



Pontificia Universidad Católica de Chile
Instituto de Física
FIS1523 Termodinámica
13 de Junio de 2014

| P1 | P2 | P3 | P4 | Nota |
|----|----|----|----|------|
| | | | | |

Tiempo: 120 minutos

Se puede usar calculadora.

No se puede usar celular.

Preguntas de enunciado en voz alta durante los primeros 90 minutos.

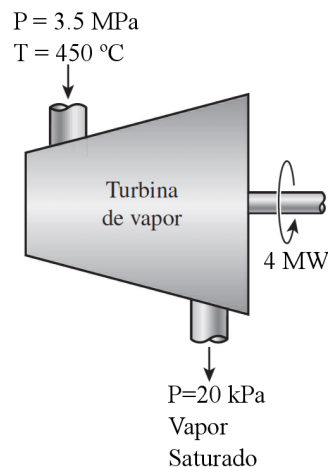
Si usa lápiz mina no podrá pedir corrección. No se puede prestar nada.

Interrogación Nro. 3

Nombre: **PAUTA**

Problema 1

Se expande vapor de forma estacionaria en una turbina a razón de 25000 kg/hr, entrando vapor a 3.5 MPa y 450°C y saliendo a 20 kPa como vapor saturado. Si la potencia de la turbina es 4MW, determine la tasa de generación de entropía para este proceso. Asuma que la temperatura del medio ambiente es 25°C.



Solución

La generación de entropía asociada a este dispositivo se debe a la transferencia de entropía por masa además de la transferencia de calor desde la turbina al medio ambiente.

Como la turbina es un dispositivo de una corriente: $\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}$ (0.5 pt).

El balance de la tasa de transferencia de energía para este sistema, considerando que opera en estado estacionario es $\dot{E}_{in} = \dot{E}_{out}$ (0.5 pt).

Despreciando las variaciones de energía cinética y potencial y la entrada de calor al sistema, la ecuación anterior se escribe como:

$$\dot{m} h_1 = \dot{Q}_{out} + \dot{W}_{out} + \dot{m} h_2 \quad (0.5 \text{ pt})$$

Reescribiendo

$$\dot{Q}_{out} = \dot{m} (h_1 - h_2) - \dot{W}_{out} \quad (0.5 \text{ pt})$$

Luego necesitamos saber las propiedades termodinámicas a la entrada y la salida para determinar el calor transferido al exterior:

$$\left. \begin{array}{l} \text{Vapor Sobrecalentado} \\ P_1 = 3,5 \text{ MPa} \\ T_1 = 450^\circ\text{C} \end{array} \right\} \Rightarrow \begin{array}{l} h_1 = 3338,1 \text{ kJ/kg} \\ s_1 = 7,0074 \text{ kg}\cdot\text{K} \end{array} \quad (0.5 \text{ pt})$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{Vapor Saturado} \\ P_2 = 20 \text{ kPa} \end{array} \right\} \Rightarrow \begin{array}{l} h_2 = 2608,9 \text{ kJ/kg} \\ s_2 = 7,9073 \text{ kg}\cdot\text{K} \end{array} \quad (0.5 \text{ pt})$$

$$\text{Luego, } \dot{Q}_{out} = (25000/3600 \text{ kg/s})(3338,1 - 2608,9) \text{ kJ/kg} - 4000 \text{ kJ/s} = 1063,8 \text{ kJ/s} \quad (0.5 \text{ pt})$$

Para determinar la tasa de entropía generada en el sistema, es necesario escribir el balance de entropía. Considerando que el sistema es estacionario se obtiene que:

$$\dot{S}_{in} - \dot{S}_{out} + \dot{S}_{gen} = 0 \quad (1.0 \text{ pt})$$

donde,

$$\dot{S}_{gen} = \dot{m}_1 s_1 - \dot{m}_2 s_2 - \frac{Q_{out}}{T_{amb}} \quad (1.0 \text{ pt})$$

$$\dot{S}_{gen} = (25000/3600 \text{ kg/s})(7,9073 - 7,0074) \text{ kJ/kg}\cdot\text{K} + \frac{1063,8 \text{ kW}}{298 \text{ K}}$$

$$\dot{S}_{gen} = 9,8 \text{ kW/K} \quad (0.5 \text{ pt})$$

Nombre: _____

Problema 2

Dos kilogramos de aire contenidos en un cilindro con pistón siguen un ciclo de potencia de Carnot con temperaturas máxima y mínima de 750 K y 300 K, respectivamente. El calor transferido al aire durante la expansión isotérmica es 60 kJ. Al final de la expansión isotérmica, la presión es 600 kPa y el volumen es 0.4 m³. Asumiendo el modelo de gas ideal para el aire ($R_{gas} = 0.287 \text{ kJ}/(\text{kg K})$), determine:

- La eficiencia térmica.
- ¿Cuál es el trabajo neto generado en un ciclo?
- La presión y volumen al comienzo de la expansión isotérmica en kPa y m³, respectivamente.
- Dibujar el ciclo en el diagrama $P - \nu$.

Solución

El ciclo de Carnot consta de 4 etapas:

- 1 → 2 expansión isotérmica
- 2 → 3 expansión adiabática
- 3 → 4 compresión isotérmica
- 1 → 3 expansión adiabática

Los datos que tenemos en el enunciado son:

$$m = 2 \text{ kg} \quad T_1 = T_2 = 750 \text{ K} \quad T_3 = T_4 = 300 \text{ K} \quad Q_{1 \rightarrow 2} = 60 \text{ kJ} \quad V_2 = 0,4 \text{ m}^3 \quad P_2 = 600 \text{ kPa}$$

- a) Usando la definición de eficiencia térmica,

$$\eta = \frac{W_{neto}}{Q_{recibido}} = 1 - \frac{T_1}{T_4} = 1 - \frac{300}{750} = 0,60 = 60 \% \quad (1.0 \text{ pt})$$

- b) El trabajo neto generado en el ciclo viene dado por

$$W_{neto} = \eta Q_{recibido} = 0,60 \times 60 \text{ kJ} = 36 \text{ kJ} \quad (1.0 \text{ pt})$$

- c) Usando el balance de energía considerando despreciables los efectos de las energías potencial y cinética,

$$\Delta U_{1 \rightarrow 2} = Q_{1 \rightarrow 2} - W_{1 \rightarrow 2} = m(u_2 - u_1) = m c_v (T_2 - T_1) = 0 \quad \Rightarrow \quad W_{1 \rightarrow 2} = Q_{1 \rightarrow 2} = 60 \text{ kJ} \quad (1.0 \text{ pt})$$

Usando la definición de trabajo en el caso de una expansión isotérmica de un gas,

$$W_{1 \rightarrow 2} = \int_{T_1}^{T_2} P dV = \int_{T_1}^{T_2} \frac{m R_{gas} T_1}{V} dV = m R_{gas} T_1 \ln \left(\frac{V_2}{V_1} \right) = 60 \text{ kJ} \quad (1.0 \text{ pt})$$

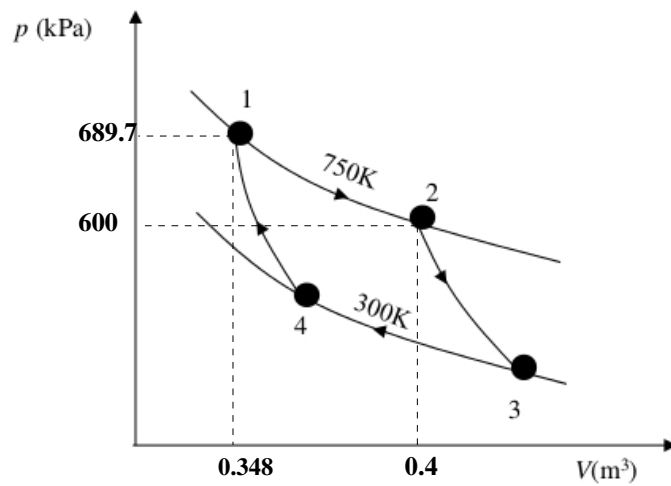
Entonces,

$$\ln \left(\frac{V_2}{V_1} \right) = \frac{W_{1 \rightarrow 2}}{m R_{gas} T_1} = \frac{60}{2 \times 0,287 \times 750} = 0,1394 \quad \Rightarrow \quad V_1 = \frac{V_2}{e^{0,1394}} = 0,348 \text{ m}^3 \quad (0.5 \text{ pt})$$

Así, usando la condición de que el proceso $1 \rightarrow 2$ es isotérmico,

$$P_1 V_1 = P_2 V_2 \quad \Rightarrow \quad P_1 = \frac{P_2 V_2}{V_1} = \frac{600 \times 0,4}{0,348} = 689,7 \text{ kPa} \quad (0.5 \text{ pt})$$

d) El dibujo del ciclo en el diagrama $P - \nu$ es

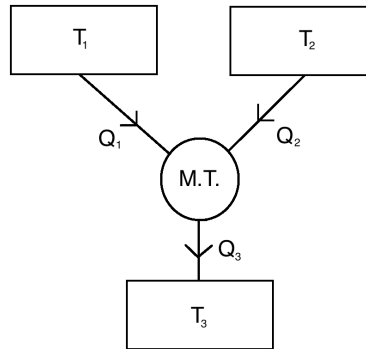


(1.0 pt)

Nombre: _____

Problema 3

Considere la máquina térmica que se muestra en la figura. Los reservorios T_1 y T_2 entregan calor $|Q_1|$ y $|Q_2|$ a la máquina térmica, respectivamente, que la máquina térmica entrega calor $|Q_3|$ al reservorio a T_3 , donde $T_3 < T_2 < T_1$. Además, la cantidad de calor $Q_2 = \alpha Q_1$ donde $\alpha > 0$.



- a) Demuestre que la eficiencia térmica η es siempre menor que

$$\eta \leq 1 - \frac{T_3}{1 + \alpha} \left(\frac{1}{T_1} + \frac{\alpha}{T_2} \right)$$

- b) Asumiendo que el proceso es reversible, evalúe los casos límites $\alpha \rightarrow 0$ y $\alpha \rightarrow \infty$. ¿A qué ciclos corresponden estos casos si se considera un gas ideal?

Solución

- a) La eficiencia térmica por definición:

$$\eta = 1 - \frac{Q_{salida}}{Q_{entrada}} = 1 - \frac{|Q_3|}{|Q_1| + |Q_2|} = 1 - \frac{|Q_3|}{|Q_1|(1 + \alpha)}$$

(1.0 pt)

La desigualdad de Clausius:

$$0 \geq \frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} + \frac{Q_3}{T_3} = \frac{Q_1}{T_1} + \frac{\alpha Q_1}{T_2} + \frac{Q_3}{T_3}$$

(1.0 pt)

Q_1 es positivo ya que es calor que se le entrega al sistema, luego dividiendo por Q_1 se encuentra que

$$0 \geq \frac{1}{T_1} + \frac{\alpha}{T_2} + \frac{Q_3}{Q_1 T_3}$$

Despejando $\frac{Q_3}{Q_1}$ se tiene que

$$-\frac{Q_3}{Q_1} \geq \frac{T_3}{T_1} + \frac{\alpha T_3}{T_2}$$

(1.0 pt)

Dado que $Q_3 < 0$ se tiene que $-\frac{Q_3}{Q_1} = \frac{|Q_3|}{|Q_1|}$, por lo tanto

$$\frac{|Q_3|}{|Q_1|} \geq \frac{T_3}{T_1} + \frac{\alpha T_3}{T_2}$$

Finalmente remplazando en la ecuación para la eficiencia térmica se encuentra que

$$\eta \leq 1 - \frac{T_3}{1 + \alpha} \left(\frac{1}{T_1} + \frac{\alpha}{T_2} \right)$$

(1.0 pt)

La eficiencia máxima está dada por la igualdad, que se consigue cuando el proceso es reversible.

b) Para $\alpha = 0$,

$$\eta \leq 1 - \frac{T_3}{T_1}$$

(1.0 pt)

Si el proceso es reversible vale la igualdad y corresponde a la eficiencia de un ciclo de Carnot entre las temperaturas T_1 y T_3 .

Para $\alpha = \infty$,

$$\eta \leq 1 - \frac{T_3}{T_2}$$

(1.0 pt)

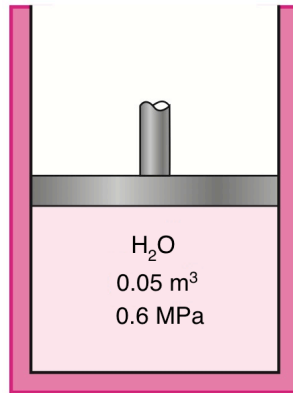
Si el proceso es reversible vale la igualdad y corresponde a la eficiencia de un ciclo de Carnot entre las temperaturas T_2 y T_3 .

Nombre: _____

Problema 4

Un dispositivo cilindro-pistón aislado contiene 0.05 m^3 de vapor de agua saturado a 0.6 MPa . Se permite que el sistema se expanda de forma reversible hasta que la presión cae a 200 kPa .

- a) Determine la temperatura final del agua.
- b) Calcule el volumen final del agua.
- c) Calcule el trabajo realizado por el sistema.



Solución

- a) Inicialmente tenemos vapor saturado a 600 kPa . De la tabla A-5 leemos
- $$\left. \begin{array}{l} \text{vapor saturado a} \\ P = 600 \text{ kPa} \end{array} \right\} \Rightarrow s_1 = s_{g@0.6 \text{ MPa}} = 6,7593 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}.$$

Dado que el proceso es adiabático y reversible, éste es isoentrópico. Por lo tanto,

$$s_2 = s_1 = 6,7593 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K} \quad (0.5 \text{ pt})$$

Mirando la tabla de saturación notamos que

$$s_{f@200 \text{ kPa}} < s_2 < s_{g@200 \text{ kPa}}, \quad (0.5 \text{ pt})$$

por lo que el estado final es una mezcla saturada de agua a 200 kPa .

La temperatura final es entonces $T_2 = T_{\text{sat}@200 \text{ kPa}} = 120,21^\circ\text{C}$. (0.5 pt)

- b) El volumen final del sistema está dado por $V_2 = m \nu_2$.

Para obtener la masa total consideramos el estado inicial. De la tabla A-5 vemos que

$$\left. \begin{array}{l} \text{vapor saturado a} \\ P = 600 \text{ kPa} \end{array} \right\} \Rightarrow \nu_1 = \nu_{g@0.6 \text{ MPa}} = 0,31560 \text{ m}^3/\text{kg} \Rightarrow m = \frac{V_1}{\nu_1} = 1,58428 \text{ kg} \quad (0.5 \text{ pt})$$

Ahora, el volumen específico final es $\nu_2 = (1 - x)\nu_{2f} + x\nu_{2g}$. La calidad se puede calcular a partir de la entropía específica.

$$\begin{aligned} \nu_{2g} &= \nu_{g@200\text{ kPa}} = 0,88578 \text{ m}^3/\text{kg} \\ \nu_{2f} &= \nu_{f@200\text{ kPa}} = 0,001061 \text{ m}^3/\text{kg} \\ s_{2g} &= s_{g@200\text{ kPa}} = 7,1270 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K} \\ s_{2f} &= s_{f@200\text{ kPa}} = 1,5302 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K} \end{aligned}$$

Así,

$$s_2 = (1-x)s_{2f} + xs_{2g} \quad \Rightarrow \quad x = \frac{s_2 - s_{2f}}{s_{2g} - s_{2f}} = 0,93430 \quad (1.0 \text{ pt})$$

con lo que,

$$\nu_2 = 0,82765 \text{ m}^3/\text{kg} \quad \Rightarrow \quad V_2 = 0,131124 \text{ m}^3 \quad (1.0 \text{ pt})$$

c) Como el proceso es adiabático, el trabajo realizado por el sistema es igual a menos la variación de la energía interna, es decir,

$$Q = 0 \quad \Rightarrow \quad W = -\Delta U = U_1 - U_2 \quad (1.0 \text{ pt})$$

Ahora, de la tabla de saturación obtenemos que

$$\left. \begin{array}{l} \text{vapor saturado a} \\ P = 600 \text{ kPa} \end{array} \right\} \quad \Rightarrow \quad u_1 = u_{g@0,6\text{ MPa}} = 2566,8 \text{ kJ/kg},$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{mezcla saturada a} \\ P = 200 \text{ kPa} \end{array} \right\} \quad \Rightarrow \quad \begin{array}{l} u_{2g} = u_{g@200\text{ kPa}} = 2529,1 \text{ kJ/kg}, \\ u_{2f} = u_{f@200\text{ kPa}} = 504,50 \text{ kJ/kg}. \end{array}$$

La energía interna específica en el estado final está dada por $u_2 = (1-x)u_{2f} + xu_{2g} = 2396,0 \text{ kJ/kg}$.

Recordando que $U = mu$, el trabajo resulta ser $W = m(u_1 - u_2) = 27,045 \text{ J}$. (1.0 pt)