta S_{\text{sis}}^{\text{tot}} + \Delta S_{\text{alr}}^{\text{tot}} = 929.25 - 785.2 = 144.05 \text{ J/K}$$

Problema 4.1.7) Ciclo de Carnot 1

Un ciclo de Carnot opera entre 327°Cy 117°C. Si este absorbe 502 J desde el reservorio caliente, calcule la cantidad de calor (en J) que se rechaza al reservorio frió.

Solución

Para el ciclo de Carnot se tiene que:

$$\eta = 1 - \frac{T_C}{T_H} = \frac{-W_{\text{neto}}}{Q_{\text{in}}}$$

Nota: La eficiencia tiene un signo negativo en el trabajo pues se considera que el trabajo neto que sale del ciclo es negativo.

Luego:

$$\eta = 1 - \frac{T_C}{T_H} = 1 - \frac{390\text{K}}{600\text{K}} = 0.35$$

$$\eta = \frac{-W_{\text{neto}}}{Q_{\text{in}}} \Longrightarrow W_{\text{neto}} = -Q_{\text{in}} \cdot \eta = -502 \cdot 0.35 = -175.7 \text{ J}$$

Luego aplicando la primera ley para un ciclo:

$$Q + W = \cancel{\Delta U}^{\,0} \Longrightarrow Q_{\text{in}} + Q_{\text{out}} + W_{\text{neto}} = 0$$

$$502 + Q_{\text{out}} - 175.7 = 0 \Longrightarrow Q_{\text{out}} = 326.3 \text{ J}$$

Problema 4.1.8) Turbina no Adiabática

Una turbina no adiabática que opera de manera estacionaria utiliza 2 kg/s de vapor a 6 MPa y 600 °C y saliendo como vapor saturado a 20 kPa mientras produce 2000 kW de potencia. Si el entorno está a 30°C y el flujo es constante. Calcule la tasa de entropía generada por el proceso en kW/K.

Solución

Primero se plantea el balance general de entropía para un sistema estacionario:

$$\cancelto{0}{\frac{dS}{dt}} = \sum_i \frac{Q_i}{T_i} + \sum_{\text{entra}} \dot{m}_e \hat{S}_e - \sum_{\text{sale}} \dot{m}_s \hat{S}_s + \dot{S}_{gen}$$

Luego desarrollando y despejando la entropía generada

$$\dot{S}_{gen} = -\frac{Q}{T_{\text{Baño}}} + \dot{m}(\hat{S}_s - \hat{S}_e)$$

La entropía de entrada y de salida se obtienen de las tablas A-4 y A-3:

$$\hat{S}_e = 7.1677 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}; \quad \hat{S}_s = 7.9085 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

Para el calor se puede plantear el balance de energía para una turbina estacionaria no adiabática:

$$\cancelto{0}{\frac{dU}{dt}} = \sum_{i=1}^{N} \dot{m}_i h_i + \dot{Q} + \dot{W}_s - P\cancelto{0}{\frac{dV}{dt}}$$

Luego despejando Q:

$$\dot{Q} = m(h_{\text{out}} - h_{\text{in}}) - \dot{W}_s$$

Las entalpías de entrada y de salida se obtienen de las tablas A-4 y A-3:

$$h_{\text{in}} = 3658.4 \text{ kJ/kg}; \quad h_{\text{out}} = 2609.7 \text{ kJ/kg}$$

Luego reemplazando en el balance (recordar que la potencia de la turbina tiene signo negativo pues este trabajo sale).

$$\dot{Q} = 2 \cdot (2609.7 - 3658.4) - (-2000) = -97.4 \text{ kW}$$

Luego reemplazando en el balance de entropía:

$$\dot{S}_{\text{gen}} = -\frac{Q}{T_{\text{Baño}}} + \dot{m}(\hat{S}_s - \hat{S}_e) = \frac{97.4}{303} + 2 \cdot (7.9085 - 7.1677) = 1.8 \text{ kW/K}$$

Problema 4.1.9) Compresor

40 kg/s de metano son comprimidos desde 0.16 MPa y 140K hasta 2.5 MPa y 340K. Debido a que el compresor estaba mal aislado, hubo una transferencia de calor desconocida Q desde un reservorio a 50°C hacia el gas. Se sabe que el sistema genero una entropía de 14.4 kJ/K · s. Determine el valor de Q en kJ/s.

Solución

El balance general de entropía para un compresor estacionario, no adiabático es:

$$\cancelto{0}{\frac{dS}{dt}} = \sum_i \frac{Q_i}{T_i} + \sum_{\text{entra}} \dot{m}_e \hat{S}_e - \sum_{\text{sale}} \dot{m}_s \hat{S}_s + \dot{S}_{\text{gen}}$$

$$\frac{Q}{T_B} = -\left(\dot{m}(\hat{S}_{in} - \hat{S}_{out}) + \dot{S}_{gen}\right)$$

Del gráfico del metano: $\hat{S}_{in} = 5.5$ y $\hat{S}_{out} = 6$. Luego:

$$Q = -(50 + 273.15)\,(40(5.5 - 6) + 14.4) = 1800 \text{ kJ/s}$$

Problema 4.1.10) Carnot en Serie

Se tienen dos ciclos de Carnot en serie. El primero tiene un reservorio caliente a 316°C y uno frío a temperatura T. El segundo utiliza la temperatura T como reservorio caliente y 38°C como reservorio frío. Si ambos ciclos tienen la misma eficiencia calcule la temperatura (T) entre los ciclos en Kelvin.

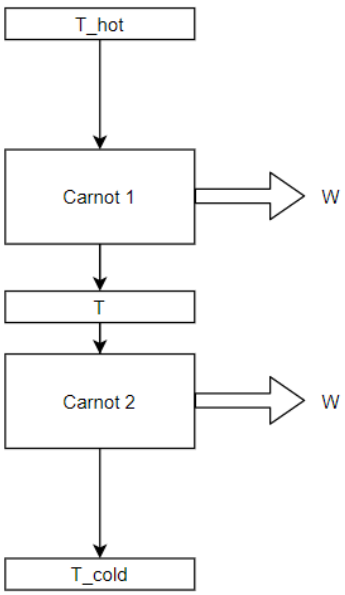


Figura 4.1: Diagrama del problema 4.1.10

Solución

Como ambos ciclos tienen la misma eficiencia:

$$\eta = 1 - \frac{T}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T}$$

Reordenando y despejando:

$$T = \sqrt{T_1 \cdot T_2} = \sqrt{589 \cdot 311} = 427\text{K}$$

Problema 4.1.11) Analizar Factibilidad de Procesos

Un inventor declara haber creado una nueva maquina para calentar nitrógeno que opera de la siguiente manera:

- 100 kg/min de vapor de agua entran a la maquina a 400 °C y P=5 bar
- 100 kg/min de liquido saturado de agua salen de la maquina a 40 °C.
- La maquina genera 50000 kJ/min de trabajo de eje. Además esta es adiabática.
- Una cantidad desconocida de nitrógeno entra a 315 K a 1 bar y sale a 330 K y a la misma presión.
- El proceso opera de manera estacionaria.

Un inversionista le pide que analice la factibilidad del proceso propuesto por el inventor con el fin de no invertir en algo que "no es posible". Asuma que el nitrógeno se comporta como un gas ideal. Utilice C_p polinómicos.

Solución

A grandes rasgos lo que se puede evaluar es si el proceso cumple la primera y la segunda ley de la termodinámica de manera simultanea. Luego debemos evaluar que se cumpla que la energía se conserva y que la entropía del universo aumente. Primero se parte evaluando la primera ley:

$$\frac{dU}{dt} = \sum_{k=1}^{K} \dot{m}_k h_k + \dot{Q} - P\frac{dV}{dt} + \dot{W}_s$$

Como el proceso opera de manera estacionaria y es adiabático:

$$0 = \sum_{k=1}^{K} \dot{m}_k h_k + \dot{W}_s$$

Si expresamos la corriente de agua como $F_A = 100$ kg/min y la corriente de nitrógeno como F_N.

$$F_A \cdot h_{A,in} + F_N \cdot h_{N,in} - F_A \cdot h_{A,out} - F_N \cdot h_{N,out} + \dot{W}_s = 0$$

$$F_A \cdot (h_{A,in} - h_{A,out}) + \dot{W}_s = F_N \cdot (h_{N,out} - h_{N,in})$$

Ahora debemos calcular la entalpías de cada corriente:

- En P=5 bar y T=400 °C: $h_{A,in} = 3271,9$ y $s_{A,in} = 7,7938$
- En Liq. Sat. a 40 °C: $h_{A,out} = 167,57$ y $s_{A,out} = 0,5725$
- Para la corriente de nitrógeno, como es un gas ideal y es un proceso a presión constante:

$$h_{N,out} - h_{N,in} = \int_{T_1}^{T_2} Cp(T)dT$$

Del anexo del Matsoukas:

$$Cp(T)/R = a_0 + a_1T + a_2T^2 + a_3T^3 + a_4T^4$$

$$a_0 = 3,539 \quad a_1 = -0,261 \cdot 10^{-3} \quad a_2 = 0,007 \cdot 10^{-5} \quad a_3 = 0,157 \cdot 10^{-8} \quad a_4 = 0,099 \cdot 10^{-11}$$

$$h_{N,out} - h_{N,in} = \int_{315}^{330} Cp(T)dT = 439,67 \text{ J/mol} = 0,43967 \text{ kJ/mol}$$

Luego para pasar la entalpía a kJ/kg:

$$\frac{0,43967 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}}{28 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{mol}}} = 15,7 \text{ kJ/kg}$$

Luego para calcular F_N:

$$F_N = \frac{F_A \cdot (h_{A,in} - h_{A,out}) + \dot{W}_s}{h_{N,out} - h_{N,in}} = \frac{100 \cdot (3271,9 - 167,57) - 50000}{15,7} = 16586 \text{ kg/min}$$

Ahora que se cumple la primera ley se debe ver si se cumple la segunda ley. Haciendo un balance de entropía:

$$\frac{d(M \cdot s)}{dt} = \sum_{j=1}^{j=J} \dot{m}_{j,in} s_j - \sum_{k=1}^{k=K} \dot{m}_{k,\text{out}} s_k + \frac{\dot{Q}}{T} + \dot{S}_{gen}$$

Luego como el proceso es estacionario, adiabático y usando las corrientes indicadas:

$$F_A \cdot (s_{A,out} - s_{A,in}) + F_N \cdot (s_{N,out} - s_{N,in}) = \dot{S}_{gen}$$

Las entropías de las corrientes de agua se obtuvieron de tablas antes, por lo que solo falta la del nitrógeno. Como es un gas ideal a presión constante:

$$s_{N,out} - s_{N,in} = \int_{T_{in}}^{T_{out}} \frac{Cp(T)dT}{T} = R \cdot \left(a_0 \ln T + a_1 T + \frac{a_2 T^2}{2} + \frac{a_3 T^3}{3} + \frac{a_4 T^4}{4} \right) \Bigg|_{T_{in}}^{T_{out}}$$

$$s_{N,out} - s_{N,in} = 1,363 \ \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}} = 1,363 \cdot 10^{-3} \ \frac{\text{kJ}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$$

Luego para pasar la entropia a $\frac{kJ}{kg \cdot K}$:

$$\frac{1,363 \cdot 10^{-3} \ \frac{\text{kJ}}{\text{mol} \cdot \text{K}}}{28 \cdot 10^{-3} \frac{kg}{mol}} = 0,0487 \ \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

Finalmente:

$$\dot{S}_{gen} = 100 \cdot (0,5725 - 7,7938) + 16586 \cdot (0,0487) = 85,6 \ \frac{\text{kJ}}{\text{K}} \geq 0$$

Luego se puede decir que el proceso no rompe ninguna ley de la termodinámica, por lo que le puede decir a su amigo inversionista que a priori puede invertir en el.

Problema 4.1.12) Ciclo de Carnot 2

Se tiene un ciclo de Carnot que utiliza 120 kg de agua en un sistema cerrado. En este, líquido saturado (Estado 1) a 20 bar es calentado isotermicamente hasta vapor saturado (Estado 2). Luego este es expandido de manera adiabática y reversible hasta 10 bar (Estado 3) para luego ser parcialmente condensado (Estado 4). Finalmente este es comprimido de manera adiabática y reversible hasta su estado inicial.

a) Caracterice los 4 estados, calculando todas sus propiedades (T, P, v, u, h, s).

b) Realice un diagrama T-S del ciclo, denotando los 4 estados y procesos en su dirección correcta.

c) Calcule la cantidad de calor y trabajo involucrado en los 4 procesos por separado. Además calcule el trabajo neto producido por el ciclo.

d) Calcule la eficiencia del ciclo en función del trabajo y el calor. Compare con la eficiencia teórica de Carnot. ¿Son estas iguales?

e) Considere ahora que usted desea aprovechar el calor que se libera y por ende decide acoplar en serie n ciclos de Carnot de igual eficiencia. Esto se ve en la Figura 4.2. Derive una expresión en función de Q_H y η, para el calor transmitido en el n-ésimo ciclo (Q_n) y una expresión para el trabajo producido en el n-ésimo ciclo de Carnot W_n.

f) Utilizando la expresión anterior, derive una expresión para el trabajo total producido en los n ciclos de Carnot. **Hint:** Recuerde la serie geométrica.

g) Finalmente, con la expresión anterior calcule el trabajo total si se utilizaran 8 ciclos de Carnot en serie. ¿Qué pasa con la eficiencia global a medida que se acopla un nuevo ciclo?

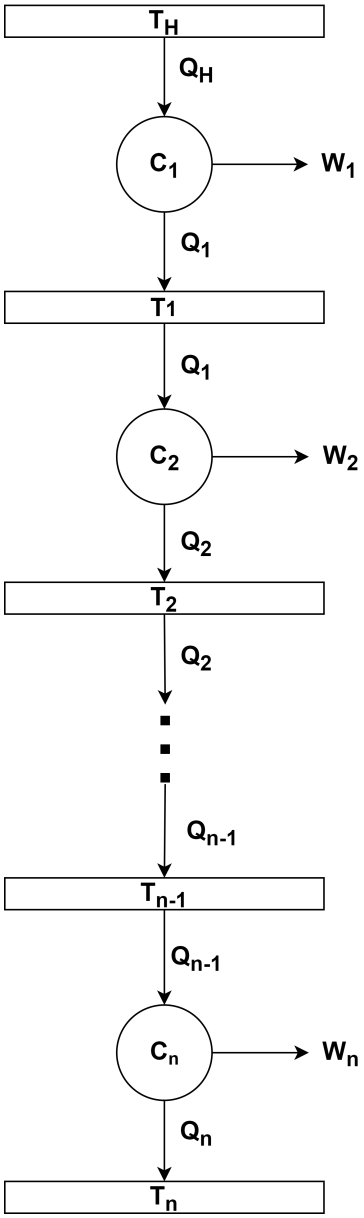


Figura 4.2: Ciclos de Carnot en Serie

Solución

a) Los procesos que ocurren son los siguientes:

- 1-2: Calentamiento isotérmico
- 2-3: Expansión adiabática reversible
- 3-4: Condensación isotérmica
- 4-1: Compresión adiabática reversible.

Estado 1: De la tabla A-3 para liquido saturado a $P_1 = 20$ bar

- $P_1 = 20$ bar
- $T_1 = 212.4°C$

- $v_1 = 1.1767 \times 10^{-3}$ m^3/kg
- $u_1 = 906.44$ kJ/kg
- $h_1 = 908.79$ kJ/kg
- $s_1 = 2.4474$ kJ/kg K

Estado 2: De la tabla A-3 para vapor saturado a $P_2 = 20$ bar

- $P_2 = 20$ bar
- $T_2 = 212.4$°C
- $v_2 = 0.09963$ m^3/kg
- $u_2 = 2600.3$ kJ/kg
- $h_2 = 2799.5$ kJ/kg
- $s_2 = 6.3409$ kJ/kg K

Estado 3: De la tabla A-3 para mezcla a $P_1 = 10$ bar y como es adiabático y reversible $s_3 = s_2$

$$s_3 = s_2 = s_L + x_3 \cdot (s_V - s_L) \Longrightarrow x_3 = \frac{s_3 - s_L}{s_V - s_L} = \frac{6.3409 - 2.1387}{6.5863 - 2.1387} = 0.9448$$

Luego se obtiene el resto de las propiedades por regla de la palanca.

- $P_3 = 10$ bar
- $T_3 = 179.9$°C
- $s_3 = s_2 = 6.3409$ kJ/kg K
- $x_3 = 0.0694$
- $v_3 = 0.1837$ m^3/kg
- $u_3 = 2483.1$ kJ/kg
- $h_3 = 2666.9$ kJ/kg

Estado 4: De la tabla A-3 para liquido saturado a $P_1 = 10$ bar y además como $s_4 = s_1$

$$s_4 = s_1 = s_L + x_4 \cdot (s_V - s_L) \Longrightarrow x_3 = \frac{s_4 - s_L}{s_V - s_L} = \frac{2.4474 - 2.1387}{6.5863 - 2.1387} = 0.0694$$

Luego se obtiene el resto de las propiedades por regla de la palanca.

- $P_4 = 10$ bar
- $T_4 = 179.9$°C
- $s_4 = 2.4474$ kJ/kg K
- $v_4 = 0.01454$ m^3/kg
- $u_4 = 888.1$ kJ/kg
- $h_4 = 902.68$ kJ/kg

b) El diagrama es el siguiente:

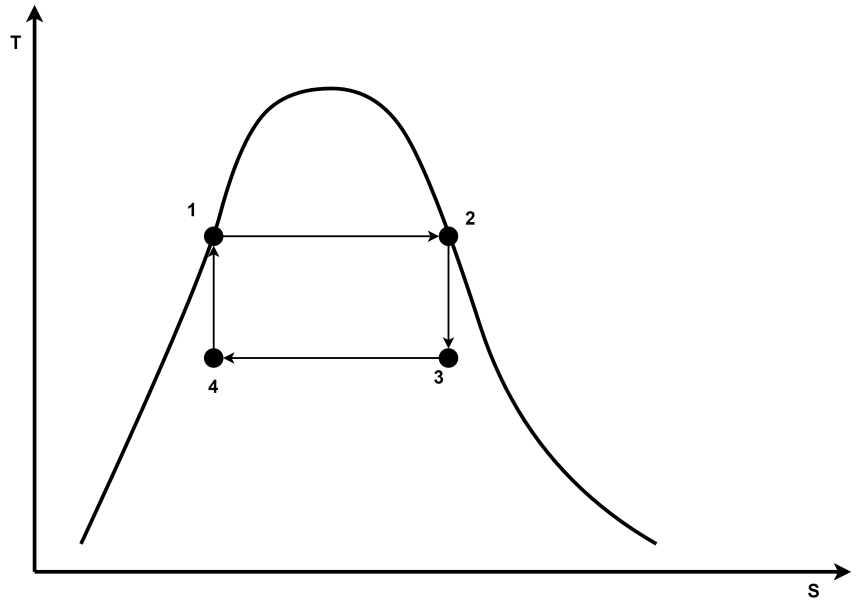


Figura 4.3: Diagrama T-S del Ciclo

c)

Proceso 1-2: Como es un proceso cerrado:

$$Q + W = \Delta U$$

Como es a presión constante:

$$Q_{1,2} = Q_H = \Delta H = m\Delta h = 120 \cdot (2799.5 - 908.79) = 226885 \text{ kJ}$$

Luego:

$$W_{1,2} = \Delta U - Q_{1,2} = 120 \cdot (2600.3 - 906.44) - 226885.2 = -23622 \text{ kJ}$$

Proceso 2-3: Como es un proceso cerrado, adiabático y reversible:

$$\cancel{Q}^{0} + W_{2,3} = \Delta U = 120 \cdot (2483.1 - 2600.3) = -14064\text{kJ}$$

Proceso 3-4: Como es un proceso cerrado y a presión constante

$$Q + W = \Delta U$$

Como es a presión constante:

$$Q_{3,4} = Q_C = \Delta H = m\Delta h = 120 \cdot (902.68 - 2666.9) = -211706\text{kJ}$$

Luego:

$$W_{3,4} = \Delta U - Q_{3,4} = 120 \cdot (881.1 - 2483.1) + 21170.6 = 20306 \text{ kJ}$$

Proceso 3-4: Como es un proceso cerrado, adiabático y reversible:

$$\cancel{Q}^{0} + W_{3,4} = \Delta U = 120 \cdot (906.44 - 881.1) = 2200.8\text{kJ}$$

Luego el trabajo neto:

$$W_N = \sum_i W_i = -23622 - 14064 + 20306 + 2200.8 = -15179.2 \text{ kJ}$$

d) La eficiencia es:

$$\eta = \frac{-W_N}{Q_H} \times 100 = 6.69\,\%$$

La eficiencia teórica es:

$$\eta_C = \left(1 - \frac{T_L}{T_H}\right) \times 100 = \left(\frac{179.89 + 273.15}{212.38 + 273.15}\right) \times 100 = 6.69\,\%$$

Es decir, son iguales.

e) Primero para el primer ciclo:

$$\frac{-W_1}{Q_H} = \eta \Longrightarrow -W_1 = Q_H \eta$$

Luego del balance de energía para un ciclo cerrado:

$$Q_H + Q_1 + W_1 = 0 \Longrightarrow Q_1 = -Q_H - W_1 = -Q_H(1 - \eta)$$

Luego para el 2do ciclo, notar que Q_1 para el ciclo 1 es un calor saliente, pero para el ciclo 2 es un calor entrante:

$$\frac{-W_2}{-Q_1} = \eta \Longrightarrow -W_2 = -Q_1\eta = Q_H(1 - \eta)\eta$$

Luego del balance:

$$\begin{aligned} Q_1 + Q_2 + W_2 = 0 \Longrightarrow & Q_2 = -Q_1 - W_2 = -Q_H(1 - \eta) + Q_H(1 - \eta)\eta \\ & Q_2 = -Q_H(1 - \eta)^2 \end{aligned}$$

Así se puede seguir para el tercer ciclo y se llega a que:

$$\begin{aligned} -W_3 &= Q_H(1 - \eta)^2\eta \\ Q_3 &= -Q_H(1 - \eta)^3 \end{aligned}$$

Luego se puede deducir y demostrar que:

$$-W_n = Q_H(1-\eta)^{n-1}\eta \tag{4.2}$$

$$Q_n = -Q_H(1-\eta)^n \tag{4.3}$$

f) Para el trabajo total en n ciclos:

$$-W_T = \sum_{i=1}^{n} -W_i = \sum_{i=1}^{n} Q_H\eta(1-\eta)^{i-1}$$

Esto es lo mismo que (con un cambio de variable de $x = i-1$):

$$\sum_{x=0}^{n-1} Q_H\eta(1-\eta)^x$$

Esta es una serie geométrica, y esta converge dado que $(1-\eta) < 1$. Esta serie tiene una expresión conocida (puede ver la demostración en internet o en libros de Calculo).

$$\sum_{i=0}^{k} a \cdot r^i = a\left(\frac{1-r^{k+1}}{1-r}\right)$$

Luego:

$$\sum_{i=1}^{n} Q_H\eta(1-\eta)^{i-1} = Q_H\eta\left(\frac{1-(1-\eta)^n}{\eta}\right)$$

$$-W_T = Q_H\left(1-(1-\eta)^n\right) \tag{4.4}$$

g) Acá solo se debe reemplazar $n = 8$ en la ecuación 4.4:

$$-W_T = Q_H\left(1-(1-\eta)^n\right) = 226885(1-(1-0.0669)^8) = 96498.9 \text{ kJ}$$

Finalmente si se acoplan muchos ciclos la eficiencia global aumenta pero el problema, es que cada vez se necesita una temperatura menor como reservorio frió, y por ende se vuelve poco practico y difícil si se disminuye bajo la temperatura ambiental.

4.2. Propuestos

Problema 4.2.1) Entropía de un sistema

10 moles de un gas están contenidos en un contenedor rígido. Inicialmente el gas se encuentra a 0.5 bar y 300 K, además el contenedor también esta a 300 K. Se introduce el contenedor dentro de un horno muy grande a 600 K. El contenedor se deja hasta que tanto el gas como

el contenedor alcanzan el equilibrio térmico con los alrededores. El gas se puede considerar como un gas ideal con $C_v = 2,5R$. El contenedor en si tiene una masa de 10 kg (sin considerar la masa del gas en su interior) y con una capacidad calorífica de 1.5 J/g $\cdot$ K.

a) Calcule la cantidad de calor añadida al gas

b) Calcule la cantidad de calor añadida al contenedor

c) Calcule el cambio de entropía para el gas

d) calcula el cambio de entropía del universo

e) ¿Es este proceso reversible? ¿A qué se puede deber que sea reversible/irreversible?

Respuesta:

a) $Q_1 = 62.355$ kJ

b) $Q_2 = 4500$ kJ

c) $\Delta S_g = 0.144$ kJ/K

d) $S_{gen} = 2.937$ kJ/K

e) El proceso es irreversible pues existe una generación positiva de entropía.

Problema 4.2.2) Compresión reversible GI

En un motor, 10 moles de un gas ideal se comprimen desde 30°C y 2 bar hasta 20 bar. El cambio de entropía para el gas es 50 J/K. Calcule la temperatura final del gas en Kelvin. Considere $C_P = \frac{5}{2}R$.

Respuesta:

$T_2 = 968.57$ K

Problema 4.2.3) Entropía de un Dirigible

Se tiene un dirigible que contiene 5000 moles de helio, que pueden modelarse como un gas ideal con $c_p = 5/2R$. El dirigible está inicialmente a 25 ^{o}C y 1 bar. El dirigible vuela lo suficientemente lento para que todos los cambios sean de forma reversible. Encuentre $Q, W, \Delta U, \Delta H$ *y* ΔS para las siguientes condiciones finales:

a) T = 15 °C y P = 1 bar.

b) T = 25°C y P = 0.9 bar.

Respuesta:

a) $W = 415.7$ kJ, $Q = \Delta H = -1039.25$ kJ, $\Delta U = -623.55$ kJ, $\Delta S = -3.547$ kJ/K

b) $Q = W = 1305.19$ kJ, $\Delta U = \Delta H = 0$ kJ, $\Delta S = 4.379$ kJ/K.

Problema 4.2.4) Ciclo Dual

Considere nuevamente el Ciclo Dual de la pregunta 2.2.3. Calcule el cambio de entropía para el gas en cada uno de los procesos. Además realice un diagrama T-S del ciclo y calcule su eficiencia térmica.

Respuesta:

Proceso 1-2:

$$\Delta S_{1,2} = 0$$

Proceso 2-3:

$$\Delta S_{23}^{\text{ig}} = 0.4528 \text{ kJ/K}$$

Proceso 3-4:

$$\Delta S_{34}^{\text{ig}} = 0.1124 \text{ kJ/K}$$

Proceso 4-5:

$$\Delta S_{4,5} = 0$$

Proceso 5-1:

$$\Delta S_{51}^{\text{ig}} = -0.5651 \text{ kJ/K}$$

Luego para el diagrama T-S:

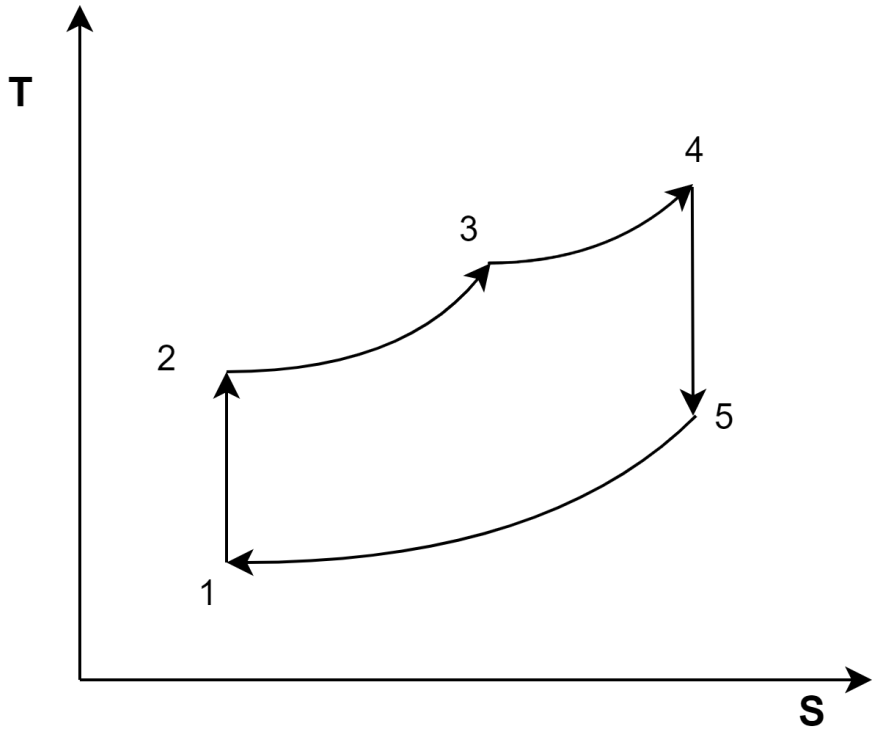


Figura 4.4: Diagrama T-S del ciclo Dual

Problema 4.2.5) Balde de Hielo

Un balde contiene 1 kg de hielo a -5°C. El balde es puesto dentro de un baño que se mantiene a 40°C hasta que se llegue al equilibrio térmico. Determine el cambio de entropía del hielo, del baño y la entropía generada. Considere $C_{P,\text{Liq}} = 4.18$ kJ/kg K, $C_{P,\text{ice}} = 2.05$ kJ/kg K, $\Delta H_{fus} = 334$ kJ/kg.

Respuesta:

$\Delta S_{liq} = 1831.89$ J/K, $\Delta S_{\text{Baño}} = -1633.24$ J/K, $S_{\text{gen}} = 198.65$ J/K.

Problema 4.2.6) Etanol Líquido

92 kg de etanol líquido se calientan desde 30°C hasta que es vapor saturado. Calcule el cambio de entropía para el etanol en kJ/K. Considere que:

- $C_P = 127$ kJ/kmol
- $T_{eb} = 78.3$°C
- $\Delta h_{vap} = 38577$ kJ/kmol
- PM = 46 kg/kmol

Respuesta:

$\Delta S_T = 257.1$ kJ/K

Problema 4.2.7) Ciclo de Carnot 3

Una planta de energía nuclear genera 750 MW de potencia. El motor nuclear utiliza un reactor con una temperatura de operación de 315 °C. Cerca de la planta hay un rió disponible a 20°C que tiene un caudal de 165 m^3/s que sirve como disipador de calor. Calcule el aumento de la temperatura del rió en el punto donde se descarga el calor. Considere que la eficiencia de la planta es un 60 % de la eficiencia de Carnot.

Respuesta:

$T_{out} = 22.6°C$

Problema 4.2.8) Entropía de un Mezclador

Agua líquida a 200 kPa y 20°C se calienta en una cámara al mezclarla con vapor sobrecalentado a 200 kPa y 150 °C. El agua líquida entra a la cámara mezcladora a razón de 2.5 kg/s, y se estima que la cámara pierde calor al aire circundante a 25 °C a razón de 1200 kJ/min. Si la mezcla sale de la cámara mezcladora a 200 kPa y 60 °C, determine:

a) El flujo másico del vapor sobrecalentado.

b) La tasa de generación de entropía durante este proceso de mezclamiento.

Respuesta:

$m_2 = 0.174$ kg/s, $\dot{S}_{gen} = 0.281$ kW/K.

Problema 4.2.9) Chiller

Se tiene un *chiller*, mostrado en la Figura 4.5, cuya función es enfriar etanol para una planta de procesos. Este opera de manera estacionaria, donde entran 170 kg/min de etanol liquido a 1 bar y a 38°C. Además, esta maquina recibe una cantidad de calor $\dot{Q}_{\text{in}}$ desde un reservorio a 282°C y expulsa una cantidad de calor $\dot{Q}_{\text{out}}$ hacia un reservorio a 38°C. Para el etanol use la capacidad calorífica del archivo "Capacidades Calorificas de Gas y Liquido.pdf".

a) Plantee el balance de energía y el de entropía para el sistema, de la forma más completa posible.

b) Si el etanol abandona la maquina a una temperatura $T_{\text{out}} = 12$°C. ¿Cuál es el valor mínimo teórico de $\dot{Q}_{\text{in}}$ tal que el proceso sea posible?

c) Repita la pregunta b), con otros 4 valores de T_{out} en el rango de 12°C y 38°C y realice un gráfico de $\dot{Q}_{\text{in}}\big|_{\text{Min}}$ vs T_{out}.

d) Ahora si se sabe que $T_{\text{out}} = 20$ °C y $\dot{Q}_{\text{in}} = 800$ kJ/min, calcule la entropía generada por el sistema en kJ/min K.

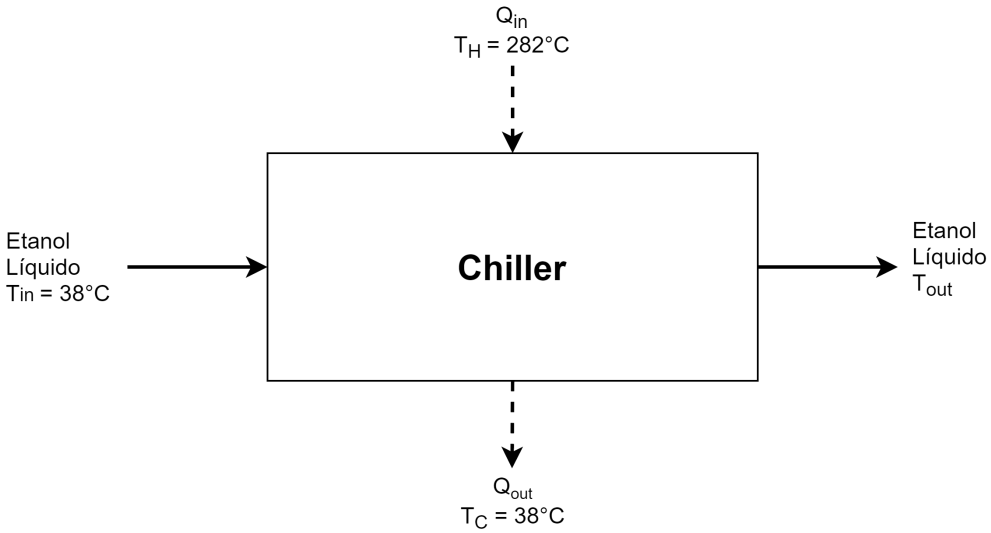


Figura 4.5: Diagrama del proceso para el *chiller*

Respuesta:

a) Primero para el balance de energía:

$$0 = \frac{\dot{m}}{PM}\int_{T_{out}}^{T_{in}} C_P dT + \dot{Q}_{in} + \dot{Q}_{out}$$

Luego para el balance de entropía:

$$0 = \frac{Q_{in}}{T_H} + \frac{Q_{out}}{T_C} + \frac{\dot{m}}{PM}\int_{T_{out}}^{T_{in}} \frac{C_P}{T} dT + \dot{S}_{\text{gen}}$$

$$C_P = a_l + b_l T + c_l T^2 + d_l T^3$$

b) $\dot{Q}_{in} = 1078.9$ kJ/min

c) Queda un gráfico como en la Figura 4.6

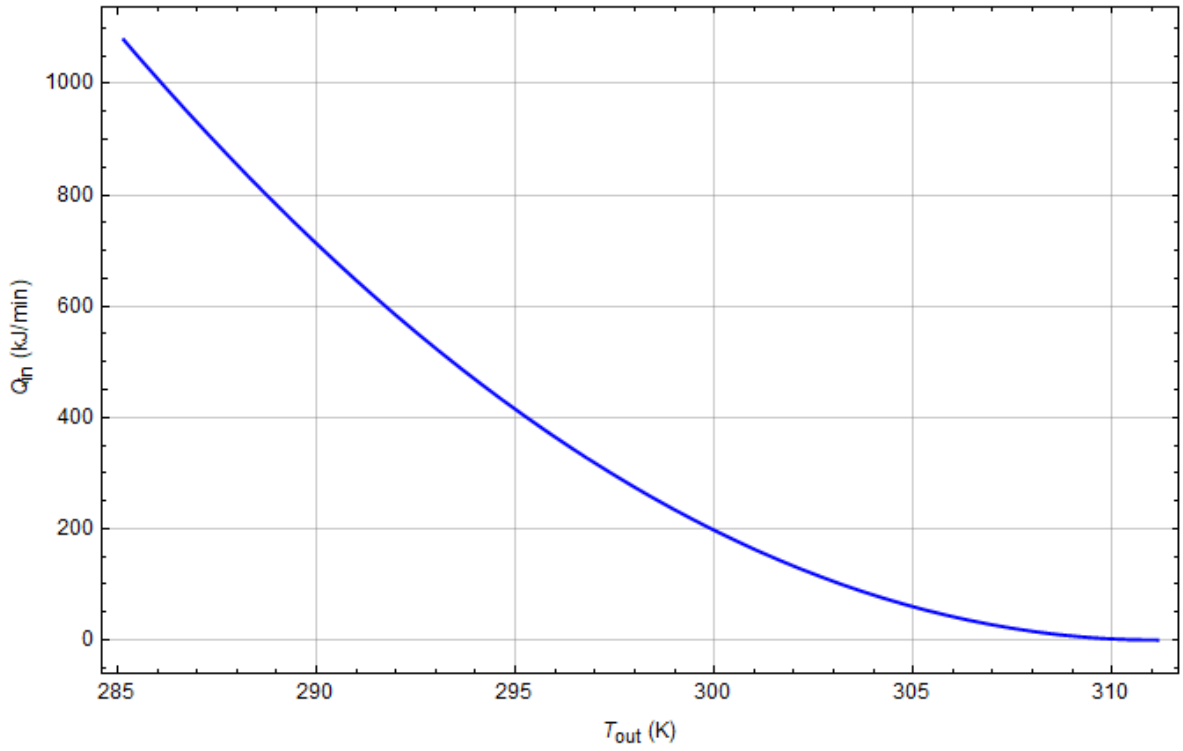


Figura 4.6: Variación de Q_{in} con T_{out}

d) $\dot{S}_{\text{gen}} = 0.40212$ kJ/K $\cdot$ min

Capítulo 5

Termodinámica de Procesos

5.1. Problemas Resueltos

Problema 5.1.1) Compresión de Metano

Metano es comprimido es un compresor adiabático con 85 % de eficiencia desde 180K y 0.45 MPa hasta 4.5 MPa. Calcule el trabajo que consume el compresor en kJ/kg. Utilice el diagrama entalpía presión para sus cálculos.

Solución

Primero se plantea el balance de energía para un compresor adiabático que opera de manera estacionaria:

$$\cancelto{0}{\frac{dU}{dt}} = \sum_{i=1}^{N} \dot{m}_i h_i + \cancelto{0}{\dot{Q}} + \dot{W}_s - P\cancelto{0}{\frac{dV}{dt}}$$

Luego para la entrada y salida y despejando el trabajo:

$$\dot{W}_s = \dot{m}(h_2 - h_1)$$

Para la entalpía de entrada se busca en el diagrama entalpía presión del metano a 180K y 0.45 MPa:

$$h_{in} = 720 \text{ kJ/kg}$$

Para la entalpía de salida se debe primero sacar la entalpía ideal ($h_{2,s}$) por el camino isoentrópico. Para esto se debe seguir la curva de entropía constante hasta llegar a 4.5 MPa. De esta forma se obtiene:

$$h_{2,s} = 1000 \text{ kJ/kg}$$

Luego para el trabajo reversible:

$$W_{\text{ideal}} = h_{2,s} - h_1 = 280$$

Luego para el trabajo real:

$$W_{\text{real}} = \frac{W_{\text{ideal}}}{\eta} = \frac{280}{0.85} = 329.41 \text{ kJ/kg}$$

Problema 5.1.2) Licuefacción de Linde

Considere el proceso de Licuefacción de Linde dado por la figura 5.1. Este se usara para producir liquido saturado a 0.1 MPa ($T_{\text{sat}} = 150$K) de un compuesto X. Las entalpías del compuesto en fase gaseosa están dadas por la tabla 5.1. Además, el liquido saturado a 0.1 MPa tiene una entalpía de 20 kJ/kg. Considere que el separador flash opera a 0.1 MPa. Los datos que se tienen de cada corriente son los siguientes:

1) $T_1 = 275$K, $P_1 = 0.1$ MPa
2) $T_2 = 200$K, $P_2 = 10$ MPa
3) $T_3 = 175$K
4) Vapor Saturado
6) Liquido Saturado

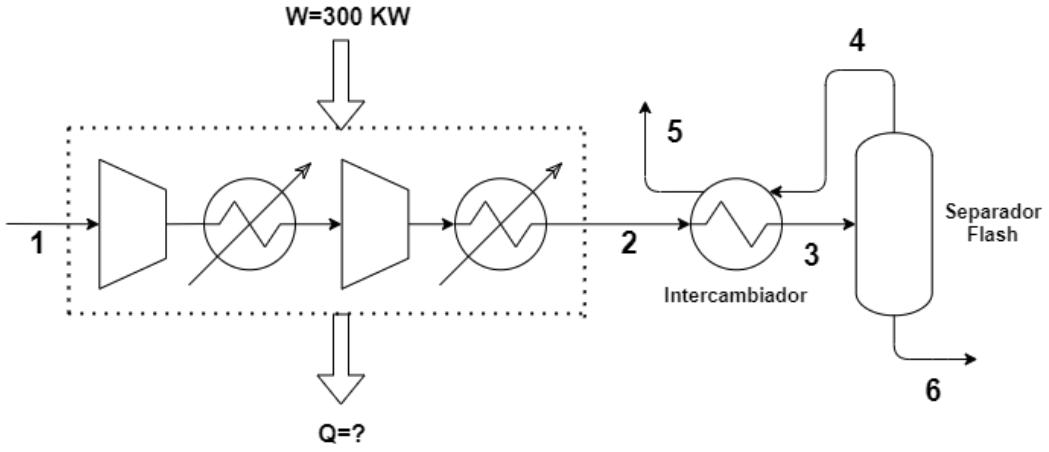


Figura 5.1: Proceso de Licuefacción de Linde

Tabla 5.1: Entalpías del compuesto en fase gaseosa del problema 5.1.2

P/T	**150 K**	**175 K**	**200 K**	**225 K**	**250 K**	**275 K**
0.1 MPa	200	215	230	245	260	275
1.0 MPa	192	202	215	229	241	258
10 MPa	184	190	200	215	228	241

Si al proceso entran 50 kg/s luego calcule el flujo másico del producto liquido (corriente 6), la cantidad de calor que se retira en los intercambiadores de calor y la entalpía de la corriente 5.

Solución

Primero se debe caracterizar las entalpías de cada estado conocido:

1) $T_1 = 275\text{K}$, $P_1 = 0.1$ MPa $\longrightarrow h_1 = 275$ kJ/kg
2) $T_2 = 200K$, $P_2 = 10$ MPa $\longrightarrow h_2 = 200$ kJ/kg
3) $T_3 = 175\text{K}$, y $P_3 = P_2 = 10$ MPa $\longrightarrow h_3 = 190$ kJ/kg
4) Vapor Saturado a $P_4 = 0.1$ MPa ($T_4 = 150\text{K}$)$\longrightarrow h_4 = 200$ kJ/kg
6) Liquido Saturado a $P_4 = 0.1$ MPa ($T_4 = 150\text{K}$)$\longrightarrow h_5 = 20$ kJ/kg

Primero para conocer el flujo másico de la corriente 6 se puede plantear un balance de materia y de energía en el separador flash:

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_4 + \dot{m}_6$$

Para el balance de energía como el separador flash es estacionario y adiabático sin agitación:

$$\cancel{\frac{dU}{dt}}^{0} = \sum_{i=1}^{N} \dot{m}_i h_i + \cancel{\dot{Q}}^{0} + \cancel{\dot{W}_s}^{0} - P\cancel{\frac{dV}{dt}}^{0}$$

$$\Longrightarrow \dot{m}_3 h_3 = \dot{m}_6 h_6 + \dot{m}_4 h_4$$

Combinando ambas ecuaciones y despejando $\dot{m}_6$:

$$\dot{m}_6 = \frac{\dot{m}_3(h_3 - h_4)}{(h_6 - h_4)} = \frac{50 \cdot (190 - 200)}{(20 - 200)} = 2.78 \text{ kg/s}$$

$$m_4 = m_3 - m_6 = 50 - 2.78 = 47.22 \text{ kg/s}$$

Para el calor que se retira en los intercambiadores de calor se puede plantear un balance de energía en el sistema delimitado:

$$\cancel{\frac{dU}{dt}}^{0} = \sum_{i=1}^{N} \dot{m}_i h_i + \dot{Q} + \dot{W}_s - P\cancel{\frac{dV}{dt}}^{0}$$

$$0 = \dot{m}_1(h_1 - h_2) + \dot{Q} + \dot{W}_s \Longrightarrow \dot{Q} = m_1(h_2 - h_1) - \dot{W}_s$$

Luego reemplazando los valores:

$$\dot{Q} = 50 \cdot (200 - 275) - 300 = -4050 \text{ kW}$$

Por ultimo para la entalpía de la corriente 5 se puede plantear un balance de energía en el intercambiador de calor:

$$\cancel{\frac{dU}{dt}}^{0} = \sum_{i=1}^{N} \dot{m}_i h_i + \cancel{\dot{Q}}^{0} + \cancel{\dot{W}_s}^{0} - P\cancel{\frac{dV}{dt}}^{0}$$

$$0 = \dot{m}_2(h_2 - h_3) + \dot{m}_4(h_4 - h_5)$$

Despejando h_5:

$$h_5 = \frac{\dot{m}_2(h_2 - h_3)}{\dot{m}_4} + h_4 = \frac{50(200 - 190)}{47.22} + 200 = 210.59 \text{ kJ/kg}$$

Problema 5.1.3) Proceso con Agua

Considere el proceso de la figura 5.2. En este entran 100 kg/s de agua por la corriente 1. El separador flash es adiabático e isobárico. Además se tienen los siguientes datos disponibles:

- Corriente 1: 100 kg/s como liquido saturado a 150 bar
- Corriente 2: $P_2 = 50$ bar
- Corriente 5: $T_5 = 360°C$
- Corriente 6: $P_6 = 1$ bar
- Eficiencia de la turbina: 85 %

Por el otro lado del intercambiador de calor se utilizan gases de combustión para calentar el vapor de agua. De estos se tienen los siguientes datos:

- Corriente 7: Gases de combustión a $T_7 = 1000°C$
- Corriente 8: $T_8 = 400°C$

Considere la siguiente capacidad calorifica para los gases:

$$C_P = a_0 + a_1 T + a_2 T^2$$

Donde C_P esta en kJ/kg°C, T en celsius (°C). Con:

$$a_0 = 1.051; \quad a_1 = -7.75 \times 10^{-5}; \quad a_2 = 2.08 \times 10^{-8}$$

Calcule el flujo másico de gases de combustión en la corriente 7 en kg/s y la potencia de la turbina en MW.

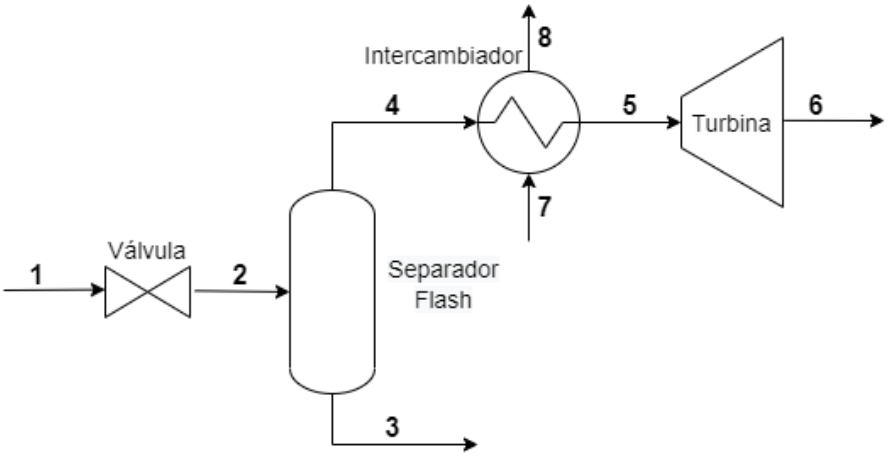


Figura 5.2: Proceso del problema 5.1.3

Solución

Primero se debe encontrar las entalpías de las corrientes:

Corriente 1:

Liquido saturado a $P_1 = 150$ bar $\longrightarrow h_1 = 1610.5$ kJ/kg

Corriente 2:

Como la válvula es isoentálpica $\longrightarrow h_2 = h_1 = 1610.5$ kJ/kg

Corriente 3:

Liquido saturado a $P_3 = P_2 = 50$ bar $\longrightarrow h_3 = 1154.2$ kJ/kg

Corriente 4:

Vapor saturado a $P_4 = P_2 = 50$ bar $\longrightarrow h_4 = 2794.3$ kJ/kg

Corriente 5:

$T_5 = 360°$C y $P_5 = P_4 = 50$ bar, luego interpolando $\longrightarrow h_5 = 3094.15$ kJ/kg y $s_5 = 6.49985$ kJ/kg $\cdot$ K

Corriente 6:

Primero se asume la turbina como isoentrópica, luego $s_{6s} = s_5 = 6.49985$ kJ/kg K. En 1 bar se ve que esta entropía esta entre liquido y vapor saturado. Luego se debe buscar la calidad ideal

$$x_{6s} = \frac{s_{6s} - s^L}{s^V - s^L} = \frac{6.49985 - 1.3026}{7.3594 - 1.3026} = 0.858 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

Luego para h_{6s}:

$$h_{6s} = (1 - x)h^L + x \cdot h^V = 0.142 \cdot 417.46 + 0.858 \cdot 2675.5 = 2354.86 \text{ kJ/kg}$$

Luego el trabajo ideal:

$$W_{\text{ideal}} = h_{6s} - h_5 = -739.29 \text{ kJ/kg}$$

Para el trabajo real:

$$W_{\text{real}} = \eta \cdot W_{\text{ideal}} = 0.85 \cdot -739.29 = -628.39 \text{ kJ/kg}$$

Para calcular la potencia se debe calcular el flujo másico que pasa por la turbina. Para esto se plantea un balance de materia y un balance de energía en el separador flash adiabático y estacionario:

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_4 + \dot{m}_3$$

$$\cancel{\frac{dU}{dt}}^{0} = \sum_{i=1}^{N} \dot{m}_i h_i + \cancel{\dot{Q}}^{0} + \cancel{\dot{W}_s}^{0} - P\cancel{\frac{dV}{dt}}^{0}$$

$$\implies \dot{m}_2 h_2 = \dot{m}_3 h_3 + \dot{m}_4 h_4$$

Combinando ambas ecuaciones y despejando $\dot{m}_4$:

$$\dot{m}_4 = \frac{\dot{m}_2(h_2 - h_3)}{(h_4 - h_3)} = \frac{100 \cdot (1610.5 - 1154.2)}{(2794.3 - 1154.2)} = 27.82 \text{ kg/s}$$

Luego para la potencia:

$$\dot{W}_{\text{real}} = \dot{m}_4 \cdot W_{\text{real}} = 27.82 \cdot -628.39 = 17482 \text{ kW} = 17.482 \text{ MW}$$

Para calcular el flujo másico de la corriente 7 se debe plantear un balance de energía en el intercambiador de calor:

$$\cancel{\frac{dU}{dt}}^{0} = \sum_{i=1}^{N} \dot{m}_i h_i + \cancel{\dot{Q}}^{0} + \cancel{\dot{W}_s}^{0} - P\cancel{\frac{dV}{dt}}^{0}$$

$$0 = \dot{m}_4(h_4 - h_5) + \dot{m}_7(h_7 - h_8) \implies \dot{m}_7 = \frac{\dot{m}_4(h_5 - h_4)}{h_7 - h_8}$$

Para calcular las entalpías de la corriente de combustión:

$$h_7 - h_8 = \int_{T_8}^{T_7} C_P dT = \int_{400}^{1000} (a_0 + a_1 T + a_2 T^2) dT$$

$$\int_{400}^{1000} (a_0 + a_1 T + a_2 T^2) dT = \left(a_0 T + a_1 \frac{T^2}{2} + a_2 \frac{T^3}{3} \right) \Bigg|_{400}^{1000}$$

$$1.051\cdot(1000-400)+-7.75\times10^{-5}\cdot(1000^2-400^2)+2.08\times10^{-8}\cdot(1000^3-400^3)=604.53\ \text{kJ/kg}$$

Luego:

$$\dot{m}_7=\frac{\dot{m}_4(h_5-h_4)}{h_7-h_8}=\frac{27.82\cdot(3094.15-2794.3)}{604.53}=13.8\ \text{kg/s}$$

Problema 5.1.4) Turbinas Paralelas

Se tiene un proceso que utiliza vapor de agua para generar trabajo (Figura 5.3. En este, dos corrientes; la corriente 1 que está a 500°C y 40 bar y la corriente 2 que esta a 600°C y 60 bar, entran a las turbinas T1 y T2 respectivamente. En ambas turbinas se expande el flujo hasta 1 bar (flujos 3 y 4). Luego, estos flujos son unidos en un mezclador adiabático, y salen en la corriente 5 como vapor saturado. La turbina 1 es completamente reversible y la turbina 2 tiene un 75 % de eficiencia. Considere que el flujo másico que pasa por la corriente 5 es $\dot{m}_5 = 100$ kg/min.

Determine:

a) La fase, las entalpías y entropías especificas de cada uno de los flujos.

b) El flujo másico que pasa por la corriente 1 y la corriente 2 respectivamente (en kg/min).

c) La potencia de cada una de las turbinas en kW.

d) La entropía generada en el proceso completo en kJ/K · min

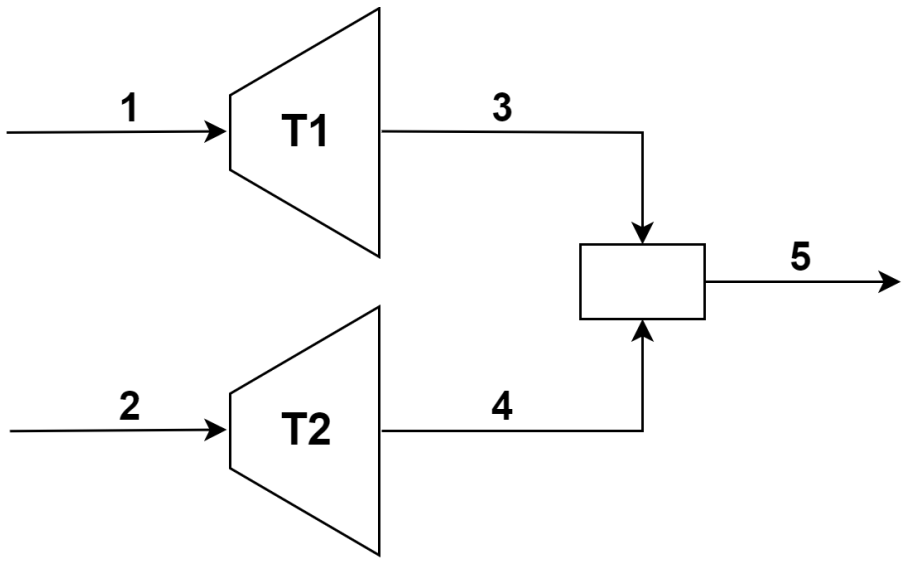


Figura 5.3: Proceso del problema 5.1.4

Solución:

a) Lo primero es caracterizar todas las corrientes:

Corriente 1: $T_1 = 500$°C y $P_1 = 40$ bar. Propiedades se obtienen de la Tabla A-4 de VSC

- $T_1 = 500°C$
- $P_1 = 40$ bar
- Fase = VSC
- $h_1 = 3445.3$ kJ/kg
- $s_1 = 7.0901$ kJ/kg K

Corriente 2: $T_2 = 600°C$ y $P_2 = 60$ bar. Propiedades se obtienen de la Tabla A-4 de VSC

- $T_2 = 600°C$
- $P_2 = 60$ bar
- Fase = VSC
- $h_2 = 3658.4$ kJ/kg
- $s_2 = 7.1677$ kJ/kg K

Corriente 3: Después de la turbina 1 con $\eta = 100\,\%$ y $P_3 = 1$ bar. Esto significa que es isoentrópica: $s_1 = s_3$. Esta entropía en 1 bar esta como mezcla liquido vapor. Sus propiedades se obtienen de la Tabla A-3. La calidad se obtiene por regla de la palanca:

$$s_3 = s_L + x(s_V - s_L) \longrightarrow x = \frac{s_3 - s_L}{s_V - s_L} = \frac{7.0901 - 1.3026}{7.3594 - 1.3026} = 0.9555$$

$$h_3 = h_L + x(h_V - h_L) = 2575.06$$

- $P_3 = 1$ bar
- $s_3 = s_1 = 7.0901$ kJ/kg K
- Fase = Liq-Vap
- $x = 0.9555$
- $h_3 = 2575.6$ kJ/kg

Corriente 4 ideal: Después de la turbina 2 y $P_4 = 1$ bar. Para la corriente ideal se asume que la turbina es isoentrópica (subindice s). Esto es $s_{4s} = s_2$. Esta entropía en 1 bar esta como mezcla liquido vapor. Sus propiedades se obtienen de la Tabla A-3. La calidad se obtiene por regla de la palanca:

$$s_4 = s_L + x_s(s_V - s_L) \longrightarrow x_s = \frac{s_4 - s_L}{s_V - s_L} = \frac{7.1677 - 1.3026}{7.3594 - 1.3026} = 0.9683$$

$$h_{4s} = h_L + x_s(h_V - h_L) = 2603.99$$

Corriente 4 real: Ahora se utilizará la eficiencia de 75 % para calcular la entalpía y entropía real:

$$\eta = \frac{W_{real}}{W_{ideal}} = \frac{h_4 - h_2}{h_{4s} - h_2} \longrightarrow h_4 = \eta(h_{4s} - h_2) + h_2 = 0.75 \cdot (2603.99 - 3658.4) + 3658.4 = 2867.6$$

Notar que esta entalpía es de VSC, por ende para la entropía se debe interpolar en la Tabla A-4 con h_4 y $P_4 = 1$:

$$\frac{7.8343 - 7.6597}{s_4 - 7.6597} = \frac{2875.3 - 2796.2}{2867.6.6 - 2796.2} \longrightarrow s_4 = 7.832$$

Entonces:

- $P_4 = 1$ bar
- Fase = VSC
- $h_3 = 2867.6$ kJ/kg
- $s_4 = 7.832$ kJ/kg K

Corriente 5: Como los mezcladores son isobáricos $P_5 = P_4 = P_3 = 1$ bar. Además es vapor saturado. Propiedades se obtienen de la Tabla A-3

- $P_5 = 1$ bar
- Fase = Vsat
- $h_5 = 2675.5$ kJ/kg
- $s_5 = 7.3594$ kJ/kg K

b) Para encontrar el flujo másico, se debe plantar un balance de materia y energía en el mezclador:

$$\dot{m}_3 + \dot{m}_4 = \dot{m}_5 = 100 \longrightarrow \dot{m}_3 = \dot{m}_5 - \dot{m}_4$$

Del balance de energía para un mezclador estacionario y adiabático, sin agitación:

$$\cancel{\frac{dU}{dt}}^{0} = \sum_{i=1}^{N} \dot{m}_i h_i + \cancel{\dot{Q}}^{0} + \cancel{\dot{W}_s}^{0} - P\cancel{\frac{dV}{dt}}^{0}$$

$$\Longrightarrow \dot{m}_3 h_3 + \dot{m}_4 h_4 = \dot{m}_5 h_5$$

Combinando:

$$(\dot{m}_5 - \dot{m}_4)h_3 + \dot{m}_4 h_4 = \dot{m}_5 h_5$$

Despejando el flujo 4:

$$\dot{m}_4 = \frac{\dot{m}_5(h_5 - h_3)}{h_4 - h_3} = \frac{100 \cdot (2675.5 - 2575.6)}{(2867.6 - 2575.6)} = 34.33 \text{ kg/min}$$

$$\dot{m}_3 = 100 - 34.33 = 65.67 \text{ kg/min}$$

Además $\dot{m}_1 = \dot{m}_3$ y $\dot{m}_2 = \dot{m}_4$.

c) Para la potencia de las turbinas se puede plantear un balance (aunque no es necesario ya que es bastante directo):

$$\cancelto{0}{\frac{dU}{dt}} = \sum_{i=1}^{N} \dot{m}_i h_i + \cancelto{0}{\dot{Q}} + \dot{W}_s - P\cancelto{0}{\frac{dV}{dt}}$$

O simplemente:

$$\dot{W}_s = \dot{m}(h_{out} - h_{in})$$

Luego para la turbina 1:

$$\dot{W}_1 = \dot{m}_1(h_3 - h_1) = 65.67(2575.6 - 3445.3) = -57145 \text{ kJ/min} = -952.4 \text{ kW}$$

Luego para la turbina 2:

$$\dot{W}_2 = \dot{m}_2(h_4 - h_2) = 34.33(2867.6 - 3658.4) = -27151 \text{ kJ/min} = -452.5 \text{ kW}$$

d) Para la entropía generada en el proceso se tienen 2 opciones:

Opción 1: Plantear el balance de entropía para cada equipo que genere entropía (turbina 2 y mezclador) y sumarlas. La turbina 1 no genera entropía ya que es reversible.

Luego del balance de entropía para la turbina 2, estacionaria y adiabática.

$$\cancelto{0}{\frac{dS}{dt}} = \sum_i \cancelto{0}{\frac{Q_i}{T_i}} + \sum_{\text{entra}} \dot{m}_e \hat{S}_e - \sum_{\text{sale}} \dot{m}_s \hat{S}_s + \dot{S}_{\text{gen}}$$

$$\implies \dot{S}_{\text{gen}} = \dot{m}_2(s_4 - s_2) = 34.33 \cdot (7.832 - 7.1677) = 22.832 \text{ kJ/K} \cdot \text{min}$$

Luego del balance de entropía para el mezclador, estacionario y adiabática.

$$\cancelto{0}{\frac{dS}{dt}} = \sum_i \cancelto{0}{\frac{Q_i}{T_i}} + \sum_{\text{entra}} \dot{m}_e \hat{S}_e - \sum_{\text{sale}} \dot{m}_s \hat{S}_s + \dot{S}_{\text{gen}}$$

$$\dot{S}_{\text{gen}} = \dot{m}_5 s_5 - \dot{m}_4 s_4 - \dot{m}_3 s_3 = 100 \times 7.3594 - 34.33 \times 7.832 - 65.67 \times 7.0901 = 1.433 \text{ kJ/K} \cdot \text{min}$$

Luego sumando ambas:

$$\dot{S}_{gen} = 22.832 + 1.433 = 24.265 \text{ kJ/K} \cdot \text{min}$$

Opción 2: Plantear el balance de entropía para el proceso completo tomando solo sus entradas y salidas globales:

Como en el proceso no adición de calor y es estacionario:

$$\cancel{\frac{dS}{dt}}^{0} = \cancel{\sum_i \frac{Q_i}{T_i}}^{0} + \sum_{\text{entra}} \dot{m}_e \hat{S}_e - \sum_{\text{sale}} \dot{m}_s \hat{S}_s + \dot{S}_{\text{gen}}$$

$$\dot{m}_1 s_1 + \dot{m}_2 s_2 - \dot{m}_5 s_5 + \dot{S}_{\text{gen}} = 0$$

$$\implies \dot{S}_{\text{gen}} = 100 \times 7.3594 - 65.67 \times 7.0901 - 34.33 \times 7.1677 = 24.265 \text{ kJ/K} \cdot \text{min}$$

Problema 5.1.5) Licuefacción de Linde 2

El proceso de licuefacción de gases es una operación en estado estacionario cuyo fin es llevar un gas a fase liquida. Considere el proceso denotado en la Figura 5.4 que corresponde a la licuefacción de Linde para formar nitrógeno liquido. En este:

- 100 kg/min de nitrógeno entra al proceso a 1 bar y 300 K
- El nitrógeno es enfriado en un intercambiador de de calor (HXA) hasta 135 K
- EL nitrógeno es comprimido desde 1 bar hasta 8 bar en un compresor (A) y luego desde 8 bar hasta 64 bar en un segundo compresor (B). Cada etapa de compresión tiene inmediatamente después un intercambiador de calor que enfría el nitrógeno hasta 135 K (HXB y HXC).
- El nitrógeno sobre calentado a 64 bar y 135K luego entra a un intercambiador (HXD) que enfría aun mas al nitrógeno.
- El nitrógeno luego entra a un separador flash adiabático (que separa liquido y vapor) que opera a 1 bar.
- La corriente de liquido saturado 1 bar que sale del separador flash se remueve como producto.
- El vapor saturado que sale del flash se usa como corriente de refrigeración en el intercambiador de calor HXD y sale a 120 K.
- Este vapor es luego recirculado hacia el intercambiador de calor HXA donde se mezcla con la alimentación fresca de nitrógeno.

Asumiendo que ambos compresores tienen una eficiencia de 80 % y utilizando el diagrama entalpía presión de nitrógeno se le pide:

a) Obtener el flujo másico de la corriente 2

b) Obtener la entalpía de todas las corrientes

c) Obtener la potencia neta que consume el proceso en los compresores en (kW), y el trabajo que consume el proceso por cada kg de nitrógeno liquido producido (en kJ/kg).

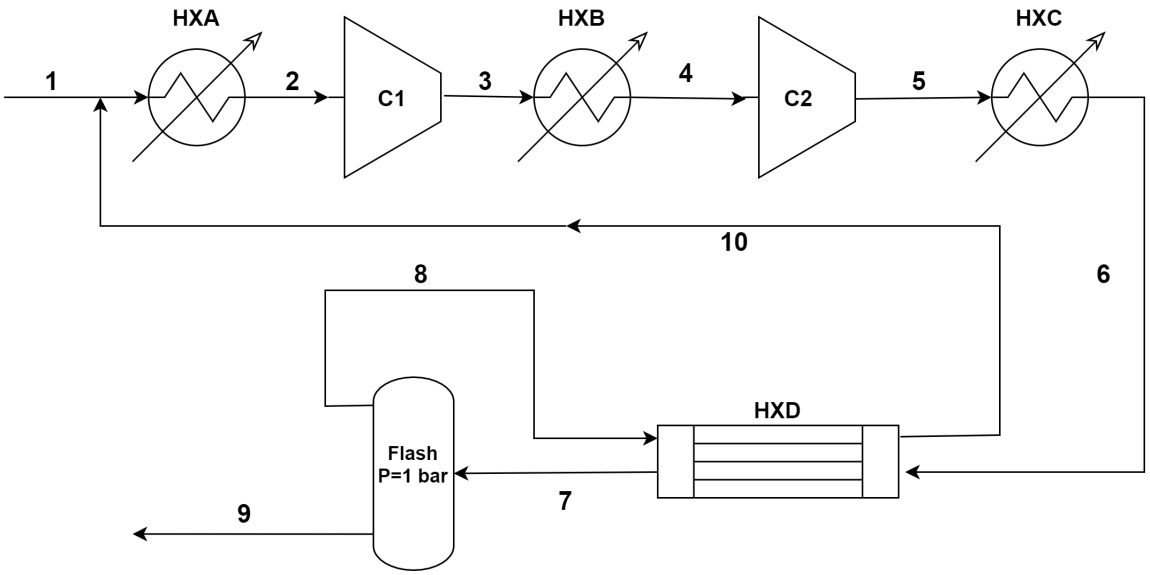


Figura 5.4: Diagrama del Proceso del Problema 5.1.5

Solución:

Corriente 1: Propiedades se obtienen del gráfico

- $T_1 = 300$ K
- $P_1 = 1$ bar
- $h_1 = 460$ kJ/kg
- $m_1 = 100$

Corriente 2: Post Intercambiador isobárico, propiedades se obtienen de grafico

- $T_2 = 135$ K
- $P_2 = 1$ bar
- $h_2 = 288$ kJ/kg

Corriente 3 ideal: Compresor isoentropico, para obtener sus propiedades se sigue por la linea de entropía constante hasta 8 bar.

- $s_3 = s_2$ (Se sigue linea de s cte)
- $P_3 = 8$ bar
- $h_{3s} = 410$ kJ/kg

Corriente 3 real: Compresor con 80 % de eficiencia, para obtener sus propiedades se utiliza la siguiente ecuacion:

$$\eta = \frac{h_{3s} - h_2}{h_3 - h_2} \longrightarrow h_3 = 440,5$$

- $P_3 = 8$ bar
- $h_3 = 440,5$ kJ/kg

Corriente 4: Post intercambiador B

- $T_4 = 135$ K
- $P_4 = 8$ bar
- $h_4 = 282$ kJ/kg

Corriente 5 ideal: Compresor isoentropico, para obtener sus propiedades se sigue por la linea de entropía constante hasta 64 bar.

- $s_5 = s_4$ (Se sigue linea de s cte)
- $P_5 = 64$ bar
- $h_{5s} = 390$ kJ/kg

Corriente 5 real: Compresor con 80 % de eficiencia, para obtener sus propiedades se utiliza la siguiente ecuacion:

$$\eta = \frac{h_{5s} - h_4}{h_5 - h_4} \longrightarrow h_5 = 417$$

- $s_5 = s_4$ (Se sigue linea de s cte)
- $P_5 = 64$ bar
- $h_5 = 417$ kJ/kg

Corriente 6: Post intercambiador C

- $T_6 = 135$ K
- $P_6 = 64$ bar
- $h_4 = 170$ kJ/kg

Corriente 7: Todavía no se puede caracterizar.

Corriente 8: Vapor saturado después del flash a 1 bar.

- Vapor saturado
- $P_8 = 1$ bar
- $h_8 = 227$ kJ/kg

Corriente 9: Liquido saturado despues del flash a 1 bar.

- Liquido saturado
- $P_9 = 1$ bar
- $h_9 = 28$ kJ/kg

Corriente 10: Salida por arriba del intercambiador D.

- $T_{10} = 120$ K
- $P_{10} = 1$ bar
- $h_{10} = 273$ kJ/kg

La corriente 7 se puede obtener al final una vez que se tengan las masas.
En primer lugar si se plantea un balance de masa a todo el sistema se obtiene que:

$$m_1 = m_9 = 100 \text{ kg/min}$$

Además se sabe que:

$$m_2 = m_1 + m_{10} = 100 + m_{10}$$

$$m_{10} = m_8$$

$$m_2 = m_3 = m_4 = m_5 = m_6 = m_7$$

Para obtener la masa de la corriente 10 y la corriente 2 se puede hacer un balance de energía alrededor del separador flash y el intercambiador HX D, como si este se tomase como un equipo. Luego:

$$m_6 \cdot h_6 - m_9 \cdot h_9 - m_{10} \cdot h_{10} = 0$$

$$m_6 \cdot 170 - 100 \cdot 28 - m_{10} \cdot 273 = 0$$

Pero $m_6 = m_2 = 100 + m_{10}$

$$(100 + m_{10}) \cdot 170 - 2800 - m_{10} \cdot 273 = 0$$

$$14200 = m_{10} \cdot 103 \longrightarrow m_{10} = 137,86$$

a) Luego $m_2 = 100 + 137,86 = 237,86$ kg/min

Como solo falta la entalpia 7, se puede hacer un balance de energia al intercambiador de calor HXD:

$$m_6 \cdot h_6 + m_8 \cdot h_8 - m_7 \cdot h_7 - m_{10} \cdot h_{10} = 0$$

Pero además, $m_6 = m_7$, $m_8 = m_{10}$

$$m_6 \cdot (h_6 - h_7) + m_8 \cdot (h_8 - h_{10}) = 0$$

$$237,86 \cdot (170 - h_7) + 137,86 \cdot (227 - 273) = 0$$

b) $h_7 = 143,3$ kJ/kg

Para el primer compresor, si se plantea el balance de energia:

$$m_2 \cdot h_2 - m_3 \cdot h_3 + W_s = 0$$

$$237,86 \cdot (288 - 440,5) + W_s = 0 \longrightarrow W_{s,A} = 36274 \text{ kJ/min}$$

Para el segundo compresor:

$$m_4 \cdot h_4 - m_5 \cdot h_5 + W_s = 0$$

$$237,86 \cdot (282 - 417) + W_s = 0 \longrightarrow W_{s,B} = 32111 \text{ kJ/min}$$

c) Finalmente para el trabajo total por cada kg de nitrógeno liquido producido se debe sumar los dos trabajos y luego dividir pro m_8:

$$\frac{W_{s,tot}}{m_8} = \frac{36274 + 32111}{137,86} = 496 \text{ kJ/kg}$$

5.2. Propuestos:

Problema 5.2.1) Válvula con Metano

Una corriente de metano liquido entra como liquido saturado 2 MPa a una válvula adiabática. La corriente sale a 0,6 MPa. Utilice el gráfico de presión entalpía del metano para calcular la calidad de salida.

Respuesta:

$x \approx 0.25$

Problema 5.2.2) Licuefacción de Metano

Se tiene un proceso de licuefacción de metano, dado en la Figura 5.5. En este la corriente 1 de $\dot{m}_1 = 50$ kg/min a 300K y 18 MPa entra a un intercambiador de calor donde se enfría hasta 220K (corriente 2). Este luego pasa por una válvula de expansión para posteriormente entrar a un separador flash que opera a 1 bar. El metano liquido (flujo 4) se retira como producto, y el metano gaseoso (flujo 5) se envía al intercambiador de calor para enfriar el flujo 1.

Determine:

a) Las presiones y entalpías especificas de todos los flujos

b) La cantidad de metano liquido (corriente 4) y gaseoso (corriente 6) en kg/min que se obtiene del proceso

c) El calor involucrado en el proceso del intercambiador de calor

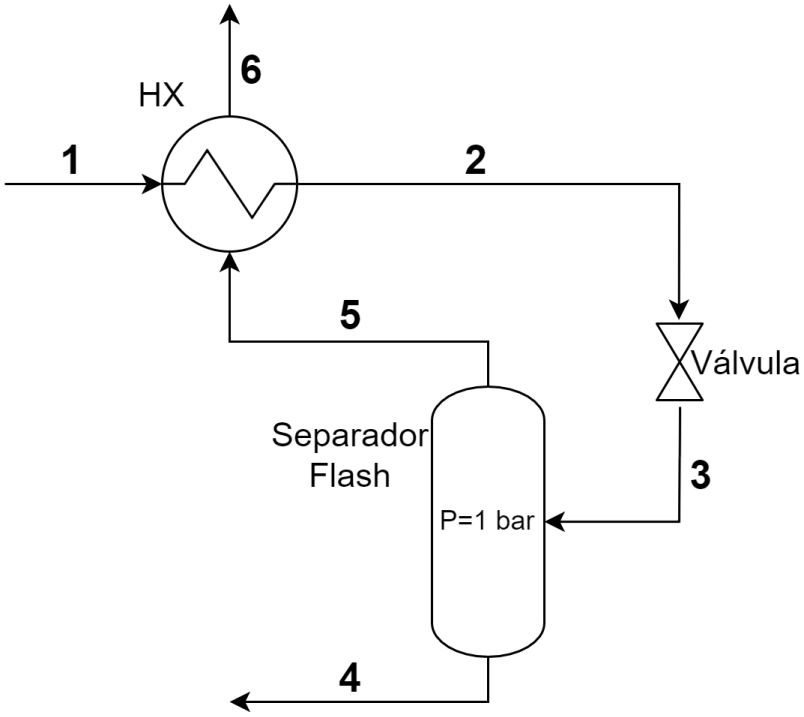


Figura 5.5: Proceso de Licuefacción de Metano

Respuesta:

a)

- $P_1 = 18$ MPa, $h_1 = 820$ kJ/kg
- $P_2 = 18$ MPa, $h_2 = 490$ kJ/kg
- $P_3 = 0.1$ MPa, $h_3 = 490$ kJ/kg
- $P_4 = 0.1$ MPa, $h_4 = 70$ kJ/kg
- $P_5 = 0.1$ MPa, $h_5 = 580$ kJ/kg
- $P_6 = 0.1$ MPa, $h_6 = 980$ kJ/kg

b) $\dot{m}_4 = 8.824$ kg/min, $\dot{m}_5 = 41.176$ kg/min

c) $\dot{Q} = 16500$ kJ/min

Problema 5.2.3) Ciclo Brayton

Se tiene un ciclo Brayton con regeneración, recalentamiento e *intercooling*, que utiliza 150 kg/s de aire ($C_P = 1.005$ kJ/kg $\cdot$ K y $\gamma = 1.4$) como fluido. En este, el aire entra a 17°C y 100 kPa al primer compresor (C1). Los 3 compresores tienen una razón de compresión de $\frac{P_{i+1}}{P_i} = 4$. Es decir la presión de salida es 4 veces la de entrada. Entre cada compresor hay un intercambiador de calor de enfriamiento (IC1 e IC2) que lleva la corriente devuelta a 17°C. Por otro lado, las turbinas tienen una razón de expansión de $\frac{P_i}{P_{i+1}} = 4$. Es decir, la presión de entrada es 4 veces la de salida. Antes de cada turbina hay un intercambiador de calor de calentamiento (RH1, RH2, RH3) que añade 300 kJ/kg cada uno al flujo de aire. Finalmente, el intercambiador HX se usa para calentar en 20°C el flujo que sale del compresor. Todas las turbinas y compresores son adiabáticas y 100 % eficientes. El aire se puede considerar como un gas ideal. Se le pide determinar:

a) La presión y temperatura de todas las corrientes en kPa y K.

b) La potencia de cada uno de los compresores y cada una de las turbinas en MW. Además calcular la Potencia Neta.

c) El calor total de entrada y el calor total de salida del proceso en MW.

d) La eficiencia térmica del proceso .

e) Realizar un diagrama T-S del proceso.

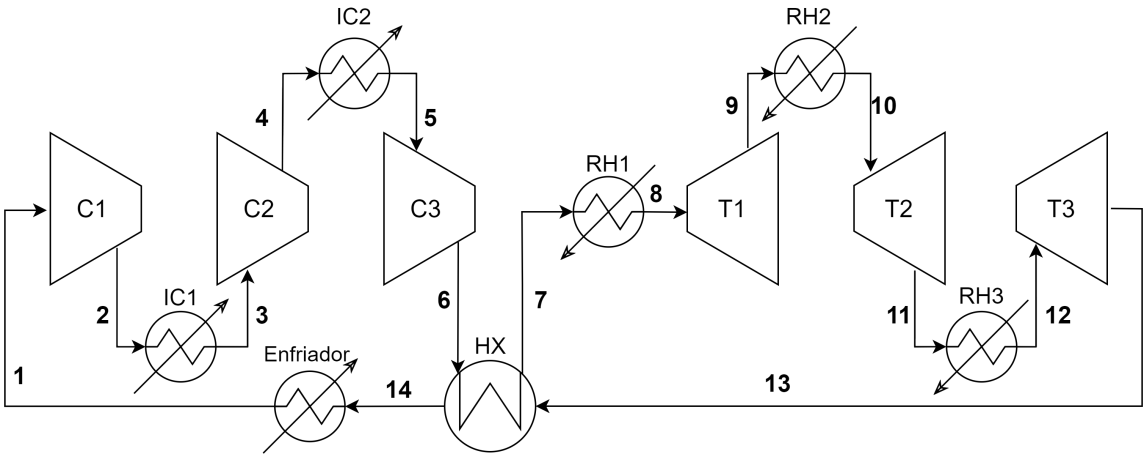


Figura 5.6: Ciclo Brayton con regeneración, recalentamiento e *intercooling*

Respuesta:

a)

- $P_1 = 100$ kPa, $T_1 = 290$ K
- $P_2 = 400$ kPa, $T_2 = 430.9$ K
- $P_3 = 400$ kPa, $T_3 = 290$ K
- $P_4 = 1600$ kPa, $T_4 = 430.9$ K
- $P_5 = 1600$ kPa, $T_5 = 290$ K
- $P_6 = 6400$ kPa, $T_6 = 430.9$ K
- $P_7 = 6400$ kPa, $T_7 = 450.9$ K
- $P_8 = 6400$ kPa, $T_8 = 749.4$ K
- $P_9 = 1600$ kPa, $T_9 = 504.3$ K
- $P_{10} = 1600$ kPa, $T_{10} = 802.8$ K
- $P_{11} = 400$ kPa, $T_{11} = 540.2$ K
- $P_{12} = 400$ kPa, $T_{12} = 838.7$ K
- $P_{13} = 100$ kPa, $T_{13} = 564.4$ K
- $P_{14} = 100$ kPa, $T_{14} = 544.4$ K

b)

- $\dot{W}_{C1} = 21.24$ MW
- $\dot{W}_{C2} = 21.24$ MW
- $\dot{W}_{C3} = 21.24$ MW
- $\dot{W}_{T1} = -36.95$ MW
- $\dot{W}_{T2} = -39.59$ MW
- $\dot{W}_{T3} = -41.35$ MW
- $\dot{W}_N = -54.16$ MW

c) $\dot{Q}_{in} = 135$ MW, $\dot{Q}_{out} = -80.83$ MW

d) $\eta = 40.1\,\%$

Capítulo 6

Ciclo Rankine

6.1. Problemas Resueltos

Problema 6.1.1) Rankine con Regeneración

Se tiene un ciclo Rankine con regeneración. En este 120 kg/s de vapor a 16 MPa y 560°C entra a la primera turbina. En esta el vapor es expandido hasta 4 MPa. Luego, una porción (y) de este flujo se dirige a un calentador cerrado mientras que el resto se expande en una segunda turbina hasta 0.3 MPa. A la salida de esta turbina, una parte del flujo (y') se envía a un intercambiador abierto mientras que la otra parte se expande en una tercera turbina hasta 8 kPa. Suponga que del condensador y del intercambiador abierto sale liquido saturado. Por otro lado la corriente 9 y 10 del intercambiador cerrado salen en equilibrio térmico, con la corriente 10 saliendo como liquido saturado. Considere que las turbinas y las bombas tienen una eficiencia de 85 %. Se le pide:

a) Determinar la entalpía de todas las corrientes

b) Determinar la potencia neta del ciclo.

c) Determinar cuanto calor se agrega en la caldera.

d) Determinar la eficiencia térmica del ciclo y comparar con la eficiencia de Carnot.

e) Realizar un diagrama T-S para el ciclo.

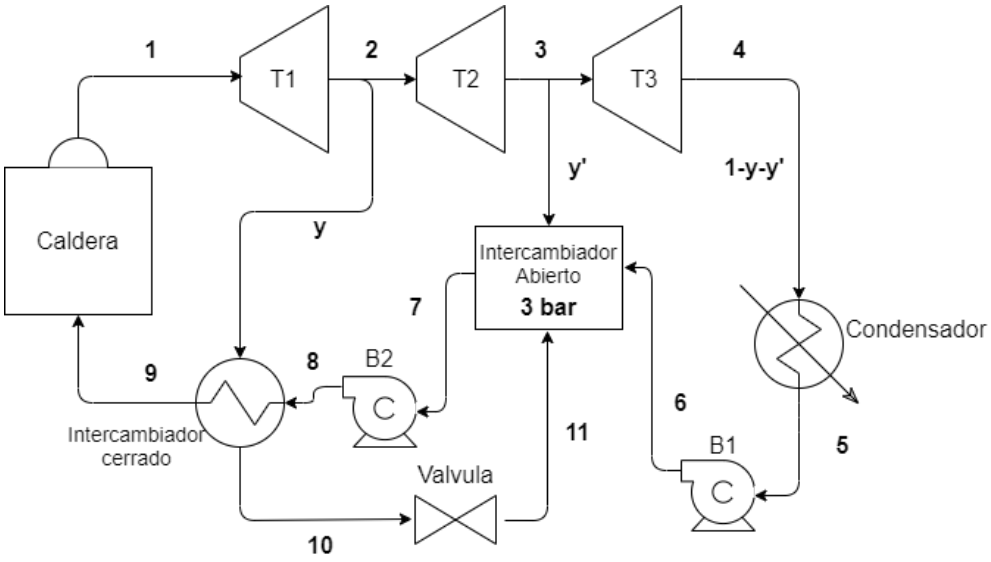


Figura 6.1: Ciclo Rankine con regeneración del problema 6.1.1

Solución

Lo primero es caracterizar todas las corrientes.

Corriente 1: Después de la caldera, las propiedades se obtienen de la tabla A-4. Como después viene una turbina se necesita la entalpía y entropía.

- $T_1 = 560°\text{C}$
- $P_1 = 160$ bar
- $h_1 = 3465.4$ kJ/kg
- $s_1 = 6.5132$ kJ/kg $\cdot$ K

Corriente 2 ideal: Salida de la primera turbina. Para la entalpía ideal se toma la turbina como isoentrópica. Propiedades se obtienen interpolando de la tabla A-4.

- $P_2 = 40$ bar
- $s_{2s} = s_1 = 6.5132$ kJ/kg $\cdot$ K
- $h_{2s} = 3050.86$ kJ/kg

Corriente 2 real: Salida de la primera turbina. Para la entalpía y entropía real se utiliza la eficiencia 0.85 %. La entropía se obtiene interpolando la tabla A-4.

$$\eta = 0.85 = \frac{h_2 - h_1}{h_{2s} - h_1} \longrightarrow h_2 = 0.85 \cdot (3050.86 - 3465.4) + 3465.4 = 3113.04$$

- $P_2 = 40$ bar
- $h_2 = 3113.04$ kJ/kg
- $s_2 = 6.6147$ kJ/kg $\cdot$ K

Corriente 3 ideal: Salida de la 2da turbina. Para la calidad y entalpía ideal se toma la turbina como isoentrópica. Propiedades se obtienen de la tabla A-3

- $P_3 = 3$ bar

- $s_{3s} = s_2 = 6.6147$ kJ/kg $\cdot$ K
- $x_{2s} = 0.929$
- $h_{3s} = 2571.86$ kJ/kg

Corriente 3 real: Salida de la 2da turbina. Para la calidad, entalpía y entropía real se utiliza la eficiencia. Los datos se obtienen de la tabla A-3.

$$\eta = 0.85 = \frac{h_3 - h_2}{h_{3s} - h_2} \longrightarrow h_3 = 0.85 \cdot (2571.86 - 3113.04) + 3113.04 = 2653.04$$

- $P_3 = 3$ bar
- $h_3 = 2653.04$ kJ/kg
- $x_3 = 0.967$
- $s_3 = 6.8143$ kJ/kg $\cdot$ K

Corriente 4 ideal: Salida de la 3ra turbina. Para la calidad y la entalpía ideal se toma la turbina como isoentrópica. Propiedades se obtienen de la tabla A-3.

- $P_4 = 0.08$ bar
- $s_{4s} = s_3 = 6.8143$ kJ/kg $\cdot$ K
- $x_{4s} = 0.815$
- $h_{4s} = 2131.87$ kJ/kg

Corriente 4 real: Salida de la 3ra turbina. Para la fase real y la entalpía real se utiliza la eficiencia. Propiedades se obtienen de la tabla A-3.

$$\eta = \frac{h_4 - h_3}{h_{4s} - h_3} \longrightarrow h_4 = 2210.04$$

- $P_4 = 0.08$ bar
- $h_4 = 2210.04$ kJ/kg
- $x_4 = 0.847$ (VSC)
- $s_4 = 7.0627$ kJ/kg $\cdot$ K

Corriente 5: Salida del condensador. Como el siguiente equipo es una bomba se necesita el volumen. Propiedades se obtienen de la tabla A-3.

- Liquido saturado
- $P_5 = P_4 = 0.08$ bar
- $h_5 = 173.88$ kJ/kg
- $v_5 = 1.0084 \times 10^{-3}$ m^3/kg

Corriente 6 ideal: Salida de la 1ra bomba asumiendo que es isoentrópica. Esta sube la presión hasta 3 bar que es la operación del intercambiador abierto. Para la entalpía ideal se usa la aproximación de bombas ideales:

$$h_{6s} = h_5 + w_{b1} = h_5 + v_5 \cdot (P_6 - P_5) = 174.17$$

- $P_6 = P_3 = 3$ bar
- $h_{6s} = 174.17$ kJ/kg

Corriente 6 real: Para la entalpía real se utiliza la eficiencia.

$$\eta = \frac{h_{6s} - h_5}{h_6 - h_5} \longrightarrow h_6 = \frac{h_{6s} - h_5}{\eta} + h_5 = 174.23$$

- $P_6 = 3$ bar
- $h_{6s} = 174.23$ kJ/kg

Corriente 7: Salida del calentador abierto como liquido saturado. Como el siguiente equipo es una bomba se necesita el volumen. Propiedades se obtienen de la tabla A-3.

- Liquido saturado
- $P_7 = P_6 = 3$ bar
- $h_7 = 561.47$ kJ/kg
- $v_7 = 1.0732 \times 10^{-3}$ m^3/mol

Corriente 8 ideal: Salida de la 2da bomba asumiendo que es isoentrópica.. Esta sube la presión hasta 160 bar que es la presión de la caldera. Para la entalpía se usa la aproximación de bombas ideales:

$$h_{8s} = h_7 + w_{b2} = h_7 + v_7 \cdot (P_8 - P_7) = 578.32$$

- $P_8 = 160$ bar
- $h_8 = 578.32$ kJ/kg

Corriente 8 real: Para la entalpía real se utiliza la eficiencia.

$$\eta = \frac{h_{8s} - h_7}{h_8 - h_7} \longrightarrow h_8 = \frac{h_{8s} - h_7}{\eta} + h_7 = 581.29$$

- $P_8 = 160$ bar
- $h_8 = 581.29$ kJ/kg

Por simplicidad es mas fácil caracterizar primero la corriente 10:

Corriente 10: Salida vertical del intercambiador cerrado. Liquido saturado a 40 bar. Propiedades se obtienen de la tabla A-3.

- Liquido saturado
- $P_{10} = P_2 = 40$ bar
- $T_{10} = T(\text{Liq sat@40bar}) = 250.4°\text{C}$
- $h_{10} = 1087.3$ kJ/kg

Corriente 9: Salida horizontal del intercambiador cerrado. Esta sale en equilibrio térmico con la corriente 10. Entalpía se obtiene de la tabla A-5:

- $P_9 = P_8 = 160$ bar
- $T_9 = T_{10} = 250.4$ °C

- $h_9 = 1087$ kJ/kg

Corriente 11: Salida horizontal de la válvula isoentálpica:

- $P_{11} = P_6 = 3$ bar
- $h_{11} = h_{10} = 1087.3$ kJ/kg

a) Luego se obtuvo todas las entalpías de las corrientes.

b) Para determinar la potencia neto del ciclo primero se debe determinar el valor de y e y'. Para el calculo de y se puede realizar un balance de energía en el intercambiador cerrado:

$$\cancel{\frac{dU}{dt}}^{0} = \sum_{i=1}^{N} \dot{m}_i h_i + \cancel{\dot{Q}}^{0} + \cancel{\dot{W}_s}^{0} - P\cancel{\frac{dV}{dt}}^{0}$$

$$\implies 0 = y(h_2 - h_{10}) + (h_8 - h_9)$$

$$\implies y = \frac{h_9 - h_8}{h_2 - h_{10}} = 0.2496$$

Luego para determinar y' se hace un balance de energía en el intercambiador abierto

$$\cancel{\frac{dU}{dt}}^{0} = \sum_{i=1}^{N} \dot{m}_i h_i + \cancel{\dot{Q}}^{0} + \cancel{\dot{W}_s}^{0} - P\cancel{\frac{dV}{dt}}^{0}$$

$$\implies y' \cdot h_3 + y \cdot h_{11} + (1 - y - y') \cdot h_6 - h_7 = 0$$

$$\implies y' = \frac{h_7 + y \cdot (h_6 - h_{11}) - h_6}{h_3 - h_6} = 0.06427$$

Finalmente para la potencia de cada turbina y bomba:

- $\dot{W}_{t1} = \dot{m}(h_2 - h_1) = 120 \cdot (3113.04 - 3464.4) = -42283$ kW
- $\dot{W}_{t2} = \dot{m}(1 - y)(h_3 - h_2) = 120 \cdot (1 - 0.2496) \cdot (2653.04 - 3113.04) = -41420$ kW
- $\dot{W}_{t3} = \dot{m}(1 - y - y')(h_4 - h_3) = 120 \cdot (1 - 0.2496 - 0.06427) \cdot (2210.04 - 2653.04) = -36472$ kW
- $\dot{W}_{b1} = \dot{m}(1 - y - y')(h_6 - h_5) = 28.52$ kW
- $\dot{W}_{b2} = \dot{m}(h_8 - h_7) = 2378.7$ kW

Luego la potencia total y potencia neta:

$$\dot{W}_T = \sum_i \dot{W}_{t,i} = -120175 \text{ kW} = -120.18 \text{ MW}$$

$$\dot{W}_B = \sum_i \dot{W}_{b,i} = 2407.24 \text{ kW} = 2.407 \text{ MW}$$

$$\dot{W}_{\text{neto}} = \dot{W}_T + \dot{W}_B = -117.77 \text{ MW}$$

c) Para el calor en la caldera se realiza un balance de energía en esta:

$$\cancelto{0}{\frac{dU}{dt}} = \sum_{i=1}^{N} \dot{m}_i h_i + \dot{Q} + \cancelto{0}{\dot{W}_s} - P\cancelto{0}{\frac{dV}{dt}}$$

$$\implies \dot{Q}_{in} = \dot{m}(h_1 - h_9) = 285408 \text{ kW} = 285.408 \text{ MW}$$

d) Para la eficiencia térmica:

$$\eta = 100 \times \frac{|W_{\text{neto}}|}{Q_{in}} = 100 \times \frac{177.77}{285.408} = 41.3\,\%$$

Para la eficiencia de Carnot, se utiliza la temperatura de la caldera (560°C=833.15K) y la temperatura del condensador (41.51°C=314.66 K).

$$\eta_C = 100 \times \left(1 - \frac{T_L}{T_H}\right) = 100 \times \left(1 - \frac{314.66}{833.15}\right) = 62.2\,\%$$

Es decir se alcanza un $\eta/\eta_C = 66.3\,\%$ de la eficiencia máxima.

e) Por ultimo el diagrama del ciclo:

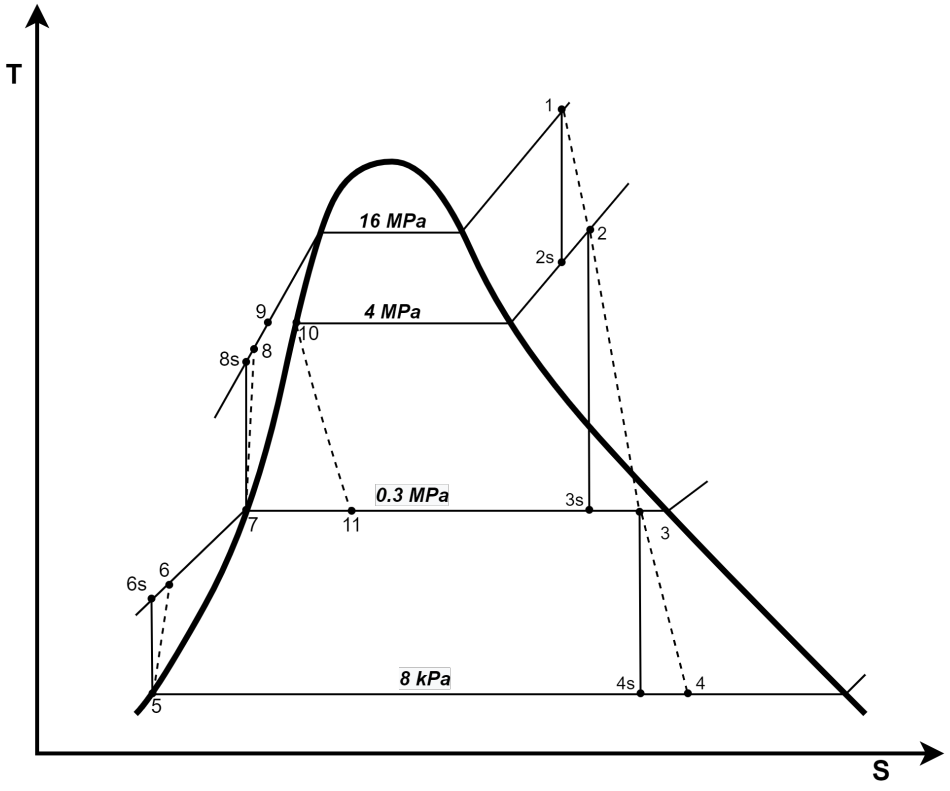


Figura 6.2: Diagrama T-S del Ciclo Rankine con regeneración del problema 6.1.1

Problema 6.1.2) Rankine con Recalentamiento y Regeneración

Se tiene un ciclo Rankine con recalentamiento y regeneración. En este vapor a 32 MPa y 600°C entra a la primera turbina. En esta el vapor es expandido hasta 8 MPa. Luego, una porción (y') de este flujo se dirige a un calentador cerrado (N°2), y la otra porción se recalienta hasta 560 °C antes de entrar a la segunda turbina. En esta el flujo se expande hasta 1 MPa. De este flujo una porción (y") se dirige a un calentador cerrado (N°1) y la otra porción se expande en una tercera turbina hasta 0.15 MPa. El flujo que sale de la tercera turbina se divide en dos partes, una parte (y"') se dirige a un calentador abierto que opera a 0.15 MPa y el resto se expande en una cuarta turbina hasta 6 kPa. Se sabe que tanto como en el condensador como en el intercambiador abierto el flujo sale como liquido saturado. Además los flujos que se utilizan como medio calefactor para los calentadores cerrados salen como liquido saturado (flujos 15 y 12). Considere que en ambos intercambiadores cerrados se alcanza el equilibrio térmico entre las corrientes. Considere que las turbinas tienen una eficiencia de 85 % y las bombas operan isoentropicamente. Se le pide:

a) Determinar la entalpía de todas las corrientes

b) Determinar la eficiencia del ciclo y compararla con la eficiencia de Carnot.

c) Calcular el flujo másico que entra a la primera turbina si la potencia neta de la planta es 500 MW.

d) Realizar un diagrama T-S para el ciclo

Hint: Utilice una aproximación o extrapolación pertinente para las corrientes de liquido sub-enfriado si es que el dato no se encuentra en la tabla.

Nota 1: El intercambiador cerrado 1 que recibe 5 corrientes funciona de la siguiente manera. La corriente horizontal (10 a 11) es un tubo que no se mezcla con las otras corrientes. Las corrientes 16 e y' se mezclan por fuera del tubo en una carcasa y salen por la corriente 12.

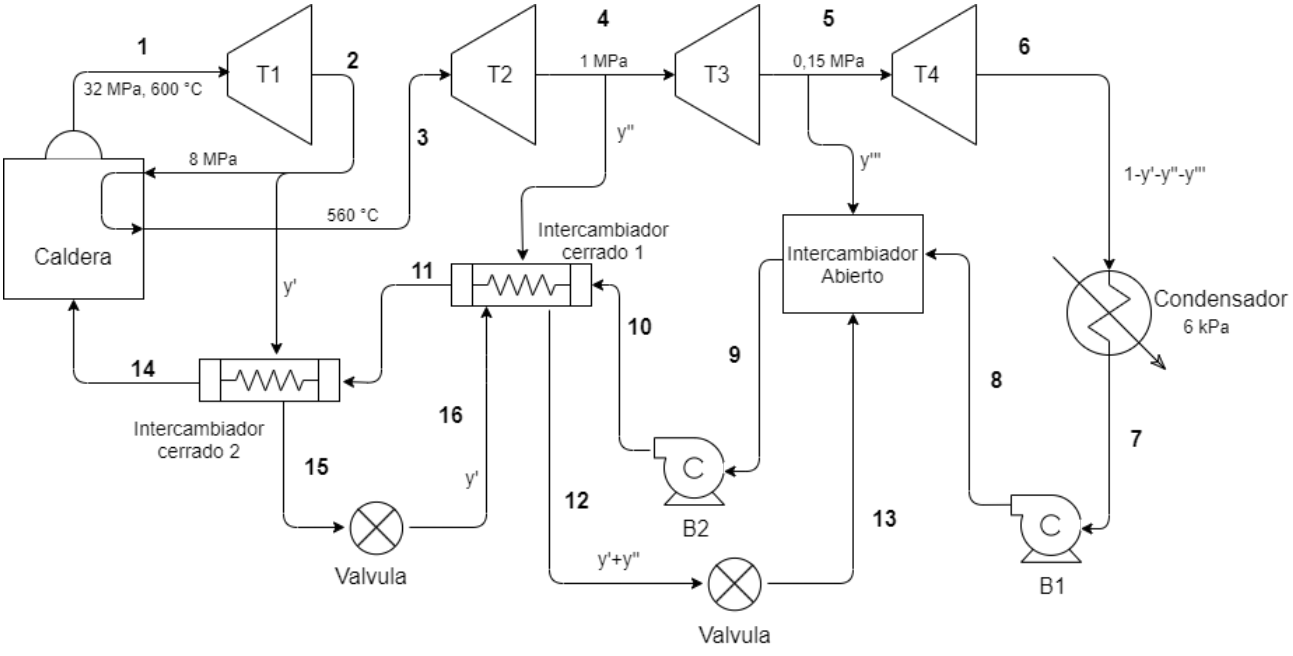


Figura 6.3: Ciclo Rankine con Regeneración y Recalentamiento

Solución

Lo primero es caracterizar todas las corrientes.

Corriente 1: Después de la caldera, las propiedades se obtienen de la tabla A-4. Como después viene una turbina se necesita la entalpía y entropía.

- $T_1 = 600°\text{C}$
- $P_1 = 320$ bar
- $h_1 = 3424.6$ kJ/kg
- $s_1 = 6.1858$ kJ/kg $\cdot$ K

Corriente 2 ideal: Salida de la primera turbina. Para la entalpía ideal se toma la turbina como isoentrópica. Propiedades se obtienen interpolando de la tabla A-4.

- $P_2 = 80$ bar
- $s_{2s} = s_1 = 6.1858$ kJ/kg $\cdot$ K
- $h_{2s} = 3022.3$ kJ/kg

Corriente 2 real: Salida de la primera turbina. Para la entalpía y entropía real se utiliza la eficiencia 85 %.

$$\eta = 0.85 = \frac{h_2 - h_1}{h_{2s} - h_1} \longrightarrow h_2 = \eta(3022.3 - 3424.6) + 3424.6 = 3082.7$$

- $P_3 = 80$ bar
- $h_2 = 3082.7$ kJ/kg

Corriente 3: Salida de recalentamiento con la caldera. Como después viene viene una turbina se necesita la entalpía y entropía. Propiedades se obtienen de la tabla A-4

- $T_3 = 560°\text{C}$
- $P_3 = P_2 = 80$ bar
- $h_3 = 3545.3$ kJ/kg
- $s_3 = 6.9072$ kJ/kg $\cdot$ K

Corriente 4 ideal: Salida de la 2da turbina. Para la entalpía ideal se toma la turbina como isoentrópica. Propiedades se obtienen de la tabla A-4

- $P_4 = 10$ bar
- $s_{4s} = s_3 = 6.9072$ kJ/kg $\cdot$ K
- $h_{4s} = 2934$ kJ/kg

Corriente 4 real: Salida de la 2da turbina. Para la entalpía y entropía real se utiliza la eficiencia. La entropía se obtiene interpolando la tabla A-4.

$$\eta = 0.85 = \frac{h_4 - h_3}{h_{4s} - h_4} \longrightarrow h_4 = 0.85 \cdot (2934 - 3545.53) + 3545.3 = 3025.77$$

- $P_4 = 10$ bar
- $h_4 = 3025.7$ kJ/kg

- $s_4 = 7.077$ kJ/kg $\cdot$ K

Corriente 5 ideal: Salida de la 3ra turbina. Para la calidad y la entalpía ideal se toma la turbina como isoentrópica. Propiedades se obtienen de la tabla A-3.

- $P_5 = 1.5$ bar
- $s_{5s} = s_4 = 7.077$ kJ/kg $\cdot$ K
- $x_{5s} = 0.975$
- $h_{5s} = 2637.5$ kJ/kg

Corriente 5 real: Salida de la 3ra turbina. Para la fase real y la entalpía real se utiliza la eficiencia. La entropía se obtiene interpolando la tabla A-4.

$$\eta = \frac{h_5 - h_4}{h_{5s} - h_4} \longrightarrow h_5 = 2695.7$$

- $P_5 = 1.5$ bar
- $h_5 = 2695.7$ kJ/kg
- $x_5 = 1$ (VSC)
- $s_5 = 7.2287$ kJ/kg $\cdot$ K

Corriente 6 ideal: Salida de la 4ta turbina. Para la calidad y la entalpía ideal se toma la turbina como isoentrópica. Propiedades se obtienen de la tabla A-3.

- $P_6 = 0.06$ bar
- $s_{6s} = s_5 = 7.2287$ kJ/kg $\cdot$ K
- $x_{6s} = 0.859$
- $h_{6s} = 2226.6$ kJ/kg

Corriente 6 real: Salida de la 4ta turbina. Para la calidad real y la entalpía real se utiliza la eficiencia. Propiedades se obtienen de la tabla A-3.

$$\eta = \frac{h_6 - h_5}{h_{6s} - h_5} \longrightarrow h_6 = 2297$$

- $P_6 = 0.06$ bar
- $h_6 = 2297$ kJ/kg
- $x_6 = 0.888$

Corriente 7: Salida del condensador. Como el siguiente equipo es una bomba se necesita el volumen. Propiedades se obtienen de la tabla A-3.

- Liquido saturado
- $P_7 = P_6 = 0.06$ bar
- $T_7 = 36.16$ °C
- $h_7 = 151.53$ kJ/kg
- $v_7 = 1.0064 \times 10^{-3}$ m^3/kg

Corriente 8: Salida de la 1ra bomba. Esta sube la presión hasta 1.5 bar que es la operación del intercambiador abierto. Para la entalpía se usa la aproximación de bombas:

$$h_8 = h_7 + w_{b1} = h_7 + v_7 \cdot (P_8 - P_7) = 151.67$$

- $P_8 = 1.5$ bar
- $h_8 = 151.67$ kJ/kg

Corriente 9: Salida del calentador abierto como liquido saturado. Como el siguiente equipo es una bomba se necesita el volumen. Propiedades se obtienen de la tabla A-3.

- Liquido saturado
- $P_9 = P_8 1.5$ bar
- $h_9 = 467.1$ kJ/kg
- $v_9 = 1.0528 \times 10^{-3}$

Corriente 10: Salida de la 2da bomba. Esta sube la presión hasta 320 bar. Para la entalpía se usa la aproximación de bombas:

$$h_{10} = h_9 + w_{b2} = h_9 + v_9 \cdot (P_{10} - P_9) = 500.6$$

- $P_{10} = 320$ bar
- $h_{10} = 500.6$ kJ/kg

Por simplicidad es mas fácil caracterizar primero la corriente 12:

Corriente 12: Salida vertical del primer intercambiador cerrado. Liquido saturado. Propiedades se obtienen de la tabla A-3.

- Liquido saturado
- $P_{12} = P_4 = 10$ bar
- $T_{12} = T(\text{Liq sat@10bar}) = 179.9°\text{C}$
- $h_{12} = 762.8$ kJ/kg

Corriente 11: Salida horizontal del primer intercambiador cerrado. Esta sale en equilibrio térmico con la corriente 12.

- $P_{11} = P_{10} = 320$ bar
- $T_{11} = T_{12} = 179.9$ °C

Ahora hay un problema pues este valor de entalpía no esta en las tablas. Para este valor de entalpía hay muchas formas en que se podría estimar. La mejor forma es utilizar la aproximación de liquido incompresible desde un punto con la misma temperatura y la presión mas cercano. El punto mas cercano en a 320 bar en las tablas con 180 °C es 300 bar.

- T = 180 °C
- P = 300 bar
- h = 780.57 kJ7kg
- v = 1.11×10^{-3} m^3/kg

Luego para aproximar la entalpía:

$$h_{11} = h(@T = 180, P = 300) + v(@T = 180, P = 300) \cdot (320 - 300) \cdot 100 = 782.8$$

Corriente 13: Salida de la válvula isoentálpica.

- $P_{13} = 1,5$ bar
- $h_{13} = h_{12} = 762.8$ kJ/kg
- $x_{13} = 0.133$

Por simplicidad es mas fácil caracterizar primero la corriente 15:

Corriente 15: Salida vertical del segundo intercambiador cerrado. Liquido saturado.Propiedades se obtienen de la tabla A-3.

- Liquido saturado
- $P_{15} = P_2 = 80$ bar
- $T_{15} = 295.1$ °C
- $h_{15} = 1316.6$ kJ/kg

Corriente 14: Salida horizontal del segundo intercambiador cerrado.

- $P_{14} = P_{11} = 320$ bar
- $T_{14} = T_{15} = 295.1$ °C

Al igual que antes hay un problema pues este valor no esta en las tablas. Realizando un procedimiento similar a antes se obtiene que $h_{14} = 1307.8$

Corriente 16: Salida de la válvula

- $P_{16} = 10$ bar
- $h_{16} = h_{15} = 1316.6$ kJ/kg
- $x_{16} = 0.275$

a) Luego se obtuvo todas las entalpías de las corrientes.

b) Para determinar la eficiencia del ciclo se debe determinar el trabajo de todas las turbinas y bombas y además el calor que entra en la caldera. Para determinar estos valores se necesita antes calcular y', y" e y"'.

Primero para determinar y' se hace un balance de energía en el segundo intercambiador cerrado:

$$\cancel{\frac{dU}{dt}}^{0} = \sum_{i=1}^{N} \dot{m}_i h_i + \cancel{\dot{Q}}^{0} + \cancel{\dot{W}_s}^{0} - P\cancel{\frac{dV}{dt}}^{0}$$

$$\implies y' \cdot h_2 + h_{11} = y' \cdot h_{15} + h_{14}$$

$$\Longrightarrow y' = \frac{h_{14} - h_{11}}{h_2 - h_{15}} = 0.2973$$

Luego para determinar y" se hace un balance de energía en el primer intercambiador cerrado:

$$\cancelto{0}{\frac{dU}{dt}} = \sum_{i=1}^{N} \dot{m}_i h_i + \cancelto{0}{\dot{Q}} + \cancelto{0}{\dot{W}_s} - P\cancelto{0}{\frac{dV}{dt}}$$

$$\Longrightarrow y'' \cdot h_4 + y' \cdot h_{16} + h_{10} = (y' + y'') \cdot h_{12} + h_{11}$$

$$\Longrightarrow y'' = \frac{h_{11} + y' \cdot (h_{12} - h_{16}) - h_{10}}{h_4 - h_{12}} = 0.0519$$

Finalmente para determinar y"' se hace un balance de energía en el calentador abierto:

$$\cancelto{0}{\frac{dU}{dt}} = \sum_{i=1}^{N} \dot{m}_i h_i + \cancelto{0}{\dot{Q}} + \cancelto{0}{\dot{W}_s} - P\cancelto{0}{\frac{dV}{dt}}$$

$$\Longrightarrow y''' \cdot h_5 + (1 - y' - y'' - y''') \cdot h_8 + (y' + y'') \cdot h_{13} = h_9$$

$$\Longrightarrow y''' = \frac{h_9 - (y' + y'') \cdot h_{13} - (1 - y' - y'') \cdot h_8}{h_5 - h_8} = 0.0401$$

Ahora para cada trabajo:

- $w_{t1} = h_2 - h_1 = -341.9$ kJ/kg
- $w_{t2} = (1 - y')(h_4 - h_3) = -365.2$ kJ/kg
- $w_{t3} = (1 - y' - y'')(h_5 - h_4) = -214.8$ kJ/kg
- $w_{t4} = (1 - y' - y'' - y''')(h_6 - h_5) = -243.5$ kJ/kg
- $w_{b1} = (1 - y' - y'' - y''')(h_8 - h_7) = 0.0885$ kJ/kg
- $w_{b2} = h_{10} - h_9 = 33.5$ kJ/kg

Para el trabajo total:

$$w_T = \sum_i w_{t,i} = -1165,3\text{kJ/kg}$$

$$w_B = \sum_i w_{b,i} = 33,6 \text{ kJ/kg}$$

Para el calor que entra en la caldera se debe considerar ambas pasadas por esta.

- $q_{in,1} = h_1 - h_{14} = 2116.8$
- $q_{in,2} = (1 - y')(h_3 - h_2) = 325.1$

$$q_{In} = \sum_i q_{in,i} = 2441.92 \text{ kJ/kg}$$

Finalmente la eficiencia es:

$$\eta = \frac{-(w_T + w_B)}{q_{In}} = 0.463$$

Para compararla con la eficiencia de Carnot se debe ver la temperatura de operación de la caldera (600°C =873.15 K) y el condensador (36.16 °C = 309.31 K).

$$\eta_C = 1 - \frac{T_L}{T_H} = 0.645$$

Es decir se llega a un $\eta/\eta_C = 72\,\%$ de la eficiencia máxima.

c) Para calcular el flujo másico:

$$W_{Neto} = \dot{m} \cdot w_{Neto}$$

Donde:

$$w_{Neto} = w_T + w_B = -1140.1 \text{ kJ/kg}$$

Luego:

$$W_{Neto} = -500 \times 10^3 = \dot{m} \cdot w_{Neto} \longrightarrow \dot{m} = 441.8 \text{ kg/s} = 1.579 \times 10^6 \text{ kg/h}$$

d) El diagrama del ciclo es el siguiente:

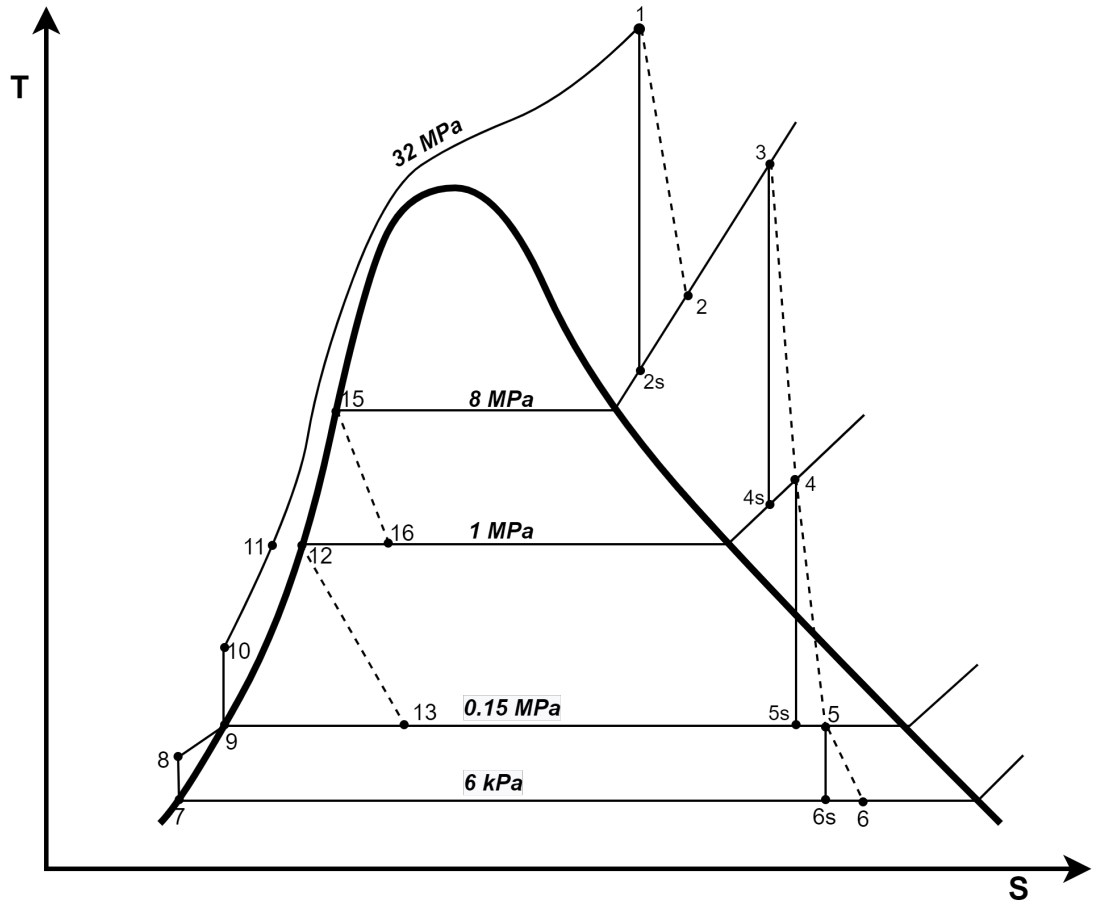


Figura 6.4: Diagrama T-S del problema 6.1.2

6.2. Propuestos

Problema 6.2.1) Ciclo Combinado

Se tiene un ciclo combinado de aire-vapor, que se muestra en la Figura 6.5. El ciclo superior opera con aire mientras que el inferior opera con agua. En este arreglo, primero el aire a 20°C y 1 bar entra a un compresor (C1), donde se eleva la presión hasta 4.46 bar. Luego, el aire es calentado en un quemador donde se transfiere un calor ($\dot{Q}_1$) hasta que el aire llega a 732.04°C. Posteriormente el aire entra a una turbina (T1) donde es nuevamente expandido hasta 1 bar. Parte de este trabajo se utilizara para potenciar el compresor, mientras que la otra parte se utilizara para producir electricidad en el generador.

Luego, la corriente de salida de la T1, se envía a la caldera del segundo ciclo, donde junto a un calor de combustión $\dot{Q}_2 = 26.5$ MW, generan 13.3 kg/s vapor a 440 °C y 40 bar. El aire abandona la caldera a 200°C. El vapor de agua luego entra a una turbina T2. En esta, una parte del flujo (12.5 kg/s) es expandido hasta solamente 5 bar y luego es purgado fuera del proceso. El remanente se expande hasta 0.06 bar y luego es enviado al condensador. Liquido saturado abandona el condensador para luego ser mezclado con un flujo de agua liquida a 20 °C ($h_{10} = 83.89$ kJ/kg) para compensar la purga. Finalmente esta mezcla, que se sabe que tiene un volumen especifico de $V_{11} = 0.001006$ m^3/kg, pasa a una bomba para ser enviado devuelta a la caldera.

Se sabe que la turbina 1 y el compresor 1 del ciclo de aire tienen una eficiencia de 85 % y 90 % respectivamente. Por otro lado, la turbina 2 y la bomba 1 del ciclo de vapor son completamente reversibles. Considerando el aire como un gas ideal con $\gamma = 1.4$ y $C_P = 1.005$ kJ/kg K y las tablas de vapor y/o gráfica T-S para la obtener las propiedades del agua, determine:

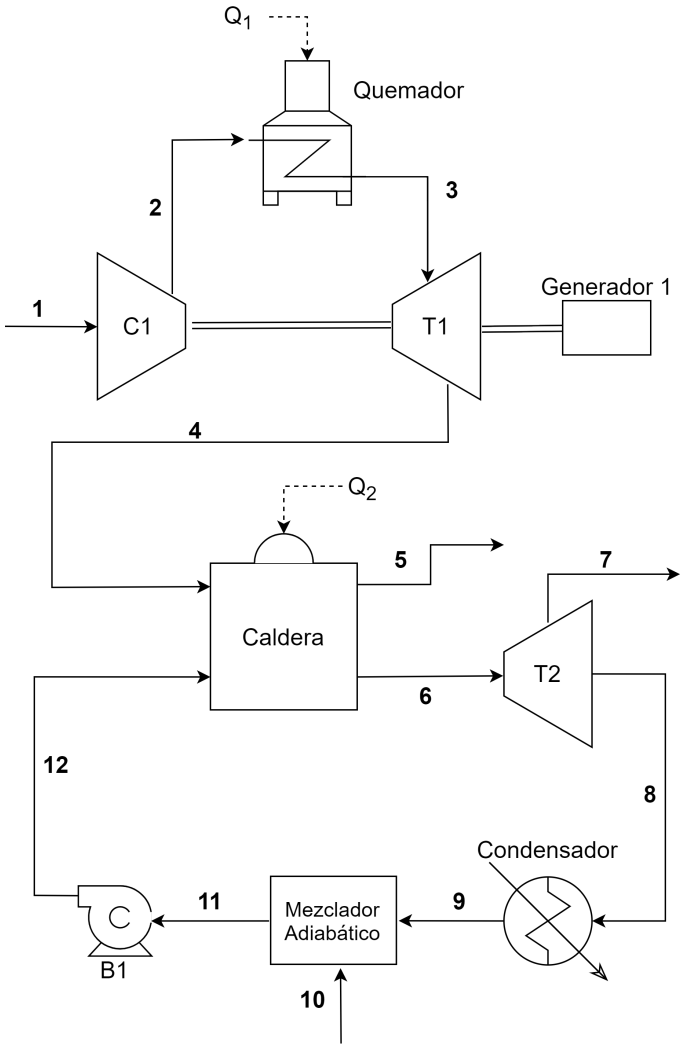


Figura 6.5: Ciclo de potencia combinado

a) La presión de todas las corrientes, las temperaturas para las corrientes de aire y las entalpías especificas para las corrientes de vapor.

b) El Flujo másico de aire que circula por compresor [kg/s].

c) La potencia consumida por el compresor (C1), la producida por la turbina de gas (T1) y la que recibe el generador [MW].

d) Potencia generada por la turbina de vapor [MW] y la consumida por la bomba [kW].

e) Calor que se añade en el quemador ($\dot{Q}_1$) [MW] y el retirado en el condensador.

f) Eficiencia del ciclo de aire [%], la eficiencia del ciclo de vapor [%] y la eficiencia del ciclo combinado [%].

Respuesta:

a) Aire:

- $P_1 = 1$ bar, $T_1 = 293.15$ K
- $P_2 = 4.46$ bar, $T_2 = 466.38$ K
- $P_3 = 4.46$ bar, $T_3 = 1005.19$ K
- $P_4 = 1$ bar, $T_4 = 708.15$ K
- $P_5 = 1$ bar, $T_5 = 473.15$ K

Agua:

- $P_6 = 40$ bar, $T_6 = 440$°C, $h_6 = 3307.1$ kJ/kg
- $P_7 = 5$ bar, $h_7 = 2785.19$ kJ/kg
- $P_8 = 0.06$ bar, $h_8 = 2126.19$ kJ/kg
- $P_9 = 0.06$ bar, $h_8 = 151.53$ kJ/kg
- $P_{10} = 0.06$ bar, $h_{10} = 83.89$ kJ/kg
- $P_{11} = 0.06$ bar, $h_{11} = 87.96$ kJ/kg
- $P_{12} = 40$ bar, $h_{12} = 91.98$ kJ/kg

b) $\dot{m}_4 = 68.85$ kg/s

c) $\dot{W}_{C1} = 12.01$ MW, $\dot{W}_{T1} = -20.55$ MW, $\dot{W}_{Gen} = -8.54$ MW

d) $\dot{W}_{T2} = -7.47$ MW, $\dot{W}_{B1} = 53.47$ kW

e) $\dot{Q}_1 = 37.26$ MW, $\dot{Q}_{cond} = -1.58$ MW

f) $\eta_{\text{air}} = 22.9\,\%$, $\eta_{\text{water}} = 17.3\,\%$, $\eta_T = 25\,\%$

Problema 6.2.2) Rankine con Recalentamiento y Regeneración 2

Se tiene un ciclo Rankine con recalentamiento y regeneración, dado en la Figura 6.6. En este, vapor a 70 bar y 425°C sale de la caldera. Parte de esta vapor se envía a la primera turbina donde se expande hasta 7 bar. La otra fracción (y) se envía a un intercambiador de calor cerrado, donde se condensa hasta líquido saturado. El vapor que sale de la primera turbina se envía a un separador flash. El vapor saturado que sale del separador flash (F3) se envía a recalentar al intercambiador de calor hasta 280°C, antes de entrar a la segunda turbina. Por otro lado, el liquido saturado del separador (F10) entra a un mezclador adiabático (intercambiador abierto). La segunda turbina expande el vapor hasta 0.07 bar, el que luego se envía al condensador. En este, el flujo es condensado hasta líquido saturado para luego pasar por una bomba antes de ser enviado al mezclador adiabático. Considere que las turbinas tienen una eficiencia de 88 % y que las bombas son completamente reversibles. Si se sabe que la planta tiene una potencia neta de 1465 MW, se le pide:

a) Determinar la presión y entalpía especifica de todas las corrientes.

b) Calcular el flujo másico que pasa por la caldera (kg/s).

c) Calcular la potencia de cada una de las turbinas y bombas en MW.

d) Calcular la cantidad de calor que se añade en la caldera en MW

e) Determinar eficiencia térmica del ciclo y compararla con la eficiencia de Carnot

f) Realizar un diagrama T-S para el ciclo.

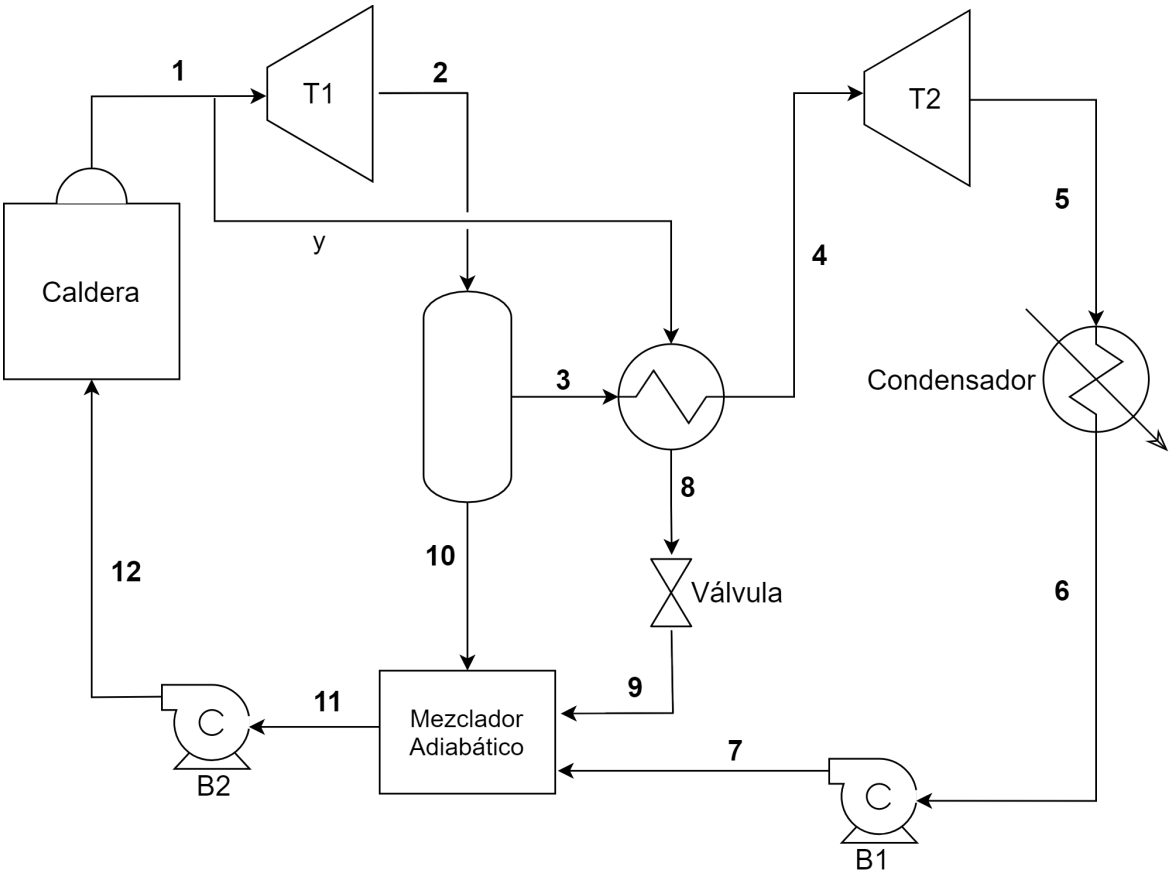


Figura 6.6: Ciclo Rankine con Recalentamiento

Respuesta:

a)

- $P_1 = 70$ bar, $h_1 = 3224.69$ kJ/kg
- $P_2 = 7$ bar, $h_2 = 2756.3$ kJ/kg
- $P_3 = 7$ bar, $h_3 = 2763.5$ kJ/kg
- $P_4 = 7$ bar, $h_4 = 3017.1$ kJ/kg
- $P_5 = 0.07$ bar, $h_5 = 2288.06$ kJ/kg
- $P_6 = 0.07$ bar, $h_6 = 162.71$ kJ/kg
- $P_7 = 7$ bar, $h_7 = 163.40$ kJ/kg
- $P_8 = 70$ bar, $h_8 = 1267.0$ kJ/kg
- $P_9 = 7$ bar, $h_9 = 1267.0$ kJ/kg
- $P_{10} = 7$ bar, $h_{10} = 697.22$ kJ/kg
- $P_{11} = 7$ bar, $h_{11} = 291.17$ kJ/kg
- $P_{12} = 70$ bar, $h_{12} = 297.62$ kJ/kg

b)$\dot{m}_T = 1393.59$ kg/s

c) $\dot{W}_{T1} = -599.96$ MW, $\dot{W}_{T2} = -930.56$ MW, $\dot{W}_{B1} = 0.891$ MW, $\dot{W}_{B2} = 9.325$ MW

d) $\dot{Q}_{in} = 4233.16$ MW

e) $\eta = 34.6\,\%$ y $\eta_C = 55.3\,\%$.

Capítulo 7

Ciclo de Refrigeración y Bomba de Calor

7.1. Problemas Resueltos

Problema 7.1.1) Bomba de Calor 1

Considere una bomba de calor que se usa para calentar un reservorio a 30°C extrayendo calor de un reservorio a 5°C. Este extrae 11 kW de calor del reservorio frió y el compresor utiliza 2 kW. ¿Cuál es el cociente entre el COP de la bomba de calor y el COP si esta operara como Carnot? Es decir $\frac{\text{COP}_{\text{Real}}}{\text{COP}_{\text{Carnot}}}$

Solución

El COP de la bomba de calor si esta fuera ideal/operara como Carnot es:

$$\text{COP}_{\text{Carnot}} = \frac{T_H}{T_C - T_C}$$

Donde T_H es el reservorio caliente y T_C es el reservorio frío. ¡Recordar pasar la temperatura a Kelvin! Luego:

$$\text{COP}_{\text{Carnot}} = \frac{T_H}{T_C - T_C} = \frac{303}{303 - 278} = 12.12$$

El COP real de la bomba de calor esta dado por:

$$\text{COP}_{\text{Real}} = \frac{|\dot{Q}_{\text{out}}|}{\dot{W}_C}$$

Donde W_C es la suma de todos los trabajos que entran al ciclo por medio de compresores. Para calcular el calor que sale se debe plantear la primera ley para un ciclo cerrado:

$$\dot{Q} + \dot{W} = \cancelto{0}{\Delta U}$$
$$\implies \dot{Q}_{\text{in}} + \dot{Q}_{\text{out}} + W_C = 0$$

$$\Longrightarrow Q_{\text{out}} = -W_C - Q_{\text{in}} = -2 - 11 = -13 \text{ kW}$$

Luego:

$$\text{COP}_{\text{Real}} = \frac{|\dot{Q}_{\text{out}}|}{\dot{W}_C} = \frac{13}{2} = 6.5$$

$$\frac{\text{COP}_{\text{Real}}}{\text{COP}_{\text{Carnot}}} = \frac{6.5}{12.12} = 0.536$$

Problema 7.1.2) Ciclo de refrigeración en Cascada

Considere un ciclo de refrigeración en 2 etapas como el de la figura 7.1. Este utiliza amoniaco como fluido de servicio. En este vapor saturado a -30°C abandona el evaporador. En el primer compresor se comprime el refrigerante hasta 5.5 bar. Considere que vapor saturado entra al segundo compresor y este es comprimido hasta 18 bar. Por otro lado, se sabe que liquido saturado entra a ambas válvulas. La eficiencia de los compresores es 85 %. Además el evaporador tiene una capacidad de refrigeración de 30 tons (1 ton = 3.517 kW). Considere que no existen caídas de presión por fricción en el condensador ni el evaporador. Se le pide:

a) Determinar la entalpía de todas las corrientes.

b) Calcular el flujo másico de la corriente 1 en kg/min.

c) Calcular el flujo másico de la corriente 3 en kg/min.

d) Calcular el COP del ciclo de refrigeración.

e) Denotar el ciclo en un diagrama T-S.

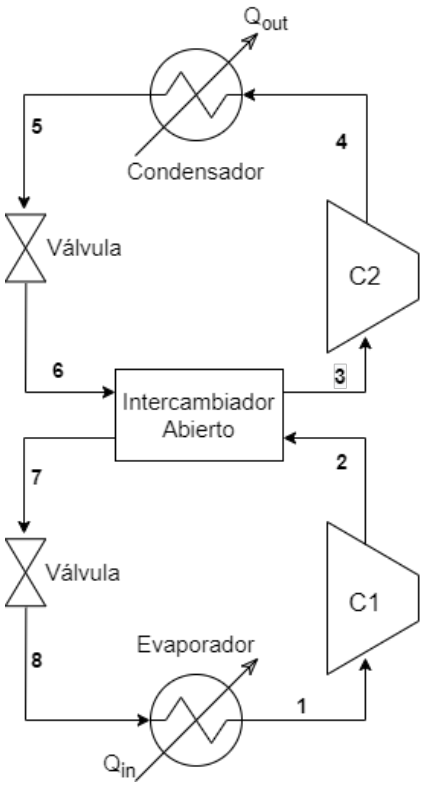


Figura 7.1: Ciclo de Refrigeración en 2 etapas del problema 7.1.2

Solución

Lo primero es caracterizar todas las corrientes:

Corriente 1: Después del evaporador, propiedades se obtienen de la tabla A-13.

- Vapor saturado
- $T_1 = -30°\text{C}$
- $P_1 = 1.195$ bar
- $h_1 = 1403.75$ kJ/kg
- $s_1 = 5.7767$ kJ/kg $\cdot$ K

Corriente 2 ideal: Salida del primer compresor. Para la entalpía ideal se toma el compresor como isoentrópico.

- $P_2 = 5.5$ bar
- $s_{2s} = s_1 = 5.7767$ kJ/kg $\cdot$ K
- $h_{2s} = 1615.15$ kJ/kg

Corriente 2 real: Salida del primer compresor. Para la entalpía real se utiliza la eficiencia.

$$\eta = 0.85 = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1} \longrightarrow h_2 = \frac{h_{2s} - h_1}{\eta} + h_1 = 1652.5$$

- $P_2 = 5.5$ bar
- $h_2 = 1652.5$ kJ/kg

Corriente 3: Entrada al segundo compresor. Vapor saturado a la presión del intercambiador abierto. Propiedades se obtienen de la tabla A-13.

- Vapor saturado.
- $P_3 = P_2 = 5.5$ bar
- $h_3 = 1448.8$ kJ/kg
- $s_3 = 5.243$ kJ/kg $\cdot$ K

Corriente 4 ideal: Salida del segundo compresor. Para la entalpía ideal se toma el compresor como isoentrópico.

- $P_4 = 18$ bar
- $s_{4s} = s_3 = 5.243$ kJ/kg $\cdot$ K
- $h_{4s} = 1619.4$ kJ/kg

Corriente 4 real: Salida del segundo compresor. Para la entalpía real se utiliza la eficiencia.

$$\eta = 0.85 = \frac{h_{4s} - h_3}{h_4 - h_3} \longrightarrow h_4 = \frac{h_{4s} - h_3}{\eta} + h_3 = 1649.5$$

- $P_4 = 18$ bar
- $h_4 = 1649.5$ kJ/kg

Corriente 5: Salida del condensador en dirección a la válvula como liquido saturado

- Líquido Saturado
- $P_5 = P_4 = 18$ bar
- $h_5 = 398$ kJ/kg

Corriente 6: Salida de la válvula isoentálpica.

- $P_6 = P_2 = 5.5$ bar
- $h_6 = h_5 = 398$ kJ/kg

Corriente 7: Salida del intercambiador abierto en dirección a la válvula.

- Liquido Saturado.
- $P_7 = P_2 = 5.5$ bar
- $h_7 = 211.65$ kJ/kg

Corriente 8: Salida de la válvula en dirección al evaporador.

- $P_8 = P_1 = 1.195$ bar
- $h_8 = h_7 = 211.65$ kJ/kg

a) Luego se obtuvo la entalpía de todas las corrientes.

b) Para calcular el flujo másico de la corriente 1 en kg/s se hace un balance de energía en el evaporador.

$$\cancel{\frac{dU}{dt}}^{0} = \sum_{i=1}^{N} \dot{m}_i h_i + \dot{Q} + \cancel{\dot{W}_s}^{0} - P\cancel{\frac{dV}{dt}}^{0}$$

$$\implies \dot{m}_1(h_1 - h_8) = \dot{Q}$$

$$\implies \dot{m}_1 = \frac{\dot{Q}}{h_1 - h_8} = \frac{30 \cdot 3.517}{1403.75 - 211.65} = 0.08851 \text{ kg/s} = 5.31 \text{ kg/min}$$

c) Para calcular el flujo másico de la corriente 3 se debe hacer un balance de energía en el intercambiador abierto.

$$\cancel{\frac{dU}{dt}}^{0} = \sum_{i=1}^{N} \dot{m}_i h_i + \cancel{\dot{Q}}^{0} + \cancel{\dot{W}_s}^{0} - P\cancel{\frac{dV}{dt}}^{0}$$

$$\implies 0 = \dot{m}_1(h_2 - h_7) + \dot{m}_3(h_6 - h_3)$$

$$\implies \dot{m}_3 = \frac{\dot{m}_1(h_2 - h_7)}{(h_3 - h_6)} = \frac{5.31 \cdot (1652.5 - 211.65)}{1448.8 - 398} = 7.28 \text{ kg/min}$$

d) Para calcular el COP se debe calcular la potencia de los compresores:

- $\dot{W}_{c,1} = \dot{m}_1(h_2 - h_1) = 0.08851 \cdot (1652.5 - 1403.75) = 22.012$ kW

- $\dot{W}_{c,2} = \dot{m}_2(h_4 - h_3) = 0.121 \cdot (1649.5 - 1448.8) = 24.355$ kW

Luego:

$$\dot{W}_C = \dot{W}_{c,1} + \dot{W}_{c,2} = 46.367 \text{ kW}$$

Finalmente para el COP:

$$\text{COP} = \frac{\dot{Q}_{\text{in}}}{W_C} = \frac{303.517}{46.367} = 2.276$$

7.2. Propuestos

Problema 7.2.1) Rankine con Refrigeración

Se tiene un ciclo de Rankine estándar que opera con agua como fluido de proceso. En este, el condensador se ha reemplazado por un intercambiador de calor que cumple la misma función (Figura 7.2. El ciclo Rankine esta acoplado con un ciclo de refrigeración estándar que utiliza 9000 kg/min de un refrigerante X, donde el evaporador corresponde justamente al intercambiador de calor. Se sabe que el ciclo de refrigeración tiene un COP=3.2. Por otro lado, la caldera genera 1000 kg/min de vapor de agua a 40 bar y 440°C. También, se sabe que el agua abandona el intercambiador de calor como líquido saturado. Por último, se sabe que el flujo 7 tiene una entalpía de 500 kJ/kg. Considere que la turbina tiene una eficiencia de 80 % y el resto de los equipos son completamente eficientes. En base a esto se le pide determinar:

a) La entalpía específica de cada una de las corrientes.

b) La potencia de la turbina, de la bomba y el compresor en MW. Además determinar el calor de la caldera, el del condensador y el intercambiado en el IdC en MW.

c) La eficiencia del ciclo Rankine.

d) El diagrama T-S para el ciclo Rankine y para el ciclo de Refrigeración

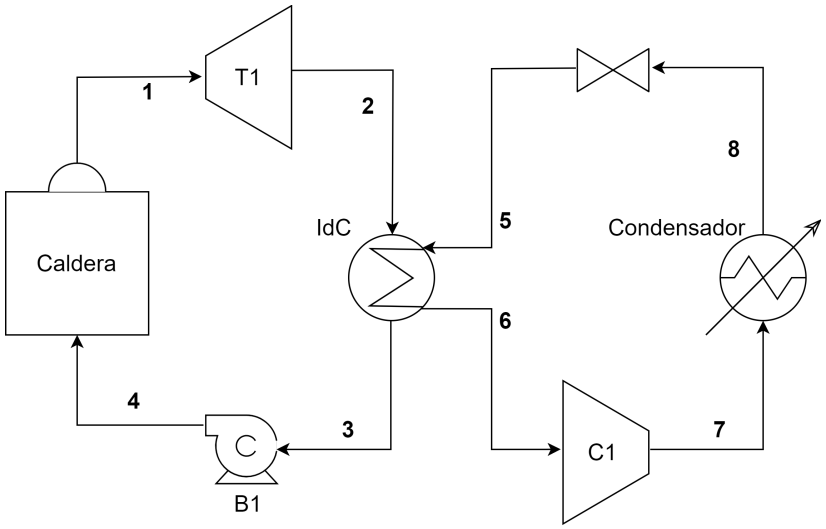


Figura 7.2: Ciclo de Rankine con Refrigeración

Respuesta:

a)

- $P_1 = 40$ bar, $h_1 = 3307.1$ kJ/kg
- $P_2 = 0.4$ bar, $h_2 = 2556.96$ kJ/kg
- $P_3 = 0.4$ bar, $h_3 = 317.58$ kJ/kg
- $P_4 = 40$ bar, $h_4 = 321.65$ kJ/kg
- $h_5 = 173.42$ kJ/kg
- $h_6 = 422.24$ kJ/kg
- $h_7 = 500$ kJ/kg
- $h_8 = 173.42$ kJ/kg

b) $\dot{W}_T = -12.5$ MW, $\dot{W}_B = 0.06775$ MW, $\dot{W}_C = 11.66$ MW, $\dot{Q}_{Cald} = 49.76$ MW, $\dot{Q}_{IdC} = 37.32$ MW, $\dot{Q}_{Cond} = -48.98$ MW

c) $\eta = 24.98\,\%$