FIS1523 ⋆ Termodinámica
✓ **Ayudante:** *Sebastián Urrutia Quiroga*
✓ **Correo:** sgurruti@uc.cl
✓ **Página Web:** web.ing.puc.cl/~sgurruti/termo

Ayudantía ⋆ Tablas Termodinámicas y Sustancias Puras

1. Un tanque rígido contiene 10 kg de agua a 90° C. 8 kg están en estado líquido y 2 kg en estado de vapor.

   a) ¿Cuál es la presión en el tanque?

   b) ¿Cuál es el volumen del tanque?

   Solución:

   a) Como el agua se encuentra tanto en estado líquido como gaseoso, se encuentre en estado de *Agua Saturada*. De la tabla,

   $$P_{@90^\circ\,\mathrm{C,\,sat.}} = 70.183\,\mathrm{kPa}$$

   b) Para hallar el volumen del tanque, utilizamos la *Tabla de Agua Saturada* para obtener los volúmenes específicos del agua líquida y gaseosa:

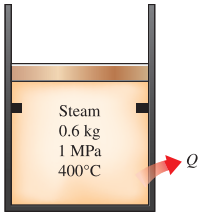
   $$v_{f@90^\circ\,\mathrm{C}} = 0.001036\,\mathrm{m^3/kg} \qquad \wedge \qquad v_{g@90^\circ\,\mathrm{C}} = 2.3593\,\mathrm{m^3/kg}$$

   Por tanto,

   $$V_{total} = m_f v_f + m_g v_g = 4.726888\,\mathrm{m^3}$$

   ■

2. Un dispositivo pistón-cilindro con topes (ver figura) inicialmente contiene 0.6 kg de vapor a 1.0 MPa y 400° C. La ubicación de los topes corresponde al 40 % del volumen inicial.



   Ahora, el sistema es enfriado. Determine:

   a) El trabajo de compresión si el estado final está caracterizado por 1.0 MPa y 250° C

   b) La temperatura del estado final si el pistón toca los topes del cilindro y la presión es 500 kPa

Solución:

a) A partir de la *Tabla de Vapor Sobrecalentado*, los volúmenes específicos para los estados inicial y final son:

$$\left.\begin{array}{rcl} P_1 &=& 1.0\,\text{MPa} \\ T_1 &=& 400^\circ\,\text{C} \end{array}\right\} v_1 = 0.30661\,\text{m}^3/\text{kg} \qquad \left.\begin{array}{rcl} P_2 &=& 1.0\,\text{MPa} \\ T_2 &=& 250^\circ\,\text{C} \end{array}\right\} v_2 = 0.23275\,\text{m}^3/\text{kg}$$

Notando que la presión $P_1 = P_2 = P$ es constante durante el proceso, el trabajo de compresión viene dado por:

$$W_{comp} = mP(v_2 - v_1) = -44.316\,\text{kJ}$$

donde el signo negativo implica que el trabajo fue realizado sobre el vapor.

b) El volumen del cilindro en el estado final es el 40 % del volumen inicial. Entonces, el estado final está caracterizado por:

$$\begin{array}{rcl} P_2' &=& 500\,\text{kPa} \\ v_2' &=& 0.4v_1 \;=\; 0.12264\,\text{m}^3/\text{kg} \end{array}$$

Si miramos la *Tabla de Vapor Sobrecalentado* a 500 kPa, notaremos que a la temperatura de saturación el volumen específico es:

$$v_{@500\,\text{kPa, sat.}} = 0.37483\,\text{m}^3/\text{kg} > v_2'$$

Por tanto, el vapor se encuentra en régimen de *Agua Saturada*. Mirando la tabla, vemos que:

(I) El volumen específico v_2' satisface:

$$v_{f@500\,\text{kPa}} < v_2' < v_{g@500\,\text{kPa}}$$

por lo que, efectivamente, se encuentra en la región de saturación

(II) La temperatura de saturación (que corresponde a la temperatura del estado final) es:

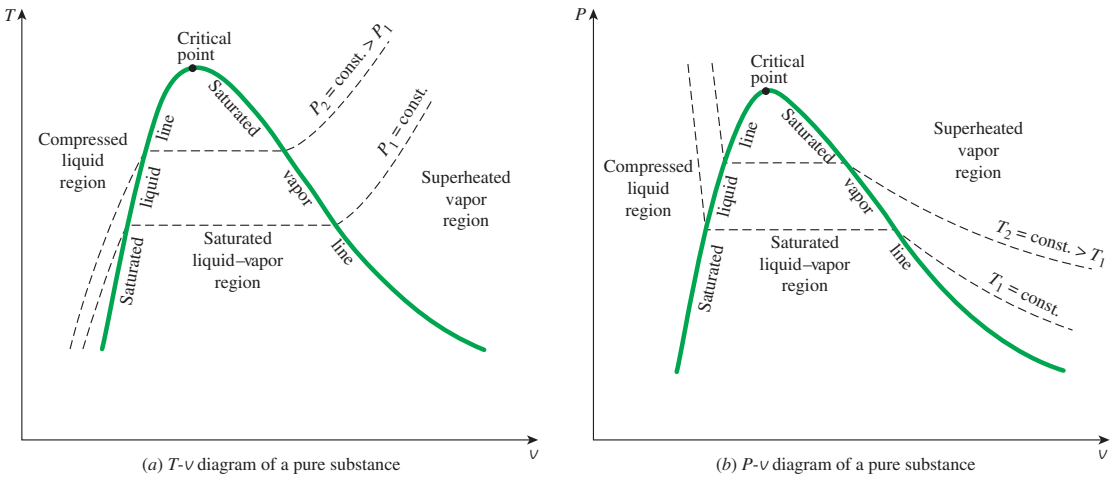
$$T_2' = 151.83^\circ\,\text{C}$$

■

3. $1\,\text{m}^3$ de agua líquida saturada a $200^\circ\,\text{C}$ se expande isotérmicamente en un sistema cerrado hasta que su calidad es del 80 %. Determine el trabajo total producido por la expansión.

Solución:

Miremos con detenimiento el diagrama $P - v$ del agua:



(*a*) *T*-*v* diagram of a pure substance (*b*) *P*-*v* diagram of a pure substance

Como el proceso es isotérmico, nos movemos a lo largo de una de las curvas T_1 o T_2 de la figura (*b*). P_1 y P_2 son iguales, y corresponden al valor de la presión de saturación del agua (que se mantiene constante durante el cambio de fase). Así,

$$P_1 = P_2 = P_{\text{sat.@200° C}} = 1554.9\,\text{kPa}$$

El volumen específico inicial corresponde al volumen específico de agua líquida saturada a 200° C, esto es:

$$v_1 = v_{f@200^\circ\,\text{C}} = 0.001157\,\text{m}^3/\text{kg}$$

Además, por enunciado, se sabe que $V_1 = 1\,\text{m}^3$. El volumen específico final corresponde al volumen específico del agua a 200° C con una calidad $x = 0.8$. Así,

$$\begin{aligned} v_2 &= v_f + x\,v_{fg} \\ &= (0.001157) + (0.8)(0.12721 - 0.001157)\,\text{m}^3/\text{kg} \\ &= 0.1019994\,\text{m}^3/\text{kg} \end{aligned}$$

De la definición de volumen específico,

$$m_2 = m_2 \quad \Longrightarrow \quad V_2 = V_1\left(\frac{v_2}{v_1}\right) = (1\,\text{m}^3)\left(\frac{0.1019994}{0.001157}\right) = 88.1585134\,\text{m}^3$$

Así, el trabajo realizado viene dado por:

$$W = P(V_2 - V_1) = 1.35523 \times 10^5\,\text{kJ}$$

■

4. Un tanque rígido de $0.5\,\text{m}^3$ contiene refrigerante R-134a inicialmente a 160 kPa y una calidad del 40 %. Se transfiere calor al refrigerante hasta que la presión alcanza los 600 kPa. Determine:

   a) La masa del refrigerante en el tanque

   b) La cantidad de calor transferida

Solución:

a) Notemos que el sistema es cerrado, por lo cual la masa del refrigerante se conserva. Además, al ser un tanque rígido, el volumen del mismo permanece constante, por lo que no se hace trabajo. Aplicando la Primera Ley de la Termodinámica,

$$Q_{in} = \Delta U = m(u_2 - u_1)$$

donde u_i corresponde a la energía interna específica del estado $i-$ésimo, con $i = 1$ (inicio) o 2 (final). Usando la *Tabla del Refrigerante R-134a Saturado*,

$$\left.\begin{array}{rcl} P_1 &=& 160\,\text{kPa} \\ x_1 &=& 0.4 \end{array}\right\} \begin{array}{rcl} v_f &=& 0.0007435\,\text{m}^3/\text{kg} \\ u_f &=& 31.06\,\text{kJ/kg} \end{array} \qquad \begin{array}{rcl} v_g &=& 0.12355\,\text{m}^3/\text{kg} \\ u_{fg} &=& 190.31\,\text{kJ/kg} \end{array}$$

Así,

$$\begin{aligned} v_1 &= v_f + x_1\, v_{fg} \\ &= v_f + x_1\,(v_g - v_f) \\ &= 0.0498661\,\text{m}^3/\text{kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} u_1 &= u_f + x_1\, u_{fg} \\ &= 107.184\,\text{kJ/kg} \end{aligned}$$

Entonces, la masa del refrigerante corresponde a:

$$m = \frac{V_1}{v_1} = 10.02685191\,\text{kg}$$

b) Como el volumen y la masa de refrigerante se mantienen constantes, es claro que $v_2 = v_1$. Si buscamos en la *Tabla del Refrigerante R-134a Saturado* a 600 kPa, notaremos que:

$$v_{g@600\,\text{kPa}} = 0.034335\,\text{m}^3/\text{kg} < v_2$$

Por tanto, el refrigerante se encuentra como *Refrigerante R-134a Sobrecalentado*. De la tabla, encontramos que:

$T\,[^\circ\,\text{C}]$	$v\,[\text{m}^3/\text{kg}]$	$u\,[\text{kJ/kg}]$
110	0.049458	319.93
120	0.050997	329.24

Como la tabla no posee el valor exacto del volumen específico que deseamos, tendremos que **interpolar**. La idea básica de la interpolación, lineal en este curso, es asumir que podemos formar una recta entre los puntos (v_a, u_a) y (v_b, u_b) y con ello determinar los valores intermedios (v, u) que no están tabulados. De la definición de una recta,

$$u - u_a = \left(\frac{u_b - u_a}{v_b - v_a}\right)(v - v_a) \quad \Longrightarrow \quad u = u_a + \left(\frac{u_b - u_a}{v_b - v_a}\right)(v - v_a)$$

Reemplazando,

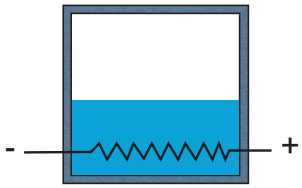
$$\begin{aligned} u_2 &= 319.93 + \left(\frac{329.24 - 319.93}{0.050997 - 0.049458}\right)(v_2 - 0.049458) \\ &= 319.93 + \left(\frac{329.24 - 319.93}{0.050997 - 0.049458}\right)(0.0498661 - 0.049458) \\ &= 322.3987531\,\text{kJ/kg} \end{aligned}$$

Finalmente,

$$Q_{in} = m(u_2 - u_1) = 2157.926458\,\text{kJ}$$

■

5. Un recipiente rígido y bien aislado contiene 5 kg de agua en mezcla saturada líquido-vapor a 200 kPa. Inicialmente, tres cuartos de la masa se encuentra es fase líquida. Al recipiente se ingresa calor por medio de una resistencia a una tasa de 800 W a partir de $t = 0$ hasta que toda el agua se convierte en vapor.



a) Determine el volumen específico y la energía interna específica del estado inicial

b) Determine el volumen específico y la energía interna específica del estado final

c) ¿Cuánto tiempo tardará en convertirse toda el agua en vapor?

Solución:

a) Ya que 3/4 de la masa se encuentra en fase líquida, $x_1 = 0.25$ para el estado inicial. De la *Tabla de Agua Saturada*,

$$\left.\begin{array}{rcl} P_1 &=& 200\,\text{MPa} \\ x_1 &=& 0.25 \end{array}\right\} \begin{array}{rcl} v_f &=& 0.001061\,\text{m}^3/\text{kg} \\ u_f &=& 504.50\,\text{kJ/kg} \end{array} \qquad \begin{array}{rcl} v_g &=& 0.88578\,\text{m}^3/\text{kg} \\ u_{fg} &=& 2024.6\,\text{kJ/kg} \end{array}$$

Así,

$$\begin{aligned} v_1 &= v_f + x_1\,(v_g - v_f) \\ &= 0.22224075\,\text{m}^3/\text{kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} u_1 &= u_f + x_1\,u_{fg} \\ &= 1010.650\,\text{kJ/kg} \end{aligned}$$

b) En este caso, tanto la masa como el volumen se han mantenido constantes. Por tanto, $v_2 = v_1$. Como toda el agua se encuentra como vapor, se debe cumplir que dicho volumen específico corresponda al volumen de gas saturado. De la *Tabla de Agua Saturada*,

P [kPa]	v_g [m^3/kg]	u_g [kJ/kg]
850	0.22690	2577.9
900	0.21489	2579.6

Como la tabla no posee el valor exacto del volumen específico que deseamos, tendremos que **interpolar**. La idea básica de la interpolación, lineal en este curso, es asumir que podemos formar una recta entre los puntos (v_a, u_a) y (v_b, u_b) y con ello determinar los valores intermedios (v, u) que no están tabulados. De la definición de una recta,

$$u - u_a = \left(\frac{u_b - u_a}{v_b - v_a}\right)(v - v_a) \quad \Longrightarrow \quad u = u_a + \left(\frac{u_b - u_a}{v_b - v_a}\right)(v - v_a)$$

Reemplazando,

$$\begin{aligned} u_2 &= 2577.9 + \left(\frac{2577.9 - 2579.6}{0.22690 - 0.21489}\right)(v_2 - 0.22690) \\ &= 2577.9 + \left(\frac{2577.9 - 2579.6}{0.22690 - 0.21489}\right)(0.22224075 - 0.22690) \\ &= 2578.559511\,\text{kJ/kg} \end{aligned}$$

c) El tiempo que tardará en convertirse el agua en vapor es:

$$\mathcal{P}\Delta t = \Delta U = m(u_2 - u_1)$$

donde $\mathcal{P} = 800\,\text{J/s}$ es la potencia de la resistencia. Así,

$$\Delta t = \frac{(5\,\text{kg})(2578.559511\,\text{kJ/s} - 1010.650\,\text{kJ/s})}{(800\,\text{J/s})} = 9799.43444\,\text{s} \approx 163.3\,\text{min}$$

■