Termodinamica para Ingenieros, FIS1523

I3

Facultad de Física
Pontificia Universidad Católica de Chile
Segundo Semestre 2014

Tiempo para responder: 120 min

Atención!!

- Si utiliza lápiz de grafito, perderá la posibilidad de reclamar errores de corrección.
- El profesor no se hace responsable de las respuestas que los ayudantes puedan dar a sus consultas durante el examen.

Nombre: _____ **Sección:** _____

Problema 1

Un sistema cilindro-piston esta lleno de agua saturada en estado líquido a 150 Celsius. Se agrega calor desde afuera y el agua pasa al estado de vapor saturado. Durante este proceso el pistón actúa con fuerza constante. Asuma que el proceso es reversible.

a) Dibuja el proceso en un diagrama P-V y T-S

b) ¿Cuanto vale el trabajo neto por unidad de masa?

c) ¿Cuanto cambia la entropía del agua por unidad de masa?

d) ¿Cuanto vale el calor agregado por unidad de masa? Calcula este valor con dos métodos distintos y compara.

Ahora el mismo sistema pasa del mísmo estado inicial al mísmo estado final, pero en vez de que se agregue calor desde afuera se realiza trabajo (por ejemplo con un batidor).

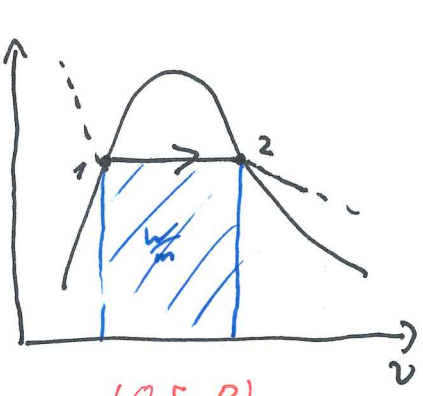
e) Indica si este proceso es reversible o irreversible.

f) Calcule el trabajo neto del sistema para este proceso, e interpreta el signo.

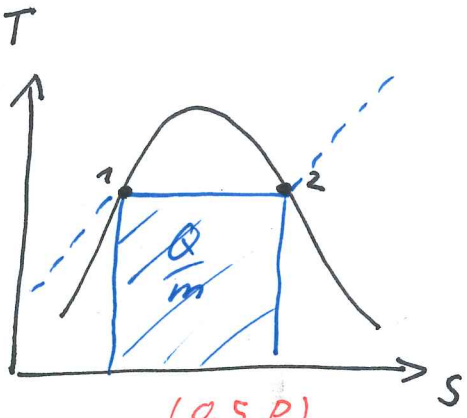
g) ¿Cuanto cambia la entropía del agua por unidad de masa? Compara con el 1 c) y explica el resultado de la comparación.

Pauta

a)



(0,5 P)



(0,5 P)

b) Reversible: camino $P(v)$ bien definido

$$\frac{W}{m} = \int_1^2 P\,dv$$

↖ cte. (gráfico 1)

$$= P(v_2 - v_1) \qquad (0,5\,P)$$

de tabla $P = P_{sat} = 476.16\ kPa$ @ 150°C

$$v_2 = v_g = 0392\ \frac{m^3}{kg}$$

$$v_1 = v_f = 0,001\ \frac{m^3}{kg}$$

$$\Rightarrow \frac{W}{m} = 186.2\ \frac{kJ}{kg} \qquad (0,5\,P)$$

c) Cambio entropía

$$\Delta S = S_2 - S_1$$

$$= S_g - S_f = 4.995\ \frac{kJ}{kg\,K}$$

(0,5 P)

tabla: @ 150°C

$$S_g = 6,837\ \frac{kJ}{kg\,K^\circ} \qquad S_f = 1,842\ \frac{kJ}{kg\,K^\circ}$$

d) Metodo ① balance energía

$$u_2 - u_1 = \frac{Q}{m} - \frac{W}{m}$$

$$\Rightarrow \frac{Q}{m} = u_2 - u_1 + \frac{W}{m} = 2114\ \frac{kJ}{kg} \qquad (0,5\,P)$$

d) Metodo ②

① Del gráfico 2 vemos $T = cte$

② Proceso reversible ⇒

$$Q = \int_1^2 T\,dS = m \int_1^2 T\,ds \quad (T \uparrow cte)$$

⇒

$$\frac{Q}{m} = \underline{\underline{T(s_2 - s_1)}} = \underline{\underline{2774 \frac{kJ}{kg}}} \quad (0,5P)$$

mismo valor

con $T = (273,15 + 150)\,K = 423,15\,K$

tabla @150°C: $s_2 = s_g = 6,837 \frac{kJ}{kg\,K}$ $\quad s_1 = s_f = 1,842 \frac{kJ}{kg\,K}$

e) irreversible ⇒ camino $P(v)$ no bien definido ⇒ usar balance de energía (0,5P)

f)

$$\Delta U + \Delta K_{kin} + \Delta P_{pot} = Q - W_{net}$$

$\Delta K_{kin} = 0$, $\Delta P_{pot} = 0$, $Q = 0$

$$\frac{W_{net}}{m} = -(u_2 - u_1) = -1927,4 \frac{kJ}{kg} \quad (0,5P)$$

tabla @150°C: $u_2 = 2559,1 \frac{kJ}{kg}$

$u_1 = 631,7 \frac{kJ}{kg}$

signo menos: Uno invierte más energía (0,5P) con el batidor que el sistema devuelve con el pistón

g)

$$\Delta S_{tot} = \int_0^2 \frac{\delta Q}{T} + \Delta S_{gen}$$

$$\frac{\Delta S_{tot}}{m} = s_2 - s_1 \quad (0,5P)$$

$$= 4995 \frac{kJ}{kg\,K}$$

igual como en 1c) (0,5P)

→ entropía es variable de estado & no importa el camino por donde llego de 1→2

Nombre: _____ **Sección:** _____

Problema 2

Considere una turbina adiabática de vapor funcionando en modo de flujo estacionario en donde el vapor entra a 350°C y 1.2 MPa. A la salida, el vapor está a 50 kPa. Asumiendo que el proceso es completamente reversible, determine:

a) El estado (fase) del agua a la salida (Nota: si es una mezcla saturada, especifique la calidad y la temperatura).

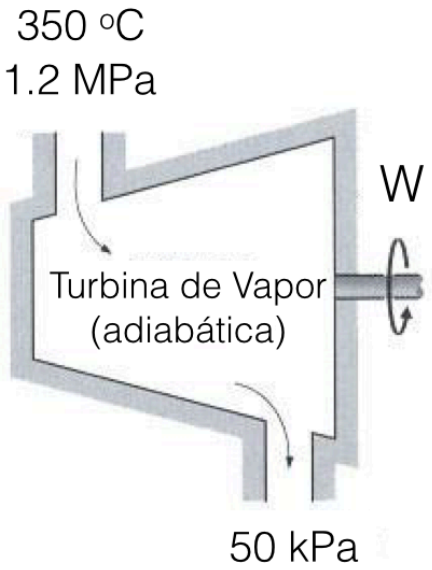
b) La entalpía específica del vapor a la salida.

c) El trabajo por kg de vapor producido por la turbina.

En la vida real, el vapor sale de la turbina a 50 kPa pero con una temperatura de 100° C. Determine:

d) El estado (fase) del agua a la salida (Nota: si es una mezcla saturada, especifique la calidad).

e) El trabajo por kg de vapor realmente producido por la turbina, así como su eficiencia isentrópica.



Solución Problema 2

a) Para determinar la fase del agua a la salida, necesitamos otra variable de estado aparte de la presión. El balance de entropía para un sistema de flujo estacionario con una entrada y una salida nos dice que:

$$\sum \frac{\dot{Q}_{VC}}{T} + \dot{m}_e s_e - \dot{m}_s s_s + \dot{S}_{gen} = 0$$

Como la turbina es adiabática, el proceso es completamente reversible, y $\dot{m}_e = \dot{m}_s$, esta ecuación se reduce a:

$$s_e = s_s. \text{ [0,5 puntos]}$$

De la tabla A-6 vemos que el vapor sobrecalentado de agua a 350° C y 1.2 MPa tiene las siguientes propiedades:

$$\begin{aligned} h_e &= 3154{,}2 \text{ kJ/kg [0,25 puntos]} \\ s_e &= 7{,}2139 \text{ kJ/kgK [0,25 puntos]} \end{aligned}$$

Puesto que $s_e = s_s$, buscando en la tabla de vapor sobrecalentado A-6 para una presón de 50 kPa vemos que incluso la entropía más baja (cuando $T = T_{sat}$) es de 7.5931 kJ/kg K. Esto significa que a la salida el vapor ya no está sobrecalentado. Buscando en la tabla de agua saturada A-5 encontramos que, a una presión de 50 kPa, $s_f = 1{,}0912$ kJ/kg K y que $s_g = 7{,}5931$ kJ/kg K.
Por ende, tenemos que $s_f < s_s < s_g$ y concluímos que el agua se encuentra en un estado de vapor húmedo, es decir una mezcla de líquido y vapor saturados [0,5 puntos]. La temperatura tiene que ser la de saturación, que corresponde a $T_{sat} = 81{,}32°$ C [0,25 puntos]de acuerdo a la tabla A-5.
Podemos determinar la calidad muy fácilmente dado que:

$$s = s_f + x(s_g - s_f). \text{ [0,5 puntos por esta ecuacion o la que es con entalpia]} \quad (1)$$

Para $s = s_s$, el resultado nos da $x = \frac{7{,}2139 - 1{,}0912}{6{,}5019} = 0{,}942$. [0,25 puntos]

b) Tenemos que:

$$h = h_f + x(h_g - h_f)$$

De la misma tabla A-5 vemos que $h_f = 340{,}54$ kJ/kg y $h_g = 2645{,}2$ kJ/kg a una presión de 50 kPa. Por ende,

$$h_s = 340{,}54 + 0{,}942(2304{,}7) = 2511{,}6 \text{ kJ/kg. [0,5 puntos]}$$

c) Conservación de masa:

$$\dot{m}_e = \dot{m}_s = \dot{m} \text{ [0,5 puntos]}$$

Si ignoramos los cambios en energía cinética y potencial del vapor (lo cual es razonable ya que no tenemos ninguna información al respecto), la primera Ley aplicada a un sistema de flujo estacionario nos dice que:

$$\dot{m}_e h_e - \dot{m}_s h_s - \dot{W} = 0$$

ya que la turbina es adiabática. Aquí $\dot{W}$ denota el trabajo hecho por la turbina, el cual es positivo. Si dividimos ambos lados de la ecuación por $\dot{m}$, nos queda:

$$h_e - h_s - w = 0$$

donde w es el trabajo hecho por la turbina por kg de vapor. Remplazando valores encontramos que:

$$w = h_e - h_s \text{ [0,5 puntos]} = 3154{,}2 - 2511{,}6 = 642{,}6 \text{ kJ/kg [0,25 puntos]}$$

d) Una temperatura de 100°C está por arriba de la temperatura de saturación a una presión de 50 kPa. Por ende, estamos lidiando con vapor sobrecalentado. [0,5 puntos]

e) Regresando a la tabla A-6, vemos que para esta combinación de presión y temperatura tenemos que $h_s^{real} = 2682{,}4$ kJ/kg [0,25 puntos]. Esto nos dice que el trabajo real producido por la turbina es $w^{real} = 3154{,}2 - 2682{,}4 = 471{,}8$ kJ/kg. [0,5 puntos] La eficiencia isentrópica para una turbina se define como

$$\eta = \frac{w^{real}}{w^{isentropico}}$$

El valor de $w^{isentropico}$ es lo que obtuvimos en c), donde asumimos que el proceso es adiabático y completamente reversible (es decir isentrópico). Nos queda que $\eta = \frac{471{,}8}{642{,}6} = 0{,}734$. [0,5 puntos]

Nombre: _____ **Sección:** _____

Problema 3

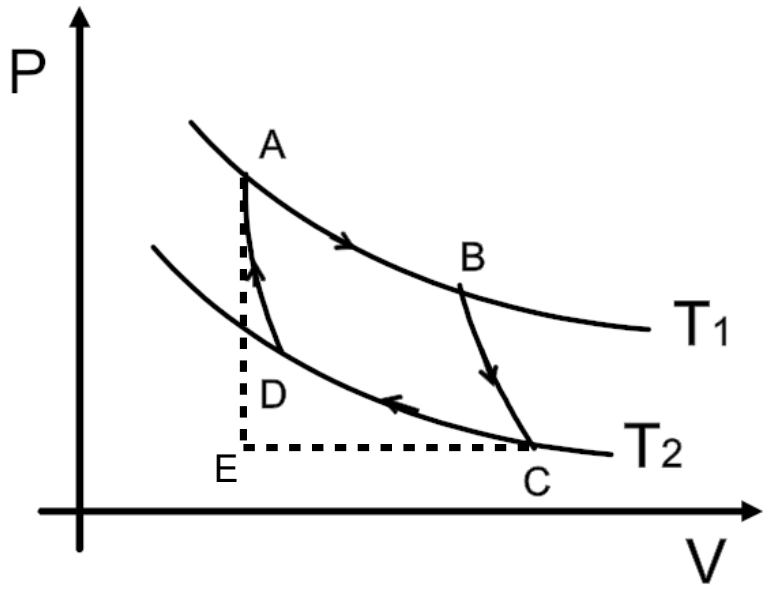
Una máquina de Carnot, que sigue el ciclo $ABCDA$, funciona con 0.136 kg de aire como sustancia de trabajo. Al principio de la expansión isotérmica, las variables termodinámicas toman los valores 2.1 MPa, 9.6×10^{-3} m^3 y 516.5 K. El aire se comporta como un gas ideal, la temperatura del reservorio frío es de 323.15 K y el calor total absorbido por la máquina de Carnot vale 32 kJ.

a) Calcule la eficiencia del ciclo usando la expresión más conocida pero sin demostrarla.

b) Demuestre que los valores del volumen y presión en los estados B y C son: $V_B = 47\times10^{-3}$ m^3, $P_B = 0.429$ MPa, $V_C = 151.8\times10^{-3}$ m^3 y $P_C = 0.083$ MPa.

c) Considerando ahora el ciclo $ABCEA$ (líneas punteadas), calcule el calor neto del ciclo.

d) Calcule la eficiencia del ciclo $ABCEA$. ¿La eficiencia es mayor, menor ó igual que la del ciclo de Carnot? ¿Por qué?



Datos de Tabla: $R_{universal} = 8.314$ J/(mol K); $R_{aire} = 0.287$ kJ/(kg K); $M_{aire} = 28.97$ gr/mol; $\gamma_{aire} = k_{aire} = 1.4$; $c_v = 0.718$ kJ/(kg K); $c_p = 1.005$ kJ/(kg K).

Fecha / /

PROBLEMA 3 – TERMODINÁMICA

a) $\eta = 1 - \frac{T_{min}}{T_{max}} = 1 - \frac{323.15}{516.5} = 1 - 0.6256 = 0.37$

$\eta = 37\%$ (1/2 pto)

b)

$A \to B$	isotérmico	$T_A = T_B$
$B \to C$	adiabático	$Q_{B\to C} = 0$
$C \to D$	isotérmico	$T_C = T_D$
$D \to A$	adiabático	$Q_{D\to A} = 0$

$A \to B$: $\Delta U = 0 \Rightarrow Q = W = m R T_A \ln V_B/V_A$

$Q_{A\to B} = 32\ kJ$

$32 = 0.136 \times 0.287 \times 516.5 \times \ln\left(V_B / 9.6\times10^{-3}\right)$

$V_B = 9.6\times10^{-3} \times e^{32/20.16} = 9.6\times10^{-3} \times 4.89$

$\boxed{V_B = 0.047\ m^3 = 47\times10^{-3}\ m^3}$ (1/4 pto)

$P_B = \frac{P_A \times V_A}{V_B} \rightarrow \boxed{P_B = 0.4289\ MPa}$ (1/4 pto)

$B \to C$: $Q = 0$; $T_B V_B^{\gamma-1} = T_C V_C^{\gamma-1}$

$\gamma = 1.4$

$T_B/T_C \; V_B^{\gamma-1} = V_C^{\gamma-1}$ (1/4 pto)

$V_C^{0.4} = \frac{516.5}{323.15} \times 0.047^{0.4} \Rightarrow \boxed{V_C = 0.1518\ m^3 = 151.8\times10^{-3}\ m^3}$

Fecha / /

$$P_C = \frac{m R T_C}{V_C} \rightarrow \boxed{P_C = 0.083\ MPa} \quad (1/4\ pto)$$

c) Q_{neto}?

$A \rightarrow B$ (T cte) $\rightarrow \Delta U = m c_v (T_B - T_A) = 0$

$(1/2\ pto)$ $\left\{ \begin{array}{l} Q = 32\ kJ \\ W = m R T_{max} \ln (V_B/V_A) \end{array} \right.$

$B \rightarrow C$ (adiabático) $\rightarrow \Delta U = m c_v (T_{min} - T_{max})$

$(1/2\ pto)$ $\left\{ \begin{array}{l} Q = 0 \\ W = -\Delta U \end{array} \right.$

$C \rightarrow E$ (isobárico) $\rightarrow \Delta U = m c_v (T_E - T_{min})$

$(1/2\ pto)$ $\left\{ \begin{array}{l} Q = m c_p (T_E - T_{min}) \\ W = P_C (V_A - V_C) \end{array} \right.$

$E \rightarrow A$ (isocórico) $\rightarrow \Delta U = m c_v (T_{max} - T_E)$

$Q = \Delta U$

$W = 0$

$(1/4\ pto)$

$(1/4\ pto)$ $\boxed{T_E = \frac{P_C V_A}{m R} = 20.4\ K}$

$$Q_{neto} = 32\ kJ + m c_p (T_E - T_{min}) + m c_v (T_{max} - T_E)$$

$(1\ pto)$ $= 32\ kJ + 0.136 \times 1.005 \times (20.4 - 323.15) + 0.136 \times 0.718 \times (516.5 - 20.4$

Fecha / /

$$Q_{neto} = 32\,kJ - 41.38\,kJ + 48.44\,kJ$$

$$\boxed{Q_{neto} = 39.06\,kJ}$$

d) $\eta = \dfrac{W_{neto}}{Q_{entra}} = \dfrac{1.32}{32} = 0.041 = 4.1\%$ (1/2 pto)

$$W_{neto} = 32\,kJ + m\,c_v\,(T_{min} - T_{max}) + P_c\,(V_A - V_c)$$

$$= 32\,kJ + 0.136 \times 0.718 \times (323.15 - 516.5) +$$

$$83\,kPa \times (9.6 \times 10^{-3}\,m^3 - 151.8 \times 10^{-3}\,m^3)$$

(1 pto)

$$= 32 - 18.88 - 11.80 = 1.32\,kJ$$

$$Q_{entra} = 32\,kJ$$

RHEIN