Examen: FIS1523 - Termodinámica

Instituto de Física
Pontificia Universidad Católica de Chile
Profs: F. Castillo, M. Favre, A. Varas
Segundo Semestre 2023

PP1	PP2	PP3	PT	N

Nombre:		
RUN:	Sección:	N. Lista:

Tiempo para responder: 120 minutos.

- Debe poner su nombre y sección en cada hoja de respuesta.
- No separe las hojas de respuesta de los enunciados.
- Puede remover el formulario y las hojas de las tablas, que están al final de este documento.
- Consultas sólo de enunciado y en voz alta durante la primera media hora de la evaluación.
- Puede usar calculadora no programable.
- No puede usar celular.
- No 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.
- Cualquier acto que vaya en contra del código de honor se sancionará con nota final 1.0 en el curso.

Problema 1

Una máquina térmica realiza el ciclo que se muestra en el gráfico $P-V$ de la figura, usando un gas diatómico. El tramo $A \to B$ es isotérmico y el tramo $C \to A$ es adiabático. La temperatura del punto A es 300 K.

a) Determine cuántos moles de gas hay en esta máquina. (0.5 ptos.)

b) Determine la temperatura en el punto C. (0.5 ptos.)

c) Encuentre la entrada de calor al gas durante el proceso a volumen constante, del punto B al punto C. (1 pto.)

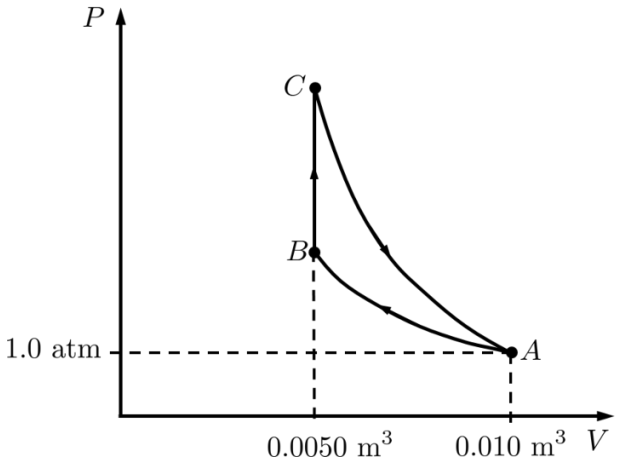
d) Determine el trabajo realizado por el gas durante el proceso isotérmico, del punto A al punto B. (1 pto.)

e) Determine el trabajo realizado por el gas durante el proceso adiabático, del punto C al punto A. (1 pto.)

f) Determine la eficiencia de la máquina. (1 pto.)

g) ¿Cuál es la máxima eficiencia posible para una máquina que opera entre T_A y T_C? (1 pto.)

En un gas diatómico $\gamma = 1.4$, $c_v = (5/2)R$. $R = 8.314$ J/mol·K y 1 atm $= 10^5$ Pa.



Solución problema 1

a) Ecuación de estado de un gas ideal:

$$PV = nRT$$

Por lo que el número de moles está dado por

$$n = \frac{PV}{RT} \qquad \text{(0.2 pts.)}$$

Considerando el punto A:

$$V_A = 0.010 \text{ m}^3, \quad P_A = 1.0 \text{ atm} = 10^5 \text{ Pa}, \quad T_A = 300 \text{ K}$$

Reemplazando:

$$n = \frac{10^5 \cdot 0.01}{8.314 \cdot 300} = 0.4 \text{ mol} \qquad \text{(0.3 pts.)}$$

b) Usando la Ecuación de Estado:

$$T_C = \frac{P_C V_C}{nR} \qquad \text{(0.1 pts.)}$$

con $V_C = 0.0050$ m^3.

El proceso $A \to C$ es adiabático. Luego:

$$P_A V_A^\gamma = P_C V_C^\gamma$$

Por lo que

$$P_C = \left(\frac{V_A}{V_C}\right)^\gamma P_A \qquad \text{(0.1 pts.)}$$

Reemplazando con $V_A = 0.010$ m^3, $V_C = 0.0050$ m^3, $P_A = 10^5$ Pa y $\gamma = 1.4$, se tiene

$$P_C = \left(\frac{0.010}{0.005}\right)^{1.4} \cdot 10^5 = 2.64 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

Luego:

$$T_C = \frac{2.64 \cdot 10^5 \times 0.005}{0.4 \times 8.314} = 397 \text{ K} \qquad \text{(0.3 pts.)}$$

c) Primera Ley de la Termodinámica:

$$\Delta U = \Delta Q - W \qquad \text{(0.2 pts.)}$$

donde ΔU es el cambio de energía interna en el proceso y W el trabajo realizado. En el proceso $B \to C$ $V = cte$, por lo que $W_{BC} = 0$. Luego:

$$\Delta Q_{BC} = \frac{5}{2} R (T_C - T_B) \qquad \text{(0.3 pts.)}$$

El proceso $A \to B$ es isotérmico, por lo que $T_B = T_A = 300$ K. Reemplazando:

$$\Delta Q_{BC} = 0.4 \times \frac{5}{2} \times 8.314 \times (397 - 300) = 806.5 \text{ J} \qquad \text{(0.5 pts.)}$$

d) El trabajo realizado en el proceso $A \to B$ está dado por

$$W_{AB} = \int_A^B PdV \qquad \text{(0.2 pts.)}$$

Usando la Ecuación de Estado,

$$P = \frac{nRT}{V}$$

El proceso $A \to B$ es isotérmico, por lo que $T = T_A = 300$ K. Luego:

$$W_{AB} = nRT_A \int_A^B \frac{dV}{V} = nRT_A \ln\left(\frac{V_B}{V_A}\right) \qquad \text{(0.4 pts.)}$$

Reemplazando valores, con $V_B = V_C = 0.0050$ m^3:

$$W_{AB} = 0.4 \times 8.314 \times 300 \times \ln\left(\frac{0.005}{0.010}\right) = -691.54 \text{ J} \qquad \text{(0.4 pts.)}$$

e) El trabajo realizado en el proceso $C \to A$ está dado por

$$W_{CA} = \int_C^A PdV \qquad \text{(0.1 pts.)}$$

El proceso $\to A$ es adiabático, por lo que $PV^\gamma = cte$. Luego:

$$W_{CA} = cte \int_C^A \frac{dV}{V^\gamma} \qquad \text{(0.2 pts.)}$$

Por lo que

$$W_{CA} = cte \left.\frac{V^{1-\gamma}}{1-\gamma}\right|_C^A$$

Evaluando la constante:

$$cte = 10^5 \times 0.010^{1.4} = 158.49 \qquad \text{(0.3 pts.)}$$

Luego, reemplazando la cte y γ, con $V_A = 0.010$ m^3 y $V_B = 0.005$ m^3, resulta

$$W_{CA} = \frac{158.49}{1-1.4}\left(0.010^{-0.4} - 0.005^{-0.4}\right) = 807.15 \text{ J} \qquad \text{(0.4 pts.)}$$

Alternativamente, usando la primera Ley de la Termodinámica y considerando que el proceso $C \to A$ es adiabático, por lo tanto sin flujo de calor, se tiene que

$$W_{CA} = nc_v \Delta T_{CA} = nc_v(T_C - T_A) \qquad \text{(0.6 pts.)}$$

Con $T_A = 300$ K y $T_C = 397$ K, resulta

$$W_{CA} = 0.4 \times \frac{5}{2} \times 8.324 \times (397 - 300) = 806.46 \text{ J} \qquad \text{(0.4 pts.)}$$

La diferencia con el cálculo anterior se debe a aproximaciones numéricas en los cálculos.

f) La eficiencia de uin ciclo termodinámico está dada por

$$\eta = \frac{W_{neto}}{Q_a} \qquad \text{(0.3 pts.)}$$

donde W_{neto} es el trabajo neto realizado en el ciclo y ΔQ_a es el calor absorbido en el ciclo. En este caso, $W_{neto} = W_{AB} + W_{CA}$ y $Q_a = \Delta Q_{BC}$. Reemplazando:

$$\eta = \frac{-691.54 + 806.46}{806.5} = 0.142 \qquad \text{(0.7 pts.)}$$

Alternativamente, la eficiencia está dada por

$$\eta = 1 - \frac{|Q_c|}{Q_a} \qquad \text{(0.3 pts.)}$$

donde Q_c es el calor cedido al medio en cada ciclo. En este caso, $Q_c = \Delta Q_{AB}$.

Usando la Primera Ley y considerando que el proceso $A \to B$ es isotérmico, por lo que $\Delta U_{AB} = 0$, se tiene que

$$\Delta Q_{AB} = W_{AB} = -691.5 \text{ J} \qquad \text{(0.3 pts.)}$$

Reemplazando,

$$\eta = 1 - \frac{691.5}{806.5} = 0.143 \qquad \text{(0.4 pts.)}$$

La diferencia con el cálculo anterior se debe a aproximaciones numéricas en los cálculos.

g) La máxima eficiencia para un ciclo termodinámico es la efciencia del Ciclo de Carnot que opera entre las mismas temperaturas extremas, y está dada por

$$\eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_b}{T_a} \qquad \text{(0.4 pts.)}$$

donde T_a y T_b son, respectivamente, la temperatura más alta y más baja en el ciclo.

En este caso $T_a = T_B = 396$ K y $T_b = T_A = 300$ K ,(0.2 pts.).

Reemplazando,

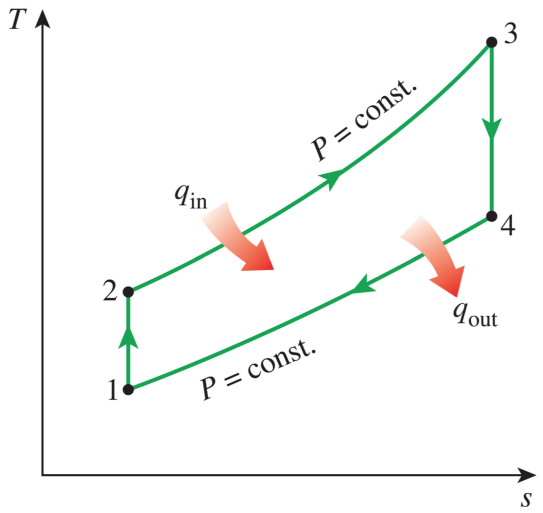
$$\eta_{Carnot} = 1 - \frac{300}{396} = 0.242 \qquad \text{(0.4 pts.)}$$

Nombre:	RUN:	Sección:

Problema 2

Una cierta cantidad de vapor de agua se somete al ciclo mostrado en la figura, donde los procesos son los siguientes:

- ① → ② Compresión isentrópica,
- ② → ③ adición de calor isobárica,
- ③ → ④ expansión isentrópica,
- ④ → ① rechazo de calor isobárico.



Las temperaturas en los estados ② y ④ son, respectivamente, $T_2 = 500\,°C$, $T_4 = 600\,°C$, mientras que en los estados ① y ③ las presiones son $P_1 = 800$ kPa y $P_3 = 1.2$ MPa.

Calcule:

a) La entalpía y entropía específicas de los estados ② y ④. (1 ptos.)

b) La temperatura y la entalpía específica de los estados ① y ③. (2 ptos.)

c) El calor por unidad de masa que entra y que sale del sistema. (1 ptos.)

d) La eficiencia del ciclo. (1 ptos.)

e) La eficiencia del ciclo de Carnot equivalente. Compare. (1 ptos.)

Solución problema 2

a) El estado 2 está determinado por

$$T_2 = 500\,^\circ\mathrm{C}\,, \qquad P_2 = P_3 = 1{,}2\,\mathrm{MPa}\,.$$

Luego, de la tabla A-6 extraemos

$$h_2 = 3477{,}0\,\mathrm{kJ/kg}\,, \qquad s_2 = 7{,}6779\,\mathrm{kJ/kg\cdot K}\,. \qquad (0{,}5\text{ pts.})$$

Similarmente, el estado 4 tiene

$$T_4 = 600\,^\circ\mathrm{C}\,, \qquad P_4 = P_1 = 800\,\mathrm{kPa}\,.$$

Así,

$$h_4 = 3700{,}1\,\mathrm{kJ/kg}\,, \qquad s_4 = 8{,}1354\,\mathrm{kJ/kg\cdot K}\,. \qquad (0{,}5\text{ pts.})$$

b) En el estado 3

$$s_3 = s_4 = 8{,}1354\,\mathrm{kJ/kg\cdot K}\,, \qquad P_3 = 1{,}2\,\mathrm{MPa}\,.$$

Interpolando linealmente encontramos

$$h(s) = h_a + \frac{s - s_a}{s_b - s_a}\,(h_b - h_a)\,, \qquad \begin{aligned} h_a &= 3697.)\,\mathrm{kJ/kg}\,, & s_a &= 7{,}9456\,\mathrm{kJ/kg\cdot K}\,,\\ h_b &= 3922.)\,\mathrm{kJ/kg}\,, & s_b &= 8{,}1904\,\mathrm{kJ/kg\cdot K}\,, \end{aligned}$$

$$h(s_3) = 3872{,}1\,\mathrm{kJ/kg}\,. \qquad (0{,}5\text{ pts.})$$

$$T(s) = T_a + \frac{s - s_a}{s_b - s_a}\,(T_b - T_a)\,, \qquad \begin{aligned} T_a &= 600\,^\circ\mathrm{C}\,, & s_a &= 7{,}9456\,\mathrm{kJ/kg\cdot K}\,,\\ T_b &= 700\,^\circ\mathrm{C}\,, & s_b &= 8{,}1904\,\mathrm{kJ/kg\cdot K}\,, \end{aligned}$$

$$T(s_3) = 677{,}5\,^\circ\mathrm{C}\,. \qquad (0{,}5\text{ pts.})$$

Por último, para el estado 1,

$$s_1 = s_2 = 7{,}6779\,\mathrm{kJ/kg\cdot K}\,, \qquad P_1 = 800\,\mathrm{kPa}\,.$$

Interpolando linealmente encontramos

$$h(s) = h_a + \frac{s - s_a}{s_b - s_a}\,(h_b - h_a)\,, \qquad \begin{aligned} h_a &= 3267{,}7\,\mathrm{kJ/kg}\,, & s_a &= 7{,}5735\,\mathrm{kJ/kg\cdot K}\,,\\ h_b &= 3481{,}3\,\mathrm{kJ/kg}\,, & s_b &= 7{,}8692\,\mathrm{kJ/kg\cdot K}\,, \end{aligned}$$

$$h(s_1) = 3343{,}1\,\mathrm{kJ/kg}\,. \qquad (0{,}5\text{ pts.})$$

$$T(s) = T_a + \frac{s - s_a}{s_b - s_a}\,(T_b - T_a)\,, \qquad \begin{aligned} T_a &= 400\,^\circ\mathrm{C}\,, & s_a &= 7{,}5735\,\mathrm{kJ/kg\cdot K}\,,\\ T_b &= 500\,^\circ\mathrm{C}\,, & s_b &= 7{,}8692\,\mathrm{kJ/kg\cdot K}\,, \end{aligned}$$

$$T(s_1) = 435{,}3\,^\circ\mathrm{C}\,. \qquad (0{,}5\text{ pts.})$$

c) Por primera ley, el calor que entra al sistema en la fase $2-3$ es

$$h_2 + q_{in} = h_3 \qquad \Rightarrow \qquad \begin{aligned} q_{in} &= h_3 - h_2\\ &= 395{,}1\,\mathrm{kJ/kg}\,. \qquad (0{,}5\text{ pts.}) \end{aligned}$$

Similarmente, en la fase $4-1$ tenemos

$$\begin{aligned} q_{out} &= h_4 - h_1\\ &= 357{,}0\,\mathrm{kJ/kg}\,. \qquad (0{,}5\text{ pts.}) \end{aligned}$$

d) La eficiencia del ciclo es

$$\begin{aligned} \eta &= 1 - \frac{q_{out}}{q_{in}}\\ &= 0{,}10\,. \qquad (1{,}0\text{ pto.}) \end{aligned}$$

e) La eficiencia del ciclo de Carnot equivalente es (no olvide que las temperaturas deben estar en Kelvin)

$$\begin{aligned} \eta_c &= 1 - \frac{T_1}{T_3}\\ &= 0{,}25\,. \qquad (1{,}0\text{ pto.}) \end{aligned}$$

Nombre:	RUN:	Sección:

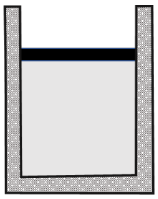
Problema 3

Un cilindro hermético posee en su interior un pistón con masa y sin roce, que proporciona una presión constante, como muestra la figura. El interior de cilindro contiene inicialmente 0.75 kg de vapor de agua saturado a 200 kPa. Luego, se enfría, de manera que el volumen se convierte en la mitad del volumen inicial, debido a transferencia de calor al ambiente circundante, que se encuentra a 20°C. Encuentre:

a) El trabajo realizado en el proceso. (2 pto.)

b) La transferencia de calor durante el proceso. (2 pto.)

c) La entropía total generada en el proceso. (2 pto.)



Solución problema 3

a) El proceso es transiente. Asignando el índice 1 al estado inicial y el índice 2 al estado final, las ecuaciones que describen el proceso son:

Primera Ley de la Termodinámica:

$$m(u_2 - u_1) = Q_{12} - W_{12} \qquad \text{(0.2 pts.)}$$

con

$$Q_{12} = m(h_2 - h_1) \qquad \text{(0.1 pts.)}$$

y

$$W_{12} = \int_1^2 P dV \qquad \text{(0.1 pts.)}$$

En el proceso hay conservación de masa, por lo que se cumple que

$$m_2 = m_1 = m \qquad \text{(0.2 pts.)}$$

En el proceso la presión y la masa son constantes, por lo que el trabajo está dado por

$$W_{12} = mP \int_1^2 dv = mP(v_2 - v_1) \qquad \text{(0.2 pts.)}$$

donde $v = V/m$ es el volumen específico.

En el estado 1, $P_1 = 200$ kPa. De la Tabla, para vapor de agua saturado, correspondiente al índice g, a 200 kPa,

$$v_1 = 0.88578 \text{ m}^3/\text{kg} \qquad \text{(0.4 pts.)}$$

En el estado 2, $P_2 = 200$ kPa y $V_2 = V/2$, por lo que

$$v_2 = v_1/2 = 0.88578/2 = 0.44289 \text{ m}^3/\text{kg} \qquad \text{(0.4 pts.)}$$

Con $m = 0.75$ kg, el trabajo resulta

$$W_{12} = mP(v_2 - v_1) = 0.75 \times 200 \times (0.44289 - 0.88578) = -66.43 \text{ kJ} \qquad \text{(0.4 pts.)}$$

b) La transferencia de calor está dada por

$$Q_{12} = m(h_2 - h_1) \qquad \text{(0.2 pts.)}$$

De la Tabla, para vapor de agua saturado, correspondiente al índice g, se tiene

$$h_1 = 2706.3 \text{ kJ/kg} \qquad \text{(0.3 pts.)}$$

En el estado 2 el volumen específico está dado por

$$v = v_f + x \cdot v_{fg}$$

donde x es la calidad y $v_{fg} = v_g - v_f$. Luego,

$$x = \frac{v - v_f}{v_g - v_f} \qquad \text{(0.1 pts.)}$$

De la Tabla, para agua a 200 kPa,

$$v_f = 0.001061 \text{ m}^3/\text{kg}, \quad v_g = 0.88578 \text{ m}^3/\text{kg} \qquad \text{(0.3 pts.)}$$

Reemplazando:

$$x = \frac{0.44289 - 0.001061}{0.88578 - 0.001061} = 0.499 \qquad \text{(0.2 pts.)}$$

La entalpía específica h_2 del estado 2 está dada por:

$$h_2 = h_f + x \cdot h_{fg}$$

De la Tabla, para agua a 200 kPa,

$$h_f = 504.71 \text{ kJ/kg}, \quad h_{fg} = 2201.6 \text{ kJ/kg} \qquad \text{(0.2 pts.)}$$

Reemplazando:

$$h_2 = 504.72 + 0.499 \cdot 2201.6 = 1603.318 \text{ kJ/kg} \qquad \text{(0.3 pts.)}$$

Luego, el flujo de calor en el proceso es:

$$Q_{12} = m(h_2 - h_1) = 0.75 \times (1603.318 - 2706.3) = -827.237 \text{ kJ} \qquad \text{(0.4 pts.)}$$

c) La segunda Ley de la Termodinámica:

$$m(s_2 - s_1) = \int_1^2 \frac{dQ}{T} + S_{12_{gen}} \qquad \text{(0.3 pts.)}$$

donde T es la temperatura constante del medio.
Luego:

$$S_{12_{gen}} = m(s_2 - s_1) - \frac{Q_{12}}{T} \qquad \text{(0.2 pts.)}$$

De la Tabla, para vapor de agua saturado, correspondiente al índice g, se tiene

$$s_1 = 7.1270 \text{ kJ/kg·K} \qquad \text{(0.3 pts.)}$$

La entropía específica s_2 del estado 2 está dada por:

$$s_2 = s_f + x \cdot s_{fg} \qquad \text{(0.2 pts.)}$$

De la Tabla, para agua a 200 kPa,

$$s_f = 1.5302 \text{ kJ/kg·K}, \quad s_{fg} = 5.5968 \text{ kJ/kg·K} \qquad \text{(0.4 pts.)}$$

Reemplazando:

$$s_2 = 1.5302 + 0.499 \cdot 5.5968 = 4.323 \text{ kJ/kg·K} \qquad \text{(0.2 pts.)}$$

Con $T = 20°\text{C} = 293$ K, reemplazando,

$$S_{12_{gen}} = 0.75 \times (4.323 - 7.127) + \frac{827.237}{293} = 0.72 \text{ kJ/kg} \qquad \text{(0.4 pts.)}$$

Nombre:	RUN:	Sección:

Formulario Examen: FIS1523 - Termodinámica

Instituto de Física
Pontificia Universidad Católica de Chile
Segundo Semestre 2023

Ecuación de Estado de gases ideales:

$$PV = nRT = NK_BT$$

$R = 8.314$ J/mol·K, $k_B = 1.38{\cdot}10^{-23}$ J/K, y n es el número de moles y N el número de partículas.

Primera Ley de la Termodinámica:

$$dU = \delta Q - \delta W$$

donde dU es la variación de energía interna, δQ el flujo de calor y δW el trabajo realizado por el sistema.

Alternativamente, en el caso de un proceso en en que un sistema absorbe una cantidad de calor Q y realiza trabajo W, la variación de energía interna es

$$\Delta U = Q - W$$

Trabajo realizado por un gas al cambiar del estado A al estado B:

$$W_{AB} = \int_A^B PdV$$

Alternativamente,

$$P\mathfrak{v} = \mathcal{R}T$$

con $\mathcal{R} = R/M_m$, siendo $R = 8.314$ J/mol· K y M_m la masa molecular del gas respectivo, y $\mathfrak{v} = V/m$.

Primera Ley de la Termodinámica:

$$dH = \delta Q + VdP$$

donde dH es la variación de entalpía y δQ el flujo de calor.

También,

$$\hbar = u + P\mathfrak{v}$$

donde $\hbar$, u y $\mathfrak{v}$ son, respectivamente, magnitudes específicas de entalpía, energía interna y volumen.

Variación de energía interna en un proceso a volumen constante:

$$\Delta U = nc_v \Delta T$$

con c_v el calor específico a volumen constante.

Variación de entalpía en un proceso de presión constante:

$$\Delta \hbar = c_p \Delta T$$

con c_p el calor específico a presión constante.

Alternativamente,

Flujo de calor en un proceso a volumen constante:

$$\Delta q = c_v \Delta T$$

Flujo de calor en un proceso a presión constante:

$$\Delta q = c_p \Delta T$$

donde $c_v = c_v/M_m$ y $c_p = c_p/M_m$ son los calores específicos a volumen y presión constante, respectivamente.

En un proceso adiabático no hay transferencia de calor y se satisface la relación

$$PV^\gamma = \text{cte}$$

donde $\gamma = c_p/c_v$.

Procesos con sustancias puras:

$m = m_{liq} + m_{vap}$ es la masa total de una mezcla de líquido y vapor.

La calidad x de la mezcla está dada por

$$x = 1 - \frac{m_{liq}}{m}$$

En una mezcla de líquido y vapor los valores específicos de volumen, energía interna y entalpía estan dados por

$$\begin{aligned} \mathfrak{v} &= \mathfrak{v}_f + x \cdot \mathfrak{v}_{fg} \\ u &= u_f + x \cdot u_{fg} \\ \hbar &= \hbar_f + x \cdot \hbar_{fg} \end{aligned}$$

con

$$\begin{aligned} \mathfrak{v}_{fg} &= \mathfrak{v}_g - \mathfrak{v}_f \\ u_{fg} &= u_g - u_f \\ \hbar_{fg} &= \hbar_g - \hbar_f \end{aligned}$$

correspondiendo el índice g a la condición de vapor saturado y el índice f a la condición de líquido saturado, y los valores correspondientes se obtienen de Tablas Termodinámicas.

Energía total E contenida en un sistema termodinámico encerrado en volume control (v. c.):

$$E = U + K + U_p$$

donde U es la energía interna, y K y U_p son la energía cinética y potencial asociada a la masa contenida en el v. c. Primera Ley de la Termodinámica,

$$dE = dU + dK + dU_p = \delta Q - \delta W$$

Por unidad de masa:

$$e + Pv = \hbar + \frac{1}{2}v^2 + gz$$

Tasa de variación de energía en interior del v.c.

$$\frac{dE_{v.c.}}{dt} = \dot{Q}_{v.c.} - \dot{W}_{v.c.} + \dot{m}_e(\hbar_e + \frac{1}{2}v_e^2 + gz_e) - \dot{m}_s(\hbar_s + \frac{1}{2}v_e^2 + gz_s)$$

donde $\dot{m}_e$ y $\dot{m}_s$ son la cantidad de masa que entra y sale del v. c., transportando entalpía y energía cinética y potencial.

Proceso estacionario:

$$\frac{dE_{v.c.}}{dt} = 0$$

Posibilidad de varios componentes de masa entrando y saliendo del v.c.:

$$\dot{Q}_{v.c.} + \sum \dot{m}_e \left(\hbar_e + \frac{1}{2}v_e^2 + gz_e\right) = \sum \dot{m}_s \left(\hbar_s + \frac{1}{2}v_s^2 + gz_s\right) + \dot{W}_{v.c.}$$

Una sola especie, $\dot{m}_e = \dot{m}_s = \dot{m}$. Primera Ley en proceso estacionario con una sola especie:

$$q + \hbar_e + \frac{1}{2}v_e^2 + gz_e = \hbar_s + \frac{1}{2}v_s^2 + gz_s + w$$

Primera Ley en proceso transiente, con $1 \rightarrow$ estado incial del v. c. y $2 \rightarrow$ estado final del v. c.:

$$\begin{aligned} Q_{v.c.} + \sum m_e \left(\hbar_e + \tfrac{1}{2}v_e^2 + gz_e\right) &= \sum m_s \left(\hbar_s + \tfrac{1}{2}v_s^2 + gz_s\right) \\ &+ \left[m_2 \left(u_2 + \tfrac{1}{2}v_2^2 + gz_2\right) - m_1 \left(u_1 + \tfrac{1}{2}v_1^2 + gz_1\right)\right]_{v.c.} + W_{v.c.} \end{aligned}$$

En un ciclo termodinámico, definido como proceso cerrado de cambio continuo de variables de estado, se cumple

$$\Delta U = 0,\ W = \oint PdV$$

por lo que

$$\Delta U = nc_v\Delta T = 0$$

y la Primera Ley es

$$\Delta Q = |Q_1| - |Q_2| = W$$

con Q_1 el calor total absorbido en el ciclo y Q_2 calor total cedido en el ciclo. η es la eficiencia del ciclo definida por

$$W = \eta |Q_1|$$

y está dada por

$$\eta = \frac{W}{|Q_1|} = \frac{|Q_1| - |Q_2|}{|Q_1|} = 1 - \frac{|Q_2|}{|Q_1|}$$

En un ciclo de Carnot se absorbe calor Q_1 a temperatura constante T_1, seguido de una expansión adiabática con cambio de temperatura $T_1 \to T_2 < T_1$, seguido de liberación de calor Q_2 a temperatura constante T_2, terminando con una compresión adiabática con cambio de temperatura $T_2 \to T_1$. La eficiencia termodinámica del Ciclo de Carnot es

$$\eta_C = 1 - \frac{|Q_2|}{|Q_1|} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

El trabajo realizado por una máquina de Carnot en un ciclo es

$$W = \eta Q_1 = \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) Q_1$$

Si en un proceso se transfiere calor δQ a temperatura T, se define el cambio de entropía como

$$dS \equiv \frac{\delta Q}{T}$$

Unidades de entropía: $[S] = J/K$ o $[S] = cal/K$.

En un proceso realizado por un gas ideal, que va desde un estado inicial i a uno final f, el cambio de entropía es

$$\Delta S = S_f - S_i = nc_p \ln\left(\frac{T_f}{T_i}\right) - nR \ln\left(\frac{P_f}{P_i}\right)$$

En una mezcla de líquido y vapor la entropía específica está dada por

$$\mathfrak{s} = \mathfrak{s}_f + x \cdot \mathfrak{s}_{fg}$$

donde x es la calidad y

$$\mathfrak{s}_{fg} = \mathfrak{s}_g - \mathfrak{s}_f$$

correspondiendo el índice g a la condición de vapor saturado y el índice f a la condición de líquido saturado, valores que se obtienen de Tablas Termodinámicas.

Desigualdad de Clausius: en un ciclo cerrado se cumple

$$\Delta S = \oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0$$

La igualdad corresponde a proceso internamente reversible, y la desigualdad a proceso irreversible. Los procesos irreversibles generan entropía, siendo ΔS_{sis} la entropía generada en el sistema completo, debido a un cambio entre estado 1 y estado 2.

$$\Delta S_{sis} = S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} + S_{gen}$$

donde $S_{gen} \geq 0$ es la entropía generada.
Un proceso isentrópico es un proceso adiabático reversible, que satisface la condición

$$\Delta \mathfrak{s} = 0$$

Segunda Ley para procesos transientes en volumen control (v.c.):

$$(m_2 \mathfrak{s}_2 - m_1 \mathfrak{s}_1)_{v.c.} = \sum m_e \mathfrak{s}_e - \sum m_s \mathfrak{s}_s + \int_0^t \frac{\dot{Q}_{v.c.}}{T} dt + \Delta S_{12\,gen}$$

con $1 \rightarrow$ estado incial del v. c. y $2 \rightarrow$ estado final del v. c., y m_e y m_s las masas que entran y salen del v. c. durante el proceso.

Segunda Ley para procesos estacionarios en volumen control (v.c.):

$$\dot{m}(\mathfrak{s}_s - \mathfrak{s}_e) = \sum \frac{\dot{Q}_{v.c.}}{T} + \dot{S}_{gen}$$

La entropía de un gas ideal con calor específico variable satisface las relaciones de Gibbs:

$$T d\mathfrak{s} = P d\mathfrak{v} + du$$
$$T d\mathfrak{s} = d\hbar - \mathfrak{v} dP$$

donde $\hbar$ y u son la entalpía y energía interna y la ecuación de estado es

$$P\mathfrak{v} = \mathcal{R}T$$

Tablas

Tomadas de "Termodinámica 7ed. Michael A. Boles y Yunus A. Çengel".

TABLA A-5

Agua saturada. Tabla de presiones

		Volumen específico, m^3/kg		*Energía interna, kJ/kg*			*Entalpía, kJ/kg*			*Entropía, kJ/kg · K*		
Pres., P kPa	Temp. sat., T_{sat} °C	Líq. sat., v_f	Vapor sat., v_g	Líq. sat., u_f	Evap., u_{fg}	Vapor sat., u_g	Líq. sat, h_f	Evap., h_{fg}	Vapor sat., h_g	Líq. sat., s_f	Evap., s_{fg}	Vapor sat., s_g
1.0	6.97	0.001000	129.19	29.302	2355.2	2384.5	29.303	2484.4	2513.7	0.1059	8.8690	8.9749
1.5	13.02	0.001001	87.964	54.686	2338.1	2392.8	54.688	2470.1	2524.7	0.1956	8.6314	8.8270
2.0	17.50	0.001001	66.990	73.431	2325.5	2398.9	73.433	2459.5	2532.9	0.2606	8.4621	8.7227
2.5	21.08	0.001002	54.242	88.422	2315.4	2403.8	88.424	2451.0	2539.4	0.3118	8.3302	8.6421
3.0	24.08	0.001003	45.654	100.98	2306.9	2407.9	100.98	2443.9	2544.8	0.3543	8.2222	8.5765
4.0	28.96	0.001004	34.791	121.39	2293.1	2414.5	121.39	2432.3	2553.7	0.4224	8.0510	8.4734
5.0	32.87	0.001005	28.185	137.75	2282.1	2419.8	137.75	2423.0	2560.7	0.4762	7.9176	8.3938
7.5	40.29	0.001008	19.233	168.74	2261.1	2429.8	168.75	2405.3	2574.0	0.5763	7.6738	8.2501
10	45.81	0.001010	14.670	191.79	2245.4	2437.2	191.81	2392.1	2583.9	0.6492	7.4996	8.1488
15	53.97	0.001014	10.020	225.93	2222.1	2448.0	225.94	2372.3	2598.3	0.7549	7.2522	8.0071
20	60.06	0.001017	7.6481	251.40	2204.6	2456.0	251.42	2357.5	2608.9	0.8320	7.0752	7.9073
25	64.96	0.001020	6.2034	271.93	2190.4	2462.4	271.96	2345.5	2617.5	0.8932	6.9370	7.8302
30	69.09	0.001022	5.2287	289.24	2178.5	2467.7	289.27	2335.3	2624.6	0.9441	6.8234	7.7675
40	75.86	0.001026	3.9933	317.58	2158.8	2476.3	317.62	2318.4	2636.1	1.0261	6.6430	7.6691
50	81.32	0.001030	3.2403	340.49	2142.7	2483.2	340.54	2304.7	2645.2	1.0912	6.5019	7.5931
75	91.76	0.001037	2.2172	384.36	2111.8	2496.1	384.44	2278.0	2662.4	1.2132	6.2426	7.4558
100	99.61	0.001043	1.6941	417.40	2088.2	2505.6	417.51	2257.5	2675.0	1.3028	6.0562	7.3589
101.325	99.97	0.001043	1.6734	418.95	2087.0	2506.0	419.06	2256.5	2675.6	1.3069	6.0476	7.3545
125	105.97	0.001048	1.3750	444.23	2068.8	2513.0	444.36	2240.6	2684.9	1.3741	5.9100	7.2841
150	111.35	0.001053	1.1594	466.97	2052.3	2519.2	467.13	2226.0	2693.1	1.4337	5.7894	7.2231
175	116.04	0.001057	1.0037	486.82	2037.7	2524.5	487.01	2213.1	2700.2	1.4850	5.6865	7.1716
200	120.21	0.001061	0.88578	504.50	2024.6	2529.1	504.71	2201.6	2706.3	1.5302	5.5968	7.1270
225	123.97	0.001064	0.79329	520.47	2012.7	2533.2	520.71	2191.0	2711.7	1.5706	5.5171	7.0877
250	127.41	0.001067	0.71873	535.08	2001.8	2536.8	535.35	2181.2	2716.5	1.6072	5.4453	7.0525
275	130.58	0.001070	0.65732	548.57	1991.6	2540.1	548.86	2172.0	2720.9	1.6408	5.3800	7.0207
300	133.52	0.001073	0.60582	561.11	1982.1	2543.2	561.43	2163.5	2724.9	1.6717	5.3200	6.9917
325	136.27	0.001076	0.56199	572.84	1973.1	2545.9	573.19	2155.4	2728.6	1.7005	5.2645	6.9650
350	138.86	0.001079	0.52422	583.89	1964.6	2548.5	584.26	2147.7	2732.0	1.7274	5.2128	6.9402
375	141.30	0.001081	0.49133	594.32	1956.6	2550.9	594.73	2140.4	2735.1	1.7526	5.1645	6.9171
400	143.61	0.001084	0.46242	604.22	1948.9	2553.1	604.66	2133.4	2738.1	1.7765	5.1191	6.8955

TABLA A-6

Vapor de agua sobrecalentado

T °C	*v* m^3/kg	*u* kJ/kg	*h* kJ/kg	*s* kJ/kg · K	*v* m^3/kg	*u* kJ/kg	*h* kJ/kg	*s* kJ/kg · K	*v* m^3/kg	*u* kJ/kg	*h* kJ/kg	*s* kJ/kg · K
	P = 0.50 MPa (151.83°C)				*P* = 0.60 MPa (158.83°C)				*P* = 0.80 MPa (170.41°C)			
Sat.	0.37483	2560.7	2748.1	6.8207	0.31560	2566.8	2756.2	6.7593	0.24035	2576.0	2768.3	6.6616
200	0.42503	2643.3	2855.8	7.0610	0.35212	2639.4	2850.6	6.9683	0.26088	2631.1	2839.8	6.8177
250	0.47443	2723.8	2961.0	7.2725	0.39390	2721.2	2957.6	7.1833	0.29321	2715.9	2950.4	7.0402
300	0.52261	2803.3	3064.6	7.4614	0.43442	2801.4	3062.0	7.3740	0.32416	2797.5	3056.9	7.2345
350	0.57015	2883.0	3168.1	7.6346	0.47428	2881.6	3166.1	7.5481	0.35442	2878.6	3162.2	7.4107
400	0.61731	2963.7	3272.4	7.7956	0.51374	2962.5	3270.8	7.7097	0.38429	2960.2	3267.7	7.5735
500	0.71095	3129.0	3484.5	8.0893	0.59200	3128.2	3483.4	8.0041	0.44332	3126.6	3481.3	7.8692
600	0.80409	3300.4	3702.5	8.3544	0.66976	3299.8	3701.7	8.2695	0.50186	3298.7	3700.1	8.1354
700	0.89696	3478.6	3927.0	8.5978	0.74725	3478.1	3926.4	8.5132	0.56011	3477.2	3925.3	8.3794
800	0.98966	3663.6	4158.4	8.8240	0.82457	3663.2	4157.9	8.7395	0.61820	3662.5	4157.0	8.6061
900	1.08227	3855.4	4396.6	9.0362	0.90179	3855.1	4396.2	8.9518	0.67619	3854.5	4395.5	8.8185
1000	1.17480	4054.0	4641.4	9.2364	0.97893	4053.8	4641.1	9.1521	0.73411	4053.3	4640.5	9.0189
1100	1.26728	4259.0	4892.6	9.4263	1.05603	4258.8	4892.4	9.3420	0.79197	4258.3	4891.9	9.2090
1200	1.35972	4470.0	5149.8	9.6071	1.13309	4469.8	5149.6	9.5229	0.84980	4469.4	5149.3	9.3898
1300	1.45214	4686.6	5412.6	9.7797	1.21012	4686.4	5412.5	9.6955	0.90761	4686.1	5412.2	9.5625
	P = 1.00 MPa (179.88 °C)				*P* = *1.20* MPa (187.96 °C)				*P* = 1.40 MPa (195.04 °C)			
Sat.	0.19437	2582.8	2777.1	6.5850	0.16326	2587.8	2783.8	6.5217	0.14078	2591.8	2788.9	6.4675
200	0.20602	2622.3	2828.3	6.6956	0.16934	2612.9	2816.1	6.5909	0.14303	2602.7	2803.0	6.4975
250	0.23275	2710.4	2943.1	6.9265	0.19241	2704.7	2935.6	6.8313	0.16356	2698.9	2927.9	6.7488
300	0.25799	2793.7	3051.6	7.1246	0.21386	2789.7	3046.3	7.0335	0.18233	2785.7	3040.9	6.9553
350	0.28250	2875.7	3158.2	7.3029	0.23455	2872.7	3154.2	7.2139	0.20029	2869.7	3150.1	7.1379
400	0.30661	2957.9	3264.5	7.4670	0.25482	2955.5	3261.3	7.3793	0.21782	2953.1	3258.1	7.3046
500	0.35411	3125.0	3479.1	7.7642	0.29464	3123.4	3477.0	7.6779	0.25216	3121.8	3474.8	7.6047
600	0.40111	3297.5	3698.6	8.0311	0.33395	3296.3	3697.0	7.9456	0.28597	3295.1	3695.5	7.8730
700	0.44783	3476.3	3924.1	8.2755	0.37297	3475.3	3922.9	8.1904	0.31951	3474.4	3921.7	8.1183
800	0.49438	3661.7	4156.1	8.5024	0.41184	3661.0	4155.2	8.4176	0.35288	3660.3	4154.3	8.3458
900	0.54083	3853.9	4394.8	8.7150	0.45059	3853.3	4394.0	8.6303	0.38614	3852.7	4393.3	8.5587
1000	0.58721	4052.7	4640.0	8.9155	0.48928	4052.2	4639.4	8.8310	0.41933	4051.7	4638.8	8.7595
1100	0.63354	4257.9	4891.4	9.1057	0.52792	4257.5	4891.0	9.0212	0.45247	4257.0	4890.5	8.9497
1200	0.67983	4469.0	5148.9	9.2866	0.56652	4468.7	5148.5	9.2022	0.48558	4468.3	5148.1	9.1308
1300	0.72610	4685.8	5411.9	9.4593	0.60509	4685.5	5411.6	9.3750	0.51866	4685.1	5411.3	9.3036