

Nombre del docente: Nedher Sanchez Ramirez

Alumno:

Apellidos: _____ Nombres: _____

Sección: _____ Fecha: 06/07/2026

Nota:

Indicaciones:

La duración es de 100 minutos.

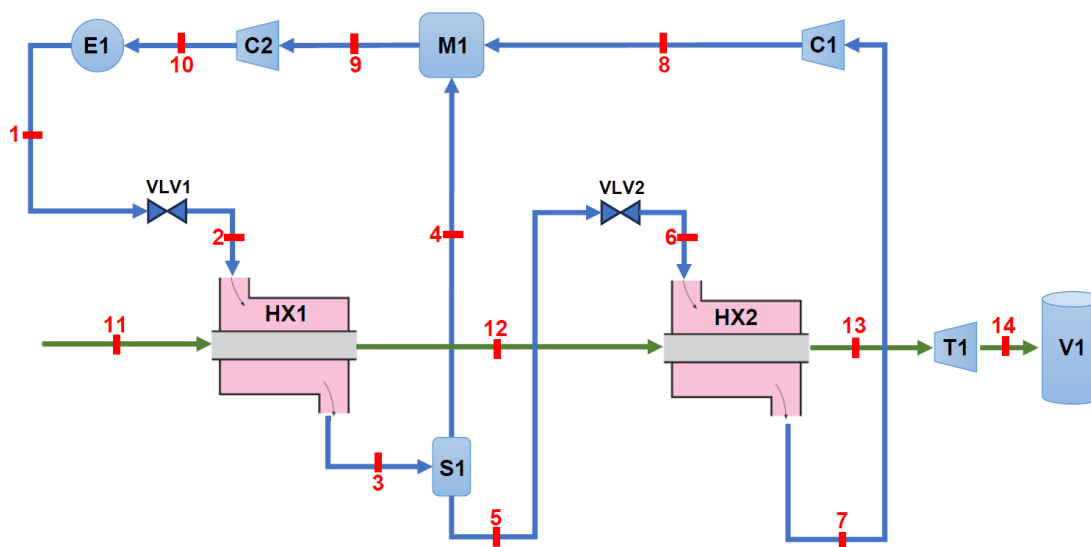
Se permite el uso de calculadora científica, tablas de propiedades termodinámicas y un formulario de 2 hojas (cuatro páginas) escrito a mano.

PREGUNTA 1 (máximo 20 puntos)

En la figura se muestra un ciclo de refrigeración que opera en estado estacionario y utiliza **R134a** como fluido de trabajo. El ciclo enfría una corriente de etano, que posteriormente será almacenada en un tanque cilíndrico rígido.

El etano (gas ideal, $c_p = 0.394 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$, $M = 30.07 \text{ kg/kmol}$) ingresa al sistema a $P_{11} = 50 \text{ bar}$ (corriente 11), se enfría inicialmente hasta $T_{12} = 0^\circ\text{C}$ (corriente 12) y finalmente hasta $T_{13} = -20^\circ\text{C}$ (corriente 13).

En la tabla 1 se muestran las condiciones de operación más importantes del refrigerante en el ciclo.



Información adicional:

- No existe caída de presión en ningún intercambiador, separador o mezclador: $p_{11}=p_{12}=p_{13}$. También $p_2=p_3=p_4=p_5$ y así sucesivamente los casos faltantes.
- Todos los equipos son de paredes externas adiabáticas, excepto el enfriador E1
- $T \text{ (K)} = T \text{ (}^\circ\text{C)} + 273.15$
- $\bar{R} = 8.314 \text{ kJ/kmol} \cdot \text{K}$
- Para un gas ideal: $u = c_v T$ y $h = c_p T$ con T en Kelvin

Tabla 1

Corriente	Presión (bar)	Temperatura (°C)	Información Adicional
1	12.0	28	
4	2.4		1 kg/s vapor saturado
5	2.4		1 kg/s líquido saturado
7	1.0		vapor saturado
8	2.4	5	
9	2.4		
10	12.0		

Pregunta 1A: Tomando a la válvula VLV2 y al intercambiador HX2 como volumen de control, se le pide (0.66 puntos c/u):

- La entalpía específica de la corriente 5 (kJ/kg)
- La entropía específica de la corriente 5 (kJ/kg. K)
- La entalpía específica de la corriente 7 (kJ/kg)
- La entropía específica de la corriente 7 (kJ/kg. K)
- Plantear el balance general de energía y simplificarlo apropiadamente
- Calcular el flujo másico de etano a través del intercambiador (kg/s)
- Plantear el balance global de entropía y simplificarlo apropiadamente
- Calcular la generación de entropía en el volumen de control (kW/K)

Solución:

Corriente 5: $h_5 = 42.95 \text{ kJ/kg}$, $s_5 = 0.1710 \text{ kJ/kg.K}$

Corriente 7: $h_7 = 231.35 \text{ kJ/kg}$, $s_7 = 0.9395 \text{ kJ/kg.K}$

Balance general de energía:

$$\begin{aligned}\frac{dE}{dt} &= Q - W + m_5(h_5 - h_7) + m_{12}(h_{12} - h_{13}) \\ 0 &= 0 - 0 + m_5(h_5 - h_7) + m_{12}c_p(T_{12} - T_{13}) \\ m_{12} &= \frac{m_5(h_5 - h_7)}{c_p(T_{13} - T_{12})}\end{aligned}$$

Flujo másico de etano:

$$\begin{aligned}m_{12} &= \frac{1 \times (42.95 - 231.35)}{0.394 \times (-20 - (0))} \\ m_{12} &= 23.90863 \text{ kg/s}\end{aligned}$$

Balance general de entropía:

$$\begin{aligned}\frac{dS}{dt} &= \frac{Q}{T} + m_5(s_5 - s_7) + m_{12}(s_{12} - s_{13}) + \sigma \\ 0 &= 0 - 0 + m_5(s_5 - s_7) + m_{12}\left(c_p \ln\left(\frac{T_{12}}{T_{13}}\right) - R \ln\left(\frac{P_{12}}{P_{13}}\right)\right) + \sigma \\ \sigma &= -m_5(s_5 - s_7) - m_{12}\left(c_p \ln\left(\frac{T_{12}}{T_{13}}\right) - R \ln\left(\frac{P_{12}}{P_{13}}\right)\right)\end{aligned}$$

Generación de entropía:

$$\begin{aligned}\sigma &= -1 \times (0.1710 - 0.9395) - 23.90863 \times \left(0.394 \ln\left(\frac{0 + 273.15}{-20 + 273.15}\right) - \frac{8.314}{30.07} \ln\left(\frac{50}{50}\right)\right) \\ \sigma &= 0.05221 \text{ kW/K}\end{aligned}$$

Pregunta 1B: Tomando como volumen de control el compresor C1, se le pide (0.66 puntos c/u):

- La entalpía específica de la corriente 8 (kJ/kg)
- La entropía específica de la corriente 8 (kJ/kg. K)
- Plantear el balance general de energía y simplificarlo apropiadamente
- La potencia consumida por el compresor C1 (kW)
- Plantear el balance global de entropía y simplificarlo apropiadamente
- La generación de entropía en el compresor C1 (kW/K)
- La entalpía isoentrópica h_{8s} en la compresión ideal (kJ/kg)
- La eficiencia isoentrópica del compresor C1

Solución:

$$\text{Corriente 8: } h_8 = \frac{248.89 + 257.84}{2} = 253.365 \text{ kJ/kg}, s_8 = \frac{0.9399 + 0.9721}{2} = 0.95600 \text{ kJ/kg.K}$$

Balance general de energía:

$$\begin{aligned}\frac{dE}{dt} &= Q - W + m\dot{\chi}(h_7 - h_8) \\ 0 &= 0 - W + m\dot{\chi}(h_7 - h_8) \\ W &= m\dot{\chi}(h_7 - h_8)\end{aligned}$$

Potencia consumida:

$$\begin{aligned}W &= 1 \times (231.35 - 253.365) \\ W &= -22.01500 \text{ kW}\end{aligned}$$

Balance general de entropía:

$$\begin{aligned}\frac{dS}{dt} &= \frac{Q}{T} + m\dot{\chi}(s_7 - s_8) + \sigma \\ 0 &= 0 + m\dot{\chi}(s_7 - s_8) + \sigma \\ \sigma &= -m\dot{\chi}(s_7 - s_8)\end{aligned}$$

Generación de entropía:

$$\begin{aligned}\sigma &= -1 \times (0.9395 - 0.95600) \\ \sigma &= 0.01650 \text{ kW/K}\end{aligned}$$

Entalpía isoentrópica:

$$\begin{aligned}h_{8s} &= \frac{248.89 - 244.09}{0.9399 - 0.9222}(0.9395 - 0.9222) + 244.09 \\ h_{8s} &= 248.78153 \text{ kJ/kg}\end{aligned}$$

Eficiencia isoentrópica:

$$\begin{aligned}\eta &= \frac{h_7 - h_{8s}}{h_7 - h_8} = \frac{231.35 - 248.78153}{231.35 - 253.365} \\ \eta &= 0.79180\end{aligned}$$

Pregunta 1C: Tomando como volumen de control el mezclador M1 (0.66 puntos c/u):

- La entalpía específica de la corriente 4 (kJ/kg)
- La entropía específica de la corriente 4 (kJ/kg. K)
- Plantear el balance general de energía y simplificarlo apropiadamente
- La entalpía específica de la corriente 9 (kJ/kg)
- La entropía específica de la corriente 9 (kJ/kg. K)
- La temperatura de la corriente 9 (°C)
- Plantear el balance general de entropía y simplificarlo apropiadamente
- La generación de entropía en el mezclador (kW/K)

Solución:

Corriente 4: $h_4 = 244.09 \text{ kJ/kg}$, $s_4 = 0.9222 \text{ kJ/kg.K}$

Balance general de energía:

$$\begin{aligned}\frac{dE}{dt} &= Q - W + m_4 h_4 + m_8 h_8 - m_9 h_9 \\ 0 &= 0 - 0 + m_4 h_4 + m_8 h_8 - m_9 h_9 \\ h_9 &= \frac{m_4 h_4 + m_8 h_8}{m_9}\end{aligned}$$

Entalpía específica de la corriente 9:

$$h_9 = \frac{1 \times 244.09 + 1 \times 253.365}{2} = 248.72750 \text{ kJ/kg}$$

Entropía específica de la corriente 9:

$$\begin{aligned}s_9 &= \frac{0.9399 - 0.9222}{248.89 - 244.09} (248.72750 - 244.09) + 0.9222 \\ s_9 &= 0.93930 \text{ kJ/kg.K}\end{aligned}$$

Temperatura de la corriente 9:

$$\begin{aligned}T_9 &= \frac{0 - (-5.37)}{248.89 - 244.09} (248.72750 - 244.09) + (-5.37) \\ T_9 &= -0.18180 \text{ }^\circ\text{C}\end{aligned}$$

Balance general de entropía:

$$\begin{aligned}\frac{dS}{dt} &= \frac{Q}{T} + m_4 s_4 + m_8 s_8 - m_9 s_9 + \sigma \\ 0 &= 0 + m_4 s_4 + m_8 s_8 - m_9 s_9 + \sigma \\ \sigma &= -m_4 s_4 - m_8 s_8 + m_9 s_9\end{aligned}$$

Generación de entropía:

$$\begin{aligned}\sigma &= -1 \times 0.9222 - 1 \times 0.95600 + 2 \times 0.93930 \\ \sigma &= 0.00040 \text{ kW/K}\end{aligned}$$

Pregunta 1D: Tomando la turbina T1 de 90% de eficiencia isoentrópica como volumen de control, y sabiendo que el etano se expande hasta 15 bar y $k = 3.3528$, se le pide (0.66 puntos c/u):

- La temperatura isoentrópica T_{14s} luego de la expansión ideal (K)
- La potencia isoentrópica específica producida por la turbina (kJ/kg)
- La potencia real específica producida por la turbina (kJ/kg)
- La temperatura real T_{14} de la corriente 14 (K)
- Plantear el balance general de entropía y simplificarlo apropiadamente
- Calcular la generación de entropía (kW/K)

Solución:

Temperatura isoentrópica:

$$T_{14s} = T_{13} \left(\frac{P_{14}}{P_{13}} \right)^{\frac{k-1}{k}}$$

$$T_{14s} = (-20 + 273.15) \left(\frac{15}{50} \right)^{\frac{3.3528-1}{3.3528}}$$

$$T_{14s} = 108.75570 \text{ K}$$

Potencia isoentrópica específica:

$$w_s = c_p(T_{13} - T_{14s})$$

$$w_s = 0.394(253.15 - 108.75570)$$

$$w_s = 56.89135 \text{ kJ/kg}$$

Potencia real específica:

$$w = \eta w_s = 0.9 \times 56.89135$$

$$w = 51.20222 \text{ kJ/kg}$$

Temperatura real de la corriente 14:

$$w = c_p(T_{13} - T_{14})$$

$$51.20222 = 0.394(253.15 - T_{14})$$

$$T_{14} = 123.19513 \text{ K}$$

Balance general de entropía:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{Q}{T} + m_{13}(s_{13} - s_{14}) + \sigma$$

$$0 = 0 + m_{13}(s_{13} - s_{14}) + \sigma$$

$$\sigma = -m_{13} \left(c_p \ln \left(\frac{T_{13}}{T_{14}} \right) - R \ln \left(\frac{P_{13}}{P_{14}} \right) \right)$$

Generación de entropía:

$$\sigma = -m_{13} \left(c_p \ln \left(\frac{T_{13}}{T_{14}} \right) - R \ln \left(\frac{P_{13}}{P_{14}} \right) \right)$$

$$\sigma = -23.90863 \left(0.394 \ln \left(\frac{253.15}{123.19513} \right) - \frac{8.314}{30.07} \ln \left(\frac{50}{15} \right) \right) = 1.17440 \text{ kW/K}$$

Pregunta 1E: El tanque cilíndrico V1 es adiabático y tiene 20 m³ de volumen. Inicialmente el tanque se encuentra vacío (**no hay masa**) y empieza a recibir la mezcla gaseosa proveniente de la turbina T1 hasta que la presión al interior llega a 10 bar. Se le pide (**0.66 puntos c/u**):

- Calcular la capacidad calorífica a volumen constante (**kJ/kg.K**) del etano
- Plantear y simplificar el balance de energía en estado transitorio para el tanque V1
- Calcular la temperatura (**K**) del etano al final del llenado
- Calcular la masa (**kg**) del etano contenida en el tanque V1 al final del llenado
- Plantear el balance de entropía en estado transitorio para el tanque V1
- Calcular la generación de entropía (**kJ/K**) al finalizar el llenado del tanque

Solución:

Capacidad calorífica a volumen constante:

$$c_v = c_p - R = 0.394 - 8.314/30.07 = 0.11751 \frac{\text{kJ}}{\text{kg.K}}$$

Balance de energía en estado transitorio:

$$M_{in} = M_2$$

$$\Delta U = Q - W + M_{in}h_{in} - M_{out}h_{out}$$

$$M_2u_2 = M_{in}h_{in}$$

Temperatura del etano:

$$M_2c_vT_2 = M_{in}c_pT_{in}$$

$$T_2 = \frac{c_p}{c_v}T_{in} = \frac{0.394}{0.11751} \times 123.19513$$

$$T_2 = 413.06171 \text{ K}$$

Masa del etano:

$$M_2 = \frac{PV}{RT_2}$$

$$M_2 = \frac{PV}{RT_2} = \frac{1000 \times 20}{8.314 \times 413.06171/30.07} = 175.1211 \text{ kg}$$

Balance de entropía en estado transitorio:

$$\Delta S = \frac{Q}{T_0} + M_{in}s_{in} - M_{out}s_{out} + \sigma$$

$$M_2s_2 - 0 = M_{in}s_{in} + \sigma$$

$$\sigma = M_2s_2 - M_{in}s_{in}$$

Generación de entropía:

$$\sigma = M_2s_2 - M_{in}s_{in}$$

$$\sigma = M_2 \left(c_p \ln \frac{T_2}{T_{in}} - R \ln \frac{P_2}{P_{in}} \right)$$

$$\sigma = 175.1211 \left(0.394 \ln \frac{413.06171}{123.19513} - \frac{8.314}{30.07} \ln \frac{10}{15} \right)$$

$$\sigma = 103.10751 \frac{\text{kJ}}{\text{K}}$$

