

Física Térmica - Examen

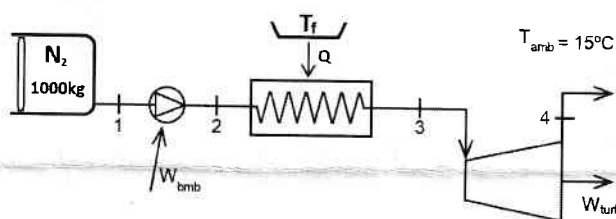
21/07/2023

- 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 3:30 horas y se aprueba con un problema completo resuelto correctamente.

Problema 1

Considere un dispositivo cilindro-pistón adiabático sin fricción conteniendo inicialmente 1000 kg de N_2 en estado de líquido saturado. El nitrógeno es extraído del depósito por acción de una bomba reversible que eleva la presión a 1 MPa. Luego de recibir calor proveniente de una fuente a 400°C en un proceso a presión constante, el nitrógeno se expande en una turbina reversible, emergiendo en condiciones atmosféricas. La temperatura ambiente es de 15°C y la presión atmosférica es de 100 kPa. Observe que luego del calentamiento el nitrógeno gaseoso puede ser considerado un gas ideal, con $R_g = 0.2968 \text{ kJ/kgK}$.

- Calcule el calor absorbido por el nitrógeno y el trabajo neto obtenido hasta que se vacía el depósito.
- Halle la variación de entropía del universo asociada a este proceso. ¿Dónde se produce la entropía?
Sugerencia: puede despreciar la irreversibilidad por mezcla en el ambiente.
- Calcule el trabajo reversible que podría haberse realizado y esquematice una forma de obtenerlo en la práctica.
- Calcule de la variación de exergía (disponibilidad) del nitrógeno.



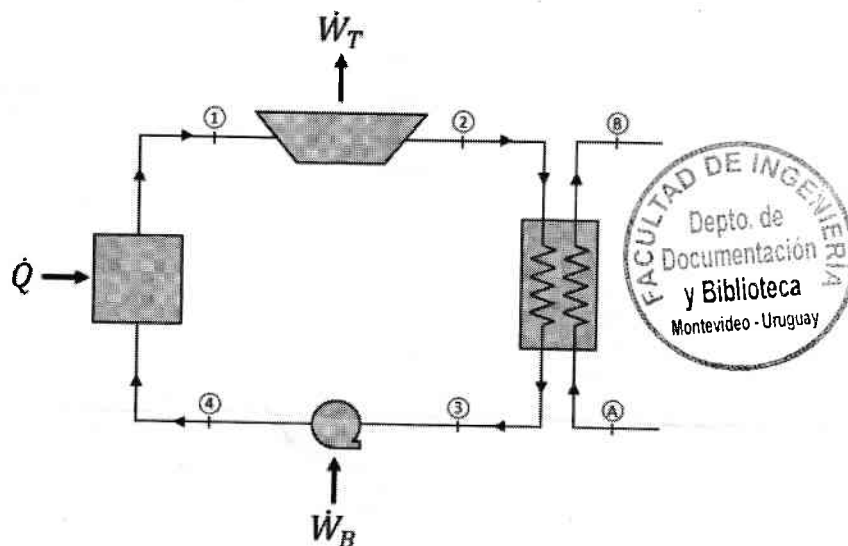
Punto	P (bar)	T (K)	$v \text{ (m}^3/\text{kg)}$	$h \text{ (kJ/kg)}$	$s \text{ (kJ/kgK)}$
1	1	77.36	0.00124	-122.02	2.8342
2	10	77.6		-120.9	
3					
4		288.15		298.85	6.7998

Problema 2

En el ciclo Rankine de la figura un flujo másico de 100 kg/s de vapor de agua ingresa a la turbina a 5 MPa y 400°C y se expande hasta una presión de 10 kPa y una calidad del 88% . Se sabe que la bomba es isentrópica y que la temperatura del estado 3 es de 20°C . El ciclo es alimentado con calor proveniente de una fuente a 450°C , y el enfriamiento se realiza con agua extraída de un lago en condiciones atmosféricas, la cual es devuelta al lago a 40°C . Se supondrá que el lago mantiene sus propiedades constantes debido al intercambio de calor con el ambiente, que se encuentra a 20°C .

- Halle la eficiencia isentrópica de la turbina y la eficiencia térmica del ciclo.
- Calcule el flujo másico de agua de enfriamiento y la tasa a la que el lago cede calor al ambiente.
- Calcule las tasas de cambio de entropía y de generación de entropía de los siguientes volúmenes de control, explicitando las hipótesis realizadas:
 - el ciclo (incluye todos los elementos de la figura)
 - la fuente térmica
 - el lago
 - el ambiente.

A partir de los resultados anteriores, calcule la tasa global de generación de entropía y enumere las fuentes de irreversibilidad e indique en cuál de los volúmenes de control analizados se acumula la entropía generada. Justifique.



Problema 1

a) Considerando al nitrógeno en los estados 3 y 4 como un gas ideal debido a su temperatura y que la turbina reversible

se tiene que

$${}_3\Delta s_4 = 0 = c_p \ln \frac{T_4}{T_3} - R \ln \frac{P_4}{P_3} \rightarrow T_3 = T_4 \left(\frac{P_3}{P_4} \right)^{Rg/c_p} = 556,3 \text{ K}$$

Por lo que tomando el estado 4 como referencia se obtiene $h_3 = h_4 + c_p(T_3 - T_4) = 577,4 \text{ kJ/kg}$.

Teniendo todas las entalpías y considerando la turbina, caldera y bomba en régimen RPFE hasta que se vacía todo el nitrógeno se tiene:

$$Q = m_{N_2}(h_3 - h_2) = 698,3 \text{ MJ}$$

$$W_T = m_{N_2}(h_3 - h_4) = 278,6 \text{ MJ}$$

$$W_B = m_{N_2}(h_1 - h_2) = -1,12 \text{ MJ}$$

Y siendo $\emptyset$ el estado vacío del cilindro

$$W_P = \int_1^{\emptyset} P dV = P_0 \int_1^{\emptyset} dV = P_0 {}_1\Delta V_{\emptyset} = -P_0 V_1 = -m_{N_2} P_0 v_1 = -124 \text{ kJ}$$

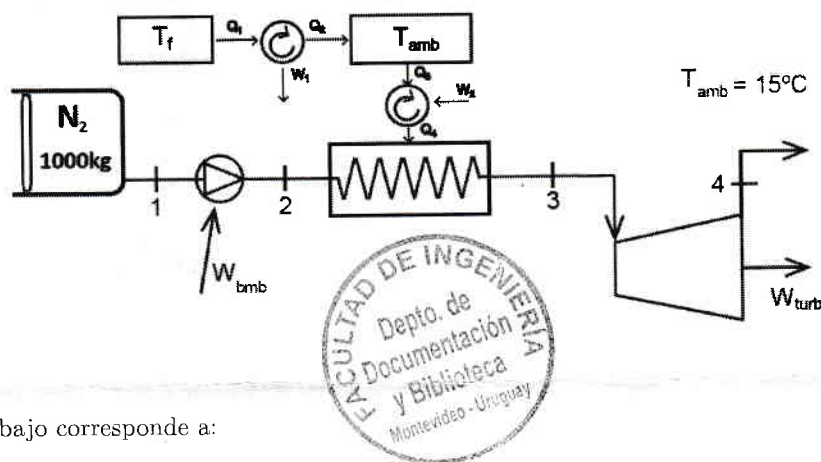
Entonces el trabajo neto del sistema es $W = W_T + W_B + W_P = 277 \text{ MJ}$

b) Haciendo segunda ley en todo el sistema (sin incluir la fuente térmica, pero con la frontera del sistema tocando dicha fuente térmica, de forma de incluir en el sistema la irreversibilidad por transferencia de calor) se tiene

$${}_1\Delta S_{\emptyset} = -m_{N_2}s_1 = \frac{Q}{T_f} + S_{gen} - m_{N_2}s_4 \rightarrow S_{gen} = m_{N_2}(s_4 - s_1) - \frac{Q}{T_f} = 2,93 \text{ MJ/K}$$

Como la bomba y turbina son reversibles la entropía es generada en el intercambio de calor en la caldera. También hay generación de entropía al mezclar el nitrógeno en el ambiente que despreciamos.

c) El trabajo reversible del sistema se obtiene eliminando la irreversibilidad del intercambio de calor usando 2 ciclos de Carnot.



Para el cuál el trabajo corresponde a:

$$W_{rev} = W + I = W + T_0 S_{gen} = 1121 \text{ MJ}$$

d) Planteando un balance de exergía a todo el sistema (sin incluir la fuente térmica) se tiene

$${}_1\Delta X_{\emptyset} = -m_{N_2}\psi_4 + Q \left(1 - \frac{T_0}{T_f} \right) - W_{rev} + P_0 \frac{dV}{dt}$$

Dado que el estado 4 está en equilibrio con el ambiente $\psi_4 = 0$. Entonces integrando se obtiene que

$${}_1\Delta X_{\emptyset} = Q \left(1 - \frac{T_0}{T_f} \right) - W_{rev} - P_0 {}_1\Delta V_{\emptyset} = Q \left(1 - \frac{T_0}{T_f} \right) - W_{rev} - W_P = -721,57 \text{ MJ}$$

Problema 2

#	Estado	T(°C)	P(kPa)	h(kJ/kg)	s(kJ/kgK)
1	sobre	400	5000	3195,6	6,6458
2	x=0,88	45,81	10	2297,47	7,2501
2s	x=0,79944	45,81	10	2104,71	6,6458
3	l. comp	20	10	83,94	0,2966
4	l. comp	-	5000	88,94	0,2966
A	l. comp	20	100	83,94	0,2966
B	l. comp	40	100	167,54	0,5724

$$p_1 = p_4, p_2 = p_3, p_A = p_B, s_1 = s_{2s}, s_3 = s_4$$

Aproximando las entalpías de los líquidos comprimidos como $h_{f@T}$ se obtienen para los estados 3, A y B. La bomba es isentrópica y trabaja con líquido comprimido por lo cual su trabajo se puede aproximar como

$$\dot{W}_B = \dot{m}(h_3 - h_4) = -\dot{m} \int_3^4 v dP \approx -\dot{m} v_3 (P_4 - P_3) = -500 \text{ kW}$$

$$h_4 = h_3 - \dot{W}_B / \dot{m} = 88,94 \text{ kJ/kg}$$

a) La eficiencia isentrópica de la turbina está determinada por el estado 2s que tiene $p_{2s} = p_2$ y $s_{2s} = s_1$

$$\eta_{isen} = \frac{\dot{W}_T}{\dot{W}_{Tisen}} = \frac{\dot{m} c_p (h_1 - h_2)}{\dot{m} c_p (h_1 - h_{2s})} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}} = 0,8232$$

La eficiencia térmica para el ciclo generador de potencia con $\dot{Q}_H = \dot{m}(h_1 - h_4)$ y $\dot{W}_{neto} = \dot{W}_B + \dot{W}_T$

$$\eta = \frac{\dot{W}_{neto}}{\dot{Q}_H} = \frac{h_1 - h_2 + h_3 - h_4}{h_1 - h_4} = 0,2875$$

b) Suponiendo el enfriador adiabático se tiene que por primera ley:

$$\dot{m}(h_2 - h_3) + \dot{m}_{lago}(h_A - h_B) = 0 \rightarrow \dot{m}_{lago} = \dot{m} \frac{h_3 - h_2}{h_A - h_B} = 2647,77 \text{ kg/s}$$

El lago intercambia calor solo con el ambiente por lo que se tiene aplicando la primera ley que

$$\dot{Q}_{lago} = \dot{m}_{lago}(h_A - h_B) = -221,35 \text{ MW}$$



c) i) El ciclo en régimen RPFE entonces la segunda ley

$$\frac{dS_{ciclo}}{dt} = \dot{m}_{lago}(s_A - s_B) + \frac{\dot{Q}_H}{T_f} + \dot{S}_{gen}^{ciclo} \rightarrow \dot{S}_{gen}^{ciclo} = \dot{m}_{lago}(s_B - s_A) - \frac{\dot{Q}_H}{T_f} = 300,66 \text{ kW/K}$$

ii) Suponiendo la fuente térmica internamente reversible, la segunda ley en su VC queda

$$\frac{dS^{FT}}{dt} = \frac{(-\dot{Q}_H)}{T_f} + \dot{S}_{gen}^{FT} = -429,60 \text{ kW/K}$$

iii) Tomando al lago como régimen RPFE la segunda ley queda

$$\frac{dS_{lago}}{dt} = \dot{m}_{lago}(s_B - s_A) + \frac{\dot{Q}_{lago}}{T_o} + \dot{S}_{gen}^{lago} \rightarrow \dot{S}_{gen}^{lago} = \dot{m}_{lago}(s_A - s_B) - \frac{\dot{Q}_{lago}}{T_o} = 24,83 \text{ kW/K}$$

iv) Suponiendo el ambiente internamente reversible, la segunda ley en su VC queda

$$\frac{dS^{amb}}{dt} = \frac{(-\dot{Q}_{lago})}{T_o} + \dot{S}_{gen}^{amb} = 755,09 \text{ kW/K}$$

Sumando las contribuciones de cada parte se tiene

$$\frac{dS^{univ}}{dt} = \frac{dS_{ciclo}}{dt} + \frac{dS^{FT}}{dt} + \frac{dS_{lago}}{dt} + \frac{dS^{amb}}{dt} = \dot{S}_{gen}^{ciclo} + \dot{S}_{gen}^{FT} + \dot{S}_{gen}^{lago} + \dot{S}_{gen}^{amb} = 325,49 \text{ kW/K}$$