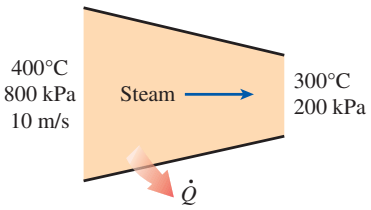
FIS1523 ⋆ Termodinámica
✓ **Ayudante:** *Sebastián Urrutia Quiroga*
✓ **Correo:** sgurruti@uc.cl
✓ **Página Web:** www.sgurruti.cl/termo

Ayudantía ⋆ Sistemas de flujo estacionario

1. A una boquilla entra vapor a 400° C y 800 kPa con una velocidad de 10 m/s, y sale por la boquilla a 300° C y 200 kPa mientras pierde calor a una tasa de 25 kW. Para un área de entrada de 800 cm^2, determine la velocidad y el caudal del vapor a la salida de la boquilla.



Solución:

Para resolver este problema, supondremos que:

- Es un proceso a flujo constante dado que no hay cambios en el tiempo
- Los cambios en la energía potential son despreciables
- No hay interacciones mediante trabajo

El balance de energía para un sistema de flujo constante puede ser expresado de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}
\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} &= \cancelto{0}{\Delta \dot{E}_{sistema}} \quad \text{(pues estamos en régimen permanente)} \\
\dot{E}_{in} &= \dot{E}_{out} \\
\dot{m}\left(h_1 + \frac{{V_1}^2}{2}\right) &= \dot{m}\left(h_2 + \frac{{V_2}^2}{2}\right) + \dot{Q}_{out} \\
h_1 + \frac{{V_1}^2}{2} &= h_2 + \frac{{V_2}^2}{2} + \frac{\dot{Q}_{out}}{\dot{m}}
\end{aligned}$$

donde V_i corresponde a la velocidad del fluido en el $i-$ésimo punto. De la *Tabla de Agua Sobrecalentada*, las propiedades del vapor a la entrada y a la salida de la boquilla son:

$$\left.\begin{aligned} P_1 &= 800\,\text{kPa} \\ T_1 &= 400^\circ\,\text{C} \end{aligned}\right\} \begin{aligned} v_1 &= 0.38429\,\text{m}^3/\text{kg} \\ h_1 &= 3267.7\,\text{kJ/kg} \end{aligned}$$

$$\left.\begin{aligned} P_2 &= 200\,\text{kPa} \\ T_2 &= 300^\circ\,\text{C} \end{aligned}\right\} \begin{aligned} v_2 &= 1.31623\,\text{m}^3/\text{kg} \\ h_2 &= 3072.1\,\text{kJ/kg} \end{aligned}$$

La tasa de flujo de masa viene dada por:

$$\dot{m} = \frac{A_1 V_1}{v_1} = \frac{(0.08\,\mathrm{m}^2)(10\,\mathrm{m/s})}{(0.38429\,\mathrm{m}^3/\mathrm{kg})} = 2.082\,\mathrm{kg/s}$$

Sustituyendo,

$$\begin{aligned} 3267.7\,\mathrm{kJ/kg} + \frac{(10\,\mathrm{m/s})}{2}\left(\frac{1\,\mathrm{kJ/kg}}{1000\,\mathrm{m}^2/\mathrm{s}^2}\right) &= 3072.1\,\mathrm{kJ/kg} + \frac{{V_2}^2}{2}\left(\frac{1\,\mathrm{kJ/kg}}{1000\,\mathrm{m}^2/\mathrm{s}^2}\right) + \frac{25\,\mathrm{kJ/s}}{2.082\,\mathrm{kg/s}} \\ V_2 &= 606\,\mathrm{m/s} \end{aligned}$$

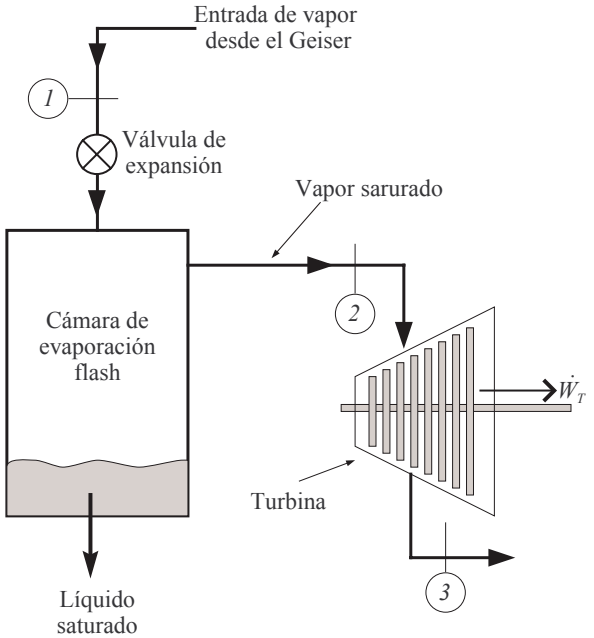
El caudal (volumen por unidad de tiempo) a la salida de la boquilla es:

$$\dot{\mathcal{V}}_2 = \dot{m} v_2 = (2.082\,\mathrm{kg/s})(1.31623\,\mathrm{m}^3/\mathrm{kg}) = 2.74\,\mathrm{m}^3/\mathrm{s}$$

■

2. Se propone el uso de una fuente geotérmica de agua (digamos, un *Geiser*), para generar electricidad por medio de una turbina de vapor. El diseño propuesto es el de la figura. Agua a alta presión $P_1 = 5.0\,\mathrm{MPa}$ y $T_1 = 180^\circ\,\mathrm{C}$ pasa a través de una válvula de expansión (proceso de Joule-Thomson, que mantiene la entalpía constante) a una cámara de evaporación *"flash"* que forma una mezcla saturada vapor-agua a 400 kPa. El líquido se deshecha, y el vapor entra a la turbina, saliendo a una presión de 10 kPa y una calidad del 90 %. Si queremos que la turbina produzca 1 MW de potencia, calcule el flujo de agua geotermal requerido.

Ayuda: Considere que la turbina está térmicamente aislada y relacione la cantidad de vapor que entra a la turbina con la calidad a la salida del evaporador *"flash"*.



Solución:

En la entrada de la valvula, (etiquetada con el número 1) el estado termodinámico del agua está dado por la presión $P_1 = 5.0\,\text{MPa}$ y la temperatura $T_1 = 180^\circ\,\text{C}$. Usando la *Tablas de Agua Comprimida*, encontramos que:

$$\left.\begin{array}{rcl} P_1 &=& 5.0\,\text{MPa} \\ T_1 &=& 180^\circ\,\text{C} \end{array}\right\} h_1 = 765.09\,\text{kJ/kg}$$

Esta entalpía se conserva a través de la válvula de expansión, de donde sabemos que dentro de la cámara de evaporación,

$$h_c = h_1 = 765.09\,\text{kJ/kg}$$

La presión dentro de la cámara la conocemos, $P_2 = 400\,\text{kPa}$, y sabemos además que el agua está en un estado de mezcla saturada. Usamos la *Tabla de Agua Saturada* para encontrar las propiedades termodinámicas del fluido:

$$h_{f@400\,\text{kPa}} = 604.66\,\text{kJ/kg}\ , \quad h_{fg@400\,\text{kPa}} = 2133.4\,\text{kJ/kg}$$

Con ello, podemos calcular la calidad de la mezcla en la cámara:

$$x_c = \frac{h_c - h_{f@400\,\text{kPa}}}{h_{fg@400\,\text{kPa}}} = 0.0752$$

La calidad mide la proporción de la masa de la mezcla que está en estado gaseoso. Por lo tanto, a la entrada de la turbina tenemos un flujo $\dot{m}_t = x_c \dot{m}$ de vapor, en que $\dot{m}$ es el flujo entrante de agua desde la fuente geotermal. Este es vapor saturado a $P_2 = 400\,\text{kPa}$, con $x_2 = 1$, ya que el agua fue descartada. Así, el estado termodinámico del gas que entra a la turbina se conoce completamente. En particular, su entalpía es,

$$h_2 = h_{g@400\,\text{kPa}} = 2738.1\,\text{kJ/kg}$$

Utilizando ahora la Primera Ley de la Termodinámica en el volumen de control definido por la turbina, encontramos que:

$$\begin{array}{rcl} \dot{E}_{in} &=& \dot{E}_{out} \\ \dot{m}_t h_2 &=& \dot{m}_t h_3 + \dot{W} \\ \dot{m}_t &=& \dfrac{\dot{W}}{h_2 - h_3} \\ \dot{m} &=& \dfrac{\dot{W}}{x_c(h_2 - h_3)} \end{array}$$

en que las entalpías están etiquetadas con los números de la figura y $\dot{W} = 1\,\text{MW}$ es el trabajo que realiza la turbina. El gas que sale de la turbina está saturado a $P_3 = 10\,\text{kPa}$ y $x_3 = 90\,\%$. De este modo, de las tablas,

$$\left.\begin{array}{rcl} P_3 &=& 10\,\text{kPa} \\ x_3 &=& 0.9 \end{array}\right\} \begin{array}{rcl} h_{f@10\,\text{kPa}} &=& 191.81\,\text{kJ/kg} \\ h_{fg@10\,\text{kPa}} &=& 2392.1\,\text{kJ/kg} \end{array}$$

Por tanto,

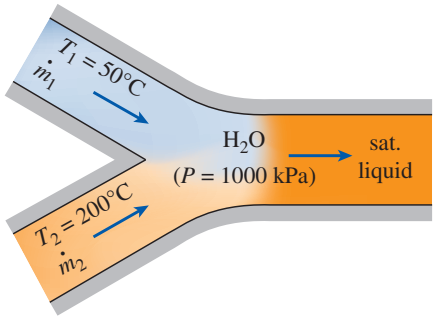
$$\begin{aligned} h_3 &= h_{f@10\,\mathrm{kPa}} + x_3\, h_{fg@10\,\mathrm{kPa}} \\ &= 2344.7\,\mathrm{kJ/kg} \end{aligned}$$

Reemplazando,

$$\dot{m} = 33.803\,\mathrm{kg/s}$$

■

3. En centrales de potencia a vapor, calentadores de agua de alimentación abierta son frecuentemente utilizados para calentar el agua mediante la mezcla con vapor proveniente de una turbina en alguna etapa intermedia. Considere un calentador de agua de alimentación abierta que opera a una presión de 1000 kPa. Agua a 50° C y 1000 kPa se calienta con vapor sobrecalentado a 200° C y 1000 kPa. En un calentador ideal, la mezcla deja el dispositivo como líquido saturado a la presión del agua entrante. Determine la razón entre los flujos de masa de agua y de vapor sobrecalentado para este caso.



Solución:

Consideremos la siguiente notación: el subíndice (1) se refiere al agua fría que ingresa al calentador, el subíndice (2) referencia al vapor que ingresa al calentador, y el subíndice (3) da cuenta del líquido saturado que sale del calentador. Notemos que $T_1 < T_{\mathrm{sat@1\,MPa}} = 179.88°\,\mathrm{C}$, por lo que el agua fría se comporta como líquido comprimido. Como no existe una entrada en la *Tabla de Agua Comprimida* para estos datos, las propiedades termodinámicas se aproximan a las de líquido saturado a dicha temperatura. Así,

$$\begin{aligned} h_1 &\approx h_{f@50^\circ\,\mathrm{C}} = 209.34\,\mathrm{kJ/kg} \\ h_2 &= h_{200^\circ\,\mathrm{C}\,1\,\mathrm{MPa}} = 2828.3\,\mathrm{kJ/kg} \\ h_3 &= h_{f@1\,\mathrm{MPa}} = 762.51\,\mathrm{kJ/kg} \end{aligned}$$

Tomamos el mezclador como nuestro sistema de estudio, el cual es un volumen de control desde que la masa cruza su frontera. Los balances de masa y energía para este sistema de flujo permanente son:

- **Balance de masa:**

$$\dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} = \cancelto{0}{\Delta \dot{m}_{sistema}} \implies \dot{m}_{in} = \dot{m}_{out} \implies \dot{m}_1 + \dot{m}_2 = \dot{m}_3$$

- **Balance de energía:**

$$\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} = \cancelto{0}{\Delta \dot{E}_{sistema}} \implies \dot{E}_{in} = \dot{E}_{out} \implies \dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_2 h_2 = \dot{m}_3 h_3$$

Combinando ambas,

$$\begin{aligned} \dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_2 h_2 &= \dot{m}_3 h_3 \\ \dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_2 h_2 &= (\dot{m}_1 + \dot{m}_2) h_3 \quad \Big/ : \dot{m}_2 \\ r h_1 + h_2 &= (r+1) h_3 \\ r &= \frac{h_3 - h_2}{h_1 - h_3} \\ &= 3.73 \end{aligned}$$

donde $r = \dfrac{\dot{m}_1}{\dot{m}_2}$ es el cociente entre ambos flujos. ■

4. Un sistema formado por un cilindro y pistón ideal, sin roce, se mantiene a presión constante. En su interior hay 1.0 kg de agua con una calidad del 5 % a 150° C. Se transfiere calor de modo tal que agua líquida se transforma en vapor, a una tasa de 1.0 g/s. Encuentre:

   a) La tasa de variación de la energía interna en el interior del cilindro

   b) La tasa de variación del volumen del cilindro

   c) La tasa de transferencia de calor

Solución:

a) Se trata de un proceso estacionario, en que las tasas de variación temporal se mantienen constantes. La ecuación de continuidad de la masa es:

$$m = m_{vap} + m_{liq} = \text{cte} \implies \dot{m} = \dot{m}_{vap} + \dot{m}_{liq} = 0 \implies \dot{m}_{vap} = -\dot{m}_{liq}$$

con $\dot{m}_{vap} = 0.001\,\text{kg/s}$. La energía interna tiene dos componentes, la del líquido saturado y la del vapor saturado. Así,

$$U = U_{liq} + U_{vap} = m_{liq} u_f + m_{vap} u_g$$

donde u_f y u_g son la energía interna del líquido y vapor saturado respectivamente, en la condición de temperatura correspondiente. Luego, como u_f y u_g son constantes a una condición dada,

$$\dot{U} = \dot{m}_{liq} u_f + \dot{m}_{vap} u_g = \dot{m}_{vap}(u_g - u_f) = \dot{m}_{vap} u_{fg}$$

De la tabla respectiva,

$$u_{fg} = u_{fg@150^\circ\,\text{C}} = 1927.4\,\text{kJ/kg}$$

Reemplazando,

$$\dot{U} = (0.001\,\text{kg/s})(1927.4\,\text{kJ/kg}) = 1.9274\,\text{kJ/s}$$

b) El volumen total en cada instante de tiempo es

$$V = V_{liq} + V_{vap}$$

Con el mismo razonamiento anterior,

$$\dot{V} = \dot{m}_{liq} v_f + \dot{m}_{vap} v_g = \dot{m}_{vap}(v_g - v_f) = \dot{m}_{vap} v_{fg}$$

De la tabla respectiva,

$$v_{fg} = (v_{g@150^\circ\,\mathrm{C}} - v_{f@150^\circ\,\mathrm{C}}) = (0.39248 - 0.001091)\,\mathrm{m}^3/\mathrm{kg} = 0.391389\,\mathrm{m}^3/\mathrm{kg}$$

Por tanto,

$$\dot{V} = 0.000391389\,\mathrm{m}^3 s$$

c) De la Primera Ley de la Termodinámica,

$$\dot{U} = \dot{Q} - \dot{W}$$

Entonces, nos resta hallar el valor de $\dot{W}$:

$$dW = PdV \quad \Longrightarrow \quad \dot{W} = P\dot{V} = P\dot{m}_{vap} v_{fg}$$

Así,

$$\dot{Q} = \dot{U} + \dot{W} = \dot{m}_{vap} u_{fg} + P\dot{m}_{vap} v_{fg} = \dot{m}_{vap}(u_{fg} + P v_{fg}) = \dot{m}_{vap} h_{fg}$$

De la tabla respectiva,

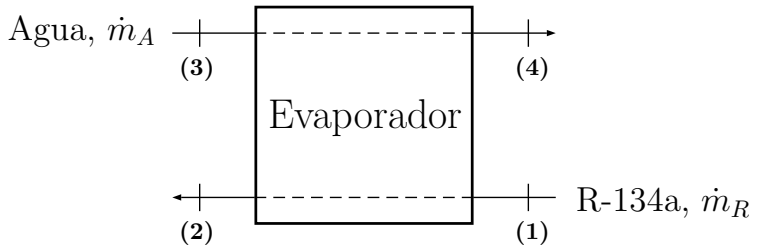
$$h_{fg} = h_{fg@150^\circ\,\mathrm{C}} = 2113.8\,\mathrm{kJ/kg}$$

y por tanto:

$$\dot{Q} = 2.1138\,\mathrm{kJ/s}$$

■

5. El evaporador de un ciclo de refrigeración es básicamente un intercambiador de calor en el cual un refrigerante es evaporado por la absorción de calor de un fluido. Refrigerante R-134a entra al evaporador a 200 kPa con una calidad del 30 %. El R-134a deja el evaporador a la misma presión, pero sobrecalentado a 60° C y una tasa de 20.65 m^3/h. El refrigerante es evaporado absorbiendo calor de un flujo de agua de 0.75 kg/s a 10° C.



Determine:

a) La tasa de calor absorbida por el refrigerante

b) La temperatura final del agua, asumiendo que entra y sale del evaporador a presión atmosférica

Solución:

a) Notemos que, dado que el condensador está bien aislado, el calor transferido desde el fluido caliente es igual al calor absorbido por el fluido frío. Los cambios en las energías cinética y potencial son despreciables. Tomamos la tubería con R-134a como nuestro primer sistema de estudio, el cual es un volumen de control. El balance de energía en este régimen estacionario se expresa como sigue:

$$\begin{aligned} \dot{E}_{in} &= \dot{E}_{out} \\ \dot{Q}_{in} + \dot{m}_R h_1 &= \dot{m}_R h_2 \\ \dot{Q}_{in} &= \dot{m}_R (h_2 - h_1) \end{aligned}$$

De la *Tabla de Refrigerante R-134a Saturado*,

$$\left.\begin{aligned} P_1 &= 200\,\text{kPa} \\ x_1 &= 0.3 \end{aligned}\right\} \begin{aligned} h_{f@200\,\text{kPa}} &= 38.41\,\text{kJ/kg} \\ h_{fg@200\,\text{kPa}} &= 206.09\,\text{kJ/kg} \end{aligned}$$

Por tanto,

$$\begin{aligned} h_1 &= h_{f@200\,\text{kPa}} + x_1\, h_{fg@200\,\text{kPa}} \\ &= 100.237\,\text{kJ/kg} \end{aligned}$$

De la *Tabla de Refrigerante R-134a Sobrecalentado*,

$$\left.\begin{aligned} P_2 &= 200\,\text{kPa} \\ T_2 &= 60^\circ\,\text{C} \end{aligned}\right\} \begin{aligned} h_2 &= 305.79\,\text{kJ/kg} \\ v_2 &= 0.13206\,\text{m}^3/\text{kg} \end{aligned}$$

Para determinar el flujo de masa de refrigerante, notamos que:

$$\dot{m}_R = \frac{\dot{V}_2}{v_2} = \frac{(20.65/3600\,\text{m}^3/\text{s})}{(0.13206\,\text{m}^3/\text{kg})} = 0.04343564373\,\text{kg/s}$$

Por tanto,

$$\dot{Q}_{in} = 8.928326876\,\text{kJ/s}$$

b) Ahora tomamos la tubería con agua como nuestro segundo sistema de estudio, el cual es un volumen de control. El balance de energía en este régimen estacionario se expresa como sigue:

$$\begin{aligned} \dot{E}_{in} &= \dot{E}_{out} \\ \dot{m}_A h_3 &= \dot{m}_R h_4 + \dot{Q}_{out} \\ h_3 - \frac{\dot{Q}_{out}}{\dot{m}_A} &= h_4 \end{aligned}$$

donde $\dot{Q}_{in} = \dot{Q}_{out}$. Notemos que $T_3 < T_{\text{sat@1 atm}} = 99.97^\circ\,\text{C}$, por lo que el agua entrante se comporta como líquido comprimido. Como no existe una entrada en la *Tabla de Agua Comprimida* para estos datos, las propiedades termodinámicas se aproximan a las de líquido saturado a dicha temperatura. Así,

$$h_3 = h_{f@10^\circ\,\text{C}} = 42.022\,\text{kJ/kg}$$

Por tanto,

$$h_4 = 30.11756417\,\text{kJ/kg}$$

Como $h_4 < h_{f@1\,\text{atm}} = 419.06\,\text{kJ/kg}$, el agua saliente también se comporta como líquido comprimido. Como no existe una entrada en la *Tabla de Agua Comprimida* para estos datos, las propiedades termodinámicas se aproximan a las de líquido saturado a dicha temperatura. De la *Tabla de Agua Saturada*, encontramos que:

$T\,[^\circ\,\text{C}]$	$h_f\,[\text{kJ/kg}]$
5	21.020
10	42.022

Como la tabla no posee el valor exacto de la entalpía específica que deseamos, tendremos que **interpolar**:

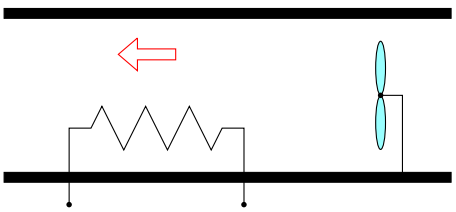
$$T = T_a + \left(\frac{T_b - T_a}{h_b - h_a}\right)(h - h_a)$$

Reemplazando,

$$\begin{aligned} T_4 &= 5 + \left(\frac{5-10}{21.020 - 42.022}\right)(h_4 - 21.020) \\ &= 5 + \left(\frac{5-10}{21.020 - 42.022}\right)(30.11756417 - 21.020) \\ &= 7.165880433^\circ\,\text{C} \end{aligned}$$

■

6. Un sistema usado para secar el pelo consiste en un ducto con resistencias como calentadores. Un ventilador pequeño impulsa aire y lo hace circundar las resistencias, donde se calienta como muestra la figura. A un sistema de este tipo, que opera de una manera estacionaria de potencia eléctrica 1.5 kW, entra aire a 100 kPa y 27° C y sale a 100 kPa y 57° C. El área transversal de la salida del sistema es $50\,\text{cm}^2$.



Despreciando los cambios de energía cinética y potencial, la potencia consumida por el ventilador y las pérdidas de calor a través de las paredes del sistema, determine:

a) El flujo volumétrico del aire en la entrada

b) La velocidad del aire a la salida

Asuma que el aire se comporta como gas ideal, con $c_P = 1.005\,\mathrm{kJ/kg\cdot K}$ y $\mathcal{R} = 0.287\,\mathrm{kJ/kg\cdot K}$.

Solución:

a) La ecuación de continuidad de la masa nos dice que:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m} \qquad \text{(una entrada y una salida)}$$

El balance de energía para este proceso estacionario es:

$$\begin{aligned} \dot{E}_{in} &= \dot{E}_{out} \\ \dot{W} + \dot{m}h_1 &= \dot{m}h_2 \\ \dot{m} &= \frac{\dot{W}}{h_2 - h_1} \\ &= \frac{\dot{W}}{c_P(T_2 - T_1)} \\ &= \frac{(1.5\,\mathrm{kJ/s})}{(1.005\,\mathrm{kJ/kg\cdot K})(30\,\mathrm{K})} \\ &= 0.04975\,\mathrm{kg/s} \end{aligned}$$

De la ecuación de estado de los gases ideales,

$$v_1 = \frac{\mathcal{R}T_1}{P_1} = 0.861\,\mathrm{m^3/kg}$$

Por tanto,

$$\dot{\mathcal{V}}_1 = \dot{m}v_1 = 0.0428\,\mathrm{m^3/s}$$

b) De la ecuación de estado,

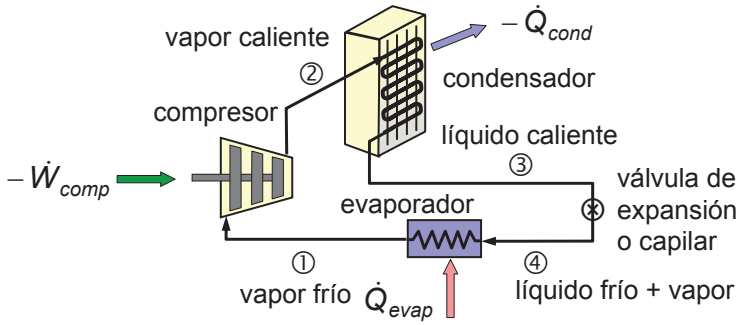
$$v_2 = \frac{\mathcal{R}T_2}{P_2} = 0.9471\,\mathrm{m^3/kg}$$

De la definición de flujo volumétrico,

$$\dot{\mathcal{V}}_2 = A_2V_2 = \dot{m}v_2 \quad \Longrightarrow \quad V_2 = \frac{\dot{m}v_2}{A_2} = 9.42\,\mathrm{m/s}$$

■

7. El sistema de refrigeración de la figura usa R-134a como fluido de trabajo. El flujo de masa en el sistema es 0.1 kg/s, y la potencia de entrada al compresor es 5.0 kW.



Determinar:

a) La calidad del vapor a la salida de la válvula de expansión

b) La tasa de transferencia de calor al evaporador

c) La tasa de transferencia de calor desde el compresor

Parámetros del sistema:

$$\begin{array}{llllllll} P_1 = 100\,\text{kPa} & T_1 = -20^\circ\,\text{C} & T_2 = 50^\circ\,\text{C} & x_3 = 0.0 \\ P_2 = 800\,\text{kPa} & T_3 = 30^\circ\,\text{C} & T_4 = -30^\circ\,\text{C} \end{array}$$

Solución:

a) Considerando un V. C. alrededor de la válvula de expansión:

$$h_3 = h_4$$

De la *Tabla de Refrigerante R-134a Saturado*,

$$\left.\begin{array}{rcl} T_3 &=& 30^\circ\,\text{C} \\ x_3 &=& 0 \end{array}\right\} h_3 = 93.58\,\text{kJ/kg}$$

Para el punto (4),

$$T_4 = -30^\circ\,\text{C} \left\} \begin{array}{rcl} h_{f@-30^\circ\,\text{C}} &=& 12.64\,\text{kJ/kg} \\ h_{fg@-30^\circ\,\text{C}} &=& 219.55\,\text{kJ/kg} \end{array}\right.$$

Así,

$$h_4 = h_{f@-30^\circ\,\text{C}} + x_4\, h_{fg@-30^\circ\,\text{C}} \quad\Longrightarrow\quad x_4 = \frac{h_4 - h_{f@-30^\circ\,\text{C}}}{h_{fg@-30^\circ\,\text{C}}} = 0.3686631747$$

b) Considerando un V. C. alrededor del evaporador:

$$\dot{Q}_{evap} + \dot{m}h_4 = \dot{m}h_1 \quad\Longrightarrow\quad \dot{Q}_{evap} = \dot{m}(h_1 - h_4)$$

De la *Tabla de Refrigerante R-134a Sobrecalentado*,

$$\left.\begin{array}{rcl} P_1 &=& 100\,\text{kPa} \\ T_1 &=& -20^\circ\,\text{C} \end{array}\right\} h_1 = 239.52\,\text{kJ/kg}$$

Por tanto,

$$\dot{Q}_{evap} = 14.594\,\text{kJ/s}$$

c) Considerando un V. C. alrededor del compresor,

$$\dot{W}_{compr} + \dot{m}h_1 = \dot{m}h_2 + \dot{Q}_{compr} \quad \Longrightarrow \quad \dot{Q}_{compr} = \dot{W}_{compr} + \dot{m}(h_1 - h_2)$$

De la *Tabla de Refrigerante R-134a Sobrecalentado*,

$$\left.\begin{array}{rcl} P_2 & = & 800\,\text{kPa} \\ T_2 & = & 50^\circ\,\text{C} \end{array}\right\} h_2 = 286.71\,\text{kJ/kg}$$

Reemplazando,

$$\dot{Q}_{compr} = 0.281\,\text{kJ/s}$$

■