



# APUNTES DE TERMODINÁMICA Clave ()

ING. JOSÉ ENRIQUE LARIOS CANALE  
PROFESOR DE CARRERA  
TITULAR “A”, TIEMPO COMPLETO  
DEPARTAMENTO DE FÍSICA Y QUÍMICA

# TEMA II. PROPIEDADES DE LAS SUSTANCIAS PURAS

# TEMA II. PROPIEDADES DE LAS SUSTANCIAS PURAS

## OBJETIVO:

«Con base en el Postulado de Estado el alumno establecerá las propiedades termodinámicas utilizando: a) Diagramas de fase P-v-T (presión-volumen específico-temperatura) y sus proyecciones en dos dimensiones; y b) Las Tablas de Propiedades Termodinámicas, que relacionan las propiedades, de las sustancias puras para su aplicación en la solución de problemas de ingeniería»

# CONTENIDO:

- 2.1 Postulado de Estado. Enunciado del Postulado de Estado. Sustancia pura. Sustancia simple. Sustancia simple compresible. 1ª y 2ª Relaciones generalizadas para cambios de energía interna y entalpía. Capacidades Térmicas Específicas a Volumen Constante y a Presión Constante. Entalpía de transformación. Transferencia de calor. Pág. 6
- 2.2 Diagramas de fase (T, P), (V, T), (V, P) y (P-V-T). Línea del punto triple y punto crítico

de una sustancia pura. Condiciones matemáticas del punto crítico. Determinación de propiedades termodinámicas. Pág. 54

- 2.3 Tablas de Propiedades Termodinámicas:  $P$ ,  $V$ ,  $T$ ,  $U$  y  $H$ , para sustancias reales (vapor de agua y refrigerantes). Determinación de propiedades termodinámicas en la campana de saturación. Calidad “ $X$ ” de una mezcla líquido-vapor. Interpolación lineal. Pág. 70
- 2.4 Coeficiente de Joule y de Thomson. Pág. 110

2.1 POSTULADO DE ESTADO.  
ENUNCIADO DEL POSTULADO DE  
ESTADO.  
SUSTANCIA PURA.  
SUSTANCIA SIMPLE.  
SUSTANCIA SIMPLE COMPRESIBLE.  
1ª Y 2ª RELACIONES  
GENERALIZADAS PARA CAMBIOS  
DE ENERGÍA INTERNA Y ENTALPÍA.

CAPACIDADES TÉRMICAS  
ESPECÍFICAS A VOLUMEN  
CONSTANTE Y A PRESIÓN  
CONSTANTE.  
ENTALPÍA DE TRANSFORMACIÓN.  
TRANSFERENCIA DE CALOR.

# SUSTANCIA PURA

Es aquella que tiene una composición o estructura molecular químicamente homogénea y estable, por lo cual no hay reacciones químicas que alteren su comportamiento físico, como por ejemplo el agua, que es empleada en las plantas termoeléctricas y en general en procesos industriales.

Hay otras sustancias de trabajo que no son sustancias puras, como por ejemplo el aire, pero que en ciertas condiciones de estado se comporta como sustancia pura.

# SUSTANCIA SIMPLE

Es aquella que tiene una forma relevante de efectuar trabajo potencialmente reversible. Hay sustancias simples: eléctrica; magnética, de tensión superficial; compresible; etc.

# SUSTANCIA SIMPLE COMPRESIBLE

Es aquella sustancia de trabajo, gas o vapor sobrecalentado, cuya forma relevante de efectuar trabajo potencialmente reversible es debido a su capacidad de variar su volumen.

# 1ª Y 2ª RELACIONES GENERALIZADAS PARA CAMBIOS DE ENERGÍA INTERNA Y ENTALPÍA

En Ingeniería se diseñan Máquinas Térmicas para transformar energía en forma de calor a tra-bajo mecánico. De igual manera se diseñan Re-frigeradores o Bombas de Calor para transferir calor de una zona de baja temperatura a una zo-na de alta temperatura. Cualquiera de estos dis-positivos emplean como sustancia de trabajo a una sustancia simple compresible, por ello, la re-

levancia del estudio de sus propiedades termodinámicas y la obtención de los correspondientes modelos matemáticos.

La aplicación del Postulado de Estado a una sustancia simple compresible implica que el estado termodinámico del sistema está definido por dos propiedades intensivas independientes, cuando éste se encuentra en equilibrio termodinámico.

A continuación se desarrollan los modelos matemáticos para evaluar la variación de la energía interna y de la entalpía, aplicando el Postulado de Estado a un sistema termodinámico en equilibrio termodinámico, para lo cual, la energía interna se pone en función de dos propiedades intensivas independientes: temperatura y volumen específico; y la entalpía en función de la temperatura y la presión.

La energía interna  $U$  (Joule), como una función de la temperatura y el volumen se expresa con:  $U = U(T, V)$ , para tenerla como una propiedad intensiva, se divide entre la masa:

$$u = \frac{U}{m} = u \left( T, \frac{V}{m} \right) \left( \frac{\text{Joule}}{\text{kg}} \right)$$

$u = u(T, v) \rightarrow$  Energía interna específica:

$$du = \left. \frac{\partial u}{\partial T} \right]_v dT + \left. \frac{\partial u}{\partial v} \right]_T dv$$

# CAPACIDAD TÉRMICA ESPECÍFICA A VOLUMAN CONSTANTE

$$c_v = \left. \frac{\partial u}{\partial T} \right]_v$$

$$c_v \left( \frac{\text{Joule}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right)$$

$$du = c_v dT + \left. \frac{\partial u}{\partial v} \right]_T dv \left. \vphantom{\frac{\partial u}{\partial v}} \right\} \begin{array}{l} 1^a \text{ Relación General} \\ \text{para cambio de ener-} \\ \text{gía interna.} \end{array}$$

Para evaluar la variación de la entalpía se parte de su definición, que a continuación se detalla:

La entalpía  $H$  se define como:

$$H = U + PV \text{ (Joule)}$$

La entalpía específica  $h$  es:

$$h = \frac{H}{m} = \frac{U}{m} + \frac{PV}{m} \text{ (J/kg)}$$

$$h = u + Pv \text{ (Joule/kg).}$$

De acuerdo al Postulado de Estado:

$$h = h(T, P);$$

diferenciando:

$$dh = \left. \frac{\partial h}{\partial T} \right]_P dT + \left. \frac{\partial h}{\partial P} \right]_T dP$$

# CAPACIDAD TÉRMICA ESPECÍFICA A PRESIÓN CONSTANTE

$$c_p = \left. \frac{\partial h}{\partial T} \right]_p$$

$$c_p \left( \frac{\text{Joule}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right)$$

$$\left. dh = c_p dT + \left. \frac{\partial h}{\partial P} \right]_T dP \right\} \begin{array}{l} 2^{\text{a}} \text{ Relación General} \\ \text{para cambio de entalpía.} \end{array}$$

La capacidad térmica específica a volumen constante de un gas permite evaluar la variación de la energía interna en un sistema sujeto a un proceso termodinámico, independientemente del proceso que se trate.

La capacidad térmica específica a presión constante de un gas permite evaluar la variación de entalpía en un sistema sujeto a un proceso termodinámico, independientemente del proceso que se trate.

# APLICACIÓN DE LAS 1ª Y 2ª RELACIONES GENERALIZADAS PARA CAMBIOS DE ENERGÍA INTERNA Y ENTALPÍA A SÓLIDOS Y LÍQUIDOS

Para sólidos y líquidos:

$$\rho = \text{ctte}, v = 1/\rho = \text{ctte}$$

por tanto,  
sustituyendo en las 1ª y 2ª relaciones  
generalizadas:

$$\left. \begin{aligned}
 du &= c_v dT + \left. \frac{\partial u}{\partial v} \right|_T dv = c_v dT \\
 dh &= c_p dT + \left. \frac{\partial h}{\partial P} \right|_T dP = c_p dT
 \end{aligned} \right\} \begin{aligned}
 h &= u + Pv; \\
 \text{diferenciando:} \\
 dh &= du + Pdv + vdP \\
 \text{el proceso es a} \\
 &\text{presión constante}
 \end{aligned}$$

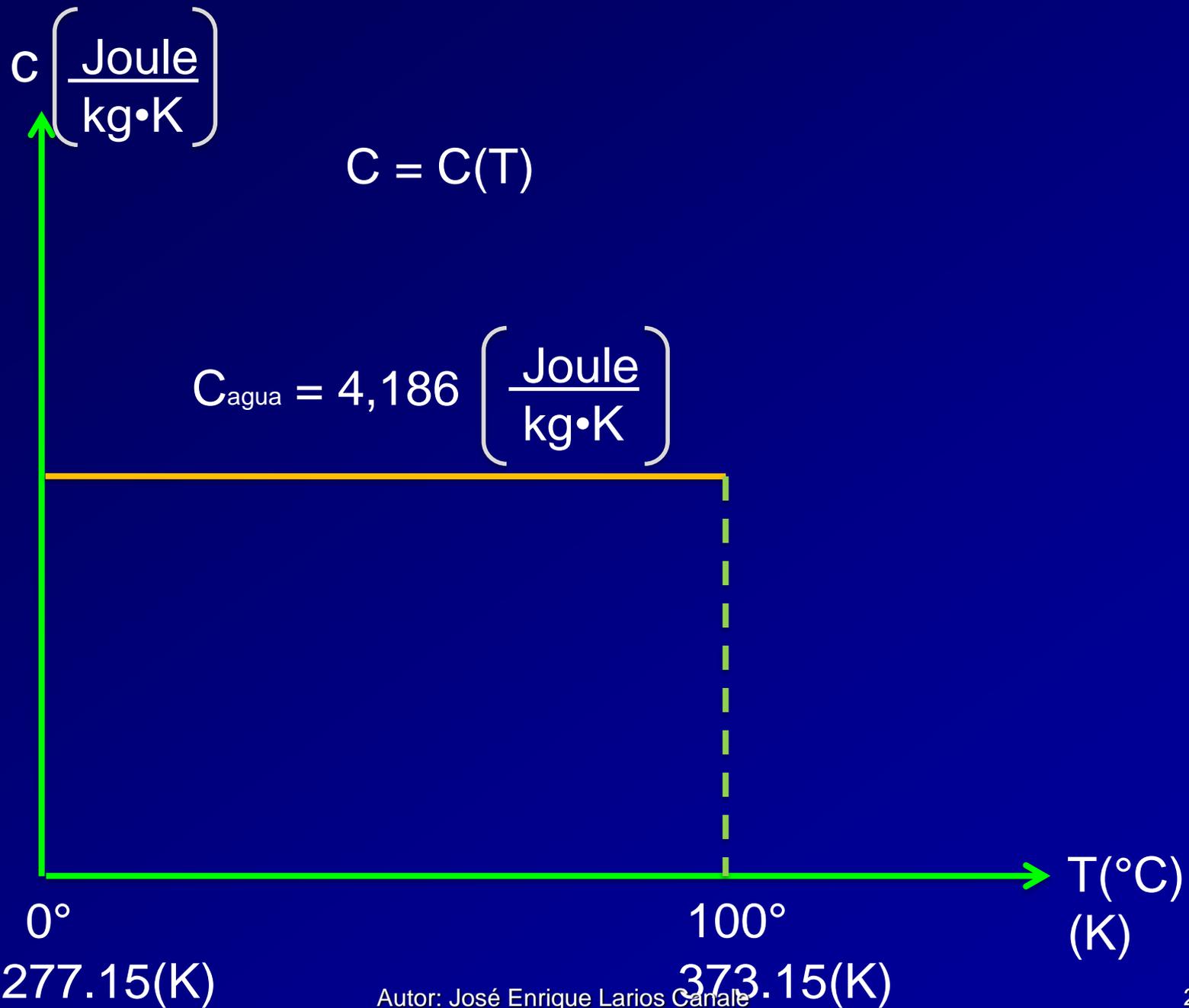
Por lo tanto,

$$du = c_v dT = dh = c_p dT \rightarrow c_v = c_p = c$$

$c$  (capacidad térmica específica), es una función de la temperatura.

# LA CAPACIDAD TÉRMICA ESPECIFICA

La capacidad térmica específica de un sólido o de un líquido es una propiedad termodinámica que evalúa la cantidad de energía que en forma de calor o de trabajo se requiere transferir a un sólido o a un líquido para que su temperatura varíe en un grado Kelvin por cada unidad de masa en kilogramos.



Sí “c” es constante:

$$du = cdT;$$

integrando:

$$\int_1^2 du = \int_1^2 cdT \quad (\text{J/kg})$$

$$u_2 - u_1 = c(T_2 - T_1)$$

Sólido y líquido

Si se quiere evaluar la variación de energía interna total “U”, integrando:

$$\int_1^2 dU = \int_1^2 mcdT \dots(1)$$

Para la mayoría de los sólidos y de los líquidos, en rangos de temperatura que se emplean en la industria se puede considerar que la capacidad térmica específica es constante

$$U_2 - U_1 = mc(T_2 - T_1) \text{ (Joule)}$$

# EQUIVALENCIA DE LA ESCALA CELSIUS Y KELVIN EN LA DIFERENCIA DE TEMPERATURAS

$$T_2 = 21 (\text{°C}) = 294 (\text{K})$$

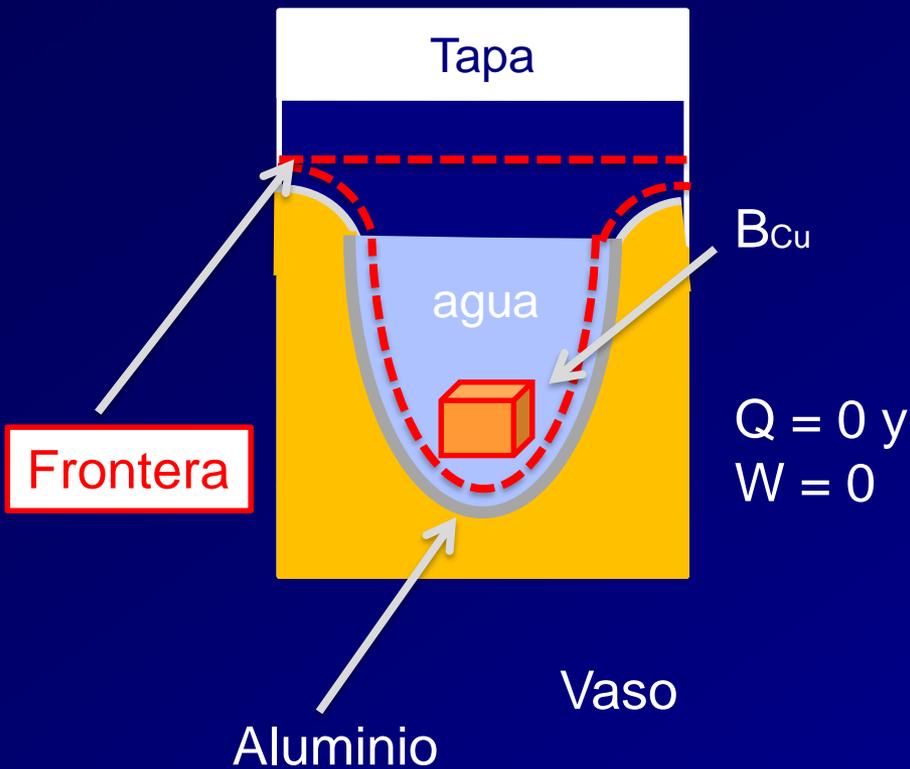
$$-T = -20 (\text{°C}) = -293 (\text{k})$$

---

$$T_2 - T_1 = 1 (\text{°C}) = 1 (\text{K})$$

## **\*EJERCICIO: 2.3.2**

¿Cuál es la temperatura de equilibrio cuando un bloque de cobre de 231 (g) a 232 ( $^{\circ}\text{C}$ ) se coloca en un calorímetro de aluminio de 201 (g) que contiene 758 (g) de agua a 15 ( $^{\circ}\text{C}$ )? Considere constantes las capacidades térmicas específicas de los tres materiales, cuyos valores se indican a continuación:



$$C_{Cu} = 389 \text{ (J/kg}\cdot\text{K)}$$

$$C_{H_2O} = 4,186 \text{ (J/kg}\cdot\text{K)}$$

$$C_{Al} = 897 \text{ (J/kg}\cdot\text{K)}$$

$$T_{eq} = ? = T_2$$

$$m_{Cu} = 231 \text{ (g);}$$

$$T_{1)Cu} = 232.0 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

$$m_{Al} = 201 \text{ (g)}$$

$$m_{H_2O} = 758 \text{ (g);}$$

$$T_{1)H_2O} = T_{1)Al} = 15 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

# Sistema Termodinámico Aislado

$${}_1Q_2 = 0; \quad {}_1W_2 = 0; \quad \Delta E_{\text{SIST})12} = 0$$

$$\Delta E_{\text{SIST})12} = \cancel{\Delta EC_{12}^0} + \cancel{\Delta EP_{12}^0} + \Delta U_{12)\text{SIST}}$$

$$\Delta U_{12)\text{SIST}} = 0 = \Delta U_{12)\text{H}_2\text{O}} + \Delta U_{12)\text{Cu}} + \Delta U_{12)\text{Al}}$$

$$mc(T_2 - T_1)_{\text{H}_2\text{O}} + mc(T_2 - T_1)_{\text{Cu}} + mc(T_2 - T_1)_{\text{Al}} = 0$$

Despejando la  $T_2$  de la ecuación anterior:

$$T_2 = \frac{mcT_1)_{H_2O} + mcT_1)_{Cu} + mcT_1)_{Al}}{mc)_{H_2O} + mc)_{Cu} + mc)_{Al}}$$

Sustituyendo datos:

$$T_2 = \frac{(0.758)(4,186)(15) + (0.231)(389)(232) + (0.201)(897)(15)}{(0.758)(4,186) + (0.231)(389) + (0.201)(897)}$$

$$T_2 = 20.66 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

# ENTALPÍA DE TRANSFORMACIÓN

Por definición:  $H = U + PV = \text{Entalpía (Joule)}$

$$H = \frac{H}{m} + \frac{U}{m} + \frac{PV}{m} \quad h = u + Pv \text{ (J/kg)} \rightarrow \text{Entalpía específica}$$

El concepto de entalpía específica se emplea para cuantificar la energía que es necesario suministrarle o retirarle a una sustancia que se encuentra a la temperatura y presión de cambio de fase.

La estructura molecular de un sistema termodinámico, ya sea sólido, líquido o gas, cambia de uno a otro cuando se le suministra o retira energía y con ello cambia, en consecuencia, su estructura molecular, lo cual se denomina como un cambio de fase y que a continuación se define:

**FASE:** Son las características de la estructura molecular de una sustancia de trabajo que definen el comportamiento físico (sólido, líquido o gas) del sistema.

Entalpía de fusión : sólido  $\rightarrow$  líquido;  $h_f - h_i = h_{if}$

(Solidificación: líquido  $\rightarrow$  sólido:  $-h_{if}$ )

Estado de saturación:

$$h_{if)_{H_2O}} = 333.4 \left( \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) \quad \begin{array}{l} \text{Condiciones de saturación} \\ P_{ATM} = 101,325.0 \text{ (Pa)} \\ T = 0 \text{ (}^\circ\text{C)} \end{array}$$

$$h_{if)_{H_2O}} = \lambda_{\text{fusión}} \text{ (calor latente de fusión)}$$

Entalpía de evaporación: líquido  $\rightarrow$  vapor;

$$h_g - h_f = h_{fg} = \lambda_{\text{ebullición}} \text{ (calor latente de ebullición)}$$

Condensación: vapor  $\rightarrow$  líquido:  $- h_{fg}$

$$h_{fg)_{H_2O}} = 2,257.0 \left( \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) \quad \text{Condiciones de saturación}$$
$$P_{\text{ATM}} = 101,325 \text{ (Pa)}$$
$$T = 100^\circ\text{C}$$

Entalpía de sublimación: sólido  $\rightarrow$  vapor;

$$h_g - h_i = h_{ig}$$

Solidificación: vapor  $\rightarrow$  sólido:  $- h_{ig}$

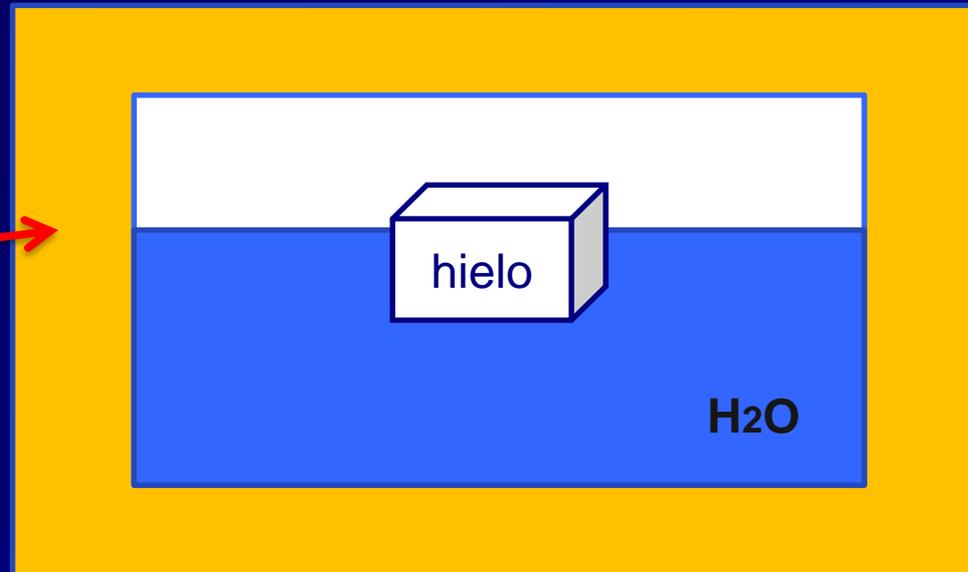
## \*EJERCICIO: 2.3

En un recipiente adiabático se mezclan 400 (g) de hielo a  $-15$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) con 150 (g) de agua en su fase líquida a  $0$  ( $^{\circ}\text{C}$ ). El proceso se lleva a cabo a nivel del mar ( $P_{\text{ATM}} = 101,325$  (Pa),  $T_{\text{amb}} = 25$  ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $g = 9.81$  ( $\text{m/s}^2$ )). Considerando que para el agua utilizada;  $c_{\text{liq}} = 4,186$  ( $\text{J}/(\text{kg}\cdot\Delta^{\circ}\text{C})$ ) y  $\lambda_{\text{fusión}} = 333$  ( $\text{kJ}/\text{kg}$ ).

Determine para la situación de equilibrio termodinámico el cociente entre la masa de agua líquida y agua sólida.

# RESOLUCIÓN:

Pared  
Adiabática



$$C_{\text{H}_2\text{O}} = 4,186 \text{ (J/kg}\cdot\text{K)}; c_{\text{hielo}} = 2,220 \text{ (J/kg}\cdot\text{K)},$$
$$h_{\text{if}} = 333.0 \text{ (kJ/kg)}; \underline{m_{\text{H}_2\text{O}}} = ?$$

$m_{\text{hielo}}$

# SISTEMA TERMODINÁMICO AISLADO

Aplicando la 1ra Ley de la Termodinámica:

$$T = \text{ctte} = 0 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

$$\Delta E_{\text{sist}} = 0 = \Delta U_{12})_{\text{hielo}} - m' h_{\text{if})_{\text{H20-hielo}}$$

$$\Delta E_{\text{sist}} = mc(T_2 - T_1)_{\text{hielo}} - m' h_{\text{if})_{\text{H20-hielo}} = 0$$

$$m'_{\text{H20-hielo}} = \frac{mc(T_2 - T_1)_{\text{hielo}}}{h_{\text{if}}}$$

Sustituyendo datos:

$$m'_{\text{H2O-hielo}} = \frac{(0.4 \text{ kg})(2,220.0 \text{ J/kg-K})(0 - (-15))(\text{K})}{333,000(\text{J/kg})} \quad 273(\text{K}) - 258(\text{K})$$

$$m'_{\text{H2O-hielo}} = 0.04 \text{ (kg)} = 40 \text{ (g)}$$

$$m_{\text{hielo}2} = m_{\text{hielo}1} + m'_{\text{H}_2\text{O-hielo}2}$$

$$m_{\text{hielo}2} = 400 + 40 = 440 \text{ (g)}$$

$$m_{\text{H}_2\text{O}2} = m_{\text{H}_2\text{O}1} - m'_{\text{H}_2\text{O-hielo}}$$

$$m_{\text{H}_2\text{O}2} = 150 - 40 = 110 \text{ (g)}$$

$$\frac{m_{\text{H}_2\text{O}2}}{m_{\text{hielo}2}} = \frac{110 \text{ (g)}}{440 \text{ (g)}} = 0.25$$

$$Q^{(+)}_{\text{hielo}} = mC_{\text{hielo}} (T_2 - T_1)_{\text{hielo}}$$

$$Q^{(+)}_{\text{hielo}} = (0.4)(2,220)(0 - (-15))$$

$$Q^{(+)}_{\text{hielo}} = 13,320 \text{ (J)}$$

$$Q^{(-)}_{\text{H}_2\text{O}} = m_{\text{H}_2\text{O}} h_{\text{if}}; m_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{-13,320 \text{ (J)}}{-333,000 \text{ (J/kg)}}$$

$$m_{\text{H}_2\text{O}}_{\text{hielo}} = 0.04 \text{ (kg)} = 40 \text{ (g)}$$

$$\underline{m_{\text{H}_2\text{O}})_2} = \underline{m_{\text{H}_2\text{O}})_1} - \underline{m_{\text{H}_2\text{O-hielo}}} = \underline{110 \text{ (g)}} = 0.25$$

$$m_{\text{hielo}})_2 = m_{\text{hielo}})_1 * m_{\text{hielo-H}_2\text{O}} = 440(\text{g})$$

# TRANSFERENCIA DE CALOR A UNA SUSTANCIA PURA

A continuación se describe un proceso de transferencia de calor a presión constante de una sustancia pura, graficando los valores de temperatura y volumen específico en un diagrama T-v. Por ejemplo, si el proceso se realiza con un lingote de cobre puro, se observa que inicialmente, en la fase sólida (a-b) la variación de la temperatura con respecto al volumen específico es casi lineal, con pendiente positiva. Posteriormente, se inicia el cambio de fase, coexistiendo como sólido y líquido (b-c), observando que la temperatura es constante.

# TRANSFERENCIA DE CALOR

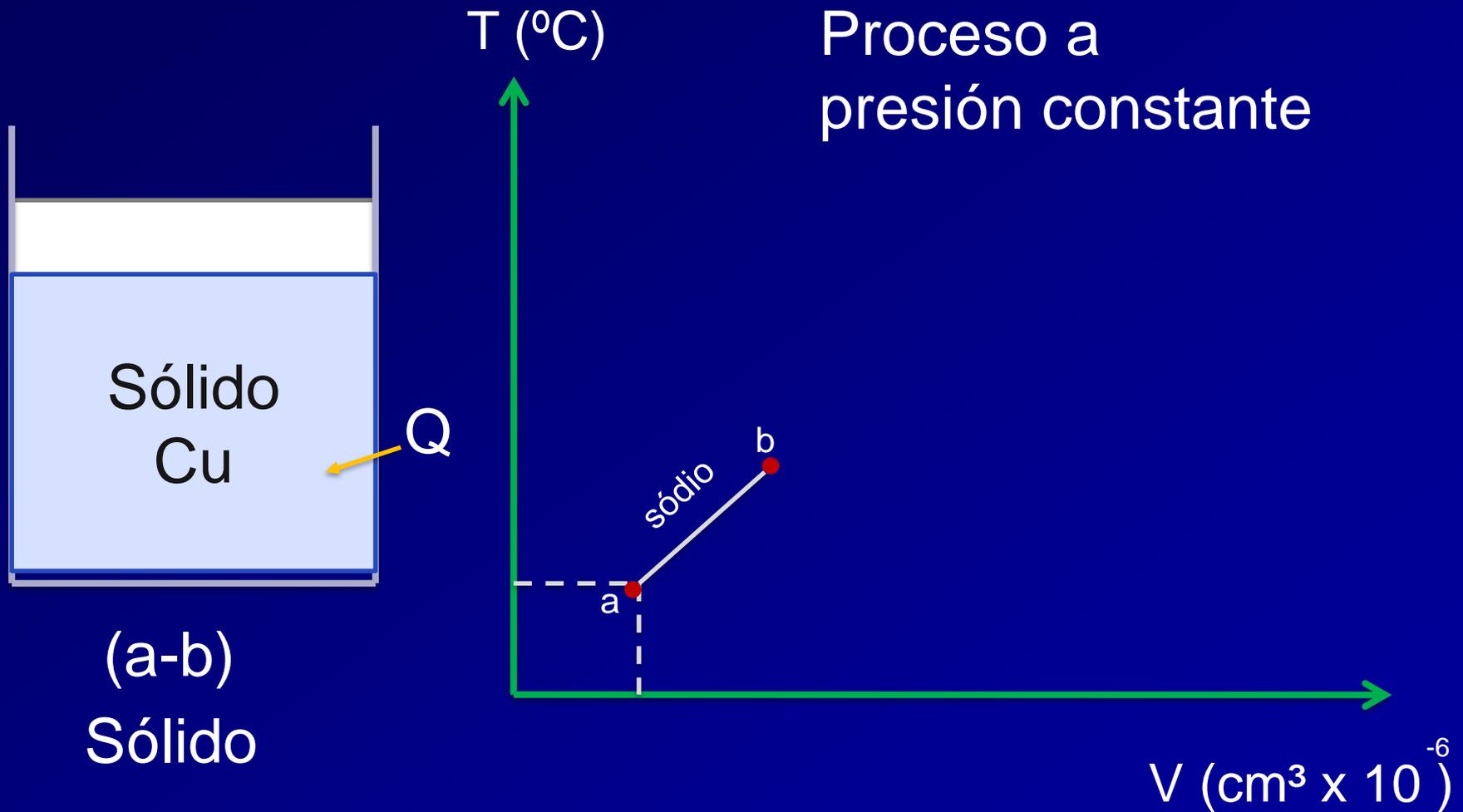


Fig. 2.1.2 Autor: José Enrique Larios Canale

# TRANSFERENCIA DE CALOR

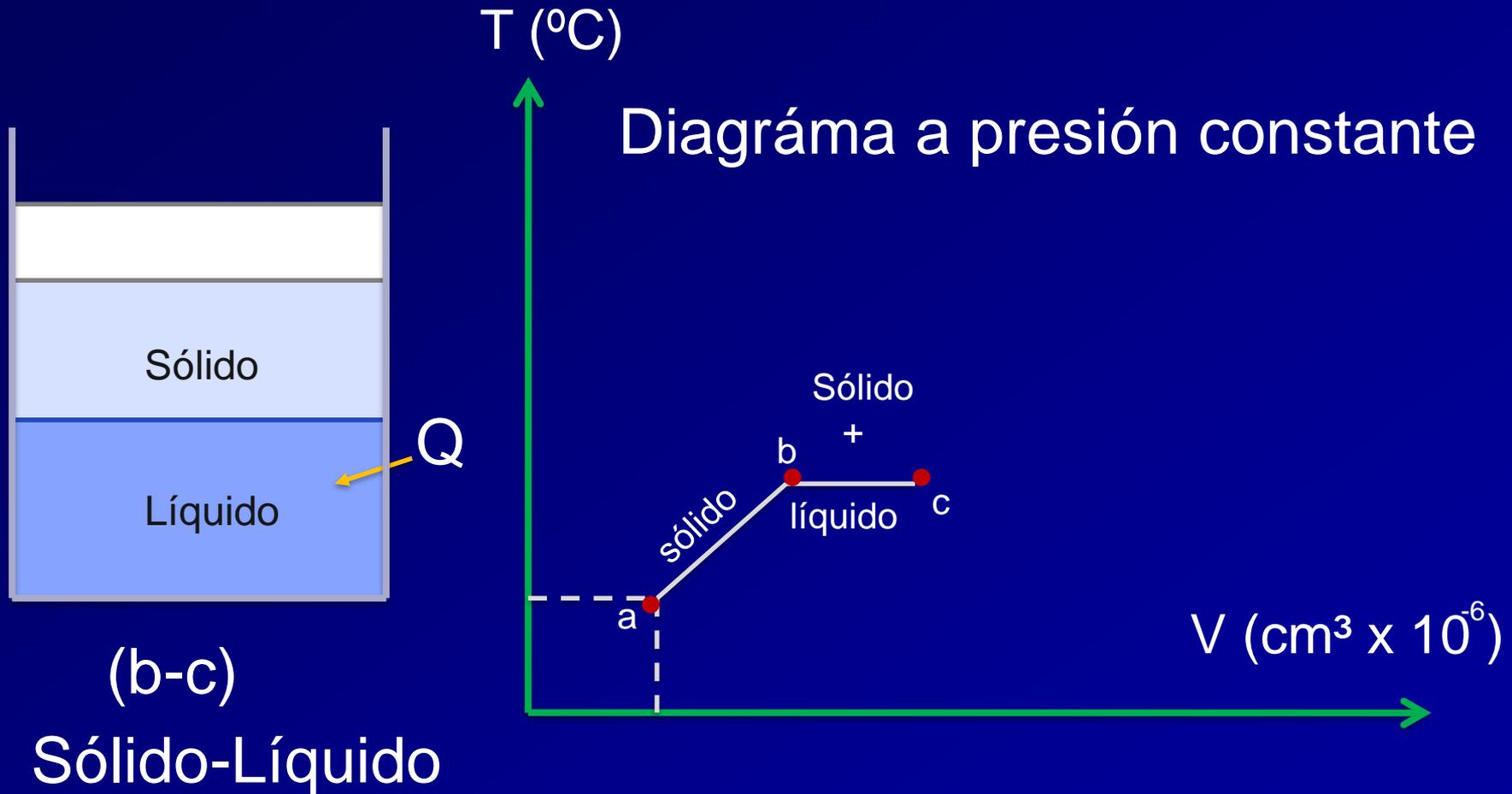


Fig. 2.1.3.

Autor: José Enrique Larios Canale

Si se continúa el proceso de transferencia de calor a presión constante, el lingote de cobre en la fase líquida (c-d), se observa que la variación de la temperatura con respecto al volumen específico es lineal, con pendiente positiva. Posteriormente, se inicia el cambio de fase, coexistiendo las dos fases, como líquido y como vapor (d-e), observando que la temperatura se mantiene constante.

A partir del estado (e), si se continúa suministrando calor al cobre, se incrementa la temperatura de manera exponencial con respecto al volumen específico (e-f) en el diagrama T-v, en lo que se denomina vapor sobrecalentado.

# TRANSFERENCIA DE CALOR

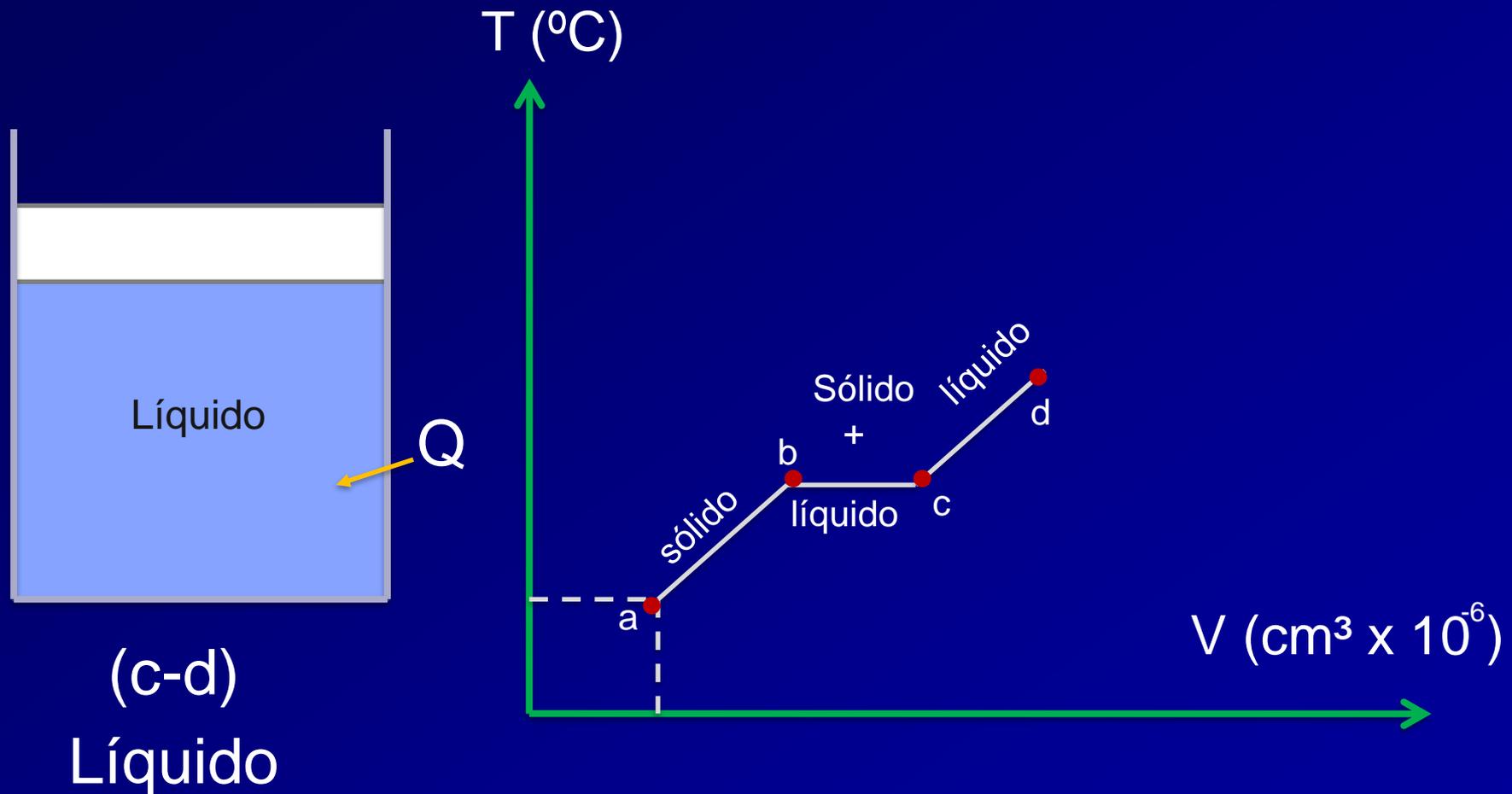


Diagrama a presión constante

# TRANSFERENCIA DE CALOR

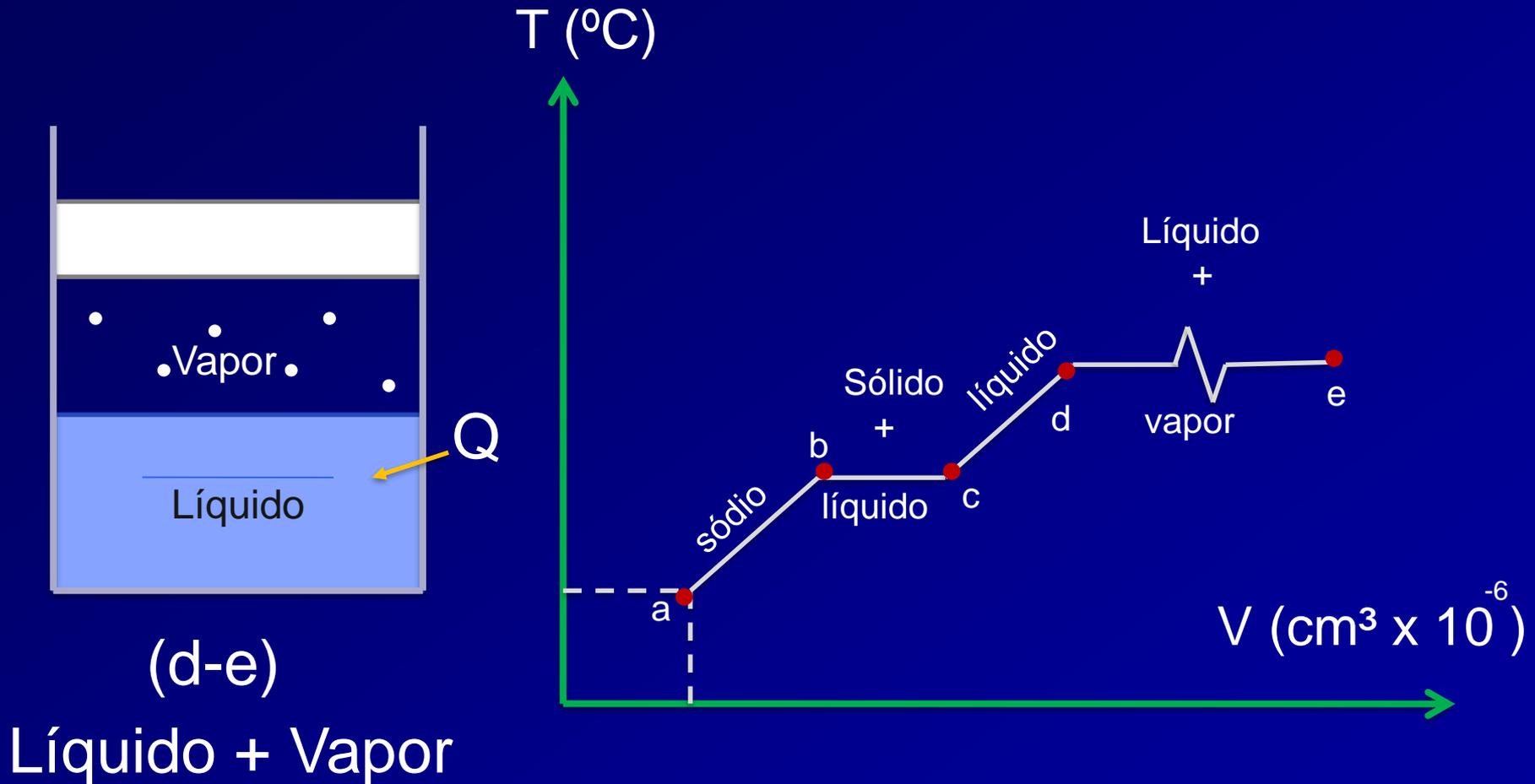
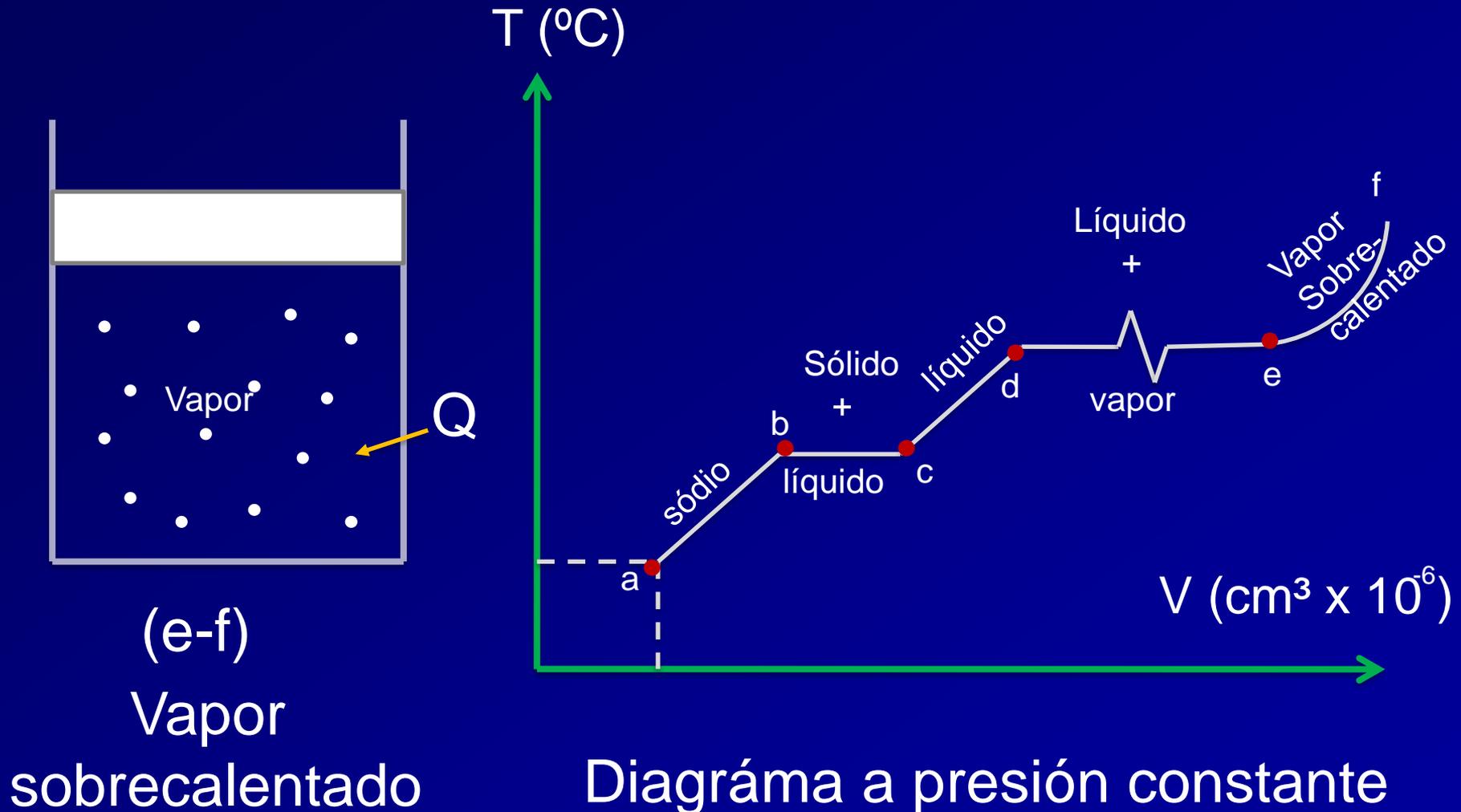


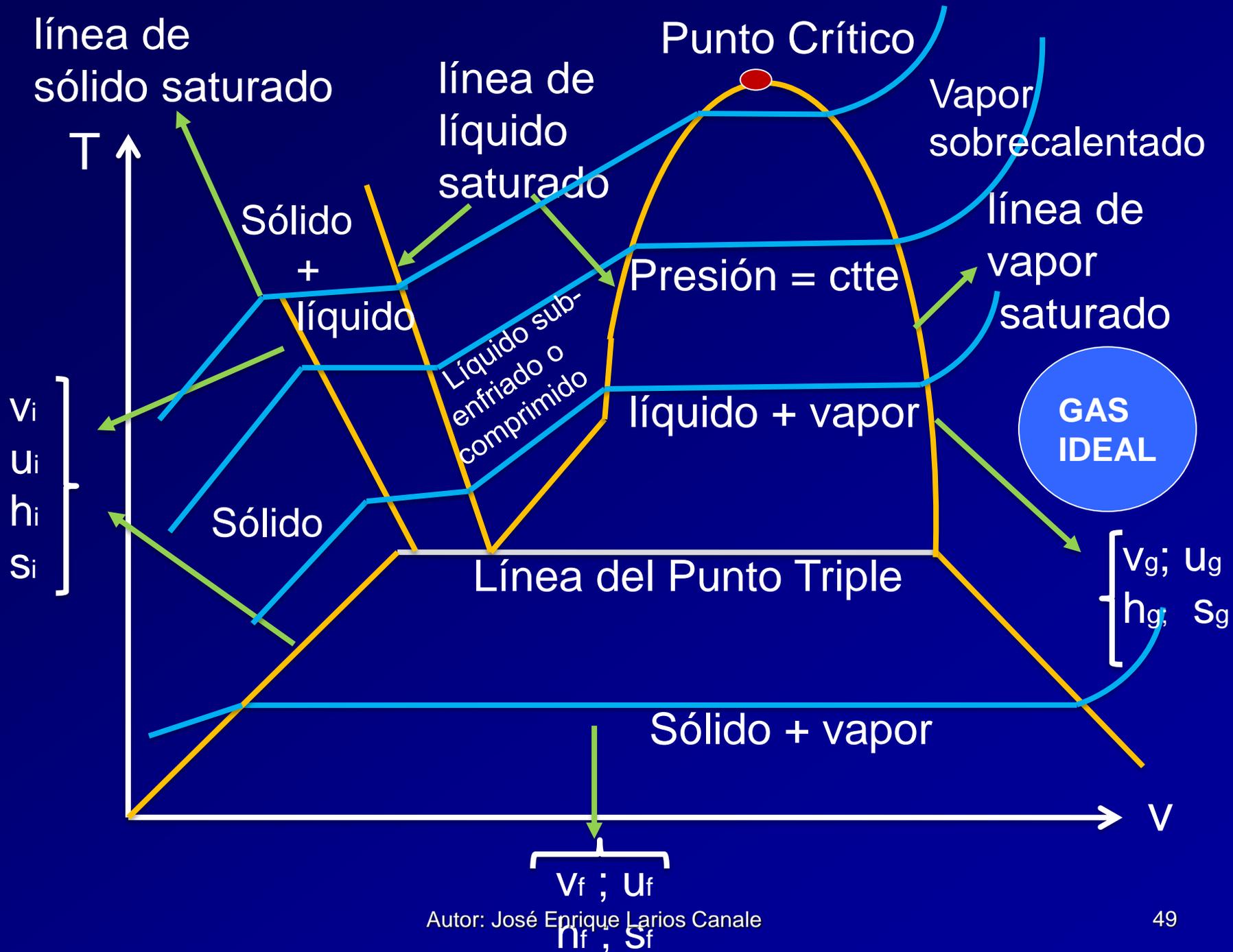
Diagrama a presión constante

# TRANSFERENCIA DE CALOR



Se repite el proceso de transferencia de calor a diferentes presiones constantes con el lingote de cobre, y se unen los puntos en los cuales hay un cambio en la pendiente de las líneas de presión constante, se delimitan tres zonas con una sola fase: sólido, líquido y vapor sobrecalentado o gas; y tres zonas con dos fases que coexisten: sólido-líquido, líquido-vapor y sólido-vapor, observando que la temperatura se mantiene constante.

En el el diagrama T-v destacan dos condiciones del estado termodinámico de una sustancia pura: el Punto Crítico y la Línea del Punto Triple, como se muestra en la siguiente diapositiva, conformando el Diagrama de Fase T-v



2.2 DIAGRAMAS DE FASE.  
LÍNEA DEL PUNTO TRIPLE DE UNA  
SUSTANCIA PURA.  
PUNTO CRÍTICO DE UNA  
SUSTANCIA PURA.  
CONDICIONES MATEMÁTICAS DEL  
PUNTO CRÍTICO.  
DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES  
TERMODINÁMICAS.

# DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES TERMODINÁMICAS

En Ingeniería Térmica se determinan las propiedades termodinámicas involucradas en los procesos de transferencia de calor y de trabajo en sistemas: aislados, cerrados y abiertos (máquinas térmicas e hidráulicas), así como en los ciclos termodinámicos en los cuales se efectúan balances de energía y entropía. Hay tres formas para conocer estas propiedades:

1. Diagramas Termodinámicos de Fase.
2. Tablas de propiedades termodinámicas.
3. Ecuaciones y modelos matemáticos.

2.3 TABLAS DE PROPIEDADES  
TERMODINÁMICAS: P, V, T, U Y H,  
PARA SUSTANCIAS REALES  
(VAPOR DE AGUA Y  
REFRIGERANTES).  
DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES  
TERMODINÁMICAS EN LA CAMPANA  
DE SATURACIÓN.

CALIDAD “x” DE UNA MEZCLA  
LÍQUIDO-VAPOR: CALIDAD DEL  
VAPOR PRODUCIDO.  
INTERPOLACIÓN LINEAL:  
INTERPOLACIÓN LINEAL DE UNA  
VARIABLE INDEPENDIENTE.

# TABLAS DE PROPIEDADES TERMODINAMICAS

En ocasiones los datos se recopilan en tablas, lo que permite una mayor precisión que la interpolación gráfica.

Las tablas de datos termodinámicos más habituales son las de datos de:

- a) Equilibrio líquido-vapor saturado,
- b) Vapor sobrecalentado (fase vapor),
- c) Líquido comprimido (fase líquida)
- d) Para varios sistemas de interés: agua, amoníaco, varios fluidos de refrigeración (freones), ...

Puesto que se presentan valores absolutos de las propiedades tabuladas, para la entalpía y la entropía debe tomarse un estado como referencia y asignarle el valor cero ( $h = s = 0$ ). El estado de referencia es el fluido líquido en su punto triple.

Las propiedades termodinámicas son características que se pueden observar, medir o cuantificar en las sustancias. La cantidad y tipo de propiedades que se puedan establecer para un sistema dependen del tipo de observación que se haya establecido para el análisis del sistema.

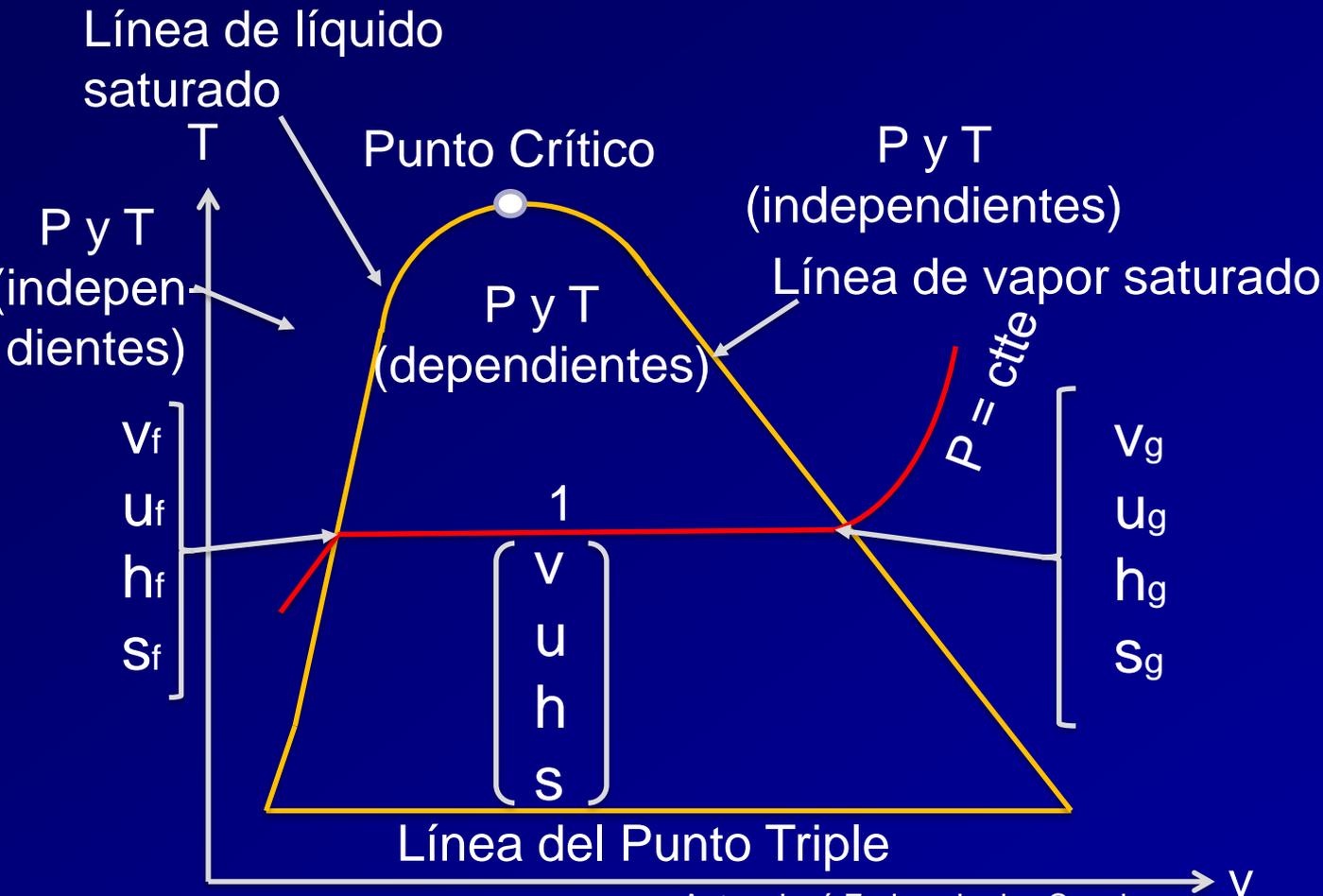
Por ejemplo, si el enfoque usado es el macroscópico, se pueden establecer propiedades como temperatura, presión, energía interna y entalpía y otras, que de ningún modo serían establecidas utilizando el enfoque microscópico.

# DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES TERMODINÁMICAS EN LA CAMPANA DE SATURACIÓN.

En la práctica de la ingeniería es frecuente el uso de sustancias de trabajo cuyos estados termodinámicos se encuentran en las condiciones de saturación de la interfase líquido vapor, conocida como la “Campana de Saturación”, que se ilustra en un diagrama T-v de la Fig. 2.3.1.

Está delimitada en su parte inferior por la Línea del Punto Triple; al lado izquierdo por la Línea de Líquido Saturado (propiedades con el subíndice “f”); al lado derecho por la Línea de Vapor Saturado (propiedades con el subíndice “g”), y en la parte superior por el Punto Crítico.

# DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES TERMODINÁMICAS EN LA CAMPANA DE SATURACIÓN



$$v = V/m$$

$$V = mv$$

Fig. 2.3.1.

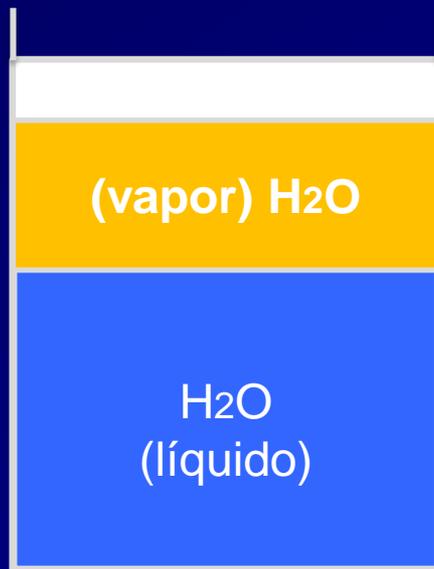
# CALIDAD “x” DE UNA MEZCLA LÍQUIDO-VAPOR.

Dentro de la Campana de Saturación, la presión y la temperatura son propiedades dependientes y para determinarlas se define el concepto de calidad de una mezcla líquido-vapor, como la relación de la masa de vapor a la masa total:

$$X = \frac{\text{masa de vapor}}{\text{masa total}}$$

A continuación se desarrollan las ecuaciones para determinar las propiedades termodinámicas del estado “1” dentro de la Campana.

## CONCEPTO DE CALIDAD «X»



$$X = \frac{\text{masa de vapor}}{\text{masa total}}$$

$$0 \leq X \leq 1$$

$$0\% \leq X \leq 100\%$$

$$m_{\text{total}} = m_{\text{líquido}} + m_{\text{vapor}}$$

Fig. 2.3.2.

$$\frac{V_{\text{total}}}{m_{\text{total}}} = \frac{V_{\text{líquido}}}{m_{\text{total}}} + \frac{V_{\text{vapor}}}{m_{\text{total}}}$$

$$v = \frac{m_{\text{líquido}} \cdot v_{\text{líquido}}}{m_{\text{total}}} + \frac{m_{\text{vapor}} \cdot v_{\text{vapor}}}{m_{\text{total}}}$$

$$v = \left( \frac{m_{\text{total}} - m_{\text{vapor}}}{m_{\text{total}}} \right) v_{\text{líquido}} + x v_{\text{vapor}}$$

$$v = (1 - x) v_{\text{líquido}} + x v_{\text{vapor}}$$

$$v = (1 - x)v_f + xv_g$$

$1 - x$  = humedad del vapor

$$v = v_f - xv_f + xv_g = v_f + x(v_g - v_f) =$$

Con el fin de simplificar la expresión anterior, se reduce a:

$$v_{fg} = v_g - v_f$$

$$v = v_f + xv_{fg}$$

El cálculo de las propiedades termodinámicas en la campana de saturación se obtienen con las siguientes ecuaciones, empleando la humedad:

$$v = (1 - x)v_f + xv_g$$

$$u = (1 - x)u_f + xu_g$$

$$h = (1 - x)h_f + xh_g$$

$$s = (1 - x)s_f + xs_g$$

Autor: José Enrique Larios Canale

El cálculo de las propiedades termodinámicas en la campana de saturación se obtienen con las siguientes ecuaciones, empleando la calidad:

$$V = V_f + Xv_{fg}$$

$$u = u_f + Xu_{fg}$$

$$h = h_f + xh_{fg}$$

$$s = s_f + Xs_{fg}$$

**CALIDAD DEL VAPOR PRODUCIDO.** La calidad del vapor es un valor difícil de determinar con exactitud. En la actualidad existen varios métodos para medir la calidad del vapor, sin embargo, no existe ninguno que pueda considerarse simple y sencillo. Entre los más utilizados se pueden mencionar los siguientes:

Método del Separador: Puede considerarse como el más simple y se basa en la definición de calidad. Se puede utilizar un recipiente cilíndrico, horizontal o vertical, aislado con el fin de separar

la fase vapor de la líquida, tal como un separador de petróleo y gas. Las medidas de las tasas de flujo por peso de las dos fases cuando éstas dejan el separador, dan una indicación directa de la calidad.

Cualquier método para medir el flujo de las dos fases puede resultar aceptable. Algunas instalaciones utilizan medidores de orificio en ambas líneas, sin embargo, un medidor de desplazamiento positivo o un medidor de turbina en el lado del líquido puede resultar satisfactorio si se realizan las correcciones por temperatura.

Para calcular la calidad, la tasa de flujo en peso de vapor se divide entre las tasas de flujo en peso de las corrientes de agua y vapor. Si la unidad generadora de vapor opera bajo condiciones de flujo continuo, como generalmente lo hace la calidad, puede hallarse dividiendo la tasa de vapor en el separador por la tasa de agua entrante.

Algunos generadores comerciales poseen separadores a fin de determinar la calidad.

Método de los cloruros: Se ha mencionado que una de las razones por las cuales se usa va-

por húmedo en recuperación térmica, es con el fin de prevenir la formación de escamas en las calderas debido a la deposición de sólidos disueltos.

Estos sólidos presentes en el agua de alimentación se concentran en la porción líquida de la descarga del generador y sirven para proveer una medida del porcentaje de la alimentación aún en fase líquida.

El ión cloruro  $\text{Cl}^-$  constituye un...??

# INTERPOLACIÓN LINEAL

La interpolación lineal es un caso particular de la Interpolación general de Newton.

Con el polinomio de interpolación de Newton se logra aproximar un valor de la función  $f(x)$  en un valor desconocido de  $x$ . El caso particular, para que una interpolación sea lineal es en el que se utiliza un polinomio de interpolación de grado 1, y se denota de la siguiente manera:

**INTERPOLACIÓN LINEAL DE UNA VARIABLE INDEPENDIENTE.** Es igual que hacer integrales cerradas. En una tabla se representan algunos valores de la función, pero no todos, en ocasiones nos interesa el valor de la función para un valor de la variable independiente distinto de los que figuran en la tabla, en este caso podemos tomar el más próximo al buscado, o aproximarnos un poco más por interpolación, la interpolación casi siempre nos dará un pequeño error respecto al valor verdadero de la función, pero siempre será menor que tomar el valor más próximo de los que figuran en la tabla, veamos como se calcula al valor de la

función para un valor de la variable independiente que se encuentre entre dos valores de la tabla por interpolación lineal.

La interpolación lineal consiste en trazar una recta que pasa por  $(x_1, y_1)$  y  $(x_2, y_2)$ ,  $y = r(x)$  y calcular los valores intermedios según esta recta en lugar de la función  $y = f(x)$

## EJERCICIO 2.3.1

Determine las propiedades termodinámicas faltantes del agua:  $T$ ;  $P$ ;  $v$ ;  $u$ ;  $h$ ;  $s$ , y  $X$ , para las siguientes condiciones especificadas:

- a) Del líquido saturado a  $20$  ( $^{\circ}\text{C}$ ),
- b) Del vapor saturado a  $9$  (bar),
- c) A  $10$  (bar) y  $280$  ( $^{\circ}\text{C}$ ),
- d) A  $8$  (bar) y una calidad del  $80$  (%),
- e) A  $100$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) y  $100$  (bar),
- f) A  $150$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) y el  $70$  (%) de calidad,
- g) A  $15$  (bar) y una entalpía de  $2,899.3$  (kJ/kg),

- h) A 200 (°C) y una entalpía de 1,822.8 (kJ/kg),
- i) A 140 (°C) y una entalpía de 2,733.9 (kJ/kg),
- j) A 280 (°C) y una energía interna de 2,760.2 (kJ/kg), y
- k) A 200 (bar) y una entalpía de 434.06 (kJ/kg).

# RESOLUCIÓN:

$$\text{a) } T = 20 \text{ (}^\circ\text{C)}; P_{\text{sat}} = 0.02339 \text{ (bar)}; x = 0$$

## Tabla A-12

$$v_f = 1.0018 \times 10^{-3} \text{ (m}^3\text{/kg)}; u_f = 83.95 \text{ (kJ/kg)}$$

$$h_f = 83.96 \text{ (kJ/kg)}; s_f = 0.2966 \text{ (kJ/kg-K)}$$

$$\text{b) } P = 9 \text{ (bar)}; x = 1 = 100\%$$

## Tabla A-13

$$T = 175.4 \text{ (}^\circ\text{C)}; v_g = 0.2150 \text{ (m}^3\text{/kg)};$$

$$u_g = 2580.5 \text{ (kJ/kg)}$$

$$h_g = 2,773.9 \text{ (kJ/kg)}; s_g = 6.6226 \text{ (kJ/kg-K)}$$

c)  $P = 10$  (bar);  $T = 280$  ( $^{\circ}\text{C}$ );

Tabla A-13

$T_{\text{sat}} = 179.9$  ( $^{\circ}\text{C}$ ); vapor sobrecalentado

$v = 0.248$  ( $\text{m}^3/\text{kg}$ );  $u = 2,760.2$  ( $\text{kJ}/\text{kg}$ )

$h = 3,008.2$  ( $\text{kJ}/\text{kg}$ );  $s = 7.0465$  ( $\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$ )

d)  $P = 8$  (bar);  $x = 80\%$

Tabla A-13;  $T_{\text{sat}} = 170.4$  ( $^{\circ}\text{C}$ );

$$v = v_f + Xv_{fg}$$

$$v = 1.1148 \times 10^{-3} + (0.8)(0.2404 - 1.1148 \times 10^{-3}) = 0.1925 \text{ (m}^3/\text{kg)};$$

$$U = U_f + XU_{fg}$$

$$\begin{aligned}u &= 720.22 + (0.8)(2,576.8 - 720.22) \\ &= 2,205.48 \text{ (kJ/kg)};\end{aligned}$$

$$h = h_f + xh_{fg}$$

$$h = 721.11 + (0.8)(2,048.0) = 2,359.51 \text{ (kJ/kg)};$$

$$S = S_f + XS_{fg}$$

$$\begin{aligned}s &= 2.0462 + (0.8)(6.6628 - 2.0462) \\ &= 5.7395 \text{ (kJ/kg-K)};\end{aligned}$$

e)  $T = 100$  ( $^{\circ}\text{C}$ );  $P = 100$  (bar);

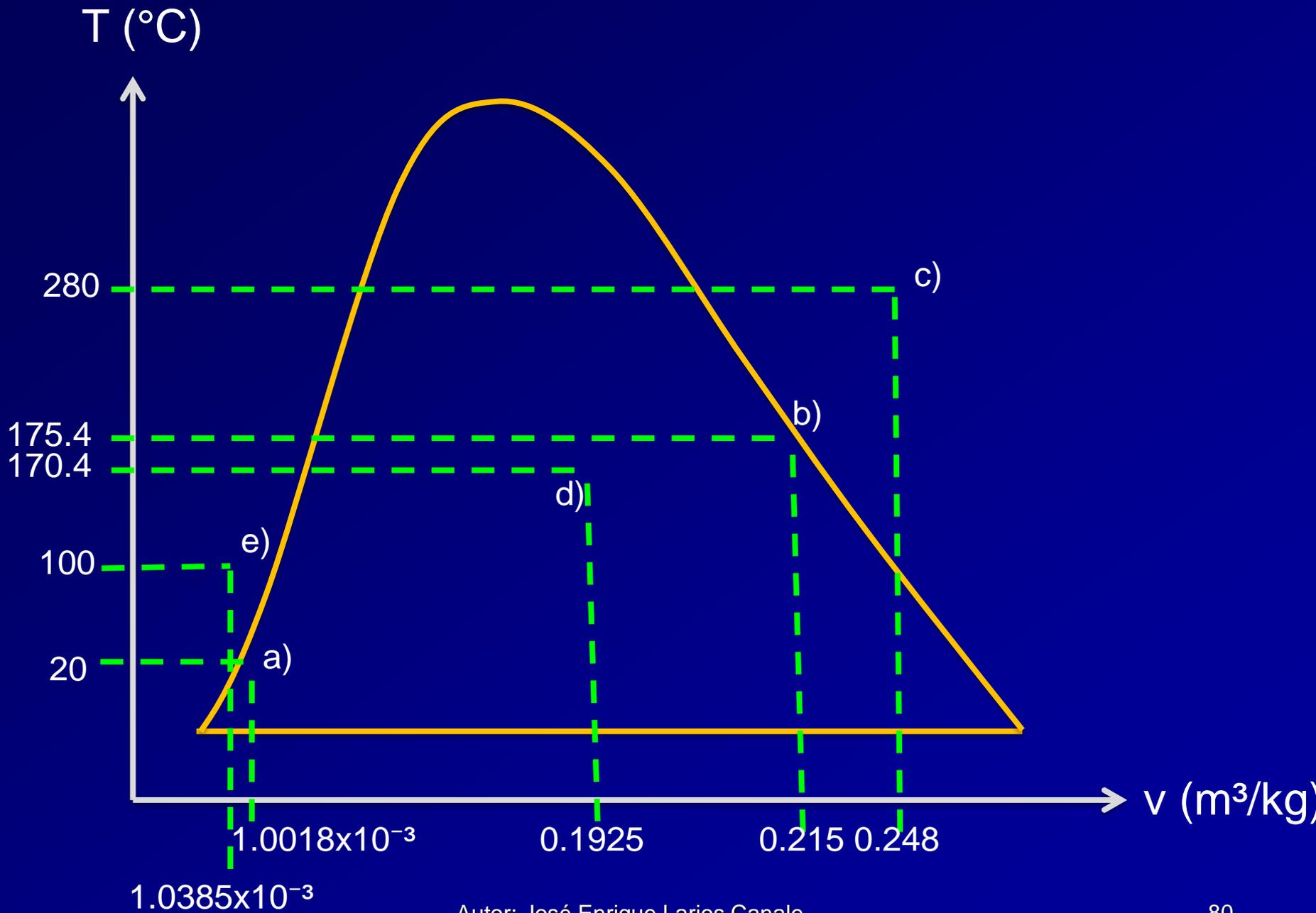
Tabla A-15

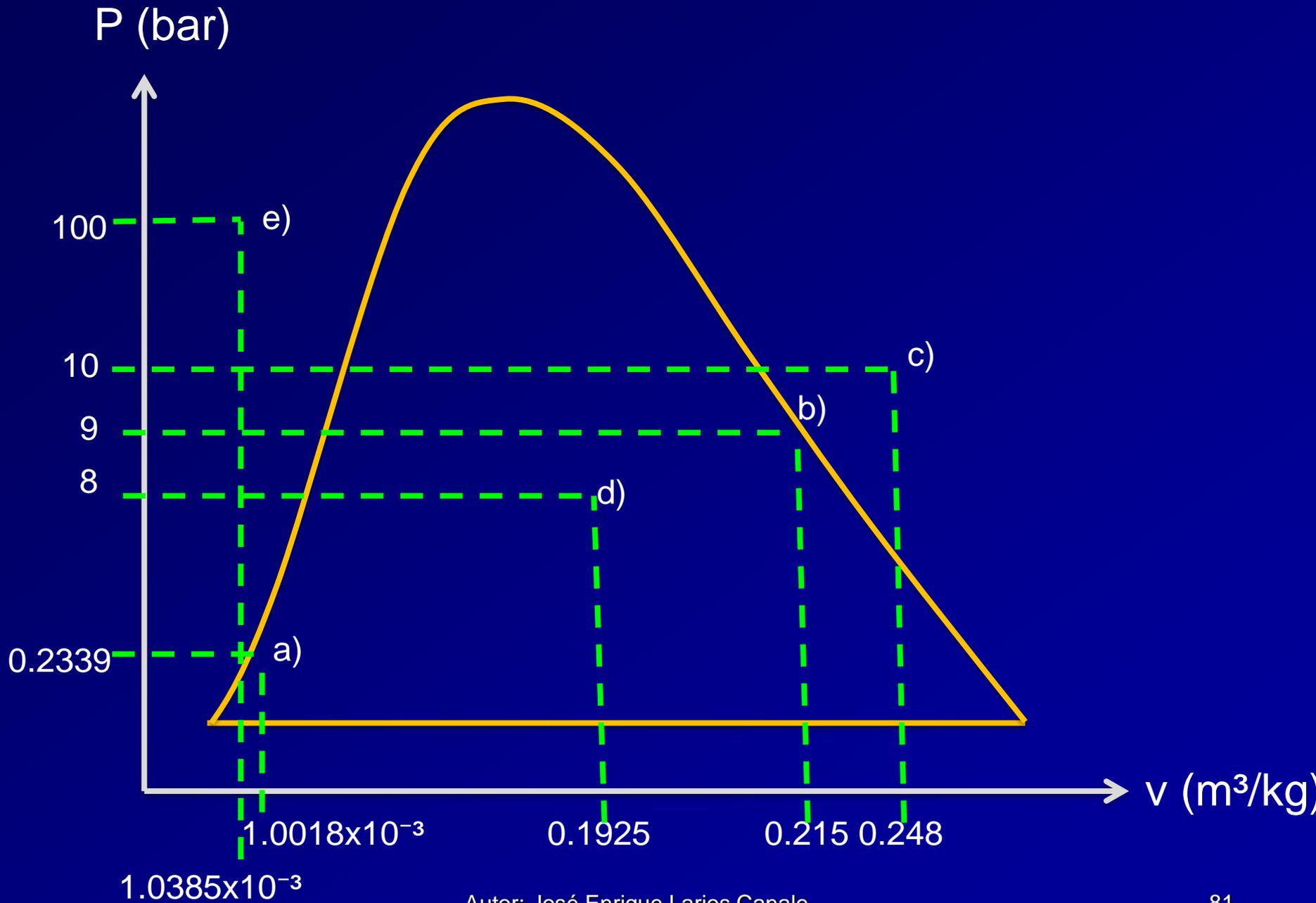
Líquido comprimido

$v = 1.0385 \times 10^{-3}$  ( $\text{m}^3/\text{kg}$ );  $u = 416.12$  ( $\text{kJ}/\text{kg}$ )

$h = 426.5$  ( $\text{kJ}/\text{kg}$ );  $s = 1.2992$  ( $\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$ )

Es- ta- do	T (°C)	P (bar)	v ( $\frac{m^3}{kg}$ )	u ( $\frac{kJ}{kg}$ )	h ( $\frac{kJ}{kg}$ )	s ( $\frac{kJ}{kg-K}$ )	x (%)
(a)	20	0.023 39	1.0018 $\times 10^{-3}$	83.95	8396	0.2966	0
(b)	175.4	9	0.2150	2580.5	2,773.9	6.6226	100
(c)	280	10	0.248	2,760.2	3,008.2	7.0465	-
(d)	170.4	8	0.1925	2,205.4 8	2,359.5 1	5.7395	80
(e)	100	100	1.0385 $\times 10^{-3}$	416.12	426.5	1.2992	-





f)  $T = 150$  ( $^{\circ}\text{C}$ );  $P_{\text{sat}} = 4.758$  (bar);  $x = 70$  %

Tabla A-12

$$V = V_f + XV_{fg}$$

$$v = 1.0905 \times 10^{-3} + (0.7)(0.3928 - 1.0905 \times 10^{-3}) = 0.2753 \text{ (m}^3\text{/kg);}$$

$$U = U_f + XU_{fg}$$

$$u = 631.68 + (0.7)(2,559.5 - 631.68) = 1,981.15 \text{ (kJ/kg);}$$

$$h = h_f + xh_{fg}$$

$$h = 632.2 + (0.7)(2,114.3) = 2,112.21 \text{ (kJ/kg);}$$

$$S = S_f + XS_{fg}$$

$$s = 1.8418 + (0.7)(6.8374 - 1.8418) = 5.3391 \\ (\text{kJ/kg-K});$$

$$\text{g) } P = 15 \text{ (bar); } h = 2,899.3 \text{ (kJ/kg);}$$

$$T_{\text{sat}} = (^\circ\text{C})$$

Tabla A-13

$$h_f = 844.84 \text{ (kJ/kg)}$$

$$h_g = 2,792.2 \text{ (kJ/kg)}$$

Tabla A- 14; Vapor sobrecalentado

$$T = 240 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

$$P = 15 \text{ (bar)}; v = 0.1483 \text{ (m}^3\text{/kg)};$$
$$u = 2,676.9 \text{ (kJ/kg)}; s = 6.6628 \text{ (kJ/kg-K)}$$

$$h) T = 200 \text{ (}^\circ\text{C)}; h = 1,822.8 \text{ (kJ/kg)}$$

Tabla A-12

$$h_f = 852.45 \text{ (kJ/kg)}$$

$$h_g = 2,793.2 \text{ (kJ/kg)}$$

$$h = h_f + xh_{fg}$$

$$x = \frac{h - h_f}{h_{fg}} = \frac{1822.8 - 852.45}{1,940.7} = 0.5 = 50\%$$

$$V = V_f + XV_{fg}$$

$$v = 1,1565 \times 10^{-3} + (0.5)(0.1274 - 1,1565 \times 10^{-3})$$

$$v = 0.06427 \text{ (m}^3\text{/kg);}$$

$$U = U_f + XU_{fg}$$

$$u = 850.65 + (0.5)(2,595.3 - 850.65)$$

$$u = 1,722.975 \text{ (kJ/kg);}$$

$$S = S_f + XS_{fg}$$

$$s = 2.3309 + (0.5)(6.4323 - 2.3309) = 4.3816 \\ \text{(kJ/kg-K);}$$

$$i) T = 140 \text{ (}^\circ\text{C)}; h = 2,733.9 \text{ (kJ/kg)}$$

Tabla A-12; vapor saturado

$$h_f = 589.13 \text{ (kJ/kg)}$$

$$h_g = 2,733.9 \text{ (kJ/kg)}$$

$$v = 0.5089 \text{ (m}^3\text{/kg)}; u = 2,550.0 \text{ (kJ/kg)}$$

$$s = 6.9299 \text{ (kJ/kg-K)}; P = 3.613 \text{ (bar)}$$

$$j) T = 280 \text{ (}^\circ\text{C)}; u = 2,760.2 \text{ (kJ/kg)}$$

Tabla A-12; vapor saturado

$$u_f = 1,227.5 \text{ (kJ/kg)}$$

$$u_g = 2,586.1 \text{ (kJ/kg)}$$

Tabla A-14; vapor sobrecalentado

$$v = 0.2480 \text{ (m}^3\text{/kg)}; h = 3,008.2 \text{ (kJ/kg)}$$

$$s = 7.0465 \text{ (kJ/kg-K)}; P = 10 \text{ (bar)}$$

$$k) P = 200 \text{ (bar); } h = 434.06 \text{ (kJ/kg)}$$

Tabla A-13;

$$h_f = 1,826.3 \text{ (kJ/kg)}$$

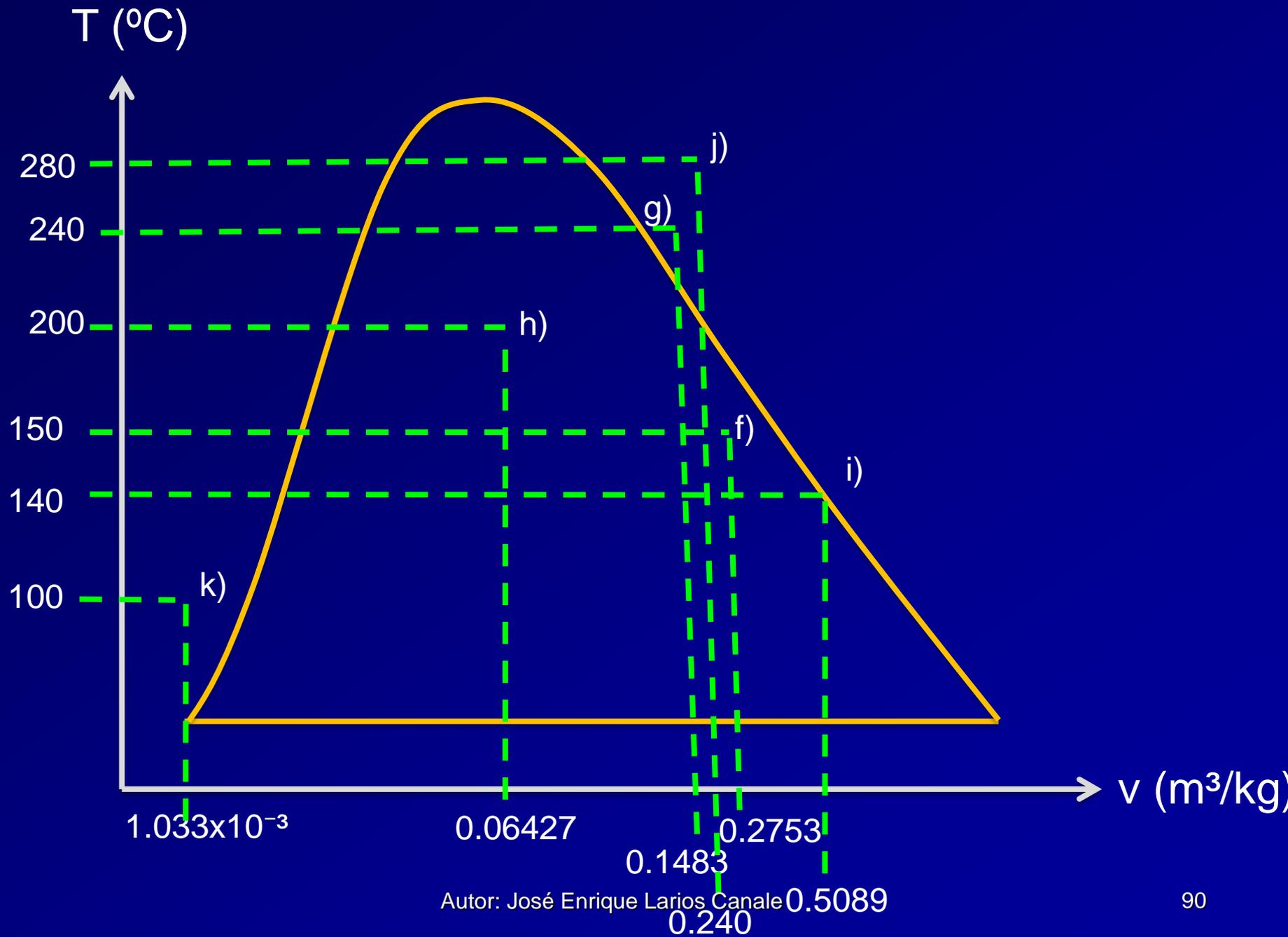
$$h_g = 2,409.7 \text{ (kJ/kg)}$$

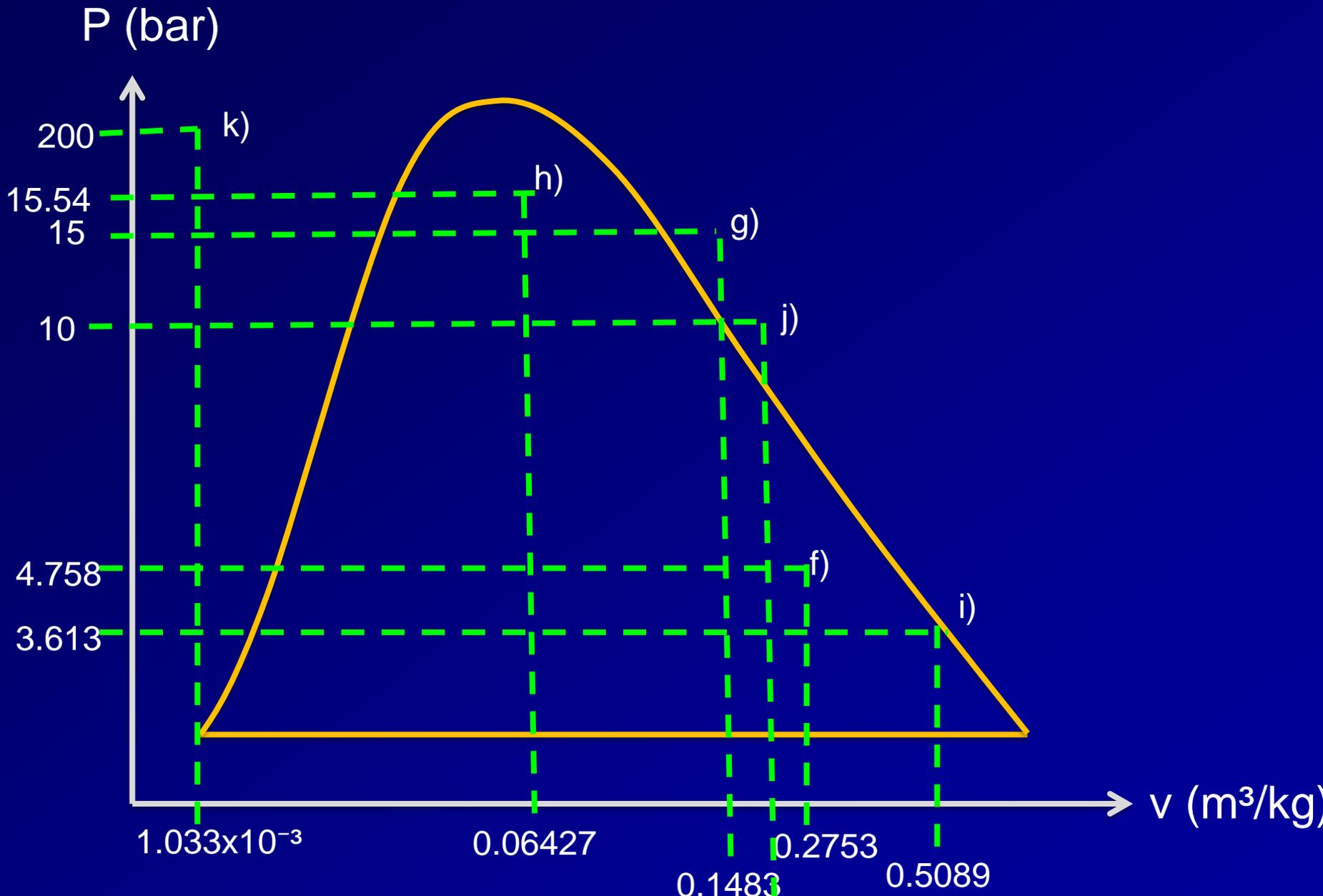
Tabla A-15;

$$v = 1.033 \times 10^{-3} \text{ (m}^3\text{/kg); } u = 413.19 \text{ (kJ/kg)}$$

$$s = 1.2917 \text{ (kJ/kg-K); } T = 100 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

<b>Es- ta- do</b>	<b>T (°C)</b>	<b>P (bar)</b>	<b>v (m<sup>3</sup>)</b>	<b>u (kJ/ kg)</b>	<b>h (kJ/ kg)</b>	<b>s (kJ/ kg-K)</b>	<b>x (%)</b>
<b>(f)</b>	<b>150</b>	<b>4.75 8</b>	<b>0.2753</b>	<b>1.981.15</b>	<b>2,112.21</b>	<b>5.3391</b>	<b>70</b>
<b>(g)</b>	<b>240</b>	<b>15</b>	<b>0.1483</b>	<b>2,676.9</b>	<b>2,899.3</b>	<b>6.6628</b>	<b>-</b>
<b>(h)</b>	<b>200</b>	<b>15.5 4</b>	<b>0.0642 7</b>	<b>1,722.97 5</b>	<b>1,822.8</b>	<b>4.3816</b>	<b>50</b>
<b>(i)</b>	<b>140</b>	<b>3.61 3</b>	<b>0.5089</b>	<b>2,550.0</b>	<b>2,733.9</b>	<b>6.9299</b>	<b>100</b>
<b>(j)</b>	<b>280</b>	<b>10</b>	<b>0.2480</b>	<b>2,760.2</b>	<b>3,008.2</b>	<b>7.0465</b>	<b>-</b>
<b>(k)</b>	<b>100</b>	<b>200</b>	<b>1.033 x10<sup>-3</sup></b>	<b>413.39</b>	<b>434.06</b>	<b>1.2916 7</b>	<b>-</b>





## 2.4 COEFICIENTE DE JOULE Y DE THOMSON

# COEFICIENTE DE JOULE Y DE THOMSON

Cuando un fluido pasa por un obstáculo como un tapón poroso, una válvula apenas abierta, un tubo capilar de orificio muy pequeño, etc., disminuye su presión debido al proceso de estrangulamiento a que se sujeta el fluido, la entalpía del fluido permanece aproximadamente constante durante tal proceso de estrangulamiento. Cuando un fluido experimenta una reducción considerable de su temperatura, puede presentarse una disminución en su temperatura, debido al estrangulamiento.

to, lo que constituye la base de operación en los refrigeradores y en la mayor parte de los acondicionadores de aire. Sin embargo, esto no siempre sucede. La temperatura del fluido puede permanecer invariable o es posible incluso que aumente durante un proceso de estrangulamiento.

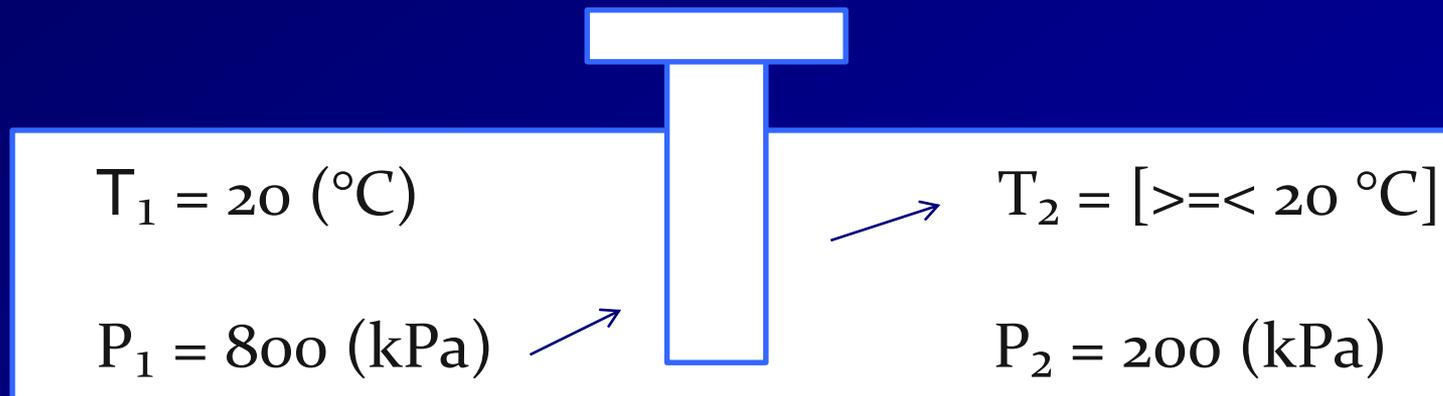


Fig. 2.4.1.

Autor: José Enrique Larios Canale

El comportamiento de la temperatura de un fluido durante un proceso de estrangulamiento ( $h = \text{ctte}$ ) está descrito por el Coeficiente de Joule-Thomson, definido como:

$$\mu = \left( \frac{\partial T}{\partial P} \right)_h$$

El Coeficiente de Joule-Thomson es una medida de cambio en la temperatura con la presión durante un proceso de entalpía constante.

Observe que si:

$$\mu_{JT} \begin{cases} < 0 \text{ la temperatura aumenta.} \\ = 0 \text{ la temperatura permanece constante.} \\ > 0 \text{ la temperatura disminuye.} \end{cases}$$

durante un proceso de estrangulamiento.

Un examen cuidadoso de la ecuación con la que se define, revela que el Coeficiente de Joule-Thomson representa la pendiente de las líneas  $h = \text{ctte}$  en un diagrama T-P. Dichos diagramas pueden construirse con facilidad a partir de mediciones de temperatura y presión fijas  $T_1$  y  $P_1$  (en consecuencia de entalpía fija) es obligado a fluir

por un tapón poroso, y se miden las reducciones de su temperatura y presión ( $T_2$  y  $P_2$ ). El experimento se repite para los tapones porosos de diferentes tamaños, cada uno de ellos con un conjunto diferente de  $T_2$  y  $P_2$ .

Al graficar las temperaturas y las presiones de salida, con diferentes procesos de estrangulamiento, manteniendo las condiciones de temperatura y presión iniciales fijas, se obtiene una línea de  $h = \text{ctte}$  como se muestra en el siguiente diagrama Temperatura-Presión.

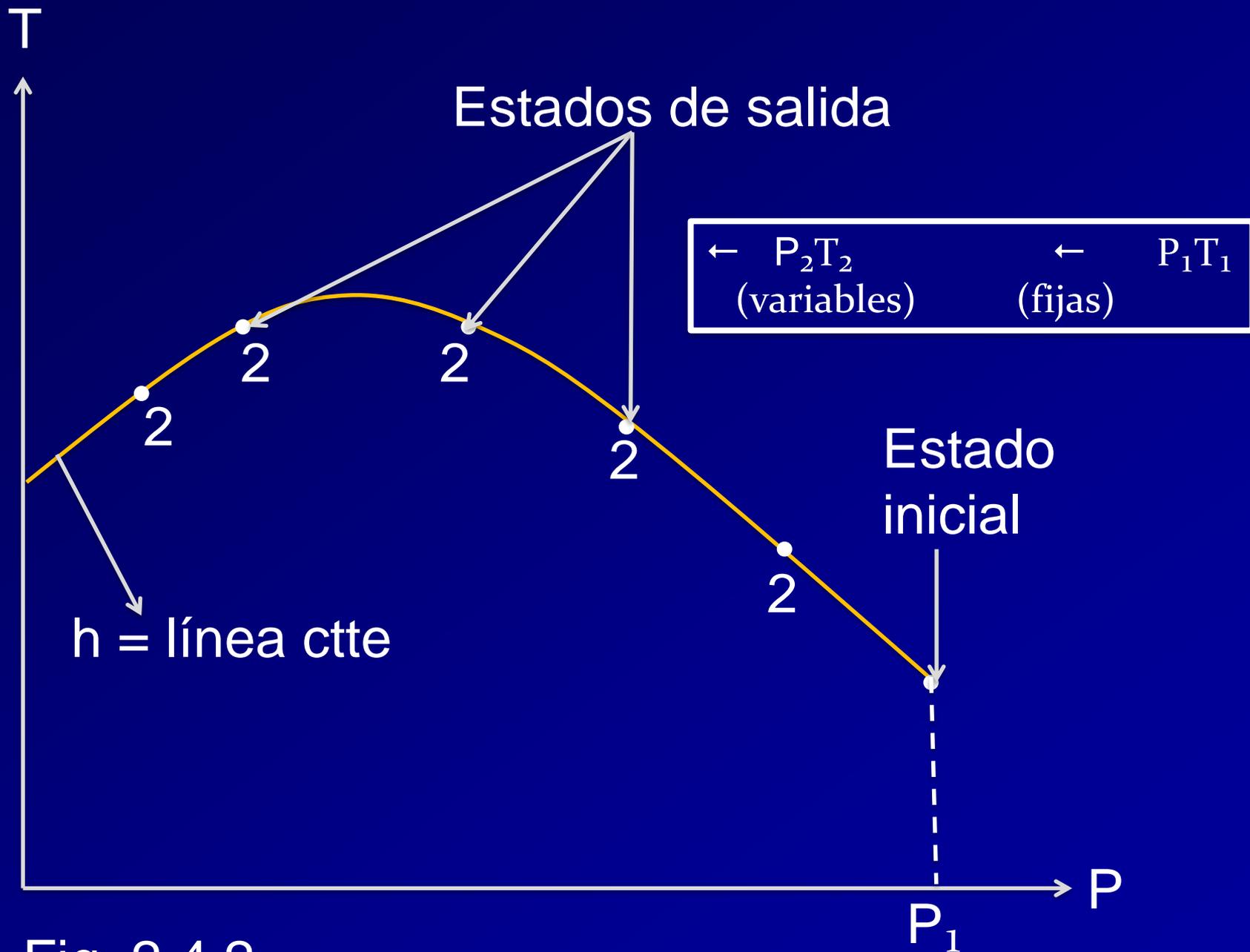


Fig. 2.4.2.

Con la repetición del experimento para diferentes conjuntos de presión y temperatura de entrada y graficando los resultados, se construye un diagrama T-P para una sustancia con varias líneas de  $h = \text{ctte}$ .

Algunas líneas de entalpía constante en el diagrama T-P contienen un punto de pendiente cero o Coeficiente de Joule-Thomson cero. La línea que pasa por estos puntos recibe el nombre de línea de inversión, y la temperatura en un punto donde la línea de entalpía constante intersecta la línea de inversión se conoce como temperatura de inversión.

La temperatura es la intersección de la línea  $P = 0$  (eje de ordenadas) y la parte superior de la línea de inversión recibe el nombre de temperatura máxima de inversión.

Obsérvese que la pendiente de las líneas de  $h = \text{ctte}$  son negativas ( $\mu_{JT} < 0$ ) en estados a la derecha de la línea de inversión, y positivas ( $\mu_{JT} > 0$ ) a la izquierda de ésta.

En estos procesos de estrangulamientos impide el intercambio de calor entre el gas y el medio exterior mediante un aislamiento térmico, para que el proceso sea adiabático.

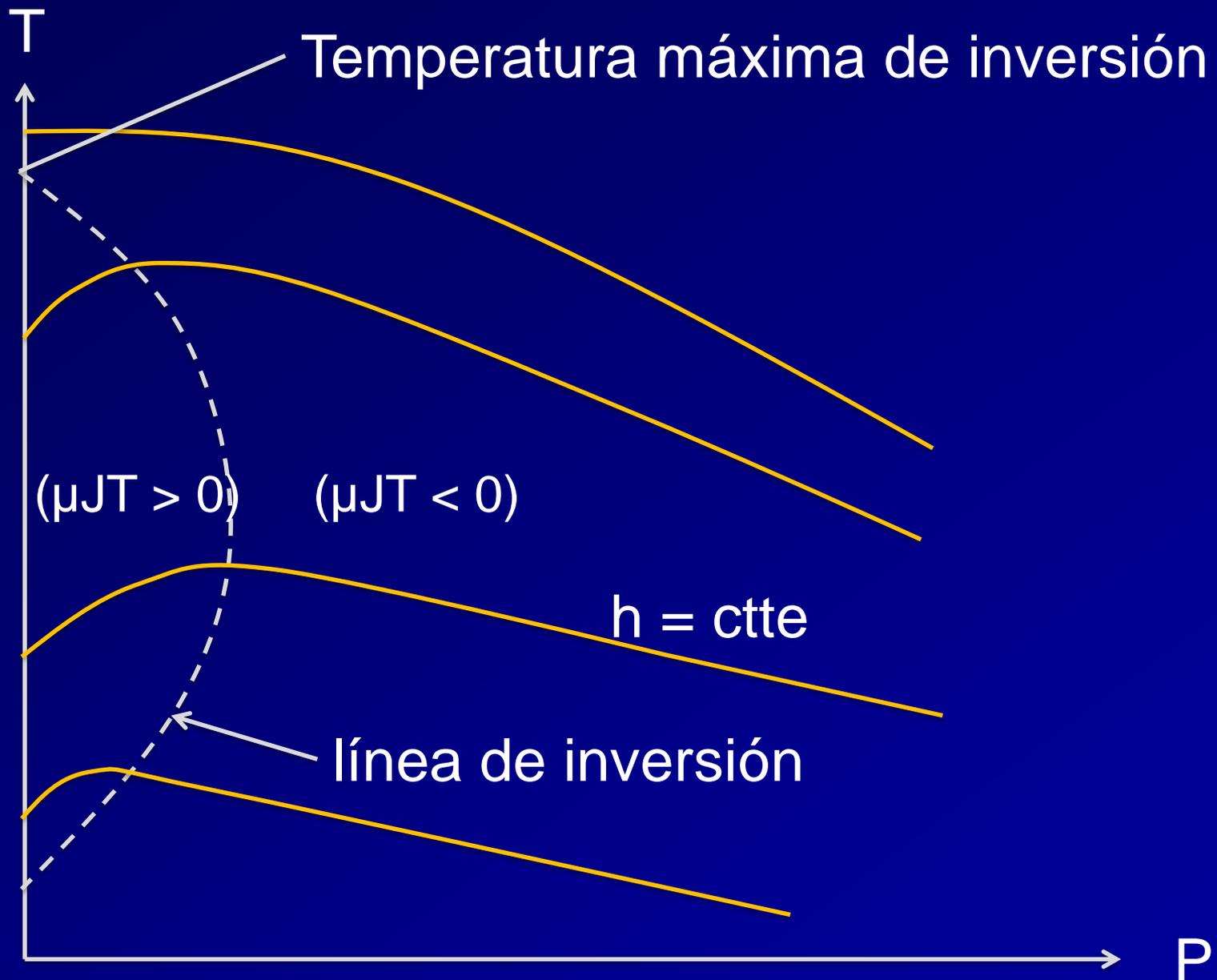


Fig. 2.4.3.

