

Física Térmica – Examen

26 de julio de 2024

Justifique y explique claramente su trabajo. Indique las unidades de las magnitudes en los resultados intermedios y finales. Identifique y revise su trabajo antes de entregar.

El examen dura 3.5 horas y para aprobarlo es necesario al menos un problema completo correctamente resuelto.

Problema 1

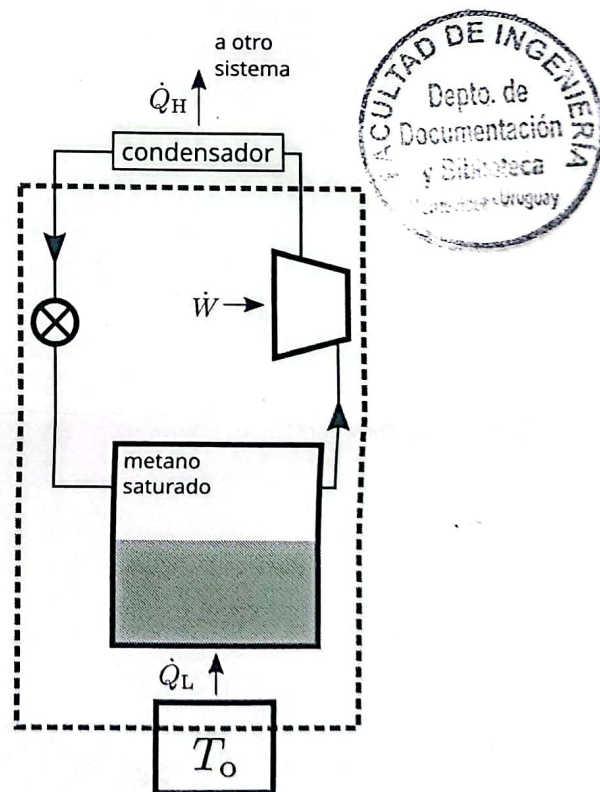
La Figura muestra parte de un sistema de refrigeración en cascada que posibilita el transporte de metano en la bodega de los barcos.

Metano saturado es almacenado en la bodega (tanque) a una temperatura de 100 K. A pesar de que la bodega está aislada, intercambia calor con el ambiente (que se encuentra a $T_o = 300$ K), siendo necesario enfriar el metano mientras se lo transporta.

El proceso estacionario seguido por parte del metano es el siguiente: de la parte superior de la bodega se extrae vapor saturado, que se comprime por un compresor adiabático reversible hasta una presión de 4 MPa. A continuación, en el condensador, el metano intercambia calor hasta convertirse en líquido saturado. Por último, pasa por una válvula con el objetivo de ser re-inyectado en la bodega a 100 K.

La sección del sistema de refrigeración mostrada en la Figura funciona gracias a que se asegura que el calor liberado en el condensador ($\dot{Q}_H$) es recibida por otra etapa (no mostrado en la figura) que se encuentra a una temperatura de operación tal que permite el funcionamiento del ciclo.

- Calcular el flujo másico que debe extraerse del tanque para que el metano saturado almacenado en la bodega no cambie de estado al recibir $\dot{Q}_L = 2$ kW desde el ambiente.
- Calcular la cantidad de calor que el metano intercambia en el condensador.
- Dibujar el diagrama $T-s$ **completo** que representa el proceso.
- Calcular la generación de entropía por unidad de tiempo en el volumen de control encerrado por las líneas punteadas.
- ¿Cuál es la temperatura máxima de operación del sistema no mostrado en la figura (en la zona en que recibe el calor $\dot{Q}_H$), que asegure el correcto funcionamiento de la etapa de refrigeración estudiada?. Justificar la respuesta.



Problema 2

Un conjunto cilindro-pistón contiene 2 kg de amoníaco a -20°C y una calidad de 80 %. El sistema se encuentra sometido a una fuerza total externa proporcional al volumen de amoníaco al cuadrado ($F_{\text{ext}}(V) = \beta V^2$).

El amoníaco dentro del cilindro puede intercambiar calor con el ambiente y con una resistencia eléctrica de $2\ \Omega$ que se encuentra a 120°C cuando circula una corriente eléctrica de 15 A. Además, ingresa masa al tanque de amoníaco a través de una línea de suministro que se encuentra a 800 kPa y 40°C .

El proceso finaliza luego de transcurridos 20 minutos, momento en el cual se alcanzó dentro del tanque una presión de 600 kPa y la masa total es de 6 kg.

- Calcular el calor intercambiado por el sistema con el ambiente.
- Hallar la entropía generada durante el proceso descrito.
- Indicar dónde se encuentran las irreversibilidades y por qué generan dicha entropía.
- Calcular el trabajo reversible, y reversible útil que podría obtenerse.

Notas para el examen:

- En caso de necesitarlo, puede asumir que la presión atmosférica es $P_o = 100\text{ kPa}$ y que la temperatura ambiente es $T_o = 20^{\circ}\text{C}$.



2/4

Soluciones

Problema 1

a)

Se pide hallar el flujo másico que circula por el sistema. Los puntos 1 y 3 se encuentran determinados debido a que el metano se encuentra saturado y con temperatura o presión conocidas. Se obtienen los valores de entropía y de entalpía de la tabla de metano saturado. Para obtener el estado dos se aplica que la turbina es adiabática e irreversible, por lo que $s_1 = s_2$. Desde la tabla de gas sobrecalentado a 4 MPa se puede interpolar para obtener la temperatura y la entalpía del punto 3. El punto 4 se obtiene considerando la válvula isentálpica. Con todos los datos calculados se obtiene la tabla:

#	Estado	T(K)	P(kPa)	h(kJ/kg)	s(kJ/kgK)
1	Vapor sat.	100	34.4	202.9	9.851
2	Vapor SC	330	4000	663.2	9.851
3	Liq. sat.	186	4000	45.5	7.068
4	Mezcla (x=0.703)	100	34.4	45.5	8.277

Luego de determinadas todas las propiedades se pueden empezar a aplicar los balances para resolver las partes del ejercicio. Para la parte a), se realiza un balance de energía al contenedor de metano.

$$\dot{Q}_L = \dot{m}(h_1 - h_4)$$

De donde se obtiene que $\dot{m} = 0,0127 \text{ kg/s}$

b)

Se aplica el primer principio al condensador para obtener el calor de alta intercambiado.

$$\dot{Q}_H = \dot{m}(h_3 - h_2) = -7,85 \text{ kW}$$

c)

Se presenta el diagrama $T-s$ en la Figura 1. Obsérvese que el proceso 1-2 es isentrópico y el proceso 2-3 tiene un descenso de temperaturas hasta el gas saturado a 186K, luego el proceso es una condensación a temperatura constante.

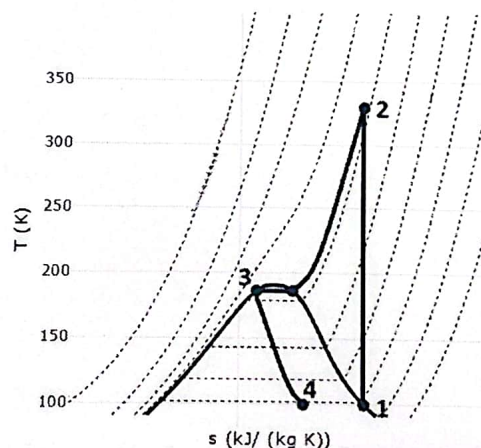


Figura 1: Diagrama Ts



d)

Para el cálculo de la generación de entropía en el volumen marcado se realiza el segundo balance en condiciones de RPFE:

$$\dot{S} = \dot{S}_{gen} + \dot{m}(s_4 - s_1) + \frac{\dot{Q}_L}{T_0}$$

Despejando se obtiene $\dot{S}_{gen} = 28,5 \text{ J/kgK}$

e)

Para que el sistema en su globalidad funcione correctamente, debe ser capaz de recibir todo el calor $\dot{Q}_H$ que el condensador mostrado en la figura libera. Observando la tabla de los estados del ciclo, se encuentra que el condensador opera entre 330 K y 186 K, por lo que la etapa que recibe $\dot{Q}_H$ debe operar a una temperatura menor que 186 K para que dicha transferencia de energía por calor sea posible.

Problema 2

En este problema, se destaca que los estados inicial y de línea de suministro están completamente definidos, pudiendo completarse la tabla de propiedades expuesta más abajo. Se marca en negrita lo que se tiene de la letra y el resto son valores obtenidos de las tablas.

#	Estado	T(°C)	P(kPa)	$\nu(m^3/kg)$	u(kJ/kg)	s(kJ/kgK)	h(kJ/kg)	V(m³)
1	Mezcla (x=0.80)	-20	190.08	0.4993	1057.35	4.5658	—	0.9985
2	Vap SC	100	600	0.2957	1499.4	5.9081	—	1.774
LS	Vap SC	40	800	—	—	5.3171	1520.8	—

a) Para calcular el calor intercambiado con el ambiente, primero va a ser necesario calcular el calor que aporta la resistencia eléctrica, el trabajo que realiza el gas al expandirse y principalmente el estado final del amoníaco. Para obtener el estado final, se utiliza la relación entre la presión y el volumen, dada como $P = \alpha V^2$. Del estado inicial se puede despejar $\alpha = P_1/V_1^2 = 190,64 \text{ kPa/m}^6$, y a partir de la constante y de la presión final se obtiene $V_2 = 1,774 \text{ m}^3$. Luego se divide este valor entre la masa y se obtiene el volumen específico $\nu_2 = 0,2957 \text{ m}^3/\text{kg}$, el cual es una propiedad intensiva y determina el estado final del amoníaco. El resto de los valores se obtienen interpolando en la tabla de amoníaco sobrecalentado.

Para calcular el trabajo realizado por el gas se integra la presión en función del volumen como se indica en la ecuación:

$$W = \int_{V_1}^{V_2} \alpha V^2 = \frac{\alpha}{3} (V_2^3 - V_1^3) = 291,5 \text{ kJ}$$

Además se calcula el calor aportado por la resistencia eléctrica:

$$Q_{res} = RI^2 \Delta t = 2\Omega(15A)^2(1200s) = 540 \text{ kJ}$$

Puede entonces plantearse un primer principio en el cilindro de amoníaco:

$$\Delta U = m_2 u_2 - m_1 u_1 = Q_{res} + Q_{amb} - W + (m_2 - m_1) h_{LS}$$

Utilizando los datos de la tabla y despejando, se obtiene un calor intercambiado con el ambiente de 550 kJ. Este calor es positivo, indicando que el sistema recibe calor del ambiente. Tiene sentido este aspecto puesto que inicialmente necesita mucha energía para evaporar el amoníaco líquido.

b)

Para hallar la entropía generada se aplica un balance de segunda ley al amoníaco:

$$\Delta S = m_2 s_2 - m_1 s_1 = \frac{Q_{res}}{T_{res}} + \frac{Q_{amb}}{T_0} + S_{gen} + (m_2 - m_1) s_{LS}$$

Donde ya se conocen todas las variables presentes en la ecuación salvo la entropía generada. Despejando se encuentra un valor de 1,724 kJ/kgK.

c)

Las irreversibilidades se encuentran en:

- Debido al intercambio de calor a diferentes temperaturas entre el amoníaco y el ambiente.
- Debido al intercambio de calor a diferentes temperaturas entre el amoníaco y la resistencia térmica.
- Debido a la mezcla de amoníaco a diferentes temperaturas entre la línea de suministro y el amoníaco dentro del cilindro.

d)

El trabajo reversible se puede calcular de forma sencilla como la suma del trabajo real y la irreversibilidad. El trabajo reversible útil será restando el trabajo realizado sobre el ambiente:

$$W_{rev} = W_{real} + T_0 S_{gen} = 796,7 \text{ kJ}$$

$$W_{rev}^{útil} = W_{rev} - P_0 \Delta V = 719,1 \text{ kJ}$$

