



P1	P2	P3	Nota

Tiempo: 120 minutos  
 Se puede usar calculadora.  
 No se puede usar celular.  
 No se puede prestar nada.  
 Preguntas de enunciado en voz alta durante los primeros 60 minutos.  
 Si usa lápiz mina no podrá pedir corrección.

### Interrogación Nro. 3

Nombre: \_\_\_\_\_

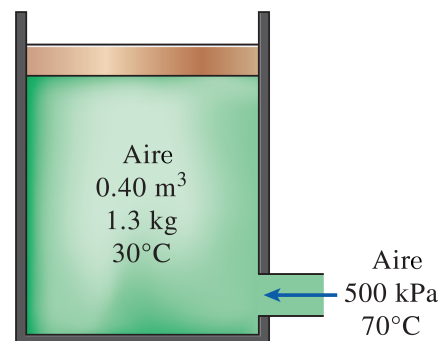
#### Problema 1

Un dispositivo cilindro-pistón contiene 1,3 kg de aire a 30 °C que ocupan un volumen de 0,4 m<sup>3</sup>. Desde una línea de suministro entra aire a 500 kPa y 70 °C hasta que el volumen aumenta en un 50 %. Asumiendo que el proceso es adiabático y que el pistón se mueve libremente, determine:

- el trabajo realizado para levantar el pistón,
- la temperatura final del aire,
- la masa de aire que entró al sistema,
- la entropía generada en el proceso.

Ayuda: considere el aire como un gas ideal con calores específicos constantes. La entropía específica es

$$s = C_P \ln \left( \frac{T}{T_{\text{ref}}} \right) - R \ln \left( \frac{P}{P_{\text{ref}}} \right),$$



donde “ref” es un estado de referencia arbitrario.

**TABLA A-1**

Masa molar, constante de gas y propiedades del punto crítico

Sustancia	Fórmula	Masa molar, <i>M</i> kg/kmol	Constante de gas, <i>R</i> kJ/kg · K*	Propiedades del punto crítico		
				Temperatura, K	Presión, MPa	Volumen, m <sup>3</sup> /kmol
Aire	—	28.97	0.2870	132.5	3.77	0.0883

**TABLA A-2**

Calores específicos de gas ideal de varios gases comunes

a) A 300 K

Gas	Fórmula	Constante de gas, <i>R</i> kJ/kg · K	<i>c<sub>p</sub></i> kJ/kg · K	<i>c<sub>v</sub></i> kJ/kg · K	<i>k</i>
Aire	—	0.2870	1.005	0.718	1.400

### Solución:

a) La presión inicial del aire es

$$P_i = \frac{m_i R_a T_i}{V_i} \\ = 282,8 \text{ kPa.}$$

Como el pistón se mueve libremente, el proceso es isobárico. Así, el trabajo es

$$W = P_i (V_f - V_i) \\ = \frac{1}{2} P_i V_i \\ = 56,6 \text{ kJ,} \quad (1,5 \text{ pts.})$$

donde hemos usado que  $V_f = 1,5V_i$ .

b) Las leyes de conservación nos dicen que

$$m_f - m_i = m_e, \quad m_f u_f - m_i u_i = m_e h_e - W \quad (0,5 \text{ pts.})$$

Pero para un gas ideal,

$$u = C_V T, \quad h = C_P T. \quad (0,5 \text{ pts.})$$

Además, podemos deshacernos de  $m_f$  usando la ecuación de estado:

$$m_f = \frac{P_f V_f}{R T_f}. \quad (0,5 \text{ pts.})$$

Así,

$$\frac{P_f V_f}{R} C_V - m_i C_V T_i = \left( \frac{P_f V_f}{R T_f} - m_i \right) C_P T_e - W.$$

Reemplazando los valores obtenemos

$$T_f = 315,4 \text{ K} \\ = 42,3^\circ \text{C.} \quad (1,0 \text{ pto.})$$

c) La masa final es

$$m_f = \frac{P_f V_f}{R T_f} \\ = 1,9 \text{ kg.}$$

Luego,

$$m_e = 0,6 \text{ kg.} \quad (0,5 \text{ pts.})$$

d) La ecuación de balance de entropía es

$$m_f s_f - m_i s_i = m_e s_e + S_{\text{gen}} \quad \Rightarrow \quad S_{\text{gen}} = m_f s_f - m_i s_i - m_e s_e \\ = m_f (s_f - s_e) - m_i (s_i - s_e). \quad (0,5 \text{ pts.})$$

Para usar la fórmula de la entropía de un gas ideal tomamos como estado de referencia el estado de entrada. Así,

$$S_{\text{gen}} = m_f \left( C_P \ln \left( \frac{T_f}{T_e} \right) - R \ln \left( \frac{P_f}{P_e} \right) \right) - m_i \left( C_P \ln \left( \frac{T_i}{T_e} \right) - R \ln \left( \frac{P_i}{P_e} \right) \right) \\ = 0,097 \text{ kJ/K.} \quad (1,0 \text{ pto.})$$

Nombre: \_\_\_\_\_

## Problema 2

Una cierta cantidad de vapor de agua se somete al siguiente ciclo (ver figura):

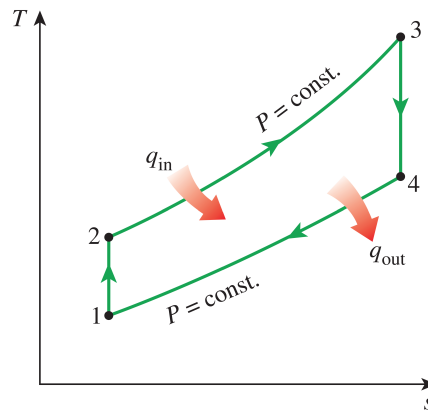
- 1 → 2 compresión isoentrópica,
- 2 → 3 adición de calor isobárica,
- 3 → 4 expansión isoentrópica,
- 4 → 1 rechazo de calor isobárico,

donde  $T_2 = 500^\circ\text{C}$ ,  $T_4 = 600^\circ\text{C}$ ,  $P_1 = 800\text{ kPa}$  y  $P_3 = 1,2\text{ MPa}$ . Calcule:

- a) la entalpía y entropía específicas de los estados 2 y 4,
- b) la temperatura y la entalpía específica de los estados 1 y 3,
- c) el calor por unidad de masa que entra y que sale del sistema,
- d) la eficiencia del ciclo,
- e) la eficiencia del ciclo de Carnot equivalente. Compare.

Ayuda: para interpolar una variable  $y$  en términos de otra variable  $x$  use la fórmula

$$y(x) = y_a + \frac{x - x_a}{x_b - x_a} (y_b - y_a) .$$



### Solución:

a) El estado 2 está determinado por

$$T_2 = 500^\circ\text{C}, \quad P_2 = P_3 = 1,2 \text{ MPa}.$$

Luego, de la tabla A-6 extraemos

$$h_2 = 3477,0 \text{ kJ/kg}, \quad s_2 = 7,6779 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}. \quad (0,5 \text{ pts.})$$

Similarmente, el estado 4 tiene

$$T_4 = 600^\circ\text{C}, \quad P_4 = P_1 = 800 \text{ kPa}.$$

Así,

$$h_4 = 3700,1 \text{ kJ/kg}, \quad s_4 = 8,1354 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}. \quad (0,5 \text{ pts.})$$

b) En el estado 3

$$s_3 = s_4 = 8,1354 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}, \quad P_3 = 1,2 \text{ MPa}.$$

Interpolando linealmente encontramos

$$h(s) = h_a + \frac{s - s_a}{s_b - s_a} (h_b - h_a), \quad \begin{array}{l} h_a = 3697,0 \text{ kJ/kg}, \quad s_a = 7,9456 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}, \\ h_b = 3922,0 \text{ kJ/kg}, \quad s_b = 8,1904 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}, \end{array}$$

$$h(s_3) = 3872,1 \text{ kJ/kg}. \quad (0,5 \text{ pts.})$$

$$T(s) = T_a + \frac{s - s_a}{s_b - s_a} (T_b - T_a), \quad \begin{array}{l} T_a = 600^\circ\text{C}, \quad s_a = 7,9456 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}, \\ T_b = 700^\circ\text{C}, \quad s_b = 8,1904 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}, \end{array}$$

$$T(s_3) = 677,5^\circ\text{C}. \quad (0,5 \text{ pts.})$$

Por último, para el estado 1,

$$s_1 = s_2 = 7,6779 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}, \quad P_1 = 800 \text{ kPa}.$$

Interpolando linealmente encontramos

$$h(s) = h_a + \frac{s - s_a}{s_b - s_a} (h_b - h_a), \quad \begin{array}{l} h_a = 3267,7 \text{ kJ/kg}, \quad s_a = 7,5735 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}, \\ h_b = 3481,3 \text{ kJ/kg}, \quad s_b = 7,8692 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}, \end{array}$$

$$h(s_1) = 3343,1 \text{ kJ/kg}. \quad (0,5 \text{ pts.})$$

$$T(s) = T_a + \frac{s - s_a}{s_b - s_a} (T_b - T_a), \quad \begin{array}{l} T_a = 400^\circ\text{C}, \quad s_a = 7,5735 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}, \\ T_b = 500^\circ\text{C}, \quad s_b = 7,8692 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}, \end{array}$$

$$T(s_1) = 435,3^\circ\text{C}. \quad (0,5 \text{ pts.})$$

c) Por primera ley, el calor que entra al sistema en la fase 2 – 3 es

$$h_2 + q_{in} = h_3 \quad \Rightarrow \quad \begin{array}{l} q_{in} = h_3 - h_2 \\ = 395,1 \text{ kJ/kg}. \end{array} \quad (0,5 \text{ pts.})$$

Similarmente, en la fase 4 – 1 tenemos

$$\begin{array}{l} q_{out} = h_4 - h_1 \\ = 357,0 \text{ kJ/kg}. \end{array} \quad (0,5 \text{ pts.})$$

d) La eficiencia del ciclo es

$$\begin{array}{l} \eta = 1 - \frac{q_{out}}{q_{in}} \\ = 0,10. \end{array} \quad (1,0 \text{ pto.})$$

e) La eficiencia del ciclo de Carnot equivalente es (no olvide que las temperaturas deben estar en Kelvin)

$$\begin{array}{l} \eta_c = 1 - \frac{T_1}{T_3} \\ = 0,25. \end{array} \quad (1,0 \text{ pto.})$$

Nombre: \_\_\_\_\_

### Problema 3

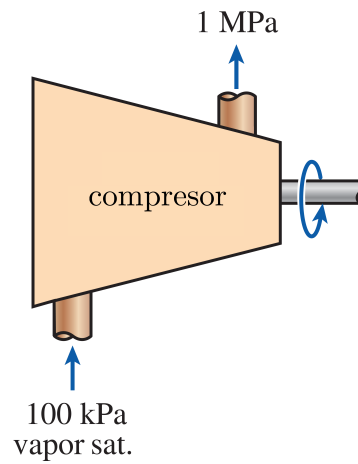
El compresor de la figura opera en condiciones estacionarias con una eficiencia isoentrópica ( $\eta = w_{\text{isoentrópico}}/w_{\text{real}}$ ) de 85 %. Encuentre:

- a) el trabajo por unidad de masa requerido por el compresor,
- b) la entropía por unidad de masa generada en el proceso,
- c) la temperatura de entrada y de salida.

Además, dibuje el proceso en un diagrama  $T - s$  con respecto a la curva de saturación.

Ayuda: para interpolar una variable  $y$  en términos de otra variable  $x$  use la fórmula

$$y(x) = y_a + \frac{x - x_a}{x_b - x_a} (y_b - y_a) .$$



### Solución:

a) La ecuación de balance de energía es

$$\dot{m}h_1 + \dot{W} = \dot{m}h_2 \quad \Rightarrow \quad h_1 + w = h_2, \quad (0,5 \text{ pts.})$$

donde hemos usado que el proceso es adiabático. La entalpía y entropía específicas de entrada son

$$h_1 = h_{g@100\text{kPa}} = 2675,0 \text{ kJ/kg}, \\ s_1 = s_{g@100\text{kPa}} = 7,3589 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}.$$

Para el compresor isoentrópico (ideal) tenemos  $s_{2s} = s_1 = 7,3589 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$  y  $P_{2s} = 1 \text{ MPa}$ . Mirando la tabla A-6 verificamos que

$$s_{2s} > s_{g@1\text{MPa}} = 6,5850 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}. \quad (0,5 \text{ pts.})$$

Por lo tanto, el agua sale del compresor como vapor sobrecalentado. Interpolando para la entalpía encontramos

$$h(s) = h_a + \frac{s - s_a}{s_b - s_a} (h_b - h_a), \quad h_a = 3158,2 \text{ kJ/kg}, \quad s_a = 7,3029 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}, \\ h_b = 3264,5 \text{ kJ/kg}, \quad s_b = 7,4670 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}, \\ h(s_{2s}) = 3194,5 \text{ kJ/kg}. \quad (0,5 \text{ pts.})$$

Así,

$$w_s = h_{2s} - h_1 \\ = 519,5 \text{ kJ/kg}.$$

Usando la eficiencia isentrópica tenemos

$$w = \frac{w_s}{\eta_s} \\ = 611,1 \text{ kJ/kg}. \quad (1,0 \text{ pto.})$$

b) Necesitamos determinar el estado final del compresor real. Para esto usamos el trabajo recién calculado y el balance de energía:

$$w = h_2 - h_1 \quad \Rightarrow \quad h_2 = w + h_1 \\ = 3286,1 \text{ kJ/kg}. \quad (0,5 \text{ pts.})$$

De la tabla A-6 vemos que

$$h_2 > h_{g@1\text{MPa}} = 2777,1 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}, \quad (0,5 \text{ pts.})$$

por lo que el estado de salida es de vapor sobrecalentado. Para calcular la entropía final interpolamos:

$$s(h) = s_a + \frac{h - h_a}{h_b - h_a} (s_b - s_a), \quad h_a = 3264,5 \text{ kJ/kg}, \quad s_a = 7,4670 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}, \\ h_b = 3479,1 \text{ kJ/kg}, \quad s_b = 7,7642 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}. \\ s(h_2) = 7,4969 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}. \quad (0,5 \text{ pts.})$$

Con esto la entropía generada queda

$$s_{\text{gen}} = s_2 - s_1 \\ = 0,1380 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}. \quad (0,5 \text{ pts.})$$

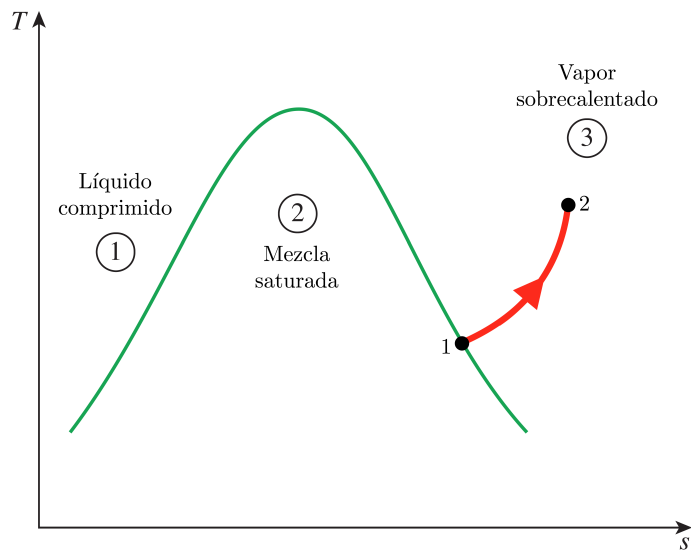
c) La temperatura de entrada es simplemente la temperatura de saturación a 100 kPa, es decir,

$$T_1 = 99,61^\circ\text{C}. \quad (0,5 \text{ pts.})$$

A la salida debemos interpolar:

$$T(h) = T_a + \frac{h - h_a}{h_b - h_a} (T_b - T_a), \quad h_a = 3264,5 \text{ kJ/kg}, \quad T_a = 400^\circ\text{C}, \\ h_b = 3479,1 \text{ kJ/kg}, \quad T_b = 500^\circ\text{C}, \\ T(h_2) = 410^\circ\text{C}. \quad (0,5 \text{ pts.})$$

d) Cualitativamente, el proceso en el diagrama  $T - s$  es



(0,5 pts.)