

Pontificia Universidad Católica de Chile
Instituto de Física
FIS1523 Termodinámica
26 de mayo del 2016

P1	P2	P3	Nota

Tiempo: 150 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 recorrección.

Interrogación Nro. 2

Nombre: _____

Problema 1

Considere 10 moles de un gas ideal monoatómico que se someten al siguiente proceso:

$1 \to 2$ Expansión isotérmica a temperatura $T_1 = 600$ K.

$2 \to 3$ Extracción de calor isocórica a volumen $V_2 = 0{,}5$ m^3.

$3 \to 4$ Compresión isobárica a presión $P_3 = 75$ kPa.

$4 \to 1$ Compresión adiabática desde una temperatura $T_4 = 350$ K hasta el estado inicial.

El sistema opera como una máquina térmica.

a) Dibuje cualitativamente el proceso en un diagrama $P - V$. *(1 pto.)*

b) Encuentre el valor de las variables T_3, V_4 y V_1 (en ese orden). *(1 pto.)*

c) Identifique las partes del proceso donde el sistema absorbe calor y calcule el calor total absorbido. *(1 pto.)*

d) Identifique las partes del proceso donde el sistema rechaza calor y calcule el calor total rechazado. *(1 pto.)*

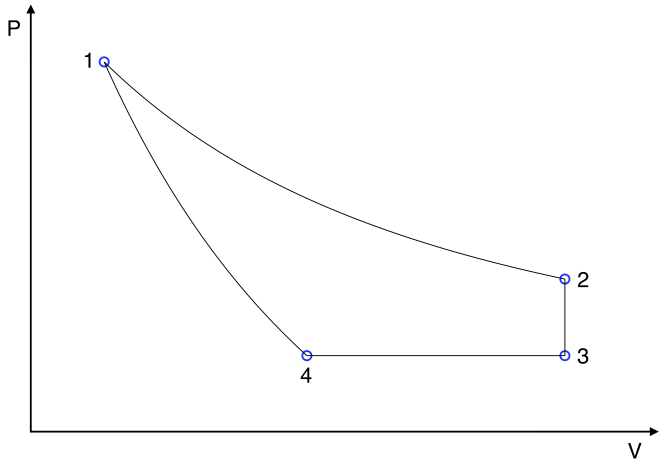
e) Calcule el trabajo neto hecho por el sistema y la eficiencia del ciclo. *(1 pto.)*

f) Identifique las temperaturas del ciclo de Carnot equivalente y compare la eficiencia correspondiente con la eficiencia anterior. ¿Cuál ciclo es más eficiente? *(1 pto.)*

Dato: $R = 8{,}314\,\mathrm{J}/\,(\mathrm{K}\cdot\mathrm{mol})$.

Solución:

a) El diagrama $P - V$ es



b) Como siempre, en cada punto usamos la ecuación de estado del gas ideal, además de conectar los estados según el proceso que corresponda. Así,

$$\begin{aligned}
\text{Estado 2:} \quad & P_2 = \frac{nRT_2}{V_2} && V_2 = 0{,}5\,\mathrm{m}^3\,, && T_2 = T_1 \\
& = 99{,}77\,\mathrm{kPa}\,, && && = 600\,\mathrm{K}\,, \\
\text{Estado 3:} \quad & P_3 = 75\,\mathrm{kPa}\,, && V_3 = V_2 && T_3 = \frac{P_3 V_3}{nR} \\
& && = 0{,}5\,\mathrm{m}^3\,, && = 451{,}05\,\mathrm{K}\,, \\
\text{Estado 4:} \quad & P_4 = P_3 && V_4 = \frac{nRT_4}{P_4} && T_4 = 350\,\mathrm{K}\,, \\
& = 75\,\mathrm{kPa}\,, && = 0{,}388\,\mathrm{m}^3\,, && \\
\text{Estado 1:} \quad & P_1 = \frac{nRT_1}{V_1} && V_1 = V_4 \left(\frac{T_4}{T_1}\right)^{\frac{1}{\gamma-1}} && T_1 = 600\,\mathrm{K}\,. \\
& = 288{,}58\,\mathrm{kPa}\,, && = 0{,}173\,\mathrm{m}^3\,, &&
\end{aligned}$$

c) La adición de calor ocurre sólo en el segmento $1 \to 2$. Por primera ley para un gas ideal en un proceso isotérmico,

$$\begin{aligned}
Q_{1\to 2} &= W_{1\to 2} \\
&= nR\,T_1 \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) \\
&= 52{,}98\,\mathrm{kJ}\,.
\end{aligned}$$

Luego,

$$Q_{in} = 52{,}98\,\mathrm{kJ}\,.$$

d) La extracción de calor se da en las partes $2 \to 3$ y $3 \to 4$:

$$\begin{aligned}
Q_{2\to 3} &= nC_V|\Delta T| && Q_{3\to 4} = nC_P|\Delta T| \\
&= \frac{3}{2}nR\,(T_2 - T_3)\,, && = \frac{5}{2}nR\,(T_3 - T_4) \\
&= 18{,}58\,\mathrm{kJ}\,, && = 21{,}00\,\mathrm{kJ}\,.
\end{aligned}$$

Así, el calor total rechazado es

$$Q_{out} = 39{,}58\,\text{kJ}\,.$$

e) El trabajo neto es

$$\begin{aligned} W &= Q_{in} - Q_{out} \\ &= 13{,}40\,\text{kJ}\,, \end{aligned}$$

con lo que la eficiencia queda

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{W}{Q_{in}} \\ &= 0{,}253 \\ &= 25{,}3\,\%\,. \end{aligned}$$

f) La temperatura más alta en el proceso es $T_1 = 600$ K, mientras que la más baja es $T_4 = 350$ K. La eficiencia del ciclo de Carnot equivalente es

$$\begin{aligned} \eta_C &= 1 - \frac{T_4}{T_1} \\ &= 0{,}417 \\ &= 41{,}7\,\%\,. \end{aligned}$$

Como pudimos haber anticipado, el proceso de Carnot es más eficiente.

Nombre: _____

Problema 2

Un tanque con un pistón movible (sin roce, de masa despreciable) se conecta a una línea de suministro que acarrea vapor de agua a 400 °C y 2 MPa (ver figura). Inicialmente el tanque se encuentra vacío, con el pistón reposando sobre la base de éste. Al abrir la válvula el pistón se mueve cuasiestáticamente hasta alcanzar un par de topes. Tras alcanzar los topes, el proceso de llenado continua hasta que el volumen específico al interior del tanque es $\nu = 0{,}37745\,\mathrm{m}^3/\mathrm{kg}$. Considere la presión atmosférica como $P_{atm} = 100$ kPa y asuma que el proceso es adiabático.

a) ¿A qué presión se encuentra el vapor cuando el pistón alcanza los topes? *(1 pto.)*

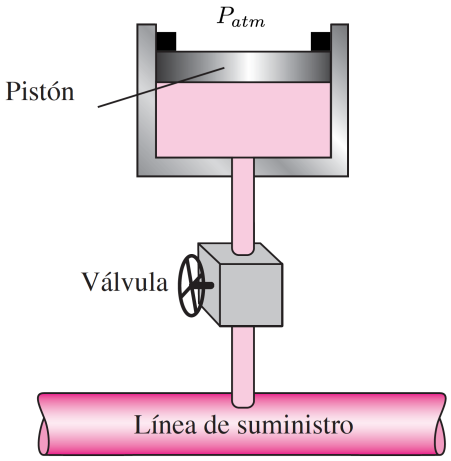
b) Encuentre la entalpía específica del sistema cuando el pistón alcanza los topes. *(2 pts.)*

c) Determine la temperatura del sistema cuando el pistón alcanza los topes. *(1 pts.)*

d) Encuentre la energía interna específica final del sistema. *(1 pts.)*

e) Determine la presión final del sistema. Para esto debe buscar en la tabla los valores del volumen específico $\nu = 0{,}37745\,\mathrm{m}^3/\mathrm{kg}$ y la energía interna calculada en el inciso anterior. *(0,5 pts.)*

f) Determine la temperatura final sistema. *(0,5 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) Como el pistón se mueve cuasiestáticamente, en la primera parte del proceso la presión del sistema permanece constante con $P = P_{atm}$. Así, $P_1 = 100$ kPa.

b) El trabajo que hace el vapor para levantar el pistón es

$$W = P_1 V_1 \,,$$

donde V_1 es el volumen definido por los topes. Como no hay intercambio de calor, la conservación de masa y la primera ley nos dicen que

$$m_1 = m_e \,, \qquad m_1 u_1 = m_e h_e - P_1 V_1 \,.$$

Dividiendo por la masa esto es

$$u_1 = h_e - P_1 \nu_1 \qquad \Rightarrow \qquad h_1 = h_e \,.$$

De la Tabla A-6 con $P = 2$ MPa y $T = 400\,^\circ$C sacamos $h_e = 3248{,}4\,\mathrm{kJ/kg}$. Por lo tanto,

$$h_1 = 3248{,}4\,\mathrm{kJ/kg} \,.$$

c) Mirando la Tabla A-6 para $P = 0{,}1$ MPa, que es la presión atmosférica, vemos que la entalpía específica $h_1 = h_e$ cae entre los $300\,^\circ$C y $400\,^\circ$C. Interpolando linealmente para la temperatura en términos de h,

$$T(h) = T_a + \frac{h - h_a}{h_b - h_a}\,(T_b - T_a) \;,$$

con

$$\begin{aligned} T_a &= 300\,^\circ\mathrm{C} \,, \qquad h_a = 3074{,}5\,\mathrm{kJ/kg} \,, \\ T_b &= 400\,^\circ\mathrm{C} \,, \qquad h_b = 3278{,}6\,\mathrm{kJ/kg} \,, \end{aligned}$$

encontramos

$$T(h_1) = 385{,}2\,^\circ\mathrm{C} \,.$$

d) Aplicando conservación de masa y de energía para el proceso completo tenemos

$$m_2 = m_e \,, \qquad m_2 u_2 = m_e h_e - P_1 V_2 \,,$$

donde hemos usado que el trabajo para levantar el pistón se hizo a presión atmosférica y que $V_1 = V_2$; una vez que el pistón alcanza los topes el vapor no hace más trabajo. Así, dividiendo por la masa y usando que el volumen específico final del sistema es $\nu_2 = 0{,}37745\,\mathrm{m^3/kg}$, encontramos

$$\begin{aligned} u_2 &= h_e - P_1 \nu_2 \\ &= 3210{,}7\,\mathrm{kJ/kg} \,. \end{aligned}$$

e) Debemos buscar en la tabla los valores $\nu = 0{,}37745\,\mathrm{m^3/kg}$ y $u = 3210{,}7\,\mathrm{kJ/kg}$. Tras una breve inspección, vemos que éstos se encuentran a una presión de 1 MPa entre las temperaturas de $500\,^\circ$C y $600\,^\circ$C:

$$P = 1\,\mathrm{MPa} \quad \rightarrow \quad \left\{ \begin{array}{lll} T_a = 500\,^\circ\mathrm{C} \,, & \nu_a = 0{,}35411\,\mathrm{m^3/kg} \,, & u_a = 3125{,}0\,\mathrm{kJ/kg} \,, \\ T_2 = ? \,, & \nu_2 = 0{,}37745\,\mathrm{m^3/kg} \,, & u_2 = 3210{,}7\,\mathrm{kJ/kg} \,, \\ T_b = 600\,^\circ\mathrm{C} \,, & \nu_b = 0{,}40111\,\mathrm{m^3/kg} \,, & u_b = 3297{,}5\,\mathrm{kJ/kg} \,. \end{array} \right.$$

f) Para determinar la temperatura interpolamos esta variable con respecto al volumen específico o la energía interna:

$$\begin{aligned} T(\nu) &= T_a + \frac{\nu - \nu_a}{\nu_b - \nu_a}\,(T_b - T_a) \;, \qquad & T(u) &= T_a + \frac{u - u_a}{u_b - u_a}\,(T_b - T_a) \;, \\ T(\nu_2) &= 549{,}7\,^\circ\mathrm{C} \,, & T(u_2) &= 549{,}7\,^\circ\mathrm{C} \,. \end{aligned}$$

Nombre: _____

Problema 3

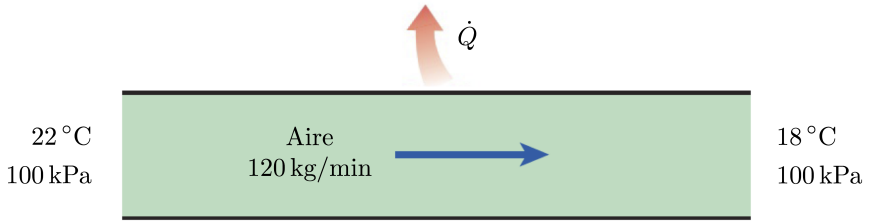
Un ducto de calefacción de área transversal 0,005 m^2 pasa por una zona expuesta al frío exterior en las condiciones que se muestran en la figura.

a) Justifique que el aire se puede tratar como gas ideal. *(1 pto.)*

b) Determine la densidad del aire a la entrada y a la salida de la zona fría. *(1 pto.)*

c) Calcule la velocidad de entrada y de salida del aire. *(2 pts.)*

d) Calcule la tasa a la que el aire pierde calor hacia el exterior. *(2 pts.)*



Datos:

TABLA A-1

Masa molar, constante de gas y propiedades del punto crítico

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

Solución:

a) De la tabla A-1 vemos que el aire se encuentra siempre a una presión mucho más baja que la presión crítica y a una temperatura mayor que la temperatura crítica:

$$\frac{P}{P_c} = 0{,}027\,, \qquad \frac{T}{T_c} \geq 2{,}197\,.$$

Por lo tanto, la aproximación de gas ideal es válida.

b) La densidad del aire está determinada por la ecuación de estado

$$PV = mR_{\text{aire}}T \qquad \Rightarrow \qquad \rho = \frac{P}{R_{\text{aire}}T}\,.$$

Extrayendo $R_{\text{aire}} = 287\,\text{J}/\,(\text{kg}\cdot\text{K})$ de la tabla A-1 encontramos

$$\rho_e = 1{,}181\,\text{kg/m}^3\,, \qquad \rho_s = 1{,}197\,\text{kg/m}^3\,.$$

c) La tasa de flujo de masa está dada por

$$\dot{m} = \rho v A \qquad \Rightarrow \qquad v = \frac{\dot{m}}{\rho A}\,.$$

Así,

$$\begin{aligned} v_e &= 338{,}8\,\text{m/s} & v_s &= 334{,}2\,\text{m/s} \\ &= 20329{,}9\,\text{m/min}\,, & &= 20054{,}4\,\text{m/min}\,. \end{aligned}$$

d) Usando la primera ley para un flujo estacionario tenemos

$$\dot{m}\left(h_e + \frac{1}{2}v_e^2\right) = \dot{m}\left(h_s + \frac{1}{2}v_s^2\right) + \dot{Q} \qquad \Rightarrow \qquad \dot{Q} = \dot{m}\,(h_e - h_s) + \frac{\dot{m}}{2}\left(v_e^2 - v_s^2\right)\,.$$

La diferencia de entalpía específica de un gas ideal es

$$\Delta h = C_P \Delta T\,.$$

Según la tabla A-2 el calor específico a presión constante es $C_P = 1005\,\text{J}/\,(\text{kg}\cdot\text{K})$. Luego,

$$\begin{aligned} \dot{Q} &= \dot{m}C_P\,(T_e - T_s) + \frac{\dot{m}}{2}\left(v_e^2 - v_s^2\right) \\ &= 11{,}13\,\text{kJ/s} \\ &= 667{,}8\,\text{kJ/min}\,. \end{aligned}$$