

Física Térmica – Examen

15 de diciembre de 2023

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

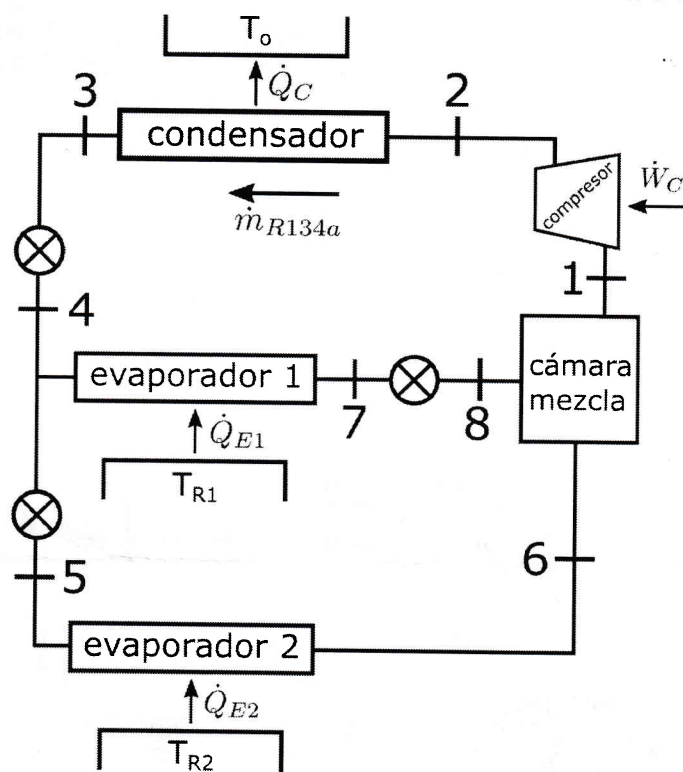
Una planta de producción de vacunas necesita tener dos recintos refrigerados. Para ello se propone el siguiente ciclo de refrigeración que utiliza refrigerante R-134a como fluido de trabajo. El ciclo utiliza un compresor, un condensador y dos evaporadores que proveen la temperatura necesaria para cada uno de los recintos.

Se sabe que a la salida del condensador (estado 3) se tiene líquido saturado a una temperatura de 40°C . El evaporador de alta temperatura provee una capacidad de enfriamiento de $\dot{Q}_{E1} = 10,5\text{ kW}$ trabajando a una temperatura de saturación de -5°C . El evaporador se utiliza para mantener un recinto refrigerado (R1) a $T_{R1} = 2^\circ\text{C}$.

El evaporador de baja temperatura provee una capacidad de enfriamiento de $\dot{Q}_{E2} = 7\text{ kW}$, trabajando a una temperatura de saturación de -20°C , y se utiliza para mantener otro recinto refrigerado (R2) a $T_{R2} = -15^\circ\text{C}$.

Se sabe que a la salida de ambos evaporadores (estados 6 y 7) se tiene vapor saturado (a las correspondientes temperaturas de operación), y que la eficiencia isentrópica del compresor es de 78 %.

- Determinar el flujo másico que circula por el compresor y la potencia que necesita para su funcionamiento.
- Determinar P , T , h y s en todos los estados (1 a 8), y expresar dichas propiedades en una tabla. Dibujar un diagrama $T-s$ del ciclo.
- Definir el COP para este ciclo y calcularlo.
- Hallar la entropía generada y obtener el trabajo reversible.
- Hallar la eficiencia de segunda ley para este ciclo.

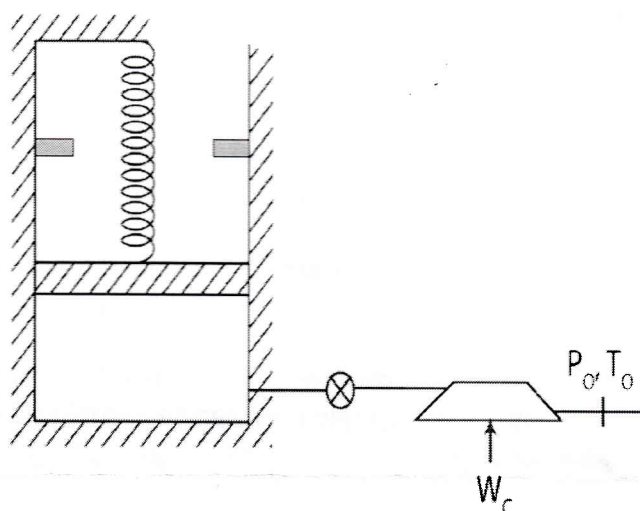


1

Problema 2

Sea el sistema cilindro-pistón-resorte adiabático que se observa en la Figura. Inicialmente, dentro del cilindro, se tiene aire a 200 kPa y 100 °C ocupando un volumen de 20 L. En determinado momento, se enciende el compresor (que tiene una relación de compresión de 10 a 1, es decir la presión de salida es diez veces la presión de la entrada) ingresando aire al sistema. El proceso finaliza cuando ya no puede ingresar más aire al cilindro.

Del sistema se sabe que el pistón alcanza los topes cuando el volumen de aire dentro del cilindro es de 100 L, que el resorte no ejerce fuerza cuando el pistón está en el fondo del cilindro, que la masa del pistón es de 510 kg y su área es de 0,25 m². Por otro lado, se sabe que el compresor es adiabático e internamente reversible.



- Calcular el trabajo real útil del aire dentro del cilindro. ¿Dónde y en qué forma se almacenó ese trabajo?
- Hallar el estado final del aire dentro del cilindro.
- Hallar la variación de exergía del cilindro.
- Calcular el trabajo reversible útil y la irreversibilidad de todo el proceso.

Notas para el examen:

- En caso de necesitarlo, puede asumir que la presión atmosférica es $P_o = 100$ kPa y que la temperatura ambiente es $T_o = 20$ °C.
- Propiedades del refrigerante R-134a en estado de vapor sobrecalentado a una presión $P=133,7$ kPa:

Temp. (°C)	Entalpía (kJ kg ⁻¹)	Entropía (kJ kg ⁻¹ K ⁻¹)
-13,9	391,49	1,7600
-9,2	395,34	1,7747



Física Térmica - Soluciones Examen 15/12/2023

Problema 1

a) Los estados 3-8 están determinados por los datos en la letra, y las relaciones de presiones de los dispositivos y las válvulas isentálpicas: $p_1 = p_5 = p_6 = p_8$ $p_2 = p_3$ $p_4 = p_7$ $h_3 = h_4 = h_5$ $h_7 = h_8$.

El estado 1 está determinado por el proceso en la cámara de mezcla. Aplicando la primera ley en los evaporadores se tienen los siguientes flujos másicos en las ramas 5 y 7 del ciclo:

$$\dot{m}_5 = \frac{\dot{Q}_{E2}}{h_6 - h_5} = 0,0540 \text{ kg/s} \quad \dot{m}_7 = \frac{\dot{Q}_{E1}}{h_7 - h_4} = 0,0756 \text{ kg/s} \quad \Rightarrow \quad \dot{m}_1 = \dot{m}_5 + \dot{m}_7 = 0,1297 \text{ kg/s}$$

Conociendo los flujos másicos y aplicando la primera ley en la cámara de mezcla obtenemos h_1 :

$$\dot{m}_1 h_1 = \dot{m}_5 h_6 + \dot{m}_7 h_8 \quad \Rightarrow \quad h_1 = \frac{\dot{m}_5 h_6 + \dot{m}_7 h_8}{\dot{m}_1} = 391,484 \text{ kJ/kg}$$

El estado isentrópico 2s está dado por $p_{2s} = p_2$ y $s_{2s} = s_1$. Luego el estado 2 está determinado por su presión y la entalpía h_2 hallada con la eficiencia isentrópica del compresor:

$$\eta_{isen,C} = \frac{\dot{W}_{isen}}{\dot{W}} = \frac{\dot{m}_1(h_1 - h_{2s})}{\dot{m}_1(h_1 - h_2)} \quad \Rightarrow \quad h_2 = h_1 + \frac{h_{2s} - h_1}{\eta_{isen,C}} = 447,233 \text{ kJ/kg}$$

La potencia necesaria para el funcionamiento del compresor es $\dot{W}_C = \dot{m}_1(h_1 - h_2) = -7,23 \text{ kW}$

b) Los estados del ciclo se detallan en la tabla:

#	Estado	T(°C)	P(kPa)	h (kJ/kg)	s (kJ/(kg K))
1	sobrecalentado	-13,9	133,7	391,484	1,7600
2	sobrecalentado	65,4	1017,1	447,233	1,7965
2s	sobrecalentado	53,9	1017,1	434,968	1,7600
3	l. saturado	40	1017,1	256,539	1,1909
4	x = 0,3129	-5	244,5	256,539	1,2113
5	x = 0,3899	-20	133,7	256,539	1,2278
6	v. saturado	-20	133,7	386,086	1,7395
7	v. saturado	-5	244,5	395,340	1,7288
8	sobrecalentado	-9,2	133,7	395,340	1,7747

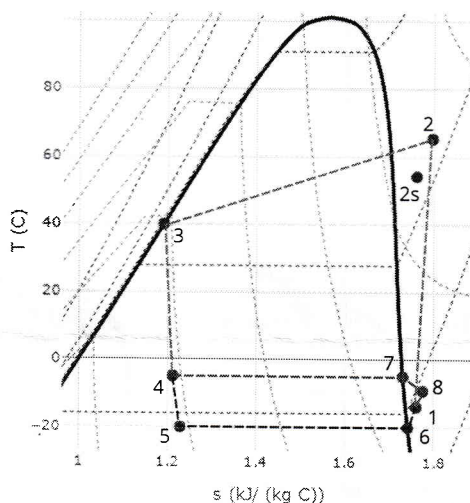


Figura 1: Diagrama $T - s$ del Problema 1

c) El COP del ciclo de refrigeración es:

$$COP_{ref} = \frac{\dot{Q}_L}{|\dot{W}|} = \frac{\dot{Q}_{E1} + \dot{Q}_{E2}}{|\dot{W}_C|} = 2,42$$

d) El calor liberado en el condensador es $\dot{Q}_C = \dot{m}_1(h_3 - h_2) = -24,73 \text{ kW}$.

Aplicando la segunda ley (RPFE) al ciclo tenemos:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{\dot{Q}_{E1}}{T_{R1}} + \frac{\dot{Q}_{E2}}{T_{R2}} + \frac{\dot{Q}_C}{T_0} + \dot{S}_{gen} \implies \dot{S}_{gen} = - \left(\frac{\dot{Q}_{E1}}{T_{R1}} + \frac{\dot{Q}_{E2}}{T_{R2}} + \frac{\dot{Q}_C}{T_0} \right) = 19,1 \text{ W/K}$$

El trabajo reversible es $\dot{W}_{rev} = \dot{W}_C + T_0 \dot{S}_{gen} = -1,636 \text{ kW}$.

e) Y finalmente la eficiencia de 2da ley es:

$$\eta_{II} = \frac{\dot{W}_{rev}}{\dot{W}} = 22,6\%$$

Pregunta 2

a) Se tiene un resorte por lo que la relación presión-volumen es lineal: $P = \alpha V + \beta$.

Dado que el resorte no hace fuerza cuando está en el fondo ($V = 0$) se tiene $\beta = P_0 + Mg/A = 120 \text{ kPa}$, siendo M la masa del pistón y A el área del mismo.

El estado inicial está dado por letra, por lo que se puede hallar $\alpha = (P_1 - \beta)/V_1 = 4 \text{ MPa/m}^3$.

El proceso termina cuando no puede entrar más masa, es decir, la presión dentro del cilindro es igual a la salida del compresor $P_2 = 1 \text{ MPa}$.

El volumen final dado por la relación $P(V)$ es $V_2 = (P_2 - \beta)/\alpha = 0,22 \text{ m}^3 > V_{Topes}$, por lo que $V_2 = V_{Topes} = 0,1 \text{ m}^3$.

Entonces el trabajo y el trabajo útil es:

$$W_{cil} = \int_1^2 P dV = \frac{\alpha}{2}(V_2^2 - V_1^2) + \beta(V_2 - V_1) = 28,8 \text{ kJ} \implies W_{cil}^{util} = W - P_0(V_2 - V_1) = 20,8 \text{ kJ}$$

b) La masa inicial es $m_1 = P_1 V_1 / R_g T_1 = 37,35 \text{ g}$.

La primera ley aplicada al VC que incluye al cilindro y la válvula es:

$$1\Delta U_2 = \dot{Q} - W + m_e h_e = -W_{cil} + (m_2 - m_1)c_p T_B \implies c_v(m_2 T_2 - m_1 T_1) = -W_{cil} + (m_2 - m_1)c_p T_B$$

Y aplicando la ecuación de gas ideal $m_2 T_2 = P_2 V_2 / R_g$ tenemos:

$$m_2 = m_1 + \frac{c_v(P_2 V_2 / R_g - m_1 T_1) + W_{cil}}{c_p T_B} = 509,7 \text{ g}$$

Siendo B el estado a la salida del compresor. El mismo está a una presión de 10 veces su entrada (1 MPa) y es isentrópico ($s_B = s_0$) por ser internamente reversible y adiabático. Por lo tanto de la relación de entropía del gas ideal se tiene:

$${}_0\Delta s_B = 0 = c_p \ln \frac{T_B}{T_0} - R_g \ln \frac{P_B}{P_0} \implies T_B = T_0 \left(\frac{P_B}{P_0} \right)^{R_g/c_p} = 566 \text{ K} = 293 \text{ }^\circ\text{C}$$



Finalmente la temperatura final es $T_2 = P_2 V_2 / (m_2 R_g) = 411 \text{ }^\circ\text{C}$

c) El trabajo del compresor es $W_{comp} = m_e(h_0 - h_B) = m_e c_p(T_0 - T_B) = -129,5 \text{ kJ}$
y el trabajo útil de todo el sistema es $W^{util} = W_{cil}^{util} + W_{comp} = -108,7 \text{ kJ}$.

La variación de la exergía se puede obtener de la definición o del balance. Para usar la definición se pueden aplicar las relaciones de gas ideal, y la exergía específica para cada estado queda

$$\phi = u - u_0 + P_0(\nu - \nu_0) - T_0(s - s_0) = c_v(T - T_0) + P_0 R_g \left(\frac{T}{P} - \frac{T_0}{P_0} \right) - T_0 \left(c_p \ln \frac{T}{T_0} - R_g \ln \frac{P}{P_0} \right)$$

Luego aplicando en el estado inicial y final del cilindro se tiene: ${}_1\Delta X_2^{cil} = m_2\phi_2 - m_1\phi_1 = 80,97 \text{ kJ}$

Alternativamente se puede hallar la entropía generada con un balance de 2da ley (EUFU) a todo el sistema:

$${}_1\Delta S_2^{cil} = \frac{Q_R}{T_R} + m_e s_e + S_{gen} = (m_2 - m_1)s_0 + S_{gen}$$

$$\Rightarrow S_{gen} = m_2(s_2 - s_0) - m_1(s_1 - s_0) = m_2 \left(c_p \ln \frac{T_2}{T_0} - R_g \ln \frac{P_2}{P_0} \right) - m_1 \left(c_p \ln \frac{T_1}{T_0} - R_g \ln \frac{P_1}{P_0} \right) = 94,6 \text{ J/K}$$

Luego el balance de exergía en todo el sistema es:

$${}_1\Delta X_2^{cil} = \left(1 - \frac{T_0}{T_R} \right) Q_R + m_e \psi_e - W^{util} - T_0 S_{gen} = 80,97 \text{ kJ}$$

Donde la exergía de entrada $\psi_e = 0$ por ser el ambiente.

d) La irreversibilidad es $I = T_0 S_{gen} = -\Delta X^{cil} - W^{util} = 27,73 \text{ kJ}$

El trabajo reversible útil del sistema se obtiene del balance de exergía o con la irreversibilidad.

$$W_{rev}^{util} = -\Delta X^{cil} = W^{util} + I = -80,97 \text{ kJ}$$



5