Examen Termodinámica

Fecha: 6 de julio 2023

1. El examen tiene una duración máxima de 2 horas y 30 minutos.
2. Los enunciados de los problemas y las hojas de respuesta vienen separadas.
3. Los enunciados de los problemas de desarrollo vienen junto con estas instrucciones.
4. Cada problema de desarrollo tiene un cuadernillo de respuesta individual.
5. Debe entregar todos los cuadernillos con las respuestas. No es necesario entregar los enunciados.
6. Debe poner su nombre, rut y sección en cada cuadernillo de respuesta.
7. Cuando el encargado pase la lista, escriba su número de lista en cada cuadernillo de respuestas.
8. No separe las hojas de los cuadernillos de respuesta. No se pueden pedir hojas extra.
9. Consultas sólo de enunciado y en voz alta durante la primera media hora de la evaluación.
10. Se puede usar calculadora no programable.
11. No se puede usar celular. Guarde éste en su mochila.
12. No se puede prestar nada.
13. Si usa lápiz mina no podrá pedir recorrección.
14. El orden y las explicaciones son requisitos para obtener el puntaje máximo en cada problema.
15. Cualquier acto que vaya en contra del *código de honor* se sancionará con nota final 1.0 en el curso.

1. Un kilogramo de agua realiza un ciclo compuesto de los siguientes procesos:

   - **Proceso 1-2:** Calentamiento a presión constante de 1 MPa a partir de vapor saturado.
   - **Proceso 2-3:** Enfriamiento a volumen constante hasta una presión $P_3 = 0{,}5$ MPa y temperatura $T_3 = 160°\text{C}$.
   - **Proceso 3-4:** Compresión isotérmica con $Q_{34} = -815{,}8$ kJ.
   - **Proceso 4-1:** Calentamiento a volumen constante.

   a) (2 pts.) Determine el volumen específico, la energía interna y la calidad, cuando corresponda, de los estados 1, 2, 3 y 4.

   b) (1 pto.) Bosqueje el diagrama T-v y P-v.

   c) (2 pts.) Calcule el trabajo y calor de cada uno de los procesos.

   d) (1 pto.) Calcule la eficiencia térmica.

a) El estado inicial corresponde a vapor saturado a 1 MP, luego, de la Tabla A-5, $T_1 = T_{\text{sat}} = 179{,}88\,°\text{C}$ (0.2 pts.), $v_1 = v_g = 0{,}19436\ \text{m}^3/\text{kg}$ (0.2 pts.) y $u_1 = u_g = 2582{,}8\ \text{kJ/kg}$ (0.2 pts.).

Debido a que el proceso 2-3 ocurre a volumen constante, $v_2 = v_3$, así que antes determinamos el estado 3.

Ya que a $P_3 = 0{,}5$ MPa tenemos $T_{\text{sat}} = 151{,}83\,°\text{C} < T_3$, el estado 3 corresponde a vapor sobrecalentado (0.2 pts.).

De la tabla A-6, debemos interpolar usando

T [°C]	v [m^3/kg]	u [kJ/kg]
151,83	0,37483	2560,7
T_3	v_3	u_3
200	0,42503	2643,3

Luego,

$$v_3 = 0{,}37483\,\text{m}^3/\text{kg} + \frac{160 - 151{,}83}{200 - 151{,}83}(0{,}42503 - 0{,}37483)\,\text{m}^3/\text{kg} = 0{,}38334\,\text{m}^3/\text{kg}. \quad \text{(0.2 pts.)}$$

De la misma manera

$$u_3 = 2560{,}7\,\text{kJ/kg} + \frac{160 - 151{,}83}{200 - 151{,}83}(2643{,}3 - 2560{,}7)\,\text{kJ/kg} = 2574{,}71\,\text{kJ/kg}. \quad \text{(0.2 pts.)}$$

Así, $v_2 = v_3 = 0{,}38334\,\text{m}^3/\text{kg}$ (0.1 pts.).

Ahora, en el estado 2 tenemos $P_2 = 1$ MPa y $v_2 = 0{,}38334\ \text{m}^3/\text{kg}$, por lo que usando la Tabla A-5, notamos que el estado 2 será vapor sobrecalentado ($v_2 > v_{g@1000kPa}$) (0.1 pts.), así usando la Tabla A-6 a 1 MPa

T [°C]	v [m^3/kg]	u [kJ/kg]
500	0,35411	3125,0
T_2	v_2	u_2
600	0,40111	3297,5

Luego,

$$u_2 = 3125{,}0\,\text{kJ/kg} + \frac{0{,}38334 - 0{,}35411}{0{,}40111 - 0{,}35411}(3297{,}5 - 3125{,}0)\,\text{kJ/kg} = 3232{,}28\,\text{kJ/kg}. \quad \text{(0.1 pts.)}$$

Debido a que el proceso 4-1 sucede a volumen constante, $v_4 = v_1 = 0{,}19436$ (0.1 pts.), luego como $v_{f@160°C} < v_4 < v_{g@160°C}$, tendremos vapor húmedo (0.1 pts.) con $P_4 = P_{\text{sat}} = 618{,}23$ kPa (0.1 pts.) y una calidad

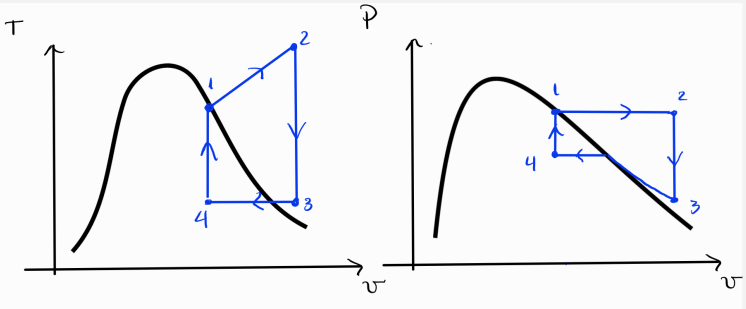
$$x_4 = \frac{v_4 - v_{f@160°C}}{v_{g@160°C} - v_{f@160°C}} = \frac{0{,}19436 - 0{,}001102}{0{,}30680 - 0{,}001102} = 0{,}632 \quad \text{(0.1 pts.)}$$

Luego, la energía interna será

$$u_4 = x_4 u_{g@160°C} + (1 - x_4)u_{f@160°C} = 0{,}632 \times 2567{,}8\,\text{kJ/kg} + 0{,}638 \times 674{,}79\,\text{kJ/kg} = 1871{,}17\,\text{kJ/kg}.$$
(0.1 pts.)

■

b) Diagrama $T-v$ (0.5 pts.) y diagrama $P-v$ (0.5 pts.)



c) El trabajo en el proceso 1-2 está dado por:

$$w_{12} = -P_1(v_2 - v_1) = -1000\,\text{kPa}\,(0{,}38334 - 0{,}19436)\,\text{m}^3/\text{kg} = -188{,}98\,\text{kJ/kg}. \quad (0.3\text{ pts.})$$

El trabajo es realizado por el gas sobre el sistema. El calor intercambiado en el proceso 1-2 viene dado por

$$q_{12} = \Delta u - w_{12} = (3232{,}28 - 2582{,}8)\,\text{kJ/kg} + 188{,}98\,\text{kJ/kg} = 838{,}46\,\text{kJ/kg}. \quad (0.3\text{ pts.})$$

El calor se agrega al sistema, tal como se esperaba.

Para el proceso 2-3, el volumen permanece constante, luego

$$w_{23} = 0 \quad (0.25\text{ pts.})$$

Luego, el calor se calcula según

$$q_{23} = \Delta u - w = u_3 - u_2 = 2574{,}71\,\text{kJ/kg} - 3232{,}28\,\text{kJ/kg} = -657{,}57\,\text{kJ/kg} \quad (0.3\text{ pts.})$$

Para el proceso 3-4, tenemos una compresión isotérmica, $T_4 = T_3 = 160\,^\circ\text{C}$.

$$w_{34} = \Delta u - q_{34} = 1871{,}17\,\text{kJ/kg} - 2574{,}71\,\text{kJ/kg} - (-815{,}8)\,\text{kJ/kg} = 112{,}26\,\text{kJ/kg}. \quad (0.3\text{ pts.})$$

Por último, el proceso 4-1 ocurre a volumen constante,

$$w_{41} = 0, \quad (0.25\text{ pts.})$$

por lo tanto

$$q_{41} = u_1 - u_4 = 2582{,}8\,\text{kJ/kg} - 1871{,}17\,\text{kJ/kg} = 711{,}63\,\text{kJ/kg} \quad (0.3\text{ pts.})$$

d) La eficiencia térmica viene dada por

$$\eta = \frac{W_{\text{net,sal}}}{Q_{\text{sum}}}.$$

El trabajo neto del ciclo es

$$W_{\text{net}} = m(w_{12} + w_{23} + w_{34} + w_{41}) = 1\,\text{kg} \times (-188{,}98 + 112{,}26)\,\text{kJ/kg} = -76{,}72\,\text{kJ}. \quad (0.3\text{ pts.})$$

Por otra parte, el calor suministrado es

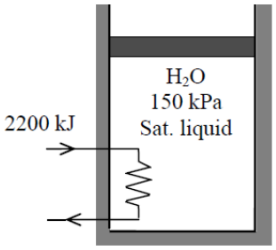
$$Q_{\text{sum}} = m(q_{12} + q_{41}) = 1550{,}09\,\text{kJ} \quad (0.3\text{ pts.})$$

Así

$$\eta = \frac{76{,}72}{1550{,}09} = 0{,}049 \quad (0.4\text{ pts.})$$

■

2. Un dispositivo cilindro-émbolo que está aislado térmicamente, contiene 5 L de agua líquida saturada a una presión constante de 150 kPa. Un calentador de resistencia eléctrica dentro del cilindro se enciende ahora, transfiriendo una energía de 2200 kJ al agua.



a) (1 pto.) Determine la masa de agua contenida en el cilindro.

b) (3 pts.) Determine el estado, la entalpía específica y la calidad (si corresponde) del agua luego de la adición de energía.

c) (2 ptos.) Determine el cambio de entropía en el sistema debido a este proceso.

a) A partir de la tabla A-5, para el estado 1 se tiene:

$$v_1 = v_{f@150kPa} = 0{,}001053\,\mathrm{m^3/kg}\,. \qquad \text{(0.5 pts.)}$$

De esta forma la masa de agua contenida en el cilindro es:

$$m = \frac{V}{v_1} = \frac{0{,}005\,\mathrm{m^3}}{0{,}001053\,\mathrm{m^3/kg}} = 4{,}75\,\mathrm{kg} \qquad \text{(0.5 pts.)}$$

b) Para determinar el estado final, es necesario considerar el balance energético para el sistema, esto es:

$$E_{in} - E_{out} = \Delta E_{sistema}$$
$$W_{e,in} - W_{sistema} = \Delta U \qquad \text{(0.25 pts.)}$$

Como $\Delta H = \Delta U + W_{sistema}$,

$$W_{e,in} = m\,(h_2 - h_1) \qquad \text{(0.5 pts.)}$$

Como el estado 1 es líquido saturado

$$h_1 = h_{f@150\,\mathrm{kPa}} = 467{,}13\,\mathrm{kJ/kg} \qquad \text{(0.25 pts.)}$$

Al despejar la entalpía del estado 2,

$$h_2 = h_1 + \frac{W_{e,in}}{m}$$
$$h_2 = 930{,}33\,\mathrm{kJ/kg} \qquad \text{(0.5 pts.)}$$

Como $h_{f@150kPa} < h_2 < h_{g@150kPa}$ el estado es una **mezcla saturada** (0.5 pts.).
La calidad de esta mezcla es:

$$\chi_2 = \frac{h_2 - h_{f@150kPa}}{h_{fg@150kPa}}$$
$$\chi_2 = 0{,}2081 \qquad \text{(1.0 pt.)}$$

c) La entropía del estado 1 está dada por

$$s_1 = s_{f@150kPa} = 1{,}4337\,\mathrm{kJ/(kg\cdot K)} \qquad \text{(0.5 pts.)}$$

Para el estado 2

$$s_2 = s_{f@150kPa} + \chi_2 \cdot s_{fg@150kPa} = 2{,}6384\,\mathrm{kJ/kg\cdot K} \qquad \text{(0.5 pts.)}$$

Finalmente el cambio de entropía del sistema está dado por

$$\Delta S = m\,(s_2 - s_1) = 5{,}72\,\mathrm{kJ/K} \qquad \text{(1 pts.)}$$

■

3. Se expande argón (Ar) en una turbina isentrópica desde 2 MPa y 500°C hasta 200 kPa. Considerando que la turbina opera de forma estacionaria y que el argón se comporta como un gas ideal, determine:

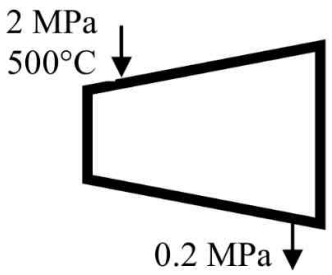
   a) (1 pto.) La temperatura del argón a la salida de la turbina.

   b) (2 pts.) El trabajo por unidad de masa generado en la turbina.

   Si experimentalmente se observa que el argón sale a 50°C, determine:

   c) (2 pts) El cambio de entropía en el argón.

   d) (1 pto.) El trabajo real generado en la turbina.



La constante del gas argón es $R_{\text{Ar}} = 0{,}2081\,\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$ y el coeficiente adiabático es $\gamma_{\text{Ar}} = 1{,}667$

a) Como la turbina es un dispositivo adiabático, se debe cumplir que

$$\frac{T^{\gamma}}{P^{\gamma-1}} = cte \qquad \text{(0.25 pts)}$$

$$T_2 = T_1\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{(\gamma-1)/\gamma} \qquad \text{(0.25 pts.)}$$

Usando la información del enunciado

$$T_2 = 308\,\text{K} \qquad \text{(0.5 pt.)}$$

b) A partir del balance energético para la turbina, el trabajo específico está dado por:

$$w_{out} = h_1 - h_2 \qquad \text{(0.5 pts.)}$$

Como la turbina opera con un gas ideal,

$$w_{out} = c_p\,(T_1 - T_2) \qquad \text{(0.5 pts.)}$$

Considerando que $\gamma = c_p/c_v$ y que $c_p - c_v = R$,

$$w_{out} = 0{,}52\,\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\,(773\,\text{K} - 308\,\text{K}) = 241{,}8\,\text{kJ/kg} \qquad \text{(1 pt.)}$$

c) Para un gas ideal, el cambio de entropía está dado por:

$$ds = \frac{dh}{T} - \frac{vdP}{T}$$

$$\Delta s = c_p \cdot ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) - R \cdot ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right) \qquad \text{(0.5 pts.)}$$

Al usar la información del enunciado:

$$\Delta s = 0{,}52\,\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} \cdot ln\left(\frac{323\,\text{K}}{773\,\text{K}}\right) - 0{,}2081\,\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} \cdot ln\left(\frac{0{,}2\,\text{MPa}}{2\,\text{MPa}}\right) = 0{,}0254\,\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} \qquad \text{(1.5 pts.)}$$

d) el trabajo está dado por:

$$w_{out} = c_p\,(T_1 - T_2) = 234\,\text{kJ/kg} \qquad \text{(1 pt.)}$$

■