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

FIS1523 Termodinámica
Interrogación 2

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

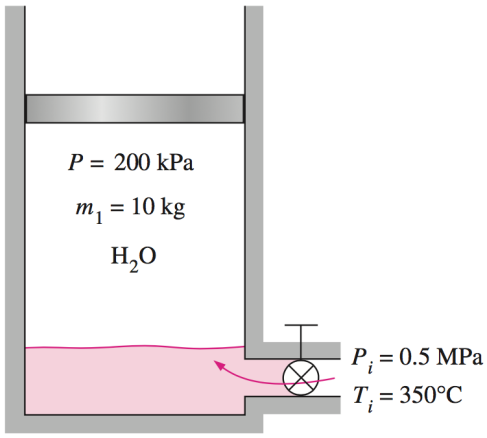
Un tanque bien aislado, cerrado con un pistón que se puede desplazar sin roce, contiene inicialmente una mezcla saturada de agua a 200 kPa con 6 kg de vapor y 4 kg de líquido. Luego se abre una válvula que permite que vapor de agua a 0.5 MPa y 350 °C entre al tanque hasta que todo el líquido en el interior se ha vaporizado. Asuma que el proceso es cuasiestático.

a) Determine la temperatura del estado final. *(0,5 pts.)*

b) Determine la entalpía específica del agua en los estados inicial y final. *(1 pto.)*

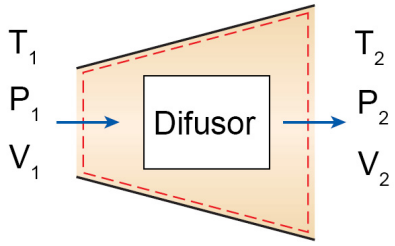
c) Determine la masa de vapor que entró al tanque. *(3 pts.)*

d) Determine el trabajo de frontera realizado. *(1,5 pts.)*



Problema 2

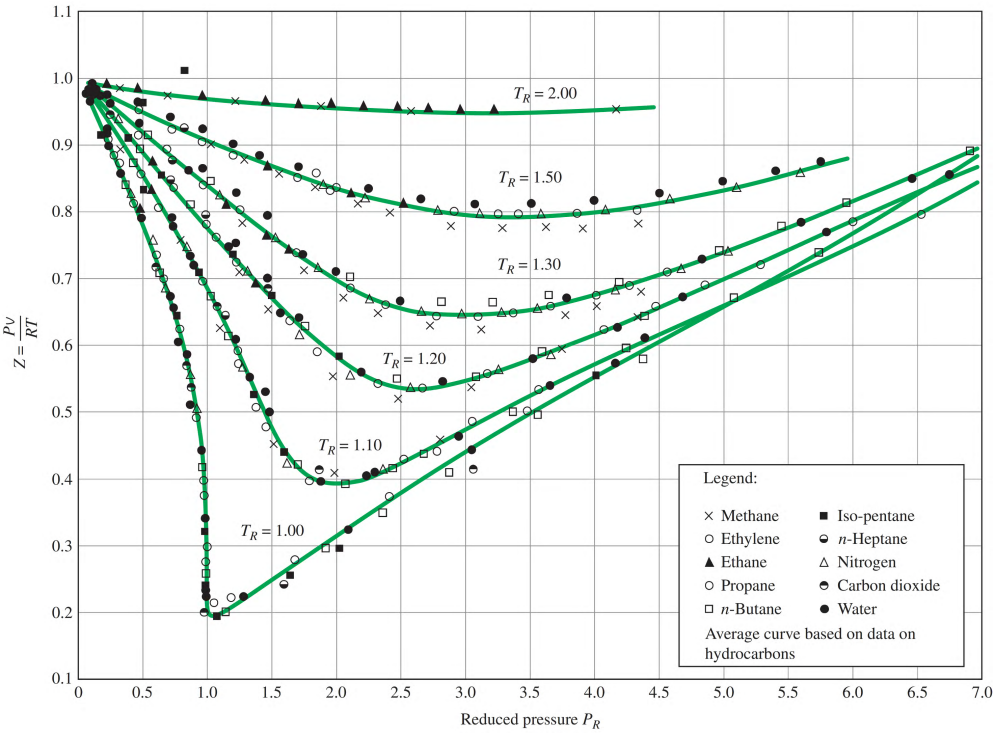
Un flujo de vapor de agua sobrecalentado pasa por un difusor. En la entrada se tiene $T_1 = 450\,^\circ\text{C}$, $P_1 = 20$ MPa, $V_1 = 250\,\text{m/s}$ y $A_1 = 0.1\,\text{m}^2$. En la salida la presión es de $P_2 = 30$ MPa y la velocidad es $V_2 = 128\,\text{m/s}$.



a) Utilizando la tabla de vapor de agua sobrecalentado, determine el volumen específico en la entrada del difusor, la tasa de flujo de masa y la temperatura de salida. *(2 pts.)*

b) Repita el cálculo (de ν_1, $\dot{m}$ y T_2) asumiendo la aproximación de gas ideal para el vapor. Calcule el porcentaje de error en el volumen específico de entrada $|(\nu_{\text{real}} - \nu_{\text{ideal}})/\nu_{\text{real}}| \times 100$.
Datos: $R_{\text{vapor}} = 0.4615\,\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$ y $c_p = 2.1\,\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$. *(2,5 pts.)*

c) Usando la carta de compresibilidad (use un valor aproximado de Z) encuentre el volumen específico corregido del vapor en la entrada del difusor. Calcule el porcetaje de error respecto al valor real.
Datos: $T_{\text{cr}} = 373.95\,^\circ\text{C}$ y $P_{\text{cr}} = 22.06$ Mpa. *(1,5 pts.)*



Problema 3

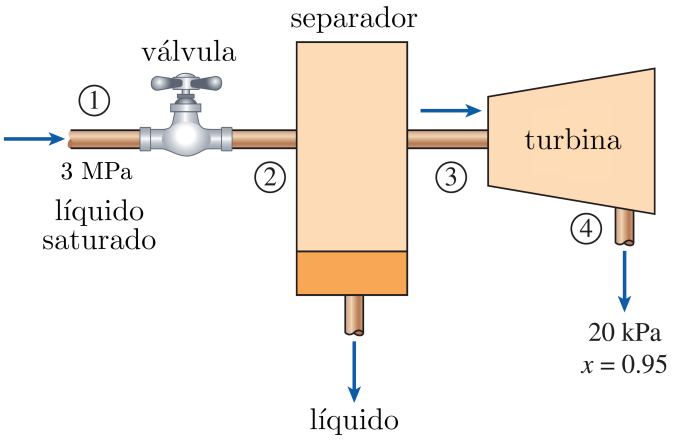
En una planta geotérmica 50 kg/s de agua entran a una válvula reguladora como líquido saturado a 3 Mpa (estado 1) y emergen de ésta como mezcla saturada a 1 Mpa (estado 2). Las componentes de la mezcla luego se separan en una cámara. Tanto el líquido como el gas salen de la cámara saturados a la misma presión de entrada. El líquido se desecha, pero el vapor saturado (estado 3) pasa por una turbina de la cual sale a 20 kPa con una calidad de 0.95 (estado 4).

a) Calcule la calidad del estado 2. *(1,5 pts.)*

b) Determine la tasa de flujo de masa que entra a la turbina. *(1,5 pts.)*

c) Calcule la potencia entregada por la turbina asumiendo que ésta es adiabática. *(1,5 pts.)*

d) Si la potencia que entrega la turbina es de 1000 kW, calcule la tasa a la que ésta libera calor. *(1,5 pts.)*



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) La masa del pistón no cambia por lo que la presión se mantiene constante a 200 kPa. En el estado final tenemos solamente vapor saturado a esta presión, por lo que de la tabla A-5 concluimos que:

$$T_2 = T_{\text{sat@200kPa}} = 120.21\,^{\circ}\text{C}\,. \qquad \text{(0,5 pts.)}$$

b) De la tabla A-5 obtenemos que:

$$\begin{aligned} h_1 &= h_{f@200\text{kPa}} + x_1 h_{fg@200\text{kPa}} = 504.71 + (0.6)(2201.6) = 1825.6 \text{ kJ/kg.} \qquad \text{(0,5 pts.)} \\ h_2 &= h_{g@200\text{kPa}} = 2706.3 \text{ kJ/kg.} \qquad \text{(0,5 pts.)} \end{aligned}$$

c) Sea m_e la masa de vapor que entró al tanque y m_1 y m_2 la masa inicial y final de agua en el tanque, respectivamente. El balance de masa nos dice que:

$$m_2 - m_1 = m_e\,. \qquad \text{(0,5 pts.)}$$

Similarmente, considerando que no hay intercambio de calor entre el tanque y su entorno, el balance de energía nos dice que:

$$-W_f + m_e h_e = m_2 u_2 - m_1 u_1\,, \qquad \text{(0,5 pts.)}$$

donde h_e es la entalpía específica del vapor que entra al tanque y W_f es el trabajo de frontera realizado. Pero $W_f = \int P dV = P(V_2 - V_1)$ ya que el proceso de expansión es a presión constante. Esto se puede reescribir como $W_f = P(m_2\nu_2 - m_1\nu_1)$ (0,5 pts.), por lo que el balance de energía queda:

$$\begin{aligned} m_e h_e &= m_2 u_2 - m_1 u_1 + P(m_2\nu_2 - m_1\nu_1) \\ (m_2 - m_1) h_e &= m_2(u_2 + P\nu_2) - m_1(u_1 + P\nu_1) \\ (m_2 - m_1) h_e &= m_2 h_2 - m_1 h_1 \end{aligned}$$

y concluimos que:

$$m_2 = \frac{h_e - h_1}{h_e - h_2} m_1\,. \qquad \text{(1 pto.)}$$

De la tabla A-6 obtenemos que $h_e = 3168.1$ kJ/kg, por lo que $m_2 = \frac{(3168.1 - 1825.6)\text{ kJ/kg}}{(3168.1 - 2706.3)\text{ kJ/kg}}(10\text{ kg}) = 29.07$ kg. Por ende, $m_e = m_2 - m_1 = 19.07$ kg. (0,5 pts.)

d) El trabajo de frontera W_f se puede obtener de dos formas. La primera es a partir del balance de energía:

$$W_f = m_e h_e - m_2 u_2 + m_1 u_1 \,. \qquad \text{(0,5 pto.)}$$

De la tabla A-4 vemos que $u_1 = u_{f@200\text{kPa}} + x_1 u_{fg@200\text{kPa}} = 504.5 + (0.6)(2024.6) = 1719.3$ kJ/kg, y que $u_2 = u_{g@200\text{kPa}} = 2529.1$ kJ/kg. Nos queda que:

$W_f = (19.07\text{ kg})(3168.1\text{ kJ/kg}) - (29.07\text{ kg})(2529.1\text{ kJ/kg}) + (10\text{ kg})(1719.3\text{ kJ/kg}) = 4087.7\text{ kJ}.$ (1 pto.)

La otra forma es calculando directamente el trabajo notando que, a partir de la información en la tabla A-4, $\nu_1 = \nu_{f@200\text{kPa}} + x_1 \nu_{fg@200\text{kPa}} = 0.001061 + (0.6)(0.88578 - 0.001061) = 0.5319$ m^3/kg, y que $\nu_2 = \nu_{g@200\text{kPa}} = 0.88578$ m^3/kg:

$$W_f = P(m_2\nu_2 - m_1\nu_1) = (200)\left((29.07)(0.88578) - (10)(0.5319)\right) = 4086.1\text{ kJ}.$$

Las pequeñas diferencias entre ambos resultados se deben a no haber utilizado mayor precisión en los cálculos, lo cual no era necesario.

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 2:

a) El flujo de masa en la entrada está dado por

$$\begin{aligned}\dot{m} &= \rho_1 v_1 A_1 \\ &= \frac{v_1 A_1}{\nu_1} \\ &= 1965.25\,\text{kg/s}\,, \qquad \textit{(0,5 pts.)}\end{aligned}$$

donde hemos usado que $\nu_1 = 0.012721\,\text{m}^3/\text{kg}$ según la tabla A-6 *(0,5 pts.)*. Ahora, la ecuación de balance de energía nos dice que

$$h_1 + \frac{V_1^2}{2} = h_2 + \frac{V_2^2}{2} \qquad \Rightarrow \qquad \begin{aligned} h_2 &= h_1 + \frac{V_1^2}{2} - \frac{V_2^2}{2} \\ &= 3084.76\,\text{kJ/kg}\,. \qquad \textit{(0,5 pts.)}\end{aligned}$$

Mirando la tabla de vapor sobrecalentado a $P_2 = 30$ MPa vemos que esta entalpía corresponde a

$$T_2 = 500\,^\circ\text{C}\,. \qquad \textit{(0,5 pts.)}$$

b) El análisis en este caso es similar, excepto que en vez de usar el valor de la tabla para el volumen específico, lo calculamos a partir de la ecuación de estado del gas ideal:

$$\begin{aligned}\nu_1 &= \frac{R_g T_1}{P_1} \\ &= 0.016687\,\text{m}^3/\text{kg}\,. \qquad \textit{(0,5 pts.)}\end{aligned}$$

Así,

$$\begin{aligned}\dot{m} &= \rho_1 v_1 A_1 \\ &= \frac{v_1 A_1}{\nu_1} \\ &= 1498.20\,\text{kg/s}\,. \qquad \textit{(0,5 pts.)}\end{aligned}$$

Similarmente, la entalpía específica de un gas ideal es $h = C_P T$, con lo que el balance de energía nos entrega

$$\begin{aligned} h_2 &= h_1 + \frac{V_1^2}{2} - \frac{V_2^2}{2} \\ &= 1541.67\,\text{kJ/kg} \qquad \textit{(0,5 pts.)}\end{aligned} \qquad \Rightarrow \qquad \begin{aligned} T_2 &= \frac{h_2}{C_P} \\ &= 734.13\,\text{K} \\ &= 460.98\,^\circ\text{C}\,. \qquad \textit{(0,5 pts.)}\end{aligned}$$

El porcentaje de error en el volumen específico es

$$\left|\frac{\nu_\text{real} - \nu_\text{ideal}}{\nu_\text{real}}\right| \times 100 = 31.2\,\%\,. \qquad \textit{(0,5 pts.)}$$

c) Esta vez corregimos la ecuación de estado del gas ideal por el factor de compresibilidad. En la entrada la presión y temperatura reducidas son

$$P_{R1} = \frac{P_1}{P_{cr}} \qquad T_{R1} = \frac{T_1}{T_{cr}} \qquad \textit{(0,5 pts.)}$$
$$= 0.91\,, \qquad = 1.12\,.$$

Mirando la carta de compresibilidad vemos que $Z \approx 0.7$ para $P_R \approx 1$ y $T_R \approx 1.10$. Así,

$$\nu_1 = Z_1 \frac{R_g T_1}{P_1}$$
$$= 0.011681\,\mathrm{m}^3/\mathrm{kg}\,. \qquad \textit{(0,5 pts.)}$$

El porcentaje de error es

$$\left| \frac{\nu_{\text{real}} - \nu_{\text{ideal Z}}}{\nu_{\text{real}}} \right| \times 100 = 8.2\,\%\,. \qquad \textit{(0,5 pts.)}$$

Por supuesto, también hay un error asociado al valor de Z que extrajimos de la carta. Cualquier valor cercano pero mayor a $Z = 0.7$ se considera correcto.

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

P1	P2	P3	Nota

Nombre: _____ **Sección:** _____ **N°:**_____

Solución Problema 3:

a) Como la válvula es isoentálpica tenemos

$$\begin{aligned} h_2 &= h_1 \\ &= h_{f\,@\,3\,\mathrm{MPa}} \\ &= 1008.3\,\mathrm{kJ/kg}\,. \end{aligned} \qquad \textit{(0,5 pts.)}$$

Si la presión del estado 2 es 1 MPa vemos que

$$762.51\,\mathrm{kJ/kg} = h_{f\,@\,1\,\mathrm{MPa}} < h_2 < h_{f\,@\,1\,\mathrm{MPa}} = 2777.1\,\mathrm{kJ/kg}\,.$$

Por lo tanto, el agua está saturada con una calidad de

$$\begin{aligned} x_2 &= \frac{h_2 - h_{f\,@\,1\,\mathrm{MPa}}}{h_{g\,@\,1\,\mathrm{MPa}} - h_{f\,@\,1\,\mathrm{MPa}}} \\ &= 0.122\,. \end{aligned} \qquad \textit{(1 pto.)}$$

b) La presencia del separador significa que sólo el 12.2 % del flujo original de 50 kg/s entra a la turbina:

$$\begin{aligned} \dot{m}_3 &= x_2 \dot{m}_1 \\ &= 6.100\,\mathrm{kg/s}\,. \end{aligned} \qquad \textit{(1,5 pts.)}$$

Esto se puede demostrar aplicando el balance de masa y de energía al separador ($3'$ es el estado del líquido que se desecha):

$$\left.\begin{aligned} \dot{m}_2 &= \dot{m}_3 + \dot{m}_{3'} \\ \dot{m}_2 h_2 &= \dot{m}_3 h_3 + \dot{m}_{3'} h_{3'} \end{aligned}\right\} \Rightarrow \quad \begin{aligned} \dot{m}_3 &= \frac{h_2 - h_{3'}}{h_3 - h_{3'}} \dot{m}_2 \\ &= x_2 \dot{m}_2 = x_2 \dot{m}_1\,, \end{aligned}$$

donde es crucial la observación que el separador no cambia las propiedades del líquido y el vapor que componen la mezcla, es decir, $h_{3'} = h_{f\,@\,1\,\mathrm{MPa}}$ y $h_3 = h_{g\,@\,1\,\mathrm{MPa}}$.

c) Por conservación de masa y energía en la turbina tenemos

$$\left.\begin{aligned} \dot{m}_3 &= \dot{m}_4 \\ \dot{m}_3 h_3 &= \dot{W} + \dot{m}_4 h_4 \end{aligned}\right. \qquad \textit{(0,5 pts.)} \quad \Rightarrow \quad \begin{aligned} \dot{W} &= \dot{m}_3 (h_3 - h_4) \\ &= 1745.1\,\mathrm{kW}\,, \end{aligned} \qquad \textit{(0,5 pts.)}$$

donde hemos usado que

$$\begin{aligned} h_4 &= x_4 h_{g\,@\,20\,\mathrm{kPa}} + (1 - x_4) h_{f\,@\,20\,\mathrm{kPa}} \\ &= 2491.0\,\mathrm{kJ/kg}\,. \end{aligned} \qquad \textit{(0,5 pts.)}$$

d) En este caso la conservación de masa y energía dictan que

$$\left.\begin{aligned} \dot{m}_3 &= \dot{m}_4 \\ \dot{m}_3 h_3 &= \dot{W} + \dot{Q} + \dot{m}_4 h_4 \end{aligned}\right. \qquad \textit{(0,5 pts.)} \quad \Rightarrow \quad \begin{aligned} \dot{Q} &= \dot{m}_3 (h_3 - h_4) - \dot{W} \\ &= 745.1\,\mathrm{kW}\,. \end{aligned} \qquad \textit{(1 pto.)}$$