



Pontificia Universidad Católica de Chile  
Instituto de Física  
FIS1523 Termodinámica  
11 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.

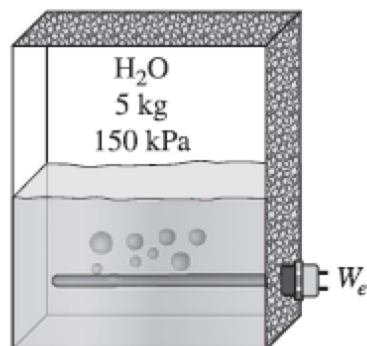
## Pauta Interrogación Nro. 3

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

### Problema 1

Un recipiente rígido bien aislado contiene 5 kg de mezcla vapor-agua a 150 kPa. Inicialmente, tres cuartas partes de la masa se encuentran en la fase líquida. Un calentador de resistencia eléctrica colocado en el recipiente se enciende hasta que todo el líquido se evapora. Determine el cambio de entropía del sistema durante este 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:

La entropía y el volumen específico iniciales están dados por

$$\begin{aligned}s_i &= (1 - x)s_{f@150\text{ kpa}} + xs_{g@150\text{ kpa}} , \\ \nu_i &= (1 - x)\nu_{f@150\text{ kpa}} + x\nu_{g@150\text{ kpa}} ,\end{aligned}$$

donde  $x = 0,25$  es la calidad de la mezcla. Extrayendo los valores de la Tabla A-5 encontramos

$$\left. \begin{aligned}s_{f@150\text{ kpa}} &= 1,4337 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \\ s_{g@150\text{ kpa}} &= 7,2231 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}\end{aligned} \right\} \Rightarrow s_i = 2,8811 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} . \quad (1 \text{pto.})$$

Así mismo, el volumen específico inicial es

$$\left. \begin{aligned}\nu_{f@150\text{ kpa}} &= 0,001053 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \\ \nu_{g@150\text{ kpa}} &= 1,1594 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}\end{aligned} \right\} \Rightarrow \nu_i = 0,2906 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} . \quad (1 \text{pto.})$$

Para determinar el estado final notamos que el volumen y la masa total se mantienen constante. Luego,

$$\nu_f = \nu_i = 0,2906 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} . \quad (1 \text{pto.})$$

En la tabla de saturación vemos que

$$\begin{aligned}\nu_{g@650\text{ kpa}} &= 0,29260 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} , \\ \nu_{g@700\text{ kpa}} &= 0,27278 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} ,\end{aligned}$$

por lo que el estado final corresponde a alguna presión intermedia entre 650 kpa y 700 kpa:

$$h@650^\circ\text{C} < s_f < h@700^\circ\text{C} . \quad (1 \text{pto.})$$

Los valores de entropía específica correspondientes son

$$\begin{aligned}s_{g@650\text{ kpa}} &= 6,7322 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} , \\ s_{g@700\text{ kpa}} &= 6,7071 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} .\end{aligned}$$

Haciendo una interpolación lineal,

$$s(\nu) = s_a + \frac{\nu - \nu_a}{\nu_b - \nu_a} (s_b - s_a) ,$$

encontramos

$$s_f = 6,7297 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} . \quad (1 \text{pto.})$$

Así,

$$\begin{aligned}\Delta S &= m(s_f - s_i) \\ &= 19,2430 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} . \quad (1 \text{pto.})\end{aligned}$$

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

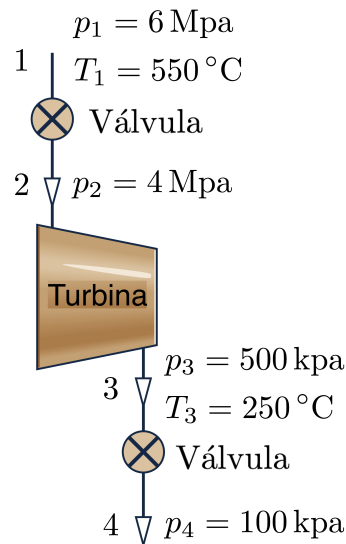
## Problema 2

La figura muestra tres dispositivos en serie, todos operando en régimen estacionario. Vapor a 6 Mpa y 550 °C pasa por una válvula de estrangulamiento ( $\dot{W} = 0$  y  $\dot{Q} = 0$ ) que disminuye su presión a 4 Mpa, tras lo cual se expande adiabáticamente en una turbina hasta 500 kpa y 250 °C. Finalmente, otra válvula de estrangulamiento regula la presión a 100 kpa. Las energías cinética y potencial del flujo pueden ser ignoradas.

- Calcule el trabajo por unidad de masa entregado por la turbina.
- Para cada dispositivo, encuentre la tasa de producción de entropía. Usando sus resultados, ordene estas componentes según su contribución a la ineficiencia del sistema.
- ¿Es posible aumentar la potencia cambiando alguna válvula de estrangulamiento? Explique brevemente.

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:

a) La conservación de energía para la turbina es

$$\dot{m}h_2 = \dot{m}h_3 + \dot{W} . \quad (0,5 \text{ pts.})$$

Luego, tras dividir por  $\dot{m}$ ,

$$w = h_2 - h_3 . \quad (0,5 \text{ pts.})$$

Al ser la válvula isoentálpica (por primera ley con  $\dot{Q} = \dot{W} = 0$ ) tenemos

$$h_2 = h_1 . \quad (0,5 \text{ pts.})$$

De la tabla A-6 leemos

$$h_1 = 3541,3 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} ,$$

$$h_3 = 2961,0 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} .$$

Así,

$$w = 580,3 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} . \quad (0,5 \text{ pts.})$$

b) Debemos determinar el estado 2. Mirando la tabla de vapor sobrecalentado a 4 Mpa, notamos que

$$h @ 500^\circ\text{C} < h_2 = h_1 < h @ 600^\circ\text{C} ,$$

y, por lo tanto,

$$s @ 500^\circ\text{C} < s_2 < s @ 600^\circ\text{C} . \quad (0,5 \text{ pts.})$$

Interpolando linealmente para la entropía,

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

donde

$$s_a = 7,0922 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} , \quad s_b = 7,3706 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} ,$$

$$h_a = 3446,0 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} , \quad h_b = 3674,9 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} ,$$

encontramos

$$s_2 = 7,2081 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} . \quad (0,5 \text{ pts.})$$

Similarmente, para el estado 4 tenemos

$$h_3 = h_4 ,$$

y vemos que a 100 kpa

$$h @ 200^\circ\text{C} < h_3 = h_4 < h @ 250^\circ\text{C} .$$

Luego,

$$s @ 200^\circ\text{C} < s_4 < s @ 250^\circ\text{C} . \quad (0,5 \text{ pts.})$$

Interpolando nuevamente con

$$s_a = 7,8356 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} , \quad s_b = 8,0346 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} ,$$

$$h_a = 2875,5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} , \quad h_b = 2974,5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} ,$$

llegamos a

$$s_4 = 8,0075 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} . \quad (0,5 \text{ pts.})$$

Por último, las entropías específicas de los estados 1 y 3 las leemos directamente de la tabla:

$$s_1 = 7,0308 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} ,$$
$$s_3 = 7,2725 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} .$$

Juntando todos estos resultados y notando que

$$s_{gen} = \Delta s ,$$

obtenemos

$$\begin{aligned} \text{válvula 1-2 :} \quad s_2 - s_1 &= 0,1773 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} , \\ \text{turbina :} \quad s_3 - s_2 &= 0,0644 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} , \quad (1 \text{ pto.}) \\ \text{válvula 3-4 :} \quad s_4 - s_3 &= 0,7350 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} . \end{aligned}$$

En orden creciente, las componentes se ordenan según su ineficiencia así: turbina, válvula 1-2, válvula 1-3.

c) El trabajo entregado por la turbina depende de la diferencia de entalpía entre los estados 2 y 3. Como la entalpía no cambia al pasar por una válvula, vemos que NO es posible aumetar la potencia (1 pto.).

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

### Problema 3

Considere una máquina térmica que opera entre dos reservorios a temperaturas  $T_c < T_h$ , como muestra la figura. En dicha máquina se cumple que la entropía generada en un ciclo es proporcional al calor que recibe del reservorio a alta temperatura, es decir,  $S_{gen} = \alpha Q_h$ .

- a) Muestre que la eficiencia de la máquina térmica está dada por

$$\eta = 1 - \frac{T_c}{T_h} (1 + \alpha T_h).$$

Ayuda:  $\Delta S = \oint \frac{dQ}{T} + S_{gen}$ .

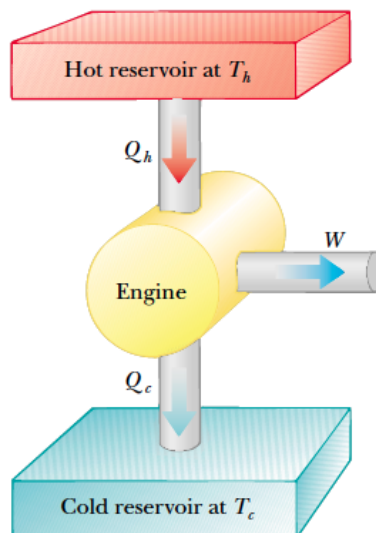
Al igual que en clases, considere ahora un refrigerador de Carnot operando entre los mismos reservorios y que utiliza como trabajo de entrada el trabajo generado por la máquina térmica. El calor que el refrigerador extrae del reservorio  $T_c$  es  $Q'_c$ , mientras que el calor que deposita en el reservorio  $T_h$  es  $Q'_h$ .

- b) Usando la primera ley y la relación entre los calores para un ciclo de Carnot, demuestre que

$$Q'_h = Q_h \left( \frac{T_h - T_c (1 + \alpha T_h)}{T_h - T_c} \right).$$

- c) A partir del resultado anterior, demuestre que si  $\alpha < 0$ , entonces el sistema combinado máquina térmica + refrigerador viola el enunciado de Clausius de la segunda ley:

*No es posible un proceso cuyo único resultado sea la transferencia de calor de un cuerpo de menor temperatura a otro de mayor temperatura.*



### Solución:

a) De la definición de entropía generada tenemos

$$0 = \frac{Q_h}{T_h} - \frac{Q_c}{T_c} + \alpha Q_h, \quad (1 \text{ pto.})$$

donde hemos usado la relación  $S_{gen} = \alpha Q_h$  y que en un ciclo se cumple que  $\Delta S = 0$ . Luego,

$$Q_c = \frac{T_c}{T_h} (1 + \alpha T_h) Q_h. \quad (0,5 \text{ pts.})$$

Así, la eficiencia de la máquina es

$$\begin{aligned} \eta &= 1 - \frac{Q_c}{Q_h} \\ &= 1 - \frac{T_c}{T_h} (1 + \alpha T_h) Q_h. \quad (1 \text{ pto.}) \end{aligned}$$

b) Para el sistema combinado la primera ley nos dice

$$Q_h + Q'_c = Q_c + Q'_h. \quad (1 \text{ pto.})$$

Usando la relación anterior entre  $Q_h$  y  $Q_c$  y sabiendo que para un ciclo de Carnot se cumple que

$$\frac{Q'_c}{T_c} = \frac{Q'_h}{T_h}, \quad (0,5 \text{ pts.})$$

la ecuación anterior implica

$$Q_h + \frac{T_c}{T_h} Q'_h = \frac{T_c}{T_h} (1 + \alpha T_h) Q_h + Q'_h.$$

Despejando  $Q'_h$  resulta en

$$Q'_h = Q_h \left( \frac{T_h - T_c (1 + \alpha T_h)}{T_h - T_c} \right). \quad (1 \text{ pto.})$$

c) Del resultado anterior tenemos

$$Q'_h - Q_h = -\frac{\alpha T_h T_c}{T_h - T_c} Q_h.$$

Si  $\alpha < 0$ , esta diferencia, que representa el calor neto que sale del sistema combinado hacia el reservorio  $T_h$ , es positiva, lo que significa que hay una transferencia de calor desde  $T_c$  hacia  $T_h$ . Esto entraría en conflicto con el postulado de Clausius ya que el sistema no recibe trabajo alguno (1 pto.).