



Pontificia Universidad Católica de Chile  
Instituto de Física  
FIS1523 Termodinámica  
30 de noviembre del 2015

P1	P2	P3	Nota

Tiempo: 120 minutos

Se puede usar calculadora.

No se puede usar celular.

Preguntas de enunciado en voz alta durante los primeros 90 minutos.

Si usa lápiz mina no podrá pedir corrección. No se puede prestar nada.

## Pauta Examen Final

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

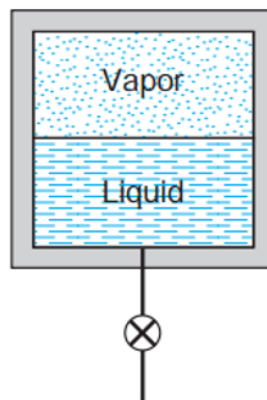
### Problema 1

Un recipiente rígido de 750 L contiene agua a 250 °C. Inicialmente, el 50 % del volumen está ocupado por agua líquida y el otro 50 % por vapor. Parte del líquido se extrae lentamente a través de una válvula al fondo del estanque, transfiriéndose calor en el proceso de manera que la temperatura permanezca constante. Si se remueve la mitad de la masa total inicial, calcule:

- La calidad inicial y final del sistema.
- La cantidad de calor requerida.

Ayuda: para interpolar linealmente una cantidad  $y$  en términos de otra variable  $x$ , utilice

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



### Solución:

- De la tabla A-4 vemos que

$$\nu_f @ 250^\circ\text{C} = 0,001252 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}, \quad \nu_g @ 250^\circ\text{C} = 0,050085 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} .$$

Como cada componente ocupa un volumen de

$$V_f = V_g = \frac{V}{2} = 0,375 \text{ m}^3,$$

las masas correspondientes son

$$m_f = \frac{V_f}{\nu_f} = 299,520767 \text{ kg}, \quad m_g = \frac{V_g}{\nu_g} = 7,487272 \text{ kg},$$

y la masa total es

$$m_1 = m_g + m_f = 307,008038 \text{ kg}.$$

Así, la calidad inicial resulta ser

$$x_1 = \frac{m_g}{m_f + m_g} = 0,024388. \quad (1.5 \text{ pts.})$$

La calidad final se obtiene notando que el volumen total del sistema se mantiene constante. Usando además que la temperatura no cambia y que, por lo tanto, tampoco lo hacen todas las cantidades específicas de cada componente (y asumiendo que al agua permanece saturada), tenemos

$$V = m_2 (x_2 \nu_g + (1 - x_2) \nu_f).$$

Despejando llegamos a

$$x_2 = \frac{\frac{V}{m_2} - \nu_f}{\nu_g - \nu_f} = 0,074414, \quad (1.5 \text{ pts.})$$

donde hemos usado que  $m_2 = \frac{m_1}{2} = 153,504019 \text{ kg}$ .

b) La conservación de energía dicta que

$$m_2 u_2 - m_1 u_1 = -m_s h_s + Q,$$

donde  $m_1$  es la masa total inicial del sistema,  $m_2 = \frac{m_1}{2}$  es la masa total final,  $m_s > 0$  es la masa de líquido que se extrajo,  $h_s$  es la entalpía que éste acarrea y  $Q$  es el calor que entró al sistema. Por conservación de masa,

$$m_s = m_1 - m_2 = \frac{m_1}{2}.$$

Así,

$$Q = m_1 \left( \frac{u_2}{2} - u_1 + \frac{h_s}{2} \right). \quad (1.5 \text{ pts.})$$

Las energías específicas para los estados inicial y final son

$$u_1 = x_1 u_g + (1 - x_1) u_f = 1117,8 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}, \quad u_2 = x_2 u_g + (1 - x_2) u_f = 1193,9 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}},$$

donde hemos extraído de la tabla A-4

$$u_{f@250^\circ\text{C}} = 1080,7 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}, \quad u_{g@250^\circ\text{C}} = 2601,8 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}.$$

Por último, de la misma tabla leemos la entalpía de salida:

$$h_{f@250^\circ\text{C}} = 1085,7 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}.$$

Juntando todos los resultados tenemos

$$Q = 6754,0 \text{ kJ}. \quad (1.5 \text{ pts.})$$

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

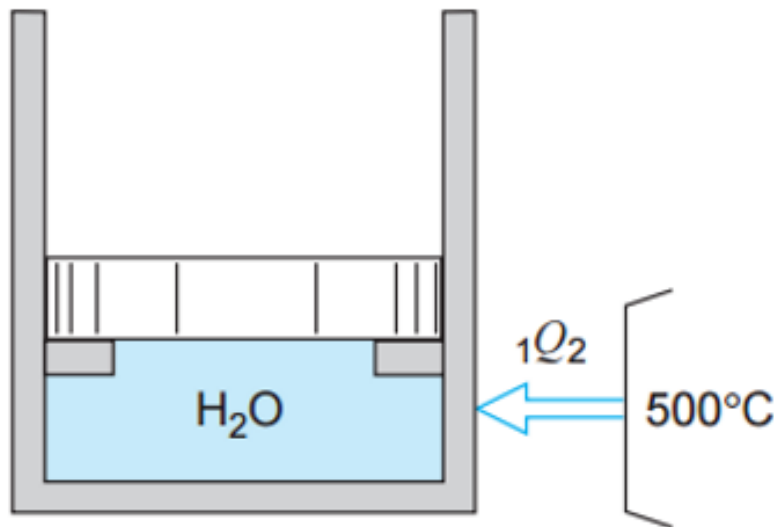
## Problema 2

Considere el sistema cilindro/pistón que se muestra en la figura. Inicialmente el sistema contiene 2 kg de agua líquida a 20 °C y 100 kPa, que luego son calentados hasta 300 °C por una fuente externa a 500 °C. La presión necesaria para levantar el pistón de los topes es de 1000 kPa. Encuentre:

- El volumen inicial del sistema.
- La temperatura del sistema cuando el pistón comienza a moverse.
- El volumen final del sistema.
- El trabajo de frontera realizado, el calor transferido y la entropía generada en el proceso.

Ayuda: para interpolar linealmente una cantidad  $y$  en términos de otra variable  $x$ , utilice

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



## Solución:

- Considerando el agua en el interior del pistón como volumen control, con índices 1 y 2 correspondientes a los estados inicial y final, respectivamente,

Primera Ley de la Termodinámica,

$$m(u_2 - u_1) = {}_1Q_2 - W_{12}$$

donde  $u_2 - u_1$  es la variación de energía interna específica en el volumen control en el proceso,  ${}_1Q_2$  es el calor transferido desde la fuente a 300°C y  $W_{12}$  es el trabajo realizado por el agua.

Segunda Ley de la Termodinámica,

$$m(s_2 - s_1) = \frac{{}_1Q_2}{T_{fuente}} + {}_1S_{2gen}$$

donde  $s_2 - s_1$  es la variación de entropía específica en el volumen control en el proceso,  $T_{fuente}$  es la temperatura fija de la fuente de calor a  $500^\circ\text{C}$  y  ${}_1S_{2gen}$  es la entropía generada en el proceso.

Si  $V_1$  es el volumen inicial, se tiene que  $V = V_1$  si la presión satisface la relación  $P \leq P_L$ , siendo  $P_L = 1000$  kPa la presión a la cual se levanta el pistón. Adicionalmente se cumple que  $P = P_L$  si  $V > V_1$ .

En el estado inicial, con  $T_1 = 20^\circ$ , los valores de tabla para líquido saturado son:

$$\begin{aligned} v_1 &= 0,001002 \text{ m}^3/\text{kg} \\ u_1 &= 83,913 \text{ kJ/kg} \\ s_1 &= 0,2965 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K} \end{aligned}$$

Luego, como la masa de agua es  $m = 2$  kg,

$$V_1 = mv_1 = 2 \cdot 0,001002 = 0,002 \text{ m}^3. \quad (1.5 \text{ pts.})$$

2. Como esta parte del proceso ocurre a volumen constante, el agua se mantiene como líquido comprimido (a la izquierda de la curva de saturación). Luego, la temperatura tiene que ser menor que la temperatura de saturación a 1000 kPa. De la tabla A-6 vemos que

$$T_{\text{sat @ 1000 kPa}} = 179,88^\circ\text{C}. \quad (0.5 \text{ pts.})$$

Como las propiedades del agua no varían considerablemente cerca de la curva de saturación, esta es la temperatura aproximada del sistema.

3. El volumen final del sistema,  $V_2$ , corresponde a la condición de vapor sobre-calentado a  $T_2 = 300^\circ\text{C}$  y  $P_2 = P_L = 1000$  kPa. Los valores de tabla para esta condición son:

$$\begin{aligned} v_2 &= 0,25799 \text{ m}^3/\text{kg} \\ u_2 &= 2793,7 \text{ kJ/kg} \\ s_2 &= 7,1246 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K} \end{aligned}$$

Luego,

$$V_2 = mv_2 = 2 \cdot 0,25799 = 0,51598 \text{ m}^3. \quad (2 \text{ pts.})$$

4. Con  $P = P_2 = 1000$  kPa = *cte*, el trabajo está dado por,

$$W_{12} = \int_1^2 P dV = P_2 (V_2 - V_1) = 1000 \cdot (0,51598 - 0,002) = 513,98 \text{ kJ}. \quad (0.5 \text{ pts.})$$

De la Primera Ley,

$${}_1Q_2 = m(u_2 - u_1) + W_{12}$$

Reemplazando,

$${}_1Q_2 = 2 \cdot (2793,7 - 83,913) + 513,98 = 5933,55 \text{ kJ}. \quad (0.5 \text{ pts.})$$

De la Segunda Ley se tiene,

$${}_1S_{2\,gen} = m(s_2 - s_1) - \frac{{}_1Q_2}{T_{fuente}}$$

Reemplazando, con  $T_{fuente} = 500 + 273 = 773$  K,

$${}_1S_{2\,gen} = 2 \cdot (7,1246 - 0,2965) - \frac{5933,55}{773} = 5,98 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K} . \quad (1 \text{ pto.})$$

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

### Problema 3

Un motor de gasolina (Otto) tiene una relación de compresión volumétrica de  $r = V_1/V_2 = 9$ . El estado antes de la compresión es de  $T_1 = 290^\circ\text{C}$ ,  $P_1 = 90 \text{ kPa}$  y la temperatura máxima del ciclo es  $T_3 = 1800^\circ\text{C}$ . Encuentre la presión  $P_4$  después de la expansión, el trabajo neto y la eficiencia del ciclo usando las propiedades del aire como gas ideal a temperatura ambiente.

Datos:  $c_p = 1,005 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ ,  $c_v = 0,718 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ ,  $\gamma = 1,4$ .

#### Solución:

Compresión:  $1 \rightarrow 2$ . Los procesos de compresión en el Ciclo de Otto son isentrópicos, por lo que  $s_2 = s_1$  y

$$\begin{aligned} T_2 &= T_1 \cdot \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{\gamma-1} \\ P_2 &= P_1 \cdot \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{\gamma} \end{aligned}$$

Con  $T_1 = 290 + 273 = 563 \text{ K}$  y  $\gamma = 1,4$  y el factor de compresión  $v_2/v_1 = 9$ , se tiene,

$$\begin{aligned} T_2 &= 563 \cdot 9^{0,4} = 1355,8 \text{ K} = 1082,8^\circ\text{C} \\ P_2 &= 90 \cdot 9^{1,4} = 1950,7 \text{ kPa} \end{aligned}$$

De la Ecuación de Estado de los gases ideales se tiene que

$$P_3 = \frac{T_3}{T_2} P_2$$

Reemplazando resulta

$$P_3 = \frac{2073}{1355,8} \cdot 1950,7 = 2982,59 \text{ kPa}$$

Expansión:  $3 \rightarrow 4$ . Proceso isentrópicos, con  $s_4 = s_3$  y usando la Ley de Estado,

$$\begin{aligned} T_4 &= T_3 \cdot (v_3/v_4)^{\gamma-1} \\ P_4 &= P_3 \cdot (T_4/T_3) \cdot (v_3/v_4) \end{aligned}$$

Considerando el factor de compresión,  $v_3/v_4 = 1/9$ , y reemplazando, resulta

$$\begin{aligned} T_4 &= 2073 \cdot (1/9)^{0,4} = 860 \text{ K} = 1133^\circ\text{C} \\ P_4 &= 2982,59 \cdot 9 \cdot (860/2073) \cdot (1/9) = 137,48 \text{ kPa} \quad (3 \text{ pts.}) \end{aligned}$$

El trabajo neto es

$$w_{\text{neto}} = w_{12} + w_{34}$$

Procesos a volumen constante,

$$\begin{aligned} w_{12} &= c_v (T_1 - T_2) \\ w_{34} &= c_v (T_3 - T_4) \end{aligned}$$

Reemplazando,

$$\begin{aligned} w_{12} &= 0,717 \cdot (563 - 1355,8) = -568,44 \text{ kJ/kg} \\ w_{34} &= 0,717 \cdot (2073 - 860) = 869,72 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

Luego, el trabajo neto es

$$w_{neto} = -568,44 + 869,72 = 301,28 \text{ kJ/kg.} \quad (2 \text{ pts.})$$

Combustión:  $2 \rightarrow 3$ . Ocurre a volumen constante, por lo que  $v_3 = v_2$  y  $c_v = 0,717 \text{ kJ/kg}$ , y

$$q_{23} = c_v (T_3 - T_2) = 0,717 \cdot (2073 - 1355,80) = 514,2 \text{ kJ/kg}$$

La eficiencia está dada por

$$\eta = \frac{w_{neto}}{q_{23}} = \frac{301,28}{514,2} = 0,5859. \quad (1 \text{ pto.})$$

Equivalentemente,

$$\eta = 1 - \frac{1}{r^{\gamma-1}} = 0,5848.$$