



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.

## Examen Final

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

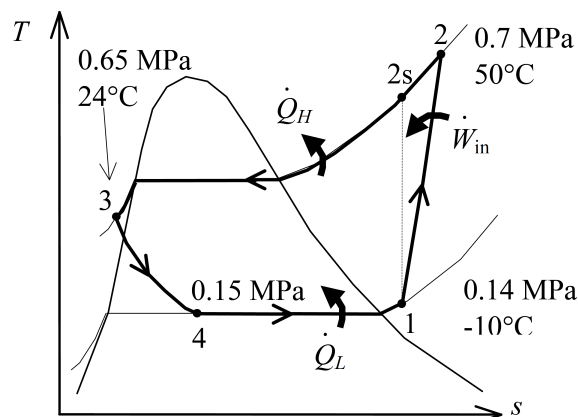
### Problema 1

Refrigerante 134a entra al compresor de un refrigerador a una tasa de 0,12 kg/s como vapor sobrecalentado a una presión de 0,14 MPa y  $-10^\circ\text{C}$  de temperatura y sale de éste a 0,7 MPa y  $50^\circ\text{C}$ . El refrigerante se enfría en un condensador a  $24^\circ\text{C}$  y 0,65 MPa y luego se estrangula en una válvula hasta 0,15 MPa. Asumiendo que el compresor y la válvula son adiabáticos,

- identifique qué partes del diagrama corresponden al compresor, al condensador y a la válvula, (1 pts.)
- calcule la tasa de transferencia de calor desde el espacio refrigerado y la potencia entregada al compresor, (2 pts.)
- encuentre la eficiencia isoentrópica del compresor, (1,5 pts.)
- determine el coeficiente de funcionamiento (CDF) del refrigerador. (1,5 pts.)

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) Las distintas partes del proceso son:

$$\begin{aligned} 1 \rightarrow 2 & \quad \text{compresor ,} \\ 2 \rightarrow 3 & \quad \text{condensador ,} \\ 3 \rightarrow 4 & \quad \text{válvula .} \end{aligned}$$

b) El balance de energía para el proceso  $4 \rightarrow 1$  es

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

La entalpía del estado 1 es

$$h_1 = 246,36 \text{ kJ/kg .}$$

La entalpía del estado 4 es la misma que la del estado 3 ya que la válvula es adiabática. Por su parte, el estado 3 corresponde a un líquido comprimido, cuyas propiedades se aproximan a las del líquido saturado a la misma temperatura. Así,

$$\begin{aligned} h_4 &= h_3 \\ &= h_f @ 24^\circ\text{C} \\ &= 84,98 \text{ kJ/kg .} \end{aligned}$$

Luego,

$$\dot{Q}_L = 19,37 \text{ kW .}$$

En el compresor tenemos

$$\dot{m}h_1 + \dot{W} = \dot{m}h_2 \quad \Rightarrow \quad \dot{W} = \dot{m} (h_2 - h_1) .$$

de la tabla extraemos

$$h_2 = 288,53 \text{ kJ/kg .}$$

Así,

$$\dot{W} = 5,06 \text{ kW .}$$

c) El balance de energía para el compresor isoentrópico es

$$\dot{m}h_1 + \dot{W}_s = \dot{m}h_{2s} \quad \Rightarrow \quad \dot{W}_s = \dot{m} (h_{2s} - h_1) .$$

La entropía  $h_{2s}$  se obtiene usando que

$$\begin{aligned} s_{2s} &= s_1 \\ &= 0,9724 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} . \end{aligned}$$

Interpolando linealmente

$$h(s) = h_a + \frac{s - s_a}{s_b - s_a} (h_b - h_a) ,$$

con

$$\begin{aligned} P_2 &= 0,7 \text{ MPa} & \Rightarrow & \quad s_a = 0,9641 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} & h_a &= 278,57 \text{ kJ/kg} \\ s_{2s} &= 0,9724 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} & & \quad s_b = 0,9954 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} & h_b &= 288,53 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

encontramos

$$h(s_{2s}) = 281,21 \text{ kJ/kg .}$$

Así,

$$\dot{W}_s = 4,18 \text{ kW .}$$

Con esto, la eficiencia isoentrópica del compresor es

$$\begin{aligned} \eta_s &= \frac{\dot{W}_s}{\dot{W}} \\ &= 0,83 . \end{aligned}$$

d) Por último, el CDF del refrigerador es

$$\begin{aligned} \text{CDF} &= \frac{\dot{Q}_L}{\dot{W}} \\ &= 3,83 . \end{aligned}$$

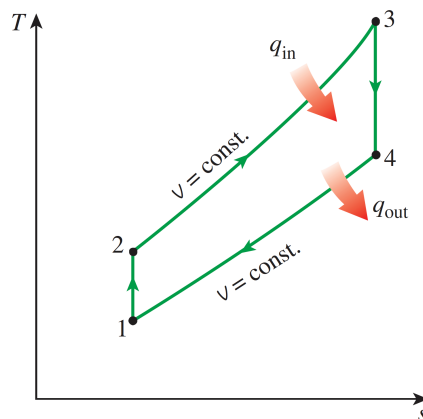
Nombre: \_\_\_\_\_

### Problema 2

Un ciclo ideal de Otto con aire como fluido de trabajo tiene una relación de compresión de  $r \equiv V_{\max}/V_{\min} = 8$ . Al comienzo de la compresión el aire en el cilindro está a  $27^\circ\text{C}$ . Si la cantidad de calor por unidad de masa transferido al aire es  $750 \text{ kJ/kg}$ , determine:

- a) la temperatura después de la compresión, (1 pto.)
- b) la temperatura al final del proceso de adición de calor (1,5 pts.)
- c) la temperatura después de la expansión, (1 pto.)
- d) la cantidad de calor rechazado por unidad de masa, (1 pto.)
- e) la producción neta de trabajo por unidad de masa, (0,5 pts.)
- f) la eficiencia térmica del ciclo de Otto y la eficiencia térmica del ciclo de Carnot equivalente. (1 pto.)

Ayuda: considere al aire como un gas ideal con calores específicos constantes ( $q = C\Delta T$ ) y recuerde que en un proceso adiabático reversible las variables de estado de un gas ideal satisfacen  $TV^{\gamma-1} = \text{constante}$ .



**TABLA A-1**

Masa molar, constante de gas y propiedades del punto crítico

Sustancia	Fórmula	Masa molar, $M \text{ kg/kmol}$	Constante de gas, $R \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}^*$	Propiedades del punto crítico		
				Temperatura, K	Presión, MPa	Volumen, $\text{m}^3/\text{kmol}$
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, $R$ $\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$	$c_p$ $\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$	$c_v$ $\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$	$k$
Aire	—	0.2870	1.005	0.718	1.400

### Solución:

Según los datos del enunciado tenemos

$$T_1 = 27^\circ\text{C}, \quad V_1 = V_4 = 8V_2 = 8V_3, \quad q_{2 \rightarrow 3} = 750 \text{ kJ/kg}.$$

a) Como el proceso  $1 \rightarrow 2$  es adiabático tenemos

$$\begin{aligned} T_1 V_1^{\gamma-1} = T_2 V_2^{\gamma-1} & \Rightarrow T_2 = T_1 \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1} \\ & = 8^{\gamma-1} T_1 \\ & = 689,56 \text{ K} \\ & = 416,41^\circ\text{C}. \end{aligned}$$

b) El calor por unidad de masa agregado al sistema en el proceso  $2 \rightarrow 3$  es

$$q_{2 \rightarrow 3} = C_V (T_3 - T_2).$$

Así,

$$\begin{aligned} T_3 = T_2 + \frac{q_{2 \rightarrow 3}}{C_V} \\ & = 1734,13 \text{ K} \\ & = 1460,98^\circ\text{C}. \end{aligned}$$

c) Como el proceso  $3 \rightarrow 4$  es adiabático tenemos

$$\begin{aligned} T_4 V_4^{\gamma-1} = T_3 V_3^{\gamma-1} & \Rightarrow T_4 = T_3 \left( \frac{V_3}{V_4} \right)^{\gamma-1} \\ & = 8^{-\gamma+1} T_3 \\ & = 754,82 \text{ K} \\ & = 481,67^\circ\text{C}. \end{aligned}$$

d) El calor rechazado es

$$\begin{aligned} q_{4 \rightarrow 1} & = C_V (T_4 - T_1) \\ & = 326,46 \text{ kJ/kg}. \end{aligned}$$

e) El trabajo por unidad de masa neto del ciclo es

$$\begin{aligned} w & = q_{2 \rightarrow 3} - q_{4 \rightarrow 1} \\ & = 423,54 \text{ kJ/kg}. \end{aligned}$$

f) La eficiencia del ciclo queda

$$\begin{aligned} \eta & = \frac{w}{q_{2 \rightarrow 3}} \\ & = 0,56, \end{aligned}$$

mientras que la eficiencia del ciclo de Carnot equivalente es

$$\begin{aligned} \eta_C & = 1 - \frac{T_1}{T_3} \\ & = 0,83. \end{aligned}$$

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

### Problema 3

Considere el dispositivo cilindro-pistón-resorte de la figura. Inicialmente el sistema contiene  $0,4 \text{ m}^3$  de refrigerante R-134a a  $0,8 \text{ MPa}$  y  $120^\circ\text{C}$ . Se abre una válvula que deja entrar refrigerante a  $1,6 \text{ MPa}$  y  $140^\circ\text{C}$  desde una línea de suministro. El proceso continúa hasta que el volumen de refrigerante al interior del cilindro es de  $0,8 \text{ m}^3$  y su temperatura es  $130^\circ\text{C}$ . Asuma que el proceso es cuasiestático de modo que el resorte siempre mantiene al pistón en equilibrio. Desprecie la presión atmosférica y el peso del pistón.

- a) Muestre que el volumen y la presión al interior del cilindro se relacionan por  $P = \alpha V$ , donde  $\alpha$  es una constante por determinar. (0,5 pts.)

Ayuda: recuerde la definición de presión y escriba la condición de equilibrio mecánico asumiendo que el resorte está en su largo natural cuando el pistón se encuentra en el fondo del recipiente.

- b) Determine la constante  $\alpha$  a partir de las condiciones iniciales. Calcule la presión final del refrigerante. (1 pts.)

- c) Calcule las masas inicial y final de refrigerante. (1 pts.)

- d) Demuestre que el trabajo realizado por el refrigerante al comprimir el resorte es

$$W = \frac{1}{2}(P_2 + P_1)(V_2 - V_1) = \frac{1}{2}(P_2 - P_1)(V_2 + V_1). \quad (0,5 \text{ pts.})$$

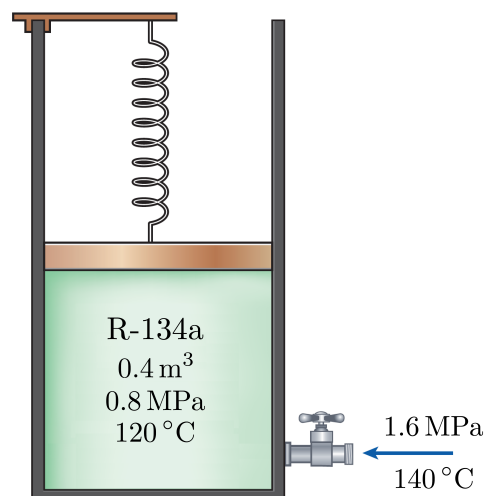
Evalúe esta expresión numéricamente.

- e) Escriba las ecuaciones de balance de masa y de energía para el proceso (transiente, por cierto) y calcule:

1) la masa de refrigerante que entró al sistema, (1 pts.)

2) el calor transferido desde/hacia el entorno. Especifique la dirección de transferencia. (1 pts.)

- f) Escriba la ecuación de balance de entropía y determine la entropía generada en el proceso si el entorno se encuentra a  $20^\circ\text{C}$ . (1 pts.)



### Solución:

a) Por equilibrio mecánico la presión del sistema está dada por

$$P = \frac{F}{A} \\ = \frac{ky}{A},$$

donde  $y$  es la posición del pistón medida desde la base del cilindro,  $A$  es el área basal de éste y  $k$  es la constante elástica del resorte. Pero el volumen del sistema es  $V = Ay$ . Luego,

$$P = \alpha V, \quad \alpha = \frac{k}{A^2}.$$

La presión es proporcional al volumen.

b) La constante de proporcionalidad se determina a partir de las condiciones iniciales. Así,

$$\alpha = \frac{P_1}{V_1} \\ = 2 \text{ MPa/m}^3.$$

Por lo tanto, la presión final es

$$P_2 = \alpha V_2 \\ = 1,6 \text{ MPa}.$$

c) La masas inicial y final son

$$m_1 = \frac{V_1}{\nu_1}, \quad m_2 = \frac{V_2}{\nu_2} \\ = 10,63 \text{ kg}, \quad = 43,95 \text{ kg},$$

donde hemos usado que  $V_1 = 0,4 \text{ m}^3$  y  $V_2 = 0,8 \text{ m}^3$ , además de  $\nu_1 = 0,037625 \text{ m}^3/\text{kg}$  y  $\nu_2 = 0,018201 \text{ m}^3/\text{kg}$  según la tabla A-13.

d) Asumiendo un proceso cuasi-estático, el trabajo hecho por el sistema es

$$W = \int_{V_1}^{V_2} P dV \\ = \alpha \int_{V_1}^{V_2} V dV \\ = \frac{1}{2} \alpha (V_2^2 - V_1^2) \\ = \frac{1}{2} \alpha (V_2 + V_1) (V_2 - V_1) \\ = \frac{1}{2} (P_2 + P_1) (V_2 - V_1) = \frac{1}{2} (V_2 + V_1) (P_2 - P_1).$$

Evalutando numéricamente,

$$W = 480 \text{ kJ}.$$

Este trabajo sale del sistema.

e) Las ecuaciones de balance de masa y de energía para este proceso son

$$m_2 - m_1 = m_e, \quad m_2 u_2 - m_1 u_1 = Q - W + m_e h_e.$$

Así, la masa que entró es

$$m_e = 33,32 \text{ kg},$$

mientras que el calor transferido queda

$$\begin{aligned} Q &= m_2 u_2 - m_1 u_1 + W - m_e h_e \\ &= -817,65 \text{ kJ}, \end{aligned}$$

donde extrajimos

$$u_1 = 327,87 \text{ kJ/kg}, \quad u_2 = 332,00 \text{ kJ/kg}, \quad h_e = 372,26 \text{ kJ/kg},$$

de la tabla. El signo significa que el calor salió desde el sistema hacia el entorno.

d) La ecuación de balance entropía es

$$m_2 s_2 - m_1 s_1 = \frac{Q}{T_{\text{entorno}}} + m_e s_e + S_{\text{gen}}.$$

De la tabla leemos

$$s_1 = 1,1798 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}, \quad s_2 = 1,1360 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}, \quad s_e = 1,1632 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K},$$

con lo que obtenemos

$$S_{\text{gen}} = 1,88 \text{ kJ/K}.$$