

Solucionario Guía de Ejercicios Termodinámica

21 de febrero de 2026

1. 2016-1

Pregunta 26 - 2016-1

Enunciado: Determine a qué temperatura son iguales (valores numéricos) las escalas Kelvin y Farenheit.

Solución: Buscamos una temperatura X tal que:

$$T_K = T_F = X$$

Usamos las conversiones del Handbook:

$$T_K = T_C + 273,15$$

$$T_F = 1,8T_C + 32$$

Igualando a X : 1. $X = T_C + 273,15 \implies T_C = X - 273,15$ 2. $X = 1,8T_C + 32$

Sustituyendo (1) en (2):

$$X = 1,8(X - 273,15) + 32$$

$$X = 1,8X - 491,67 + 32$$

$$X = 1,8X - 459,67$$

$$0,8X = 459,67 \implies X = 574,58$$

El valor más cercano es 574, 25.

Nota Handbook FE:

- **Units and Conversions (Pág. 1):** Fórmulas de conversión de temperaturas.
- $T_K = T_C + 273,15$; $T_F = 1,8T_C + 32$.

Respuesta Correcta: e) (Equivalente a 574,25)

Pregunta 27 - 2016-1

Enunciado: Sistema cerrado, sin trabajo expansión/compresión.

Solución: Primera Ley Sistema Cerrado:

$$Q - W = \Delta U + \Delta KE + \Delta PE$$

Si no hay trabajo ($W = 0$) y $\Delta KE, \Delta PE \approx 0$:

$$Q = \Delta U$$

Nota Handbook FE:

- **First Law of Thermodynamics (Pág. 147):** $Q - W = \Delta U + \Delta KE + \Delta PE$ (Closed System).
- *Special Case: Constant Volume* implica $W = 0$.

Respuesta Correcta: b)

Pregunta 28 - 2016-1

Enunciado: Corriente de agua a $200^\circ C$ y 1 MPa. Indique en qué estado se encuentra.

Solución: Datos:

- $T = 200^\circ C$
- $P = 1 \text{ MPa} = 10 \text{ bar}$

Procedimiento para determinar el estado:

Paso 1: Consultar temperatura de saturación a la presión dada.

En las tablas de vapor saturado (Saturación por Presión):

- A $P = 1,0 \text{ MPa}$: $T_{sat} = 179,91^\circ C \approx 180^\circ C$

Paso 2: Comparar temperatura real con temperatura de saturación.

$$T_{real} = 200^\circ C \quad \text{vs} \quad T_{sat} = 180^\circ C$$

Paso 3: Aplicar criterio de identificación de estado.

- Si $T < T_{sat}$: **Líquido comprimido (subenfriado)**
- Si $T = T_{sat}$: **Saturado** (líquido saturado, mezcla, o vapor saturado)
- Si $T > T_{sat}$: **Vapor sobrecalentado**

Como $200^\circ C > 180^\circ C$, el agua se encuentra como **Vapor Sobrecalentado**.

Verificación alternativa (Diagrama P-T):

- Punto: ($P = 1,0 \text{ MPa}, T = 200^\circ C$)
- Curva de saturación: $P_{sat}(200^\circ C) = 1,554 \text{ MPa}$
- Como $P < P_{sat}$, está en región de vapor sobrecalentado

Nota Handbook FE:

- **Steam Tables (Pág. 157):** Tablas de vapor saturado (agua).
- Criterio: Si $T > T_{sat}$ a la presión dada, es vapor sobrecalentado.
- Para propiedades específicas, consultar tablas de vapor sobrecalentado.

Respuesta Correcta: d)

2. 2016-2

Pregunta 33 - 2016-2

Enunciado: ¿Cuál es la temperatura de un sistema en equilibrio térmico con otro sistema compuesto por una mezcla de agua y vapor de agua a 1 atm de presión?

Solución: Concepto clave: Equilibrio térmico significa que ambos sistemas están a la misma temperatura.

Paso 1: Identificar la temperatura de la mezcla agua-vapor.

Para una mezcla líquido-vapor en equilibrio (estado saturado):

- La temperatura y presión están relacionadas por la ecuación de Clausius-Clapeyron
- A cada presión corresponde una única temperatura de saturación
- $T = T_{sat}(P)$

Paso 2: Consultar temperatura de saturación a 1 atm.

De las tablas de vapor de agua:

- $P = 1 \text{ atm} = 101,325 \text{ kPa}$
- $T_{sat} = 100^\circ\text{C} = 373,15 \text{ K} = 212^\circ\text{F}$

Paso 3: Aplicar condición de equilibrio térmico.

Por la Ley Cero de la Termodinámica:

- Si el sistema A está en equilibrio térmico con el sistema B
- Entonces $T_A = T_B$

Por lo tanto:

$$T_{sistema} = T_{mezcla} = 100^\circ\text{C}$$

Nota importante: Cualquier mezcla de agua líquida y vapor en equilibrio a 1 atm SIEMPRE está a 100°C , independientemente de la calidad (proporción de vapor).

Nota Handbook FE:

- **Properties of Water (Pág. 157):** A presión atmosférica normal, $T_{sat} = 100^\circ\text{C}$.
- En zona de mezcla ($0 < x < 1$), T y P son dependientes (regla de fases de Gibbs).
- **Zeroth Law (Pág. 143):** Equilibrio térmico implica temperaturas iguales.

Respuesta Correcta: c)

Pregunta 34 - 2016-2

Enunciado: Un gas ideal puede ser llevado desde el punto 2 al punto 4 de tres maneras distintas: $2 \rightarrow 4$; $2 \rightarrow 3 \rightarrow 4$; $2 \rightarrow 1 \rightarrow 4$. Indique cuál afirmación es correcta.

Solución: Conceptos fundamentales:

Propiedades de estado: Dependen solo del estado (P , T , V), no del camino.

- Energía interna (U)
- Entalpía (H)

- Entropía (S)
- Volumen (V), Presión (P), Temperatura (T)

Propiedades de trayectoria: Dependen del camino seguido.

- Calor (Q)
- Trabajo (W)

Análisis de cada proceso:

Para un gas ideal: $\Delta U = nC_v\Delta T = nC_v(T_4 - T_2)$

Como ΔU solo depende de las temperaturas inicial y final:

$$\Delta U_{2 \rightarrow 4} = \Delta U_{2 \rightarrow 3 \rightarrow 4} = \Delta U_{2 \rightarrow 1 \rightarrow 4}$$

Sin embargo:

- El calor transferido Q es diferente para cada camino
- El trabajo realizado W es diferente para cada camino (área bajo la curva P-V)

Verificación con Primera Ley:

$$Q - W = \Delta U$$

Como ΔU es igual para todos los caminos, pero Q y W varían, se cumple:

$$Q_1 - W_1 = Q_2 - W_2 = Q_3 - W_3 = \Delta U$$

Nota Handbook FE:

- **Thermodynamics (Pág. 143):** Definición de propiedades de estado (U , H , S) vs trayectoria (Q , W).
- Propiedades de estado son independientes del camino termodinámico.

Respuesta Correcta: a) Se realiza el mismo cambio de energía interna para los 3 procesos

Pregunta 35 - 2016-2

Enunciado: La propiedad de una sustancia que aumenta o disminuye cuando se le suministra o retira calor, respectivamente, de una manera reversible, es conocida como:

Solución: La propiedad descrita es la **Entropía** (S).

Definición de Clausius: Para un proceso reversible:

$$dS = \frac{\delta Q_{rev}}{T}$$

Interpretación:

- Si se **suministra calor** reversiblemente: $\delta Q > 0 \Rightarrow dS > 0$ (entropía aumenta)
- Si se **retira calor** reversiblemente: $\delta Q < 0 \Rightarrow dS < 0$ (entropía disminuye)

Diferencia con otras propiedades:

- **Entalpía** (H): Relacionada con calor a presión constante, pero no caracteriza procesos reversibles generales

- **Energía interna (U):** Cambia con calor Y trabajo, no solo calor
- **Trabajo:** No es una propiedad de estado

Segunda Ley de la Termodinámica: Para cualquier proceso:

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

La igualdad aplica solo para procesos reversibles.

Nota Handbook FE:

- **Second Law of Thermodynamics (Pág. 151):** Se define en términos de entropía: $dS \geq \delta Q/T$.
- Para procesos reversibles: $dS = \delta Q/T$ (igualdad de Clausius).

Respuesta Correcta: c)

Pregunta 36 - 2016-2

Enunciado: Considere una bomba de calor de Carnot que posee un coeficiente de operación de 10. Indique la razón entre la temperatura absoluta más baja y más alta.

Solución: Definición del COP para bomba de calor (Heat Pump):

$$COP_{HP} = \frac{Q_H}{W} = \frac{T_H}{T_H - T_L}$$

Donde:

- Q_H = Calor entregado al espacio caliente
- W = Trabajo neto requerido
- T_H = Temperatura del espacio caliente (K)
- T_L = Temperatura del espacio frío (K)

Paso 1: Plantear ecuación con datos dados.

$$COP_{HP} = \frac{T_H}{T_H - T_L} = 10$$

Paso 2: Manipular algebraicamente.

Reescribiendo:

$$\begin{aligned} \frac{T_H}{T_H - T_L} &= 10 \\ T_H &= 10(T_H - T_L) \\ T_H &= 10T_H - 10T_L \\ 10T_L &= 9T_H \\ \frac{T_L}{T_H} &= \frac{9}{10} = 0,9 \end{aligned}$$

Interpretación física:

- Si $T_H = 300$ K (27°C), entonces $T_L = 270$ K (-3°C)

- Un COP alto (10) indica que las temperaturas están muy cercanas
- Por cada kJ de trabajo, se entregan 10 kJ de calor

Verificación:

$$COP_{HP} = \frac{300}{300 - 270} = \frac{300}{30} = 10$$

Nota Handbook FE:

- **Cycles (Pág. 149):** Fórmulas para Vapour Compression y Carnot.
- $COP_{HP,Carnot} = T_H / (T_H - T_L)$ (máximo teórico).
- Relación: $COP_{HP} = COP_R + 1$ donde COP_R es para refrigeración.

Respuesta Correcta: b) 0,9

3. 2017-1

Pregunta 33 - 2017-1

Enunciado: Comparar A ($26^\circ C$), B ($536,67^\circ R$), C ($84,2^\circ F$).

Solución: Convertimos a Celsius (Pág. 1): 1. $T_A = 26^\circ C$. 2. $T_B = 536,67^\circ R \Rightarrow T_K = 298,15 K \Rightarrow T_C = 25^\circ C$. 3. $T_C = 84,2^\circ F \Rightarrow T_C = 29^\circ C$.

Orden: $T_B < T_A < T_C$.

Nota Handbook FE:

- **Units and Conversions (Pág. 1):** Factores: $T_R = 1,8T_K$, $T_F = 1,8T_C + 32$.

Respuesta Correcta: d)

Pregunta 34 - 2017-1

Enunciado: ¿Cuáles de las siguientes propiedades afectan la cantidad de energía transferida en forma de calor sensible desde o hacia una sustancia?

Solución: El **calor sensible** es la energía térmica transferida que produce un cambio de temperatura sin cambio de fase.

La ecuación fundamental es:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T$$

Nemotecnia: $Q = c\Delta Tm$. Acuérdate de las siglas CTM

Donde:

- Q = Calor transferido (J o kJ)
- m = Masa de la sustancia (kg)
- c = Calor específico (J/kg·K o kJ/kg·K)
- ΔT = Cambio de temperatura (K o °C)

Por lo tanto, las tres propiedades que afectan el calor sensible son:

1. **Masa** (m): A mayor masa, mayor calor requerido

2. **Calor específico** (c): Propiedad del material
3. **Cambio de temperatura** (ΔT): Diferencia térmica deseada

Nota: El calor *latente* (cambio de fase) NO depende de ΔT , sino de la masa y el calor latente de transformación.

Nota Handbook FE:

- **Heat Capacity (Pág. 146):** Definición de c_p y c_v .
- **Heat Transfer (Pág. 204):** $Q = \dot{m}c_p\Delta T$.

Respuesta Correcta: d)

Pregunta 35 - 2017-1

Enunciado: Indique cuál afirmación es correcta respecto a la segunda ley de la termodinámica, para un proceso irreversible.

Solución: Segunda Ley de la Termodinámica (Enunciado de Clausius):

Para cualquier proceso que ocurre en el universo:

$$\Delta S_{universo} = \Delta S_{sistema} + \Delta S_{alrededores} \geq 0$$

Clasificación de procesos:

- **Proceso reversible:** $\Delta S_{universo} = 0$ (equilibrio termodinámico)
- **Proceso irreversible:** $\Delta S_{universo} > 0$ (proceso real espontáneo)
- **Proceso imposible:** $\Delta S_{universo} < 0$ (viola la Segunda Ley)

Para un proceso irreversible:

$$\Delta S_{universo} > 0$$

La entropía total del universo **siempre aumenta** en procesos irreversibles.

Notas importantes:

- La entropía del *sistema* puede aumentar, disminuir o permanecer constante
- La entropía de los *alrededores* puede aumentar, disminuir o permanecer constante
- Pero la suma $\Delta S_{sistema} + \Delta S_{alrededores} > 0$ para procesos irreversibles

Ejemplo: Un refrigerador disminuye la entropía del interior (sistema), pero aumenta más la entropía del exterior (alrededores), resultando en $\Delta S_{universo} > 0$.

Nota Handbook FE:

- **Second Law of Thermodynamics (Pág. 151):** Para proceso aislado irreversible, $\Delta S > 0$.
- Principio de aumento de entropía: La entropía del universo nunca disminuye.

Respuesta Correcta: a)

Pregunta 36 - 2017-1

Enunciado: Una máquina térmica reversible opera entre 800°C (fuente) y 30°C (sumidero). Determine la mínima tasa de rechazo de calor por kW de potencia neta.

Solución: Datos:

- $T_H = 800^{\circ}\text{C} = 1073,15\text{ K}$ (fuente caliente)
- $T_L = 30^{\circ}\text{C} = 303,15\text{ K}$ (sumidero frío)
- $W_{net} = 1\text{ kW}$ (potencia neta)

Paso 1: Calcular eficiencia de Carnot.

Para una máquina térmica reversible (Carnot):

$$\eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_L}{T_H} = 1 - \frac{303,15}{1073,15} = 1 - 0,2825 = 0,7175$$

Paso 2: Calcular calor de entrada.

De la definición de eficiencia:

$$\eta = \frac{W_{net}}{Q_{in}} \Rightarrow Q_{in} = \frac{W_{net}}{\eta} = \frac{1}{0,7175} = 1,394\text{ kW}$$

Paso 3: Calcular calor de rechazo.

Por conservación de energía (Primera Ley):

$$Q_{in} = W_{net} + Q_{out}$$

$$Q_{out} = Q_{in} - W_{net} = 1,394 - 1,0 = 0,394\text{ kW} \approx 0,4\text{ kW}$$

Conceptos Claves y Desglose del Enunciado:

- **Primera Ley de la Termodinámica (Conservación de Energía):** La energía no se crea ni se destruye, solo se transforma. En una máquina térmica, el calor absorbido desde la fuente caliente (Q_{in} o Q_H) se convierte parcialmente en trabajo útil (W_{net}), y la energía *sobran*te que no se pudo transformar se rechaza al sumidero frío (Q_{out} o Q_L). Es decir: $Q_{in} = W_{net} + Q_{out}$.
- **Mínima tasa de rechazo de calor:** La Segunda Ley establece que es imposible convertir el 100 % del calor en trabajo; siempre habrá un *desperdicio* en forma de calor rechazado ($Q_{out} > 0$). La máquina de **Carnot** es la máquina térmica teórica más eficiente posible. Al aprovechar la energía al máximo, es la que **menos calor desperdicia**. Por ende, calcular el rechazo en un ciclo reversible (Carnot) nos da el valor **mínimo** absoluto que puede existir.
- **Por kW de potencia neta:** Simplemente fija nuestra base de cálculo. Significa: *Si queremos generar exactamente 1 kW de trabajo ($W_{net} = 1\text{ kW}$), ¿cuánta energía tendríamos que botar?*

Ejemplos Prácticos:

- **Motor de automóvil:** La combustión de gasolina entrega el calor (Q_{in}). El movimiento de las ruedas y ejes es el trabajo mecánico (W_{net}). El calor que sale ardiente por el tubo de escape y el que disipa el radiador hacia el aire, conforman el calor rechazado (Q_{out}). Si el motor fuera reversible (Carnot), desperdiciaría por el escape esa tasa *mínima* calculada.
- **Central Termoeléctrica:** Quema carbón o gas para calentar agua (Q_{in}). El vapor mueve turbinas para generar electricidad (W_{net}). Luego el vapor se debe enfriar y condensar botando calor a un río, lago o torre de enfriamiento (Q_{out}). Si una central genera 1000 MW de electricidad y tiene 40 % de eficiencia, debe botar 1500 MW de calor al ambiente, que calienta el río o la atmósfera.

Interpretación de los Resultados: Al calcular el $Q_{out} \approx 0,4 \text{ kW}$, la termodinámica nos asegura que para generar 1 kW de potencia útil entre 800°C y 30°C , **incluso con la mejor tecnología imaginable (reversible)**, estamos obligados a calentar nuestro entorno botando 0.4 kW por cada kW útil. Toda máquina real desperdiciará más que eso.

Nota Handbook FE:

- **Cycles (Pág. 149):** Eficiencia de Carnot $\eta = 1 - T_L/T_H$.
- Balance de energía: $Q_H = W + Q_L$.

Respuesta Correcta: b) 0,4 kW

4. 2017-2

Pregunta 33 - 2017-2

Enunciado: ¿Cuál de las siguientes afirmaciones acerca de las escalas de temperatura Celsius y Kelvin es CORRECTA?

Solución: La relación entre Kelvin y Celsius es:

$$T_K = T_C + 273,15$$

Esta es una transformación lineal con pendiente $m = 1$ y desplazamiento $b = 273,15$.
Para cambios de temperatura:

$$\Delta T_K = T_{K,2} - T_{K,1} = (T_{C,2} + 273,15) - (T_{C,1} + 273,15)$$

$$\Delta T_K = T_{C,2} - T_{C,1} = \Delta T_C$$

Por lo tanto, un grado Kelvin tiene el mismo espaciamento que un grado Celsius.

Ejemplo:

- Calentar agua de 20°C a 30°C : $\Delta T = 10^\circ\text{C}$
- En Kelvin: de 293.15 K a 303.15 K: $\Delta T = 10\text{K}$

Nota Handbook FE:

- **Units (Pág. 1):** Relación lineal con desplazamiento ($T_K = T_C + 273,15$) implica pendientes iguales.
- La diferencia de temperatura es invariante: $\Delta T_K = \Delta T_C$.

Respuesta Correcta: c)

Pregunta 34 - 2017-2

Enunciado: Un globo que contiene aire frío se coloca en una habitación cerrada a temperatura levemente más alta. El globo NO está en equilibrio térmico con el aire de la habitación HASTA que:

Solución: Concepto: Equilibrio térmico (Ley Cero de la Termodinámica).

Dos sistemas están en equilibrio térmico cuando:

- No hay flujo neto de calor entre ellos
- Ambos están a la misma temperatura

- Todas las propiedades macroscópicas son constantes en el tiempo

Proceso del globo:

Estado inicial:

- $T_{globo} < T_{hab}$ (donde T_{hab} es la temperatura de la habitación)
- Hay flujo de calor del aire de la habitación hacia el globo
- El globo NO está en equilibrio

Durante el proceso:

- El aire dentro del globo se calienta
- Al calentarse, el aire se expande (Ley de Charles)
- El globo aumenta de volumen (se expande)

Condición de equilibrio:

- Cuando $T_{globo} = T_{hab}$
- El flujo de calor cesa
- La expansión se detiene

Por lo tanto, el globo alcanza equilibrio térmico cuando ****detiene su expansión****.

Análisis de opciones:

- a) Desciende: No relacionado con equilibrio térmico
- b) Comienza a contraerse: Falso, se expande al calentarse
- c) Detiene su expansión: Correcto (equilibrio alcanzado)
- d) Se eleva: Puede ocurrir pero no define equilibrio térmico

Nota Handbook FE:

- **Thermodynamics (Pág. 143):** Zeroth Law define equilibrio térmico.
- **Ideal Gas (Pág. 145):** $V \propto T$ a presión constante (Ley de Charles).

Respuesta Correcta: c) Detiene su expansión

Pregunta 35 - 2017-2

Enunciado: El cambio de entropía de un sistema depende de:

Solución: Para responder esta pregunta, analizaremos matemáticamente de qué depende el cambio de entropía (ΔS) utilizando el modelo de **Gas Ideal** proporcionado en el **FE Handbook (Pág. 145)**.

El cambio de entropía total de un sistema cerrado es $\Delta S = m\Delta s$. El manual nos entrega dos ecuaciones fundamentales para el cambio de entropía específica (Δs):

1. En función de Temperatura y Volumen específico (v):

$$\Delta s = c_v \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right) + R \ln \left(\frac{v_2}{v_1} \right)$$

2. En función de Temperatura y Presión (P):

$$\Delta s = c_p \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right) - R \ln \left(\frac{P_2}{P_1} \right)$$

De estas ecuaciones es evidente que el cálculo del cambio de entropía requiere conocer los cambios de **Temperatura (T)**, **Presión (P)** y **Volumen (V)**.

Análisis detallado de las opciones:

- **a) Masa transferida:** Incorrecto. Un sistema cerrado por definición no transfiere masa (su m es constante), por lo que esto no es lo que genera el ΔS .
- **b) Calor transferido:** Incorrecto como dependencia única analítica. Si bien conceptualmente $dS \geq \delta Q/T$, el calor es una propiedad de trayectoria. La entropía es una propiedad de estado, por lo que su cambio neto final depende solo de los puntos de inicio y fin (P, V, T), sin importar la trayectoria irreversible real o el calor real transferido en el camino.
- **c) Cambio de temperatura:** Insuficiente. Como muestran las ecuaciones, conocer solo el cambio de temperatura (T_2/T_1) no basta; necesitamos conocer también qué ocurrió con el volumen del gas (v_2/v_1) o su presión (P_2/P_1).
- **d) Cambio de presión y volumen:** Correcto. Por la Ecuación de Estado de los Gases Ideales ($Pv = RT$), la temperatura depende directamente de la presión y el volumen. Por lo tanto, si conocemos cómo cambian la **presión y el volumen**, conocemos implícitamente cómo cambia la temperatura, y nuestro cambio de entropía queda completamente definido.

Respuesta correcta: El cambio de entropía de un gas ideal está definido si se conoce el cambio de presión y volumen.

Nota Handbook FE:

- **Ideal Gas (Pág. 145):** Fórmulas explícitas para el cálculo de entropía dependiente de T, P y v :
 $\Delta s = c_v \ln(T_2/T_1) + R \ln(v_2/v_1)$ y $\Delta s = c_p \ln(T_2/T_1) - R \ln(P_2/P_1)$.

Respuesta Correcta: d)

Pregunta 36 - 2017-2

Enunciado: Se tienen 2 motores térmicos reversibles; el primero opera entre $1000^\circ C$ y T_2 , mientras que el segundo opera entre T_2 y $400^\circ C$. El valor de T_2 para que el trabajo de ambos motores sea el mismo es aproximadamente:

Solución: Configuración:

- Motor 1: $T_H = 1000^\circ C = 1273,15 \text{ K}$, $T_{mid} = T_2$
- Motor 2: $T_{mid} = T_2$, $T_L = 400^\circ C = 673,15 \text{ K}$

Paso 1: Expresar eficiencias de Carnot.

$$\eta_1 = 1 - \frac{T_2}{T_H} = 1 - \frac{T_2}{1273,15}$$
$$\eta_2 = 1 - \frac{T_L}{T_2} = 1 - \frac{673,15}{T_2}$$

Paso 2: Plantear condición $W_1 = W_2$.

Asumiendo mismo flujo de calor Q_H en el primer motor:

$$W_1 = \eta_1 Q_H$$

El calor rechazado por el motor 1 es la entrada del motor 2:

$$Q_2 = Q_H(1 - \eta_1) = Q_H \frac{T_2}{T_H}$$

$$W_2 = \eta_2 Q_2 = \left(1 - \frac{T_L}{T_2}\right) Q_H \frac{T_2}{T_H}$$

Igualando $W_1 = W_2$:

$$\left(1 - \frac{T_2}{T_H}\right) = \left(1 - \frac{T_L}{T_2}\right) \frac{T_2}{T_H}$$

Paso 3: Simplificar.

Simplificando:

$$\begin{aligned} T_H - T_2 &= T_2 - T_L \\ T_2 &= \frac{T_H + T_L}{2} = \frac{1273,15 + 673,15}{2} = 973,15 \text{ K} \\ T_2 &= 973,15 - 273,15 = 700^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Resultado: Para que ambos motores produzcan el mismo trabajo, T_2 debe ser la ****media aritmética**** de las temperaturas extremas.

Nota Handbook FE:

- **Cycles (Pág. 149):** Usar expresiones de eficiencia para derivar trabajo.
- Para motores en serie con trabajos iguales: $T_{mid} = (T_H + T_L)/2$.

Respuesta Correcta: b) 700°C

5. 2018-1

Pregunta 33 - 2018-1

Enunciado: Termómetro -35°C a 280°C .

Solución:

$$\Delta T_C = 315^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_R = 1,8\Delta T_C = 567^\circ\text{R}$$

Nota Handbook FE:

- **Units (Pág. 1):** Factor 1.8 para diferencia de temperatura.

Respuesta Correcta: d)

Pregunta 34 - 2018-1

Enunciado: Esferas A y B . Igual calor.

Solución:

$$Q = mc\Delta T$$

$$c_A\Delta T_A = c_B\Delta T_B$$

$$220(51) = 80\Delta T_B \implies \Delta T_B = 140,25$$

$$T_{f,B} = 21 + 140,25 = 161,25^\circ C$$

Nota Handbook FE:

- **Heat Capacity (Pág. 146):** Definición calor sensible.

Respuesta Correcta: a)

Pregunta 35 - 2018-1

Enunciado: Un sistema cerrado realiza procesos en cuasi equilibrio mostrados en diagrama P-V. Indique el trabajo realizado por el sistema.

Solución: El trabajo en un proceso de frontera móvil (moving boundary work) es:

$$W = \int P dV$$

Geométricamente, es el área bajo la curva en el diagrama P-V.

Del gráfico identificamos:

■ Punto 1: ($V_1 = 0,1 \text{ m}^3$, $P_1 = 100 \text{ kPa}$)

■ Punto 2: ($V_2 = 0,1 \text{ m}^3$, $P_2 = 200 \text{ kPa}$)

■ Punto 3: ($V_3 = 0,4 \text{ m}^3$, $P_3 = 400 \text{ kPa}$)

■ Punto 4: ($V_4 = 0,6 \text{ m}^3$, $P_4 = 400 \text{ kPa}$)

Proceso 1→2 (Isocórico): $V = \text{constante}$

$$W_{1\rightarrow 2} = \int_{V_1}^{V_2} P dV = 0 \quad (\text{no hay cambio de volumen})$$

Proceso 2→3 (Proceso lineal): Calculamos como área de trapecio:

$$W_{2\rightarrow 3} = \frac{P_2 + P_3}{2} \times (V_3 - V_2) = \frac{200 + 400}{2} \times (0,4 - 0,1)$$

$$W_{2\rightarrow 3} = 300 \times 0,3 = 90 \text{ kJ}$$

Proceso 3→4 (Isobárico): $P = 400 \text{ kPa}$

$$W_{3\rightarrow 4} = P_3 \times (V_4 - V_3) = 400 \times (0,6 - 0,4)$$

$$W_{3\rightarrow 4} = 400 \times 0,2 = 80 \text{ kJ}$$

Trabajo total del ciclo:

$$W_{total} = W_{1\rightarrow 2} + W_{2\rightarrow 3} + W_{3\rightarrow 4} = 0 + 90 + 80 = 170 \text{ kJ}$$

Nota Handbook FE:

- **First Law (Pág. 147):** $W_b = \int P dV$ (Reversible boundary work).
- Work is positive for expansion ($dV > 0$) and negative for compression.
- Para proceso isobárico: $W = P(V_2 - V_1)$.

Respuesta Correcta: a)**Pregunta 36 - 2018-1**

Enunciado: Si el coeficiente de operación de un ciclo de Carnot invertido de refrigeración es de 0,25, indique cuál sería la eficiencia del ciclo si este se invirtiera.

Solución: Conceptos clave:

- Ciclo de refrigeración invertido: extrae calor del espacio frío
- Si se invierte \rightarrow se convierte en máquina térmica

Paso 1: Determinar relación de temperaturas desde COP.

Para refrigerador de Carnot:

$$COP_R = \frac{Q_L}{W} = \frac{T_L}{T_H - T_L} = 0,25$$

Resolviendo:

$$T_L = 0,25(T_H - T_L)$$

$$T_L = 0,25T_H - 0,25T_L$$

$$1,25T_L = 0,25T_H$$

$$\frac{T_L}{T_H} = \frac{0,25}{1,25} = 0,2$$

Por lo tanto: $T_H = 5T_L$ **Paso 2: Calcular eficiencia del ciclo invertido (máquina térmica).**

Al invertir el ciclo, se convierte en máquina térmica de Carnot:

$$\eta = 1 - \frac{T_L}{T_H} = 1 - 0,2 = 0,8 = 80\%$$

Relación general entre COP y η para Carnot:

$$\eta = \frac{COP_R}{1 + COP_R} = \frac{0,25}{1,25} = 0,2 \quad (\text{NO})$$

Más bien:

$$\eta = 1 - \frac{1}{1 + COP_R} = 1 - \frac{1}{1,25} = 0,8$$

Verificación:

- Si $T_H = 500$ K, entonces $T_L = 100$ K
- $COP_R = 100/(500 - 100) = 0,25$
- $\eta = 1 - 100/500 = 0,8$

Nota Handbook FE:

- **Cycles (Pág. 149):** Relaciones de COP y η para ciclos reversibles.
- Un ciclo reversible operado en reversa mantiene las mismas temperaturas.

Respuesta Correcta: c) 80 %

6. 2018-2

Pregunta 30 - 2018-2

Enunciado: Una pera pierde 5 kJ de calor por cada $^{\circ}C$ que cae la temperatura. ¿Cuánto calor pierde por cada $^{\circ}F$?

Solución: Sabemos que la relación entre cambios de temperatura es:

$$\Delta T_C = \frac{\Delta T_F}{1,8} \quad \text{o bien} \quad \Delta T_F = 1,8 \times \Delta T_C$$

Esto significa que:

$$1^{\circ}C = 1,8^{\circ}F$$

Si la pera pierde 5 kJ por cada $1^{\circ}C$, y $1^{\circ}C$ equivale a $1,8^{\circ}F$, entonces:

$$\text{Pérdida por } 1^{\circ}F = \frac{5 \text{ kJ}}{1,8} = 2,78 \text{ kJ} \approx 2,7 \text{ kJ}$$

Verificación:

- Si $\Delta T = 10^{\circ}C = 18^{\circ}F$
- Pérdida total: $5 \times 10 = 50 \text{ kJ}$
- Por grado F: $50/18 = 2,78 \text{ kJ}/^{\circ}F$

Nota Handbook FE:

- **Units (Pág. 1):** $T_F = 1,8T_C + 32$. Para diferencias: $\Delta T_F = 1,8\Delta T_C$.

Respuesta Correcta: a)

Pregunta 31 - 2018-2

Enunciado: Corriente de agua con $\dot{m} = 4 \text{ kg/s}$ ingresa a tubería adiabática a $25^{\circ}C$. Por fricción, la temperatura aumenta a $25,5^{\circ}C$. $C_p = 4180 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$. Determine la tasa de generación de entropía.

Solución: Para resolver este problema, partimos del **Balance de Entropía** general para un volumen de control (sistema abierto) estipulado por la Segunda Ley de la Termodinámica (FE Handbook Pág. 151):

$$\frac{dS_{cv}}{dt} = \sum \frac{\dot{Q}_j}{T_j} + \sum \dot{m}_i s_i - \sum \dot{m}_e s_e + \dot{S}_{gen}$$

Para derivar nuestra ecuación de trabajo, aplicamos las simplificaciones de nuestro caso particular:

1. **Estado estacionario:** No hay acumulación dentro del sistema, por lo que el cambio en el tiempo es nulo ($\frac{dS_{cv}}{dt} = 0$).

2. **Flujo único:** Solo hay una entrada ($i = 1$) y una salida ($e = 2$), con el mismo flujo másico constante por conservación de masa ($\dot{m}_i = \dot{m}_e = \dot{m}$).

Aplicando estas condiciones a la ecuación general, nos queda:

$$0 = \frac{\dot{Q}}{T_b} + \dot{m}s_1 - \dot{m}s_2 + \dot{S}_{gen}$$

Reordenando para despejar netamente la tasa de generación de entropía (\dot{S}_{gen}):

$$\dot{S}_{gen} = \dot{m}(s_2 - s_1) - \frac{\dot{Q}}{T_b}$$

Como nuestro sistema (tubería) se describe explícitamente como **adiabático**, no hay transferencia de calor con el entorno, anulando el término térmico ($\dot{Q} = 0$).

Por lo tanto, la ecuación se reduce finalmente a:

$$\dot{S}_{gen} = \dot{m}(s_2 - s_1)$$

Para sustancia incompresible (agua líquida):

$$s_2 - s_1 = c_p \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right)$$

Datos:

- $\dot{m} = 4 \text{ kg/s}$
- $T_1 = 25^\circ\text{C} = 298,15 \text{ K}$
- $T_2 = 25,5^\circ\text{C} = 298,65 \text{ K}$
- $c_p = 4180 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$

Cálculo del cambio específico de entropía:

$$s_2 - s_1 = 4180 \times \ln \left(\frac{298,65}{298,15} \right)$$

$$s_2 - s_1 = 4180 \times \ln(1,001677)$$

$$s_2 - s_1 = 4180 \times 0,001676 = 7,0 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$$

Tasa de generación de entropía:

$$\dot{S}_{gen} = 4 \times 7,0 = 28 \text{ W/K}$$

Interpretación física: La fricción genera calor internamente (irreversibilidad), aumentando la temperatura y creando entropía. Este proceso es espontáneo e irreversible ($\dot{S}_{gen} > 0$).

Nota Handbook FE:

- **Second Law (Pág. 151):** Entropy Balance for Open System.
- **Heat Capacity (Pág. 146):** For incompressible substances, $\Delta s = c \ln(T_2/T_1)$.

Respuesta Correcta: c)

Pregunta 32 - 2018-2

Enunciado: Corriente de aire ingresa a tubería de 28 cm de diámetro a 200 kPa, 20°C con velocidad de 5 m/s. $R = 0,287 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$. Determine el flujo másico.

Solución: Datos:

- $D = 28 \text{ cm} = 0,28 \text{ m}$
- $P = 200 \text{ kPa}$
- $T = 20^\circ\text{C} = 293,15 \text{ K}$
- $v = 5 \text{ m/s}$
- $R = 0,287 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K}) = 287 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$

Paso 1: Relacionar la Ecuación de Gas Ideal con la Densidad.

El FE Handbook (Pág. 145) nos entrega la ecuación de estado de Gas Ideal en función del volumen específico (v):

$$Pv = RT$$

Sabemos que el volumen específico es el volumen por unidad de masa ($v = V/m$), y la densidad es masa por unidad de volumen ($\rho = m/V$). Por lo tanto, el volumen específico es el inverso exacto de la densidad:

$$v = \frac{1}{\rho}$$

Sustituyendo esto en la ecuación del Handbook, obtenemos una versión directa para calcular la densidad:

$$P \left(\frac{1}{\rho} \right) = RT \implies \rho = \frac{P}{RT}$$

Paso 2: Calcular la densidad del aire.

$$\rho = \frac{200,000 \text{ Pa}}{287 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K}) \times 293,15 \text{ K}}$$

$$\rho = \frac{200,000}{84,134,05} = 2,377 \text{ kg/m}^3$$

Paso 3: Calcular área de la sección transversal.

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi (0,28)^2}{4} = \frac{0,2464}{4} = 0,0616 \text{ m}^2$$

Paso 4: Calcular flujo másico.

Aplicamos la **Ecuación de Continuidad** (FE Handbook, Pág. 181), que nos dice que el flujo de masa (\dot{m}) que atraviesa una sección es el producto de su densidad, área y velocidad:

$$\dot{m} = \rho Av = 2,377 \times 0,0616 \times 5$$

$$\dot{m} = 0,732 \text{ kg/s} \approx 0,73 \text{ kg/s}$$

Interpretación Práctica: Esta ecuación es fundamental en el diseño de ductos de ventilación (HVAC) o sistemas de admisión de motores. Nos dice que si el aire está comprimido (alta presión \implies alta densidad), necesitamos un ducto más pequeño (menor Área) o una menor velocidad para transportar la misma cantidad de masa de aire (kg/s) que si el aire estuviese a presión atmosférica normal.

Verificación dimensional:

$$\left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \times (\text{m}^2) \times \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right) = \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Nota Handbook FE:

- **Ideal Gas (Pág. 145):** $Pv = RT$. Concepto de variable específica ($v = 1/\rho$).
- **Fluid Mechanics (Pág. 181):** Continuity Equation: $\dot{m} = \rho Av$.
- **Tip:** Asegurar siempre consistencia estricta de unidades: usar Pa, J/(kg·K), K.

Respuesta Correcta: d) 0,73 kg/s

Pregunta 33 - 2018-2

Enunciado: Ciclo de Rankine ideal opera entre 3,060 MPa y 57,83 kPa. A la salida del condensador: líquido saturado. Bomba reversible, adiabática, fluido incompresible. Determine el trabajo efectuado por la bomba.

Solución: Datos:

- $P_1 = 57,83$ kPa (salida condensador = entrada bomba, estado líquido saturado)
- $P_2 = 3,060$ MPa = 3060 kPa (entrada caldera = salida bomba)
- Bomba: reversible, adiabática (isoentrópica)
- Fluido: incompresible

Paso 1: Consultar volumen específico del líquido saturado.

De tablas de vapor a las condiciones de entrada de la bomba ($P_1 = 57,83$ kPa, $T_{sat} \approx 85^\circ\text{C}$):

$$v_f \approx 0,001033 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Paso 2: Relacionar con el FE Handbook para trabajo de bombas.

El trabajo de una bomba ideal puede derivarse de la Primera Ley. En el **FE Handbook (Pág. 148, Steady-Flow Systems)**, el balance de energía para un volumen de control, asumiendo cambios de energía cinética y potencial despreciables y proceso adiabático ($Q_{in} = 0$), se reduce a:

$$h_{in} = h_{out} + w_{out} \implies w_{pump_in} = h_{out} - h_{in}$$

Para evitar buscar entalpías de líquido comprimido en tablas, el **FE Handbook (Pág. 149, Turbines, Pumps, Compressors)** nos entrega una relación explícita **para bombas asumiendo fluido incompresible**:

$$h_{es} - h_i = v_i(P_e - P_i)$$

Donde el subíndice s indica condición isoentrópica (ideal), e es salida (P_2) e i es entrada (P_1).

Por lo tanto, el trabajo consumido específico ideal es netamente:

$$w_p = v_1(P_2 - P_1)$$

Paso 3: Calcular el trabajo.

Sustituyendo los valores:

$$w_p = 0,001033 \times (3060 - 57,83)$$

$$w_p = 0,001033 \times 3002,17 = 3,101 \text{ kJ/kg}$$

Dado que la bomba **consume** energía para operar, su trabajo neto extraído de un volumen de control sería formalmente negativo ($w_p = -3,10$ kJ/kg), pero como el enunciado pide el trabajo *efectuado por la bomba* (consumido en valor absoluto):

$$|w_p| = 3,10 \text{ kJ/kg}$$

Nota sobre signos:

- Trabajo **sobre** la bomba (entrada): negativo
- Trabajo **por** la bomba (salida): positivo
- En ciclo Rankine, la bomba consume energía: $w_{in} = 3,10 \text{ kJ/kg}$

Nota Handbook FE:

- **Thermodynamics (Pág. 148):** Steady-Flow Systems balance (Primera Ley).
- **Thermodynamics (Pág. 149):** Turbines, Pumps, Compressors. Ecuación explícita para el cambio de entalpía ideal en bombas (y trabajo reversible): $h_{es} - h_i = v_i(P_e - P_i)$.

Respuesta Correcta: b) 3,10 kJ/kg

7. 2019-1

Pregunta 22 - 2019-1

Enunciado: Indique cuál es el efecto esperado en el tamaño del orificio de un anillo de oro, si lo coloca en el freezer, a medida que baja la temperatura del anillo.

Solución: Concepto: Expansión/contracción térmica uniforme.

Cuando un material sólido se enfría, todas sus dimensiones se contraen proporcionalmente.

Ley de expansión térmica lineal:

$$\Delta L = \alpha L_0 \Delta T$$

Donde:

- α = coeficiente de expansión térmica lineal
- L_0 = longitud inicial
- ΔT = cambio de temperatura

Análisis del anillo:

Imagine el anillo como si fuera un disco sólido completo:

- Al enfriarse, el disco completo se contrae
- Tanto el diámetro exterior como el interior disminuyen
- La proporción se mantiene constante

Conclusión: El orificio del anillo ****disminuye**** de tamaño cuando la temperatura baja.

Analogía útil: Piense en una fotografía que se reduce uniformemente: tanto los objetos como los espacios vacíos se reducen.

Cálculo cuantitativo para el oro:

- $\alpha_{oro} \approx 14 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$
- Si T disminuye de 20°C a -18°C ($\Delta T = -38^\circ\text{C}$)
- Para un orificio de $D_0 = 2 \text{ cm}$:

$$\Delta D = 14 \times 10^{-6} \times 2 \times (-38) = -0,00106 \text{ cm}$$

- El orificio se reduce aproximadamente 0.01 mm

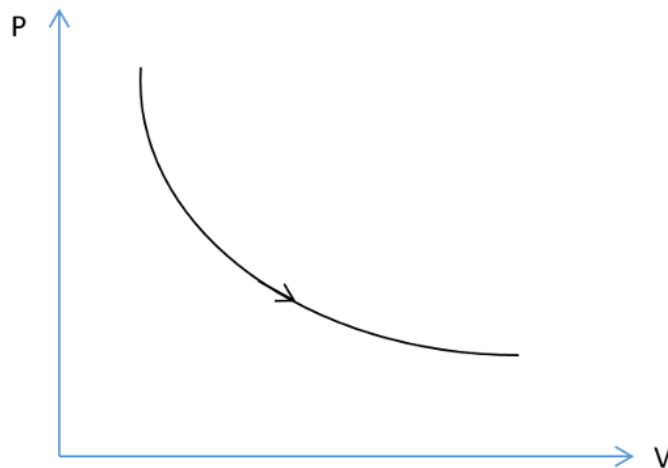
Nota Handbook FE:

- **Mechanics of Materials (Pág. 134):** Thermal Deformation $\delta_t = \alpha L \Delta T$.
- La contracción térmica es uniforme en todas las dimensiones.

Respuesta Correcta: b) El tamaño del orificio disminuye

Pregunta 23 - 2019-1

Enunciado: El gráfico P-V representa un proceso de expansión realizado por un gas ideal en un sistema adiabático. Indique cuál alternativa describe CORRECTAMENTE el trabajo realizado por el gas y el cambio de energía interna.



Solución: Aplicamos la Primera Ley de la Termodinámica:

$$Q - W = \Delta U$$

Condición adiabática: No hay transferencia de calor

$$Q = 0$$

Por lo tanto:

$$-W = \Delta U \quad \Rightarrow \quad \Delta U = -W$$

Análisis del proceso de expansión:

- En una **expansión**, el gas realiza trabajo sobre el entorno
- Por convención: $W > 0$ (trabajo *realizado por* el sistema)
- Sustituyendo: $\Delta U = -W < 0$
- Por lo tanto: La energía interna **disminuye**

Interpretación física: El gas usa su energía interna para realizar trabajo de expansión. Como no recibe calor del exterior (adiabático), su temperatura disminuye.

Para un gas ideal: $\Delta U = nC_v\Delta T$, entonces $\Delta T < 0$ (enfriamiento).

Nota Handbook FE:

- **First Law (Pág. 147):** $Q - W = \Delta U$. For adiabatic ($Q = 0$) expansion ($W > 0$), $\Delta U < 0$.
- Sign convention: $W > 0$ cuando el sistema realiza trabajo.

Respuesta Correcta: d) Trabajo realizado por el gas, energía interna disminuye

Pregunta 24 - 2019-1

Enunciado: Indique qué ocurre con la entropía mientras más probable es la ocurrencia de un estado de equilibrio.

Solución: Existen dos formas de interpretar la evolución hacia el equilibrio:

1. Interpretación Estadística (Microscópica): A nivel molecular, la entropía está definida por la relación de Boltzmann:

$$S = k_B \ln \Omega$$

Donde Ω es el número de microestados posibles (maneras en que se pueden ordenar las partículas).

- Un macroestado con mayor cantidad de microestados (Ω) es, por estadística, **más probable** que ocurra aleatoriamente.
- El estado de **equilibrio termodinámico** es la configuración de partículas más probable; por consiguiente, concentra el mayor número de microestados (Ω máximo).
- Al ser Ω máximo en el equilibrio, la entropía S asume su valor **máximo**.

2. Interpretación Clásica (Macroscópica): El enfoque tradicional de la Segunda Ley analiza las transferencias irreversibles, estipulando que un sistema evoluciona espontáneamente hacia el desorden hasta estancarse en el equilibrio.

Conclusión: Independiente del enfoque de estudio utilizado, mientras más se aproxima o más probable es el estado de equilibrio, la entropía adopta su valor **máximo**.

Nota Handbook FE:

- **Second Law of Thermodynamics (Pág. 151):** El manual adopta el enfoque clásico (macroscópico) estipulando en el *Increase of entropy principle*: $\Delta S_{isolated} \geq 0$. La desigualdad enuncia matemáticamente que la entropía del universo progresa irremediablemente hasta estabilizarse en un **máximo** cuando el sistema aislado cruza la barrera del **equilibrio**. Al ser una guía técnica orientada a cálculos directos, el manual FE no menciona la ecuación probabilística de Boltzmann ($S = k_B \ln \Omega$), centrándose exclusivamente en la desigualdad de Clausius.

Respuesta Correcta: a)

Pregunta 25 - 2019-1

Enunciado: Durante un proceso de adición de calor isotérmico de un ciclo de Carnot, 1.000 kJ de calor se agregan al fluido desde una fuente a 500°C . Determine el cambio de entropía del fluido.

Solución: Proceso isotérmico reversible: $T = \text{constante}$

Para un proceso reversible, el cambio de entropía es:

$$dS = \frac{\delta Q_{rev}}{T}$$

Como la temperatura es constante:

$$\Delta S = \frac{Q}{T}$$

Datos:

- $Q = 1,000 \text{ kJ}$ (calor agregado al fluido)
- $T = 500^\circ\text{C} = 773,15 \text{ K}$

Cálculo del cambio de entropía:

$$\Delta S = \frac{1000 \text{ kJ}}{773,15 \text{ K}} = 1,293 \text{ kJ/K} \approx 1,3 \text{ kJ/K}$$

Interpretación:

- Como $Q > 0$ (calor agregado), $\Delta S > 0$ (entropía aumenta)
- En el ciclo de Carnot, durante la expansión isotérmica el fluido recibe calor de la fuente caliente y su entropía aumenta
- Este proceso es reversible, por lo que usamos la igualdad de Clausius

Nota: La fuente (alrededores) experimenta $\Delta S_{fuente} = -Q/T = -1,3 \text{ kJ/K}$, de modo que $\Delta S_{total} = 0$ (proceso reversible).

Nota Handbook FE:

- **Second Law (Pág. 151):** Entropy change for ideal gas $s_2 - s_1 = c_p \ln(T_2/T_1) - R \ln(P_2/P_1)$.
- For isothermal ($T_2 = T_1$), $\Delta S = -R \ln(P_2/P_1)$ or simply Q/T for reversible.
- **Carnot Cycle (Pág. 149):** Isothermal processes at T_H and T_L .

Respuesta Correcta: b)

8. 2019-2

Pregunta 22 - 2019-2

Enunciado: Un médico posee un termómetro de mercurio mal calibrado que indica -4°C en el punto de congelación del agua y 110°C en el punto de ebullición. ¿Qué temperatura marcará cuando el paciente tenga 40°C de fiebre?

Solución: Usamos interpolación lineal entre los puntos de calibración.

Escala real: $T_{real} \in [0^\circ\text{C}, 100^\circ\text{C}]$ (rango de 100°C)

Escala errónea: $T_{error} \in [-4^\circ\text{C}, 110^\circ\text{C}]$ (rango de 114°C)

La relación lineal es:

$$T_{error} = a \cdot T_{real} + b$$

Usando los puntos de calibración:

$$-4 = a \cdot 0 + b \implies b = -4$$

$$110 = a \cdot 100 + (-4) \implies 114 = 100a \implies a = 1,14$$

Por lo tanto:

$$T_{error} = 1,14 \cdot T_{real} - 4$$

Para $T_{real} = 40^\circ\text{C}$:

$$T_{error} = 1,14 \times 40 - 4 = 45,6 - 4 = 41,6^\circ\text{C}$$

Nota Handbook FE:

- **Mathematics (Pág. 11):** Ecuación de la recta: $y = mx + b$.
- Calibración requiere dos puntos de referencia conocidos.

Respuesta Correcta: b)

Pregunta 23 - 2019-2

Enunciado: ¿A cuál de las siguientes temperaturas la superficie de un lago se encuentra congelada?

Solución: Condición para congelación del agua:

El agua pura congela (transición líquido \rightarrow sólido) a:

$$T_{fus} = 0^{\circ}C = 273,15 \text{ K} = 32^{\circ}F$$

Para que la superficie del lago esté congelada:

$$T \leq 0^{\circ}C$$

Análisis de opciones:

a) $41^{\circ}F$:

$$T_C = \frac{41 - 32}{1,8} = 5^{\circ}C > 0^{\circ}C$$

\rightarrow Líquido

b) $2^{\circ}C > 0^{\circ}C \rightarrow$ Líquido

c) $482^{\circ}R$:

$$T_K = \frac{482}{1,8} = 267,8 \text{ K}$$

$$T_C = 267,8 - 273,15 = -5,35^{\circ}C < 0^{\circ}C$$

\rightarrow ****Sólido (congelado)****

d) $280K$:

$$T_C = 280 - 273,15 = 6,85^{\circ}C > 0^{\circ}C$$

\rightarrow Líquido

Nota importante:

- A presión atmosférica (1 atm), el agua congela exactamente a $0^{\circ}C$
- La presión puede modificar ligeramente este valor
- El agua puede existir en estado *superenfriado* (líquido bajo $0^{\circ}C$) bajo condiciones especiales

Nota Handbook FE:

- **Properties of Water (Pág. 157):** Punto triple del agua: $0.01^{\circ}C$ a 611.7 Pa.
- A 1 atm: congelación a $0^{\circ}C$, ebullición a $100^{\circ}C$.

Respuesta Correcta: c) $482^{\circ}R$

Pregunta 24 - 2019-2

Enunciado: Para que dos cuerpos se encuentren en equilibrio térmico, indique cuál de las siguientes propiedades debe ser la misma en todo el sistema.

Solución: Ley Cero de la Termodinámica:

Dos sistemas están en ****equilibrio térmico**** si y solo si tienen la misma temperatura.

Definición formal:

- Si el sistema A está en equilibrio térmico con B
- Y el sistema B está en equilibrio térmico con C
- Entonces A está en equilibrio térmico con C

- Esta relación de equivalencia define la temperatura

Análisis de opciones:

a) **Presión**: NO necesariamente igual

- Dos objetos pueden estar a diferente presión pero en equilibrio térmico

- Ejemplo: globo de helio y aire ambiente (misma T, diferente P)

b) **Calor específico**: NO debe ser igual

- Es una propiedad del material, no del estado

- Objetos de diferentes materiales pueden estar en equilibrio térmico

c) **Volumen**: NO debe ser igual

- Objetos de diferentes tamaños pueden estar en equilibrio térmico

d) **Temperatura**: SÍ, debe ser la misma

- Condición necesaria y suficiente para equilibrio térmico

- Cuando $T_A = T_B$, no hay flujo neto de calor

Criterio de equilibrio térmico:

$$T_1 = T_2 \quad \Leftrightarrow \quad \dot{Q}_{1 \rightarrow 2} = 0$$

Nota Handbook FE:

- **Thermodynamics (Pág. 143)**: Zeroth Law: *Two systems in thermal equilibrium with a third system are in thermal equilibrium with each other.*
- La temperatura es la propiedad que caracteriza el equilibrio térmico.

Respuesta Correcta: d) Temperatura

Pregunta 25 - 2019-2

Enunciado: Un gas ideal realiza un proceso isocórico en un sistema cerrado. El calor transferido y el trabajo están dados por:

Solución: Proceso isocórico significa volumen constante: $V = \text{constante}$

Trabajo de frontera móvil:

$$W = \int P dV$$

Como $dV = 0$:

$$W = 0$$

Primera Ley de la Termodinámica:

$$Q - W = \Delta U$$

Sustituyendo $W = 0$:

$$Q = \Delta U$$

Para un gas ideal:

$$\Delta U = nC_v\Delta T = mc_v\Delta T$$

Por lo tanto:

$$Q = C_v\Delta T$$

Donde C_v es la capacidad calorífica a volumen constante.

Resumen del proceso isocórico:

- Trabajo: $W = 0$ (no hay cambio de volumen)
- Calor: $Q = C_v \Delta T$ (todo el calor cambia la energía interna)

Nota Handbook FE:

- **First Law (Pág. 147):** Constant Volume Process.
- **Heat Capacity (Pág. 146):** $C_v = \left. \frac{\partial U}{\partial T} \right|_v$ para gas ideal.

Respuesta Correcta: d) $C_v \Delta T, 0$

9. 2023-2

Pregunta 34 - 2023-2

Enunciado: En Gran Bretaña la escala de temperatura utilizada es la escala Rankine. Determine en dicha escala, el valor de la temperatura correspondiente al punto de congelación y de ebullición del agua, respectivamente.

Solución: La escala Rankine ($^{\circ}\text{R}$) es la escala absoluta de temperatura equivalente a la escala Fahrenheit ($^{\circ}\text{F}$), de la misma manera que Kelvin (K) es la escala absoluta para Celsius ($^{\circ}\text{C}$). El tamaño del grado Rankine es idéntico al del grado Fahrenheit.

La fórmula de conversión desde Fahrenheit hacia Rankine consiste en sumar la temperatura del cero absoluto en Fahrenheit:

$$T(^{\circ}\text{R}) = T(^{\circ}\text{F}) + 459,67$$

Para responder la pregunta, evaluamos los puntos clave del agua a nivel del mar (1 atm):

1. Punto de Congelación del Agua: En la escala Fahrenheit, el agua se congela a 32°F . Aplicando la conversión:

$$T_{\text{congelación}} = 32 + 459,67 = 491,67 \approx 491,7^{\circ}\text{R}$$

2. Punto de Ebullición del Agua: En la escala Fahrenheit, el agua ebulle a 212°F . Aplicando la conversión:

$$T_{\text{ebullición}} = 212 + 459,67 = 671,67 \approx 671,7^{\circ}\text{R}$$

Por lo tanto, la respuesta es $491,7^{\circ}\text{R}$ y $671,7^{\circ}\text{R}$.

Nota Handbook FE:

- **Units (Pág. 1):** La tabla de conversiones define explícitamente $T_{\circ\text{R}} = T_{\circ\text{F}} + 459,67$. Además, documenta de manera literal los estados base del agua: *Water freezes at 32°F ($491,67^{\circ}\text{R}$) and boils at 212°F ($671,67^{\circ}\text{R}$).*

Respuesta Correcta: d)

Pregunta 35 - 2023-2

Enunciado: Considere un puente de acero ($\alpha = 12 \times 10^{-6} / ^{\circ}\text{C}$), longitud 1.400 metros en el punto más frío. El puente se expone a temperaturas entre -10°C y 40°C . Indique el cambio de longitud más cercano.

Solución: Datos:

- $L_0 = 1400$ m (longitud en el punto más frío)
- $\alpha = 12 \times 10^{-6} / ^{\circ}\text{C}$ (coeficiente de expansión térmica lineal del acero)
- $T_{\text{min}} = -10^{\circ}\text{C}$

- $T_{max} = 40^{\circ}C$
- $\Delta T = 40 - (-10) = 50^{\circ}C$

Fórmula de expansión térmica lineal:

$$\Delta L = \alpha L_0 \Delta T$$

Cálculo:

$$\Delta L = 12 \times 10^{-6} \times 1400 \times 50$$

$$\Delta L = 12 \times 10^{-6} \times 70,000$$

$$\Delta L = 0,84 \text{ m} = 84 \text{ cm}$$

Interpretación física:

- El puente se expande 84 cm al calentarse de $-10^{\circ}C$ a $40^{\circ}C$
- Esta expansión significativa requiere juntas de dilatación
- Sin juntas, se generarían esfuerzos compresivos enormes

Verificación dimensional:

$$\frac{1}{^{\circ}C} \times m \times ^{\circ}C = m$$

Nota de ingeniería: Los puentes tienen juntas de expansión para permitir este movimiento sin generar esfuerzos que puedan causar fallas estructurales.

Nota Handbook FE:

- **Mechanics of Materials (Pág. 131):** Thermal Deformation $\delta_t = \alpha L \Delta T$.
- Para acero: $\alpha \approx 12 \times 10^{-6} / ^{\circ}C$.

Respuesta Correcta: c) 0,84 m

Pregunta 36 - 2023-2

Enunciado: Un gas ideal a 200 K experimenta expansión isobárica a 2,5 kPa, aumentando su volumen de 2 m^3 a 4 m^3 . Se transfieren 20 kJ por calor. Determine la temperatura final.

Solución: Proceso isobárico: Presión constante $P = 2,5 \text{ kPa}$

Para un gas ideal, la ecuación de estado es:

$$PV = nRT$$

En un proceso isobárico ($P = \text{constante}$):

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$

Datos:

- $T_1 = 200 \text{ K}$
- $V_1 = 2 \text{ m}^3$
- $V_2 = 4 \text{ m}^3$
- $P = 2,5 \text{ kPa}$ (constante)

Cálculo de temperatura final:

$$T_2 = T_1 \times \frac{V_2}{V_1} = 200 \times \frac{4}{2} = 200 \times 2 = 400 \text{ K}$$

Verificación con Primera Ley:

- Trabajo: $W = P(V_2 - V_1) = 2,5 \times (4 - 2) = 5 \text{ kJ}$
- Primera Ley: $Q = \Delta U + W = nC_v\Delta T + 5$
- Los 20 kJ de calor son consistentes con el aumento de temperatura

Nota Handbook FE:

- **Ideal Gas (Pág. 145):** Equation of State $Pv = RT$.
- Para proceso isobárico: $V/T = \text{constante}$ (Ley de Charles).

Respuesta Correcta: d)

Pregunta 37 - 2023-2

Enunciado: Estime la entropía específica de una corriente a 0,6 MPa y 700°C usando tablas de vapor del Handbook.

Solución: Datos:

- $P = 0,6 \text{ MPa}$
- $T = 700^\circ\text{C}$

Paso 1: Determinar el estado.

De las tablas de saturación a $P = 0,6 \text{ MPa}$ (Pág. 157):

- $T_{sat} = 158,85^\circ\text{C}$

Como $T = 700^\circ\text{C} > T_{sat} = 158,85^\circ\text{C}$, el agua se encuentra en estado de **vapor sobrecalentado**.

Paso 2: Consultar tablas de vapor sobrecalentado.

En las tablas de vapor sobrecalentado (*Superheated Water Tables*) del FE Handbook (Pág. 158), busquemos la presión $P = 0,60 \text{ MPa}$.

Para dicha presión, observamos directamente en la tabla el valor a la temperatura requerida:

- A $T = 700^\circ\text{C}$: $s = 8,5107 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$

Conclusión: El valor exacto proporcionado por la tabla es **8.5107 kJ/(kg·K)**.

Nota Handbook FE:

- **Steam Tables (Pág. 158):** Para presiones comunes y temperaturas de hasta 1300°C , el manual ofrece valores directos sin necesidad de interpolar si la temperatura coincide con las entradas de la tabla (como en este caso para 700°C).

Respuesta Correcta: d)

Pregunta 38 - 2023-2

Enunciado: Una corriente se encuentra como líquido saturado a 235°C . Usando tablas de vapor del Handbook, indique el valor más cercano de la entalpía.

Solución: Datos:

- Estado: **Líquido saturado**
- $T = 235^{\circ}\text{C}$

Paso 1: Identificar la propiedad a buscar.

Para líquido saturado, buscamos h_f (entalpía del líquido saturado).

Paso 2: Consultar tablas de saturación por temperatura.

En las tablas de vapor saturado (Saturación por Temperatura) del FE Handbook (Pág. 157):

A $T = 235^{\circ}\text{C}$:

- $P_{sat} = 3,062 \text{ MPa}$
- $h_f = 1013,62 \text{ kJ/kg}$ (entalpía líquido saturado)
- $h_g = 2803,3 \text{ kJ/kg}$ (entalpía vapor saturado)
- $h_{fg} = h_g - h_f = 1789,7 \text{ kJ/kg}$ (calor latente)

Respuesta: $h = h_f = 1013,62 \text{ kJ/kg}$

Análisis de opciones:

- a) $2,6558 \text{ kJ/kg}$: Demasiado bajo, posiblemente s_f (entropía)
- b) $1009,89 \text{ kJ/kg}$: Cercano pero ligeramente bajo
- c) $2804,2 \text{ kJ/kg}$: Esto sería h_g (vapor saturado)
- d) $1013,62 \text{ kJ/kg}$: h_f exacto

Nota importante:

- Líquido saturado \rightarrow usar h_f
- Vapor saturado \rightarrow usar h_g
- Mezcla \rightarrow usar $h = h_f + x \cdot h_{fg}$ donde $0 < x < 1$

Nota Handbook FE:

- **Steam Tables (Pág. 157):** Properties of saturated water.
- Notación: f = líquido saturado, g = vapor saturado, fg = diferencia.

Respuesta Correcta: d)

Pregunta 39 - 2023-2

Enunciado: Mezcla líquido-vapor a 195°C con entalpía 1500 kJ/kg . Usando tablas de vapor del Handbook, determine la calidad (x) de la corriente.

Solución: Datos:

- Estado: **Mezcla líquido-vapor** (saturado)
- $T = 195^{\circ}\text{C}$

- $h = 1500 \text{ kJ/kg}$

Definición de calidad: La calidad x es la fracción másica de vapor en una mezcla líquido-vapor:

$$0 < x < 1$$

donde $x = 0$ (líquido saturado) y $x = 1$ (vapor saturado).

Paso 1: Consultar tablas de saturación.

En tablas de vapor saturado a $T = 195^\circ\text{C}$:

- $h_f = 826,7 \text{ kJ/kg}$ (líquido saturado)
- $h_g = 2790,7 \text{ kJ/kg}$ (vapor saturado)
- $h_{fg} = h_g - h_f = 1964,0 \text{ kJ/kg}$ (calor latente)

Paso 2: Aplicar fórmula de calidad.

Para sistemas bifásicos:

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

Despejando x :

$$x = \frac{h - h_f}{h_{fg}}$$

Paso 3: Calcular.

$$x = \frac{1500 - 826,7}{1964,0} = \frac{673,3}{1964,0} = 0,343 \approx 0,34$$

Verificación:

- $h_f = 826,7 \text{ kJ/kg} < h = 1500 \text{ kJ/kg} < h_g = 2790,7 \text{ kJ/kg}$
- $0 < x = 0,34 < 1$ (confirma mezcla bifásica)

Interpretación física: La mezcla contiene 34 % de vapor y 66 % de líquido en masa.

Nota Handbook FE:

- **Properties for Two-Phase Systems (Pág. 144):** El manual define la calidad (x) y entrega las relaciones para propiedades en la mezcla:
 - $h = h_f + x \cdot h_{fg}$
 - $u = u_f + x \cdot u_{fg}$
 - $s = s_f + x \cdot s_{fg}$
 - $v = v_f + x \cdot v_{fg}$
- Estas fórmulas se encuentran bajo el encabezado "*Properties for Two-Phase (vapor-liquid) Systems*".

Respuesta Correcta: a)

10. 2024-2

Pregunta 34 - 2024-2

Enunciado: Se tienen cuatro vasos con diferentes líquidos con temperaturas: $T_A = 536,67^\circ\text{R}$, $T_B = 10^\circ\text{C}$, $T_C = 293,15\text{K}$, $T_D = 122^\circ\text{F}$. Ordene de mayor a menor.

Solución: Convertimos todas las temperaturas a Celsius para compararlas:

Temperatura A:

$$T_A = 536,67^\circ R$$

Primero a Kelvin: $T_K = \frac{536,67}{1,8} = 298,15$ K Luego a Celsius: $T_A = 298,15 - 273,15 = 25^\circ C$

Temperatura B:

$$T_B = 10^\circ C$$

(Ya está en Celsius)

Temperatura C:

$$T_C = 293,15$$
 K

Conversión: $T_C = 293,15 - 273,15 = 20^\circ C$

Temperatura D:

$$T_D = 122^\circ F$$

Conversión: $T_D = \frac{122-32}{1,8} = \frac{90}{1,8} = 50^\circ C$

Ordenamiento de mayor a menor:

$$T_D(50^\circ C) > T_A(25^\circ C) > T_C(20^\circ C) > T_B(10^\circ C)$$

Por lo tanto: $T_D > T_A > T_C > T_B$

Nota Handbook FE:

- **Units (Pág. 1):** $T_K = T_C + 273,15$; $T_F = 1,8T_C + 32$; $T_R = 1,8T_K$.

Respuesta Correcta: b)

Pregunta 35 - 2024-2

Enunciado: Suponga que un cuerpo A entra en contacto con un cuerpo B cuando no hay transferencia de calor a los alrededores y que al inicio $T_A > T_B$. Al pasar un tiempo prolongado, se espera que la temperatura de B sea:

Solución: Análisis del proceso:

Condiciones iniciales:

- $T_A > T_B$ (A más caliente que B)
- Sistema aislado (no hay transferencia de calor a los alrededores)
- Los cuerpos A y B están en contacto térmico

Proceso de equilibración:

Por la Segunda Ley de la Termodinámica:

- El calor fluye espontáneamente de mayor a menor temperatura
- Q fluye de A hacia B
- A se enfría: T_A disminuye
- B se calienta: T_B aumenta

Estado final (equilibrio térmico):

Después de un tiempo prolongado:

$$T_A^{final} = T_B^{final} = T_{equilibrio}$$

Por conservación de energía (sistema aislado):

$$m_A c_A (T_{A,i} - T_{eq}) = m_B c_B (T_{eq} - T_{B,i})$$

Conclusión: La temperatura final de B será **igual que la de A** (ambos en equilibrio).

Análisis de opciones:

- a) Mayor que A: Imposible (violaría Segunda Ley)
- b) Menor que inicial de B: Falso (B se calienta)
- c) Igual que A: Correcto (equilibrio térmico)
- d) Cero absoluto: Imposible sin proceso especial

Valor de $T_{\text{equilibrio}}$:

$$T_{eq} = \frac{m_A c_A T_{A,i} + m_B c_B T_{B,i}}{m_A c_A + m_B c_B}$$

Donde $T_{B,i} < T_{eq} < T_{A,i}$

Nota Handbook FE:

- **Thermodynamics (Pág. 143):** Zeroth Law de equilibrio térmico.
- **Second Law (Pág. 151):** El calor fluye de mayor a menor temperatura.

Respuesta Correcta: c) Igual que la de A

Pregunta 36 - 2024-2

Enunciado: Para un gas ideal que se somete a un proceso a volumen constante, el trabajo y la transferencia de calor son respectivamente:

Solución: Proceso a volumen constante (isocórico): $V = \text{constante}$

1. Trabajo de frontera móvil:

$$W = \int_{V_1}^{V_2} P dV$$

Como V es constante, $dV = 0$, por lo tanto:

$$W = 0$$

2. Transferencia de calor: Aplicando la Primera Ley:

$$Q - W = \Delta U$$

$$Q - 0 = \Delta U$$

$$Q = \Delta U$$

Para un gas ideal:

$$\Delta U = n C_v \Delta T$$

Donde C_v es la capacidad calorífica molar a volumen constante.

Por lo tanto:

$$Q = C_v \Delta T$$

Resumen:

- Trabajo: $W = 0$ (no hay expansión/compresión)
- Calor: $Q = C_v \Delta T$ (todo el calor se convierte en energía interna)

Nota: No se usa C_p porque este aplica a procesos isobáricos, no isocóricos.

Nota Handbook FE:

- **First Law (Pág. 147):** Constant volume process: $Q = \Delta U = C_v \Delta T$.
- **Heat Capacity (Pág. 146):** C_v es la capacidad calorífica a volumen constante.

Respuesta Correcta: d) $0, C_v \Delta T$

Pregunta 37 - 2024-2

Enunciado: Cuando un sólido se derrite y se convierte en un líquido, ¿qué ocurre con la entropía del sistema?

Solución: Durante la fusión (cambio de fase sólido \rightarrow líquido), la **entropía aumenta**.

Análisis termodinámico: Para un proceso de fusión a presión y temperatura constantes (equilibrio de fases):

$$\Delta S_{fus} = \frac{Q_{fus}}{T_{fus}} = \frac{m \cdot h_{fg}}{T_{fus}} > 0$$

Donde:

- h_{fg} = Calor latente de fusión (siempre positivo)
- T_{fus} = Temperatura de fusión (constante durante el proceso)
- Como $Q > 0$ y $T > 0$, entonces $\Delta S > 0$

Interpretación física (orden molecular):

- **Sólido:** Moléculas en posiciones fijas, estructura ordenada \rightarrow Baja entropía
- **Líquido:** Moléculas móviles, mayor desorden molecular \rightarrow Alta entropía
- Mayor desorden = Mayor número de microestados (Ω) = Mayor entropía

Ejemplo numérico (fusión del hielo):

- $h_{fg} = 334 \text{ kJ/kg}$
- $T_{fus} = 273,15 \text{ K}$
- $\Delta s = 334/273,15 = 1,22 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)} > 0$

Generalización: En todos los cambios de fase que aumentan el desorden molecular, la entropía aumenta:

- Sólido \rightarrow Líquido (fusión): $\Delta S > 0$
- Líquido \rightarrow Gas (vaporización): $\Delta S > 0$
- Sólido \rightarrow Gas (sublimación): $\Delta S > 0$

Nota Handbook FE:

- **Second Law (Pág. 151):** Isothermal, Reversible Process $\Delta s = q/T$. Para cambios de fase: $\Delta s = h_{fg}/T$.

Respuesta Correcta: a)

Pregunta 38 - 2024-2

Enunciado: En termodinámica se designa como proceso adiabático aquel que no intercambia calor con su entorno. Luego, el cambio de entropía en un proceso adiabático será:

Solución: Desigualdad de Clausius (Segunda Ley): Para cualquier proceso:

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

Donde:

- Igualdad (=): Proceso reversible
- Desigualdad (>): Proceso irreversible

Para un proceso adiabático: $\delta Q = 0$

Sustituyendo:

$$dS \geq \frac{0}{T} = 0$$

Por lo tanto:

$$\Delta S \geq 0$$

Clasificación de procesos adiabáticos:

1. **Adiabático reversible (isoentrópico):** $\Delta S = 0$

- No hay fricción ni irreversibilidades
- Proceso idealizado (cuasi-estático)
- Ejemplo: Expansión/compresión ideal en turbina/compresor

2. **Adiabático irreversible:** $\Delta S > 0$

- Presencia de fricción, turbulencia, diferencias finitas de temperatura
- Procesos reales
- Ejemplo: Expansión con fricción, mezclado adiabático

Conclusión: En un proceso adiabático, el cambio de entropía es **mayor o igual a cero:** $\Delta S \geq 0$

Nota importante: Adiabático NO implica isoentrópico. Todo proceso isoentrópico es adiabático reversible, pero no todo proceso adiabático es isoentrópico.

Nota Handbook FE:

- **Second Law (Pág. 151):** $\Delta S \geq \int dQ/T$. For adiabatic $dQ = 0$, so $\Delta S \geq 0$.
- Isentropic process: $\Delta S = 0$ (adiabatic + reversible).

Respuesta Correcta: c)

Pregunta 39 - 2024-2

Enunciado: Corriente de agua a 200°C con densidad de 52 kg/m^3 . ¿En qué estado se encuentra?

Solución: Datos:

- $T = 200^\circ\text{C}$
- $\rho = 52 \text{ kg/m}^3$ (densidad)

Paso 1: Convertir densidad a volumen específico.

$$v = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{52} = 0,01923 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Paso 2: Consultar tablas de saturación.

En tablas de vapor saturado a $T = 200^\circ\text{C}$:

- $v_f = 0,001157 \text{ m}^3/\text{kg}$ (líquido saturado)
- $v_g = 0,12736 \text{ m}^3/\text{kg}$ (vapor saturado)

- $v_{fg} = v_g - v_f = 0,12620 \text{ m}^3/\text{kg}$

Paso 3: Aplicar criterio de identificación.

Comparamos v con los valores de saturación:

$$v_f = 0,001157 < v = 0,01923 < v_g = 0,12736$$

Criterios:

- Si $v < v_f$: Líquido comprimido
- Si $v = v_f$: Líquido saturado
- Si $v_f < v < v_g$: **Mezcla líquido-vapor**
- Si $v = v_g$: Vapor saturado
- Si $v > v_g$: Vapor sobrecalentado

Como v está entre v_f y v_g , el agua se encuentra como **Mezcla líquido-vapor**.

Cálculo adicional - Calidad:

$$x = \frac{v - v_f}{v_{fg}} = \frac{0,01923 - 0,001157}{0,12620} = \frac{0,01807}{0,12620} = 0,143$$

La mezcla contiene aproximadamente 14.3 % de vapor en masa.

Nota Handbook FE:

- **Steam Tables (Pág. 157):** Propiedades v_f y v_g en tablas de saturación.
- If $v_f < v < v_g$, state is Saturated Mixture.
- Relación densidad-volumen específico: $v = 1/\rho$.

Respuesta Correcta: c)