Pontificia Universidad Católica de Chile
Instituto de Física
FIS1523 Termodinámica
Interrogación 3
16 de junio del 2017

FIS1523 Termodinámica
Interrogación 3

Duración: 120 minutos

Instrucciones:

- Los enunciados de los problemas y las hojas de respuesta vienen separadas.
- Todos los enunciados vienen en un único cuadernillo junto con estas instrucciones.
- Cada pregunta tiene un cuadernillo de respuesta individual.
- Debe entregar sólo los cuadernillos con las respuestas. No es necesario entregar los enunciados.
- Debe poner su nombre y sección en cada cuadernillo de respuestas, además de escribir claramente el número de la pregunta a la que corresponde.
- Cuando el encargado pase la lista, escriba su número de lista en cada cuadernillo de respuestas.
- No separe las hojas de los cuadernillos de respuesta. No se pueden pedir hojas extra.
- Consultas sólo de enunciado y en voz alta.
- Se puede usar calculadora no programable.
- No se puede usar celular. Guarde éste en su mochila.
- No se puede prestar nada.
- Si usa lápiz mina no podrá pedir recorrección.
- El orden y las explicaciones son requisitos para obtener el puntaje máximo en cada problema.

Problema 1

Un sistema cilindro-pistón contiene 2 kg de agua a 5 MPa y 100 °C. Se añade calor al sistema de un reservorio a 700 °C hasta que el sistema alcanza esta temperatura. Suponiendo que no existe fricción y que el proceso es isobárico:

a) Determine el trabajo realizado. *(1 pto.)*

b) Determine el calor total transferido al agua. *(1 pto.)*

c) Determine el cambio de entropía del agua. *(1 pto.)*

d) Determine la entropía generada durante el proceso. *(1 pto.)*

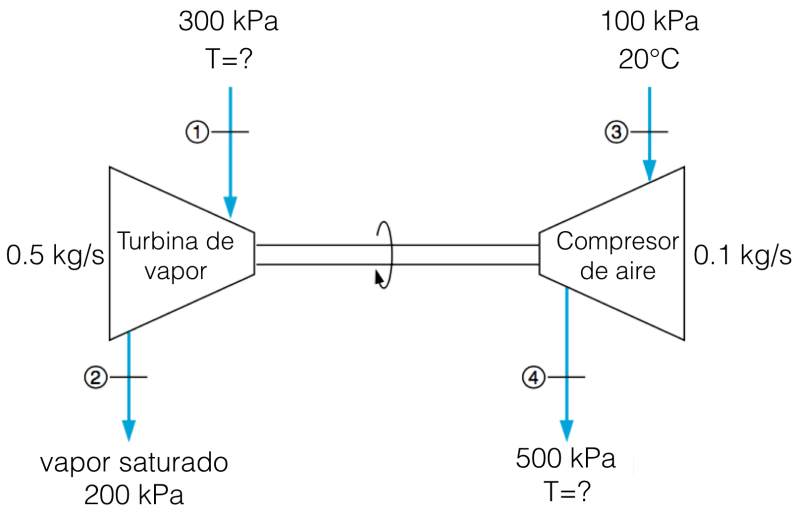
e) Dibuje cualitativamente con respecto a la campana de saturación el proceso en un diagrama $P - v$ y en un diagrama $T - s$. *(1 pto.)*

f) Según los resultados obtenidos, indique y justifique si se trata de un proceso reversible, irreversible o imposible. *(1 pto.)*

Nota: Recuerde que las propiedades del líquido comprimido se pueden aproximar por las propiedades del líquido saturado a la misma temperatura.

Problema 2

Se tiene una turbina de vapor y un compresor de aire, ambos adiabáticos y operando en estado estacionario. La turbina toma vapor a 300 kPa y la desecha como vapor saturado a 200 kPa, a una tasa de 0.5 kg/s. El compresor toma aire del ambiente a 100 kPa y 20 °C y lo comprime a 500 kPa a una tasa de 0.1 kg/s. Todo el trabajo producido por la turbina se utiliza para alimentar el compresor. Puede asumir que el aire es un gas ideal.



a) Demuestre que, si el compresor es reversible, la temperatura T_4 con la que el aire sale del compresor es igual a 464.5 K. *(1 pto.)*

b) Indique si, para el mismo estado de entrada y la misma presión de salida, T_4 sería mayor, menor o igual a 464.5 K si el compresor no fuera reversible. Justifique muy brevemente su respuesta. *(1 pto.)*

A partir de aquí puede asumir que el compresor es reversible, pero no la turbina.

c) Determine la potencia que entrega la turbina. *(1 pto.)*

d) Determine la temperatura a la entrada de la turbina. *(1 pto.)*

e) Determine la tasa a la que se genera entropía en la turbina. *(1 pto.)*

f) Determine la eficiencia isentrópica de la turbina asumiendo que en el caso isentrópico el agua sigue saliendo a 200 kPa pero no necesariamente como vapor saturado. *(1 pto.)*

Problema 3

En la figura se muestra un proceso cíclico y su diagrama T-s correspondiente. El ciclo consiste en 4 procesos:

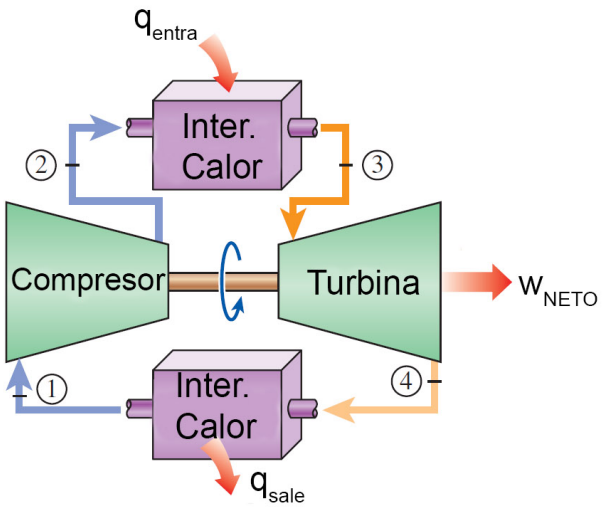
1 - 2 Compresión isentrópica (compresor).

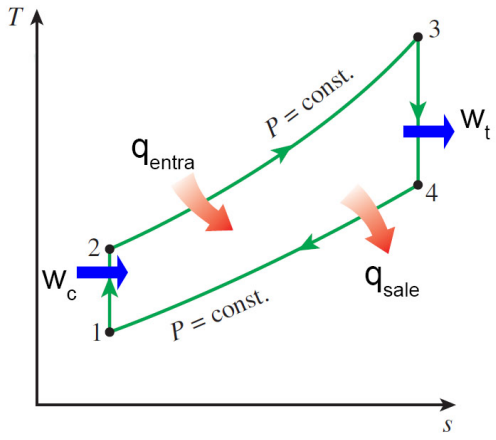
2 - 3 Adición de calor isobárica (intercambiador de calor).

3 - 4 Expansión isentrópica (turbina).

4 - 1 Liberación de calor isobárica (intercambiador de calor).

El proceso 4-1 ocurre a una presión contante P_0 y el proceso 2-3 ocurre a una presion constante rP_0, con $r > 1$. El ciclo utiliza aire que se puede aproximar como gas ideal con $\gamma = 1.4$ y calores especificos constantes $c_p = 1.005\,\mathrm{kJ/kg \cdot K}$, $c_v = 0.718\,\mathrm{kJ/kg \cdot K}$.





a) Demuestre que la eficiencia térmica del ciclo es:

$$\eta = 1 - \frac{1}{r^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} \qquad \textit{(3 pts.)}$$

b) Si $r = 10$, la temperatura minima durante el ciclo es $T_{min} = 300K$ y la máxima $T_{max} = 1000K$. Determine el trabajo por unidad de masa que consume el compresor y que genera la turbina. *(2 pts.)*

c) Usando los valores de (b), calcule la eficiencia de Carnot equivalente, y compare con la eficiencia térmica del ciclo. *(1 pto.)*

Pontificia Universidad Católica de Chile
Instituto de Física
FIS1523 Termodinámica
Interrogación 2
22 de mayo del 2017

P1	P2	P3	Nota

Nombre: _____ **Sección:** _____ **Nº:**_____

Solución Problema 1:

a) Determinamos el trabajo realizado:

$$W_{12} = P(V_2 - V_1) = mP(v_2 - v_1)$$

-Estado inicial: $P_1 = 5\,MPa$; $T_1 = 100\,^0C$ (líquido comprimido) *(0,25 pts.)*

$$v_{@\,T,P} \approx v_{f@T}$$

$$v_1 = 0.001043\ m^3/kg \quad (Tabla\ A-5)$$

-Estado final: $P_1 = 5\,MPa$; $T_1 = 700\,^0C$ (Vapor sobrecalentado) *(0,25 pts.)*

$$v_2 = 0.08852\ m^3/kg \quad (Tabla\ A-6)$$

$$W_{12} = mP(v_2 - v_1) = 874.77\ kJ \qquad \textit{(0,5 pts.)}$$

b) Determinamos el calor transferido:

$$Q_{12} = \Delta U - W_{12} = m(u_2 - u_1) + mP(v_2 - v_1) = m(h_2 - h_1) \qquad \textit{(0,5 pts.)}$$

$$h_1 = 417.51\ kJ/kg \quad (h_{@\,T,P} \approx h_{f@T}) \quad (Tabla\ A-5)$$

$$h_2 = 3900.3\ kJ/kg \quad (Tabla\ A-6)$$

$$Q_{12} = m(h_2 - h_1) = 6965.58kJ \qquad \textit{(0,5 pts.)}$$

También se puede obtener a partir de los valores de energía interna de las tablas y del trabajo (calculado en el apartado anterior). Nota: Los resultados son aproximados debido a la aproximación de líquido saturado a esa temperatura en el estado inicial.

c) Tenemos que:

$$s_1 = 1.3028\ kJ/(kg\,K) \quad (s_{@\,T,P} \approx s_{f@T}) \quad (Tabla\ A-5) \qquad \textit{(0,25 pts.)}$$

$$s_2 = 7.5136\ kJ/(kg\,K) \quad (Tabla\ A-6) \qquad \textit{(0,25 pts.)}$$

por lo que:

$$\Delta S = m(s_2 - s_1) = 12.422\ \text{kJ/K} \qquad \textit{(0,5 pts.)}$$

d) Determinamos la entropía generada:

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int \frac{\delta Q}{T} + S_{gen}$$

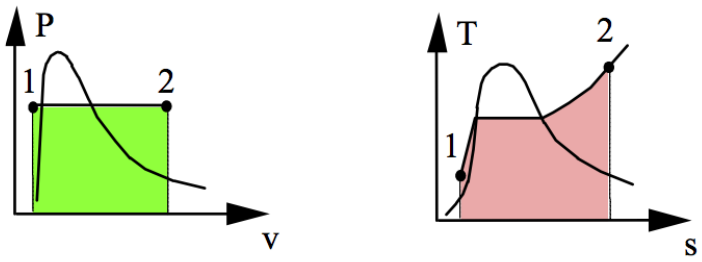
Como se trata de una transferencia de calor a temperatura constante:

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \frac{Q_{12}}{T} + S_{gen}$$

$$S_{gen} = m(s_2 - s_1) - \frac{Q_{12}}{T} \qquad \textit{(0,5 pts.)}$$

$$S_{gen} = 5.264\ kJ/K \qquad \textit{(0,5 pts.)}$$

e) *(0.5 pts por diagrama)*



f) Proceso irreversible ya que $S_{gen} > 0$. *(1 pto.)*

Solución Problema 2:

a) Sabemos que para el aire en el compresor $\Delta s = c_p \ln\left(\frac{T_4}{T_3}\right) - R \ln\left(\frac{P_4}{P_3}\right)$, por ende para un proceso isentrópico $T_3 P_3^{\frac{k-1}{k}} = T_4 P_4^{\frac{k-1}{k}}$ *(0,5 pts.)*. De aquí obtenemos que:

$$T_4 = T_3 \left(\frac{P_4}{P_3}\right)^{\frac{k-1}{k}} = 293.2 \left(\frac{500}{100}\right)^{0.286} = 464.5\ \text{K} \qquad \textit{(0,5 pts.)}$$

b) Haciendo el balance de masa para el compresor llegamos a $\dot{m}_3 = \dot{m}_4$. Por ende, el balance de energía en este dispositivo nos lleva a $\dot{W}_C = \dot{m}_3(h_3 - h_4)$, y $\dot{W}_{Cs} = \dot{m}_3(h_3 - h_{4s})$ en el caso isentrópico.

El compresor requiere mayor trabajo en caso de que haya irreversibilidades *(0,5 pts.)*, es decir $|W_C| > |W_{Cs}|$, lo que implica que $h_4 > h_{4s}$. Como la entalpía de un gas ideal sólo depende de la temperatura, esto implica que la temperatura final en el caso no reversible sería mayor a la de (a). *(0,5 pts.)*

c) Tenemos que:

$$\dot{W}_{Cs} = \dot{m}_3(h_3 - h_{4s}) = \dot{m}_3 c_p(T_3 - T_4) \textit{(0,5 pts.)} = (0.1)(1.005)(293.2 - 464.5) = -17.2 \text{ kW}$$

Pero $\dot{W}_T = -\dot{W}_{Cs}$, así que $\dot{W}_T = 17.2$ kW. *(0,5 pts.)*

d) Para la turbina tenemos que $\dot{m}_1 = \dot{m}_2$ y que $\dot{W}_T = \dot{m}_1(h1 - h2)$. De la tabla A-5 obtenemos que $h_2 = h_{\text{g@200kPa}} = 2706.3$ kJ/kg y

$$h_1 = h_2 + \frac{\dot{W}_T}{\dot{m}_1} = 2706.3 + \frac{17.2}{0.5} = 2740.7 \text{ kJ/kg} \qquad \textit{(0,5 pts.)}$$

Vamos a la tabla de vapor sobrecalentado A-6 y vemos que, a 300 kPa, la temperatura debe estar entre 133.52°C y 150°C. Haciendo la interpolación nos queda:

$$T_1 = \frac{150 - 133.52}{2761.2 - 2724.9}(2740.7 - 2724.9) + 133.52 = 140.7°\text{C} \qquad \textit{(0,5 pts.)}$$

e) El balance de entropía en la turbina queda:

$$\Sigma \frac{\overset{0}{\dot{Q}}}{T} + \dot{m}_1 s_1 - \dot{m}_2 s_2 + \dot{S}_{\text{gen}} = \cancel{\dot{S}_{VC}}^{0}$$
$$\rightarrow \dot{S}_{\text{gen}} = \dot{m}_1(s_2 - s_1) \qquad \textit{(0,5 pts.)}$$

De la tabla A-5 obtenemos que $s_2 = h_{\text{g@200kPa}} = 7.1270$ kJ/(kgK). De la tabla A-6 hacemos otra interpolación similar a la del inciso anterior y encontramos:

$$s_1 = \frac{7.0792 - 6.9917}{2761.2 - 2724.9}(2740.7 - 2724.9) + 6.9917 = 7.02979 \text{ kJ/(kg K)}$$

Nos queda que $\dot{S}_{\text{gen}} = (0.5)(7.1270 - 7.02979) = 0.049$ kW/K. *(0,5 pts.)*

f) Para calcular la eficiencia isentrópica necesitamos la potencia isentrópica $\dot{W}_{Ts}$. En este caso $s_{2s} = s_1 = 7.02979$ kJ/(kgK). Vamos a la tabla de agua saturada A-5 y vemos que a 200kPa tenemos que $s_f < s_{2s} < s_g$, por lo que tenemos una mezcla saturada (esto era de esperarse, ya que en el caso isentrópico la turbina va a producir más trabajo que en el caso real y la entalpía de salida tendrá que ser menor a la del caso real). Tenemos que:

$$\begin{aligned} s_{2s} &= s_{f@200kPa} + x_{2s} s_{fg@200kPa} \\ 7.02979 &= 1.5302 + x_{2s}(5.5968) \\ &\rightarrow x_{2s} = 0.983 \qquad \textit{(0,5 pts.)} \end{aligned}$$

Por ende $h_{2s} = h_{f@200kPa} + x_{2s} h_{fg@200kPa} = 504.71 + 0.983(2201.6) = 2668.9$ kJ/kg. Por ende, $\dot{W}_{Ts} = \dot{m}_1(h_1 - h_{2s}) = (0.5)(2740.7 - 2668.9) = 35.9$ kW. Como esperado, este valor es superior a lo obtenido en (c). Nos queda entonces que:

$$\eta_T = \frac{\dot{W}_T}{\dot{W}_{Ts}} = \frac{17.2}{35.9} = 0.48. \qquad \textit{(0,5 pts.)}$$

Solución Problema 3:

a) Tenemos un flujo estacionario, despreciamos energia potencial y cinetica. Consevación de energia:

$$(q_e - q_s) - (w_e - w_s) = h_s - h_e$$

Los procesos 2-3 y 4-1 no hay trabajo y son donde entra y sale calor:

$$q_e = h_3 - h_2 = c_p(T_3 - T_2) \text{ (0.5 pts.)}; \qquad q_s = h_4 - h_1 = c_p(T_4 - T_1) \text{ (0.5 pts.)}$$

El trabajo neto es simplemente la diferencia entre el calor que entra y el que sale:

$$w_{neto} = q_e - q_s = h_3 - h_2 - h_4 + h_1 = c_p(T_3 - T_2 - T_4 + T_1)$$

La eficiencia del ciclo se escribe:

$$\eta = \frac{w_{neto}}{q_e} = 1 - \frac{q_s}{q_e} = 1 - \frac{c_p(T_4 - T_1)}{c_p(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_1(T_4/T_1 - 1)}{T_2(T_3/T_2 - 1)} \qquad \text{(0,5 pts.)}$$

En los procesos isentropicos 1-2 y 3-4 tenemos las relaciones adiabaticas:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = \left(\frac{P_3}{P_4}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = \frac{T_3}{T_4} \qquad \text{(0,5 pts.)}$$

Con esto podemos reducir la expresion para la eficiencia ($T_4/T_1 = T_3/T_2$):

$$\eta = 1 - \frac{T_1(T_4/T_1 - 1)}{T_2(T_3/T_2 - 1)} = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \qquad \text{(0,5 pts.)}$$

Pero tenemos que $P_1 = P_0$ y $P_2 = rP_0$, entonces $P_1/P_2 = 1/r$

$$\eta = 1 - \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = 1 - \frac{1}{r^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} \qquad \text{(0,5 pts.)}$$

b) Necesitamos obtener las temperaturas en las 4 etapas y tenemos 2, $T_{min} = T_1 = 300K$, $T_{max} = T_3 = 1000K$. Las otras temperaturas las obtenemos de las relaciones adiabaticas:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = r^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = 1.931 \quad \Rightarrow \quad T_2 = 579.2K \qquad \text{(0,5 pts.)}$$

$$\frac{T_4}{T_3} = \left(\frac{P_4}{P_3}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = \left(\frac{1}{r}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = 0.518 \quad \Rightarrow \quad T_4 = 517.9K \qquad \text{(0,5 pts.)}$$

Ahora calculamos los trabajos realizados por el compresor y la turbina:

$$w_c = h_1 - h_2 = c_p(T_1 - T_2) = -280.6kJ/kg \qquad \text{(0,5 pts.)}$$

$$w_t = h_3 - h_4 = c_p(T_3 - T_4) = 484.51kJ/kg \qquad \text{(0,5 pts.)}$$

c) La eficiencia del ciclo de Carnot equivalente se obtiene usando las temperaturas máximas y minimas:

$$\eta_C = 1 - \frac{T_{min}}{T_{max}} = 1 - \frac{T_1}{T_3} = 1 - \frac{300}{1000} = 0.7 \qquad \text{(0,5 pts.)}$$

La eficiencia térmica del ciclo es:

$$\eta = 1 - \frac{1}{r^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} = 1 - \frac{1}{10^{\frac{0.4}{1.4}}} = 0.482 < \eta_C \qquad \text{(0,5 pts.)}$$