

# Problemas de termodinámica adaptados a los grados de ingeniería

Vicente Compañ Moreno | Abel García Bernabé

Vicente Compañ Moreno  
Abel García Bernabé

# **Problemas de Termodinámica adaptados a los grados de ingeniería**

Colección *Académica*

Citar como:

Compañ Moreno, V.; García Bernabé, A. (2022). *Problemas de Termodinámica adaptados a los grados de ingeniería*. Valencia: edUPV

© Vicente Compañ Moreno  
Abel García Bernabé

© 2022, edUPV

*Venta:* [www.lalibreria.upv.es](http://www.lalibreria.upv.es) / Ref.: 0227\_05\_01\_01

ISBN: 978-84-9048-594-1

DL: V- 2641-2022

edUPV se compromete con la ecoimpresión y utiliza papeles de proveedores que cumplen con los estándares de sostenibilidad medioambiental <https://editorialupv.webs.upv.es/compromiso-medioambiental/>

Imprime: Byprint Percom, S. L.

Si el lector detecta algún error en el libro o bien quiere contactar con los autores, puede enviar un correo a [edicion@editorial.upv.es](mailto:edicion@editorial.upv.es)

La Editorial UPV autoriza la reproducción, traducción y difusión parcial de la presente publicación con fines científicos, educativos y de investigación que no sean comerciales ni de lucro, siempre que se identifique y se reconozca debidamente a la Editorial UPV, la publicación y los autores. La autorización para reproducir, difundir o traducir el presente estudio, o compilar o crear obras derivadas del mismo en cualquier forma, con fines comerciales/lucrativos o sin ánimo de lucro, deberá solicitarse por escrito al correo [edicion@editorial.upv.es](mailto:edicion@editorial.upv.es)

Impreso en España

# Presentación

La implantación de los nuevos planes de estudio en el curso 2011-2012 en los Grados de Ingeniería (Tecnologías Industriales, Organización Industrial e Ingeniería Química) en la Universidad Politécnica de Valencia ha modificado los temarios y la forma de impartir la asignatura de Termodinámica, pero no los contenidos imprescindibles en la formación de cualquier ingeniero. Las cuestiones y problemas han tenido siempre una gran importancia en el estudio de la termodinámica para ingenieros, y ahora con los nuevos planes de estudio se han convertido en una parte fundamental en la docencia de la asignatura. La asignatura de Termodinámica se imparte en el primer cuatrimestre del segundo semestre del segundo curso de la titulación. Forma parte del módulo 2, común a la Rama Industrial de carácter obligatorio, y al bloque de materia de Termodinámica y Mecánica de Fluidos, junto a las asignaturas de Mecánica de fluidos y Transmisión de calor. Previamente el alumno ha curso asignaturas de Matemáticas, Física I y Química, con lo que disponen de conocimientos básicos para entender y plantear los problemas de la Termodinámica. Entre los conocimientos previos que se recomienda están el cálculo de una y varias variables, las integrales de línea, la mecánica clásica de los sistemas, la química general y la fenomenología de la física básica. Tomando la experiencia de la docencia en las asignaturas de Termodinámica y Ampliación de Termodinámica de los planes antiguos de la titulación de Ingeniero Industrial (plan de 1994), así como la experiencia acumulada durante estos diez años de implantación de los nuevos planes, hemos realizando una nueva colección de cuestiones y problemas de termodinámica adaptada a todos los grados de ingeniería que actualmente se imparten en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de la UPV, y que consideramos aplicable a todos los estudiantes de ingeniería así como a estudiantes de cualquier rama tanto científica como técnica y que abordan por primera vez cuestiones y problemas de Termodinámica. Esta colección de cuestiones y problemas se ha dividido en once capítulos, de acuerdo con el plan de estudio de la asignatura de Termodinámica en los grados de Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales, Grado en Ingeniería de Organización Industrial y Grado en Ingeniería Química. En los dos primeros capítulos se aborda el manejo de tablas, gráficos y usos de ecuaciones de estado para la estimación de propiedades termodinámicas, especialmente

las propiedades  $p$ - $v$ - $T$ . El capítulo 3 se plantean cuestiones y problemas de determinación de calor y trabajo en procesos ideales. Los capítulos 4 y 5 se trabajarán la primera ley de la termodinámica para sistemas cerrados y abiertos, respectivamente. Los capítulos 6 y 7 tratarán las cuestiones y problemas relacionados con la segunda ley de la termodinámica. En los capítulos 8, 9 y 10 se trabajan problemas relacionados con las máquinas térmicas. Finalmente, el último capítulo trata sobre los balances de exergía de algunos sistemas tratados anteriormente. Los conocimientos y habilidades adquiridos en cada capítulo se vuelven a emplear en los capítulos siguientes, tratándose de un aprendizaje de forma continua. Los manejos de las tablas del agua y los gráficos que principalmente se adquieren en el primer capítulo, son utilizados de forma continuada en las resoluciones de las cuestiones y problemas de los capítulos que se consideran a lo largo y ancho del libro. La primera Ley se aplica en todos los capítulos en los que abordamos la segunda Ley (6 y 7), y ambas leyes de la Termodinámica propiciarán al estudiante los conocimientos adecuados para analizar el funcionamiento de las máquinas térmicas, así como la resolución de cualquier problema que quiera plantearse. En este sentido, los problemas que se resuelven en los capítulos 8, 9 y 10, servirán para sentar bien las bases del conocimiento de las máquinas térmicas.

Valencia, septiembre de 2022

# Índice

Presentación .....	III
Capítulo 1: Introducción a la Termodinámica. Conceptos fundamentales. Propiedades p-v-T de sustancias puras.....	1
Capítulo 2: Estimación de propiedades. Principio de los estados correspondientes y correlaciones generalizadas .....	13
Capítulo 3: Calor y trabajo en procesos ideales.....	47
Capítulo 4: Primera ley de la Termodinámica. Balance de energía en sistemas cerrados .....	67
Capítulo 5: Primera ley de la Termodinámica. Balance de energía en sistemas abiertos .....	93
Capítulo 6: Segunda ley de la Termodinámica.....	141
Capítulo 7: Entropía y desigualdad de entropía.....	151
Capítulo 8: Ciclos de turbina de gas.....	163
Capítulo 9: Ciclos de turbina de vapor .....	199
Capítulo 10: Ciclos de máquinas frigoríficas .....	231
Capítulo 11: Análisis exegético de algunos sistemas Termodinámicos.....	239
Anexo 1 .....	251
Anexo 2 .....	257
Anexo 3 .....	265
Referencias.....	281



# Capítulo 1

## Propiedades $p-v-T$ de una sustancia pura

1. Calcule el volumen específico del nitrógeno a 5 MPa y 150 K. Compare con el predicho por la ecuación de gas perfecto.

### Solución

Tomamos el gráfico  $p-h$  del nitrógeno, y buscamos la isobara de 5 MPa y la isoterma de 150 K. La isocora que pasa por la intersección de la isobara e isoterma corresponde a una densidad de  $80 \text{ kg/m}^3$ . El volumen específico será:

$$v = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{80} = 0.0125 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

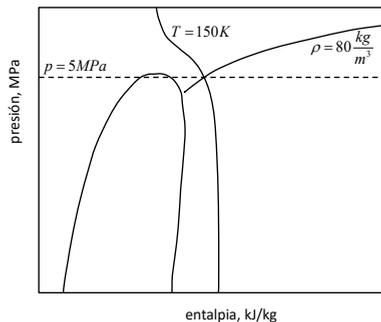


Grafico  $p-h$  del nitrógeno

Considerando que el nitrógeno tiene comportamiento de gas perfecto en esta situación, y tomando la presión como 50 atm y el peso molecular de nitrógeno es de 28 g/mol, el volumen específico será:

$$v = \frac{RT}{p} = \frac{0.082 \frac{\text{atm} \cdot \text{l}}{\text{mol} \cdot \text{K}} 150 \text{ K}}{50 \text{ atm}} \times \frac{1 \text{ mol}}{28 \text{ g}} \times 10^3 \frac{\text{g}}{\text{kg}} \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{l}} = 8.786 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

El error cometido en la suposición del gas perfecto será:

$$\text{error} = 100 \times \frac{(v_{\text{real}} - v_{\text{gas perfecto}})}{v_{\text{real}}} = 100 \times \frac{(0.0125 - 8.786 \times 10^{-3})}{0.0125} = 29.7\%$$

**2. En una botella de 50 litros hay 1 kg de butano. Calcule la temperatura máxima a la que puede ser calentado si solo suporta 10 atm.**

**Solución**

La densidad del butano en la botella será:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{1}{50} = 0.02 \frac{\text{kg}}{\text{l}} = 20 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Tomamos el diagrama  $ph$  del butano, y buscamos la isoterma que pasa por la intersección de la isobara de 1 MPa ( $10\text{atm} \approx 1\text{MPa}$ ) y la isocora de  $20 \text{ kg/m}^3$ , siendo la de  $130^\circ\text{C}$ . Esta es la temperatura máxima que puede soportar el butano en la botella.

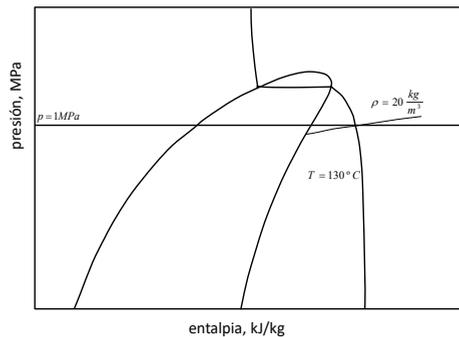


Grafico  $p-h$  del butano

El ingeniero deberá asegurarse que la botella no sobrepase los  $130^\circ\text{C}$  de temperatura y la refrigerar si fuera necesario.

**3. Un tubo sellado de capacidad 0.2 litros contiene propano a  $130^\circ\text{C}$  y una presión desconocida. Se sabe que a  $-30^\circ\text{C}$  aparece gotitas de líquido en su pared. Determina la cantidad de propano y la presión inicial que hay dentro del tubo. Si continuamos licuando el propano conseguiremos que todo el propano pase al estado líquido. ¿Qué volumen de líquido tendremos cuando esté todo el propano licuado?**

**Solución**

La temperatura en punto 1 es de  $130^\circ\text{C}$ , y su densidad será la misma cuando en el propano aparezcan las primeras gotas ( $\rho_1 = \rho_2$ ), porque el volumen del tubo y la cantidad de propano no varían en el enfriado. Además, podemos observar en el diagrama  $p-h$  que la presión inicial del propano es  $0.3 \text{ MPa}$ . El punto 2 es un estado de vapor saturado y se caracteriza en el diagrama  $p-h$  en la parte izquierda de la campana de saturación. El punto 2 será la intersección de la isoterma de  $-30^\circ\text{C}$  y la parte izquierda de la campana de saturación (ver diagrama  $p-h$ ). Por el punto 2 pasa la isocora de  $4 \text{ kg/m}^3$  y la isobara de  $0.18 \text{ MPa}$ . La masa de propano será:

$$m = \rho V = 4 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 0.2\text{l} \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{l}} = 8 \times 10^{-4} \text{kg} = 0.8\text{g}$$

$$p = 0.3\text{MPa}$$

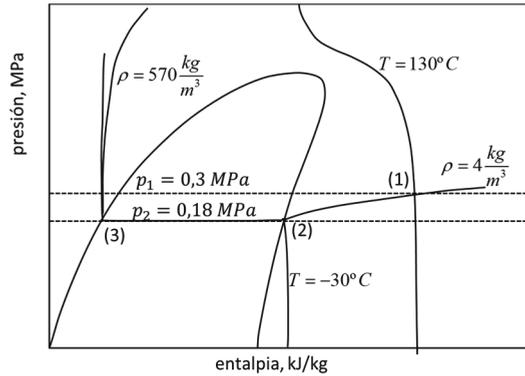


Gráfico p-h del propano

Si el propano sigue licuándose hasta el estado de líquido saturado (punto 3), la presión y temperatura no varían. El punto 3 es la intersección de la isoterma de  $-30^{\circ}\text{C}$  (o la isobara de  $0,18\text{MPa}$ ) con la parte derecha de la campana de saturación (líquido saturado). La isocora que pasa por el punto 3 es de  $570\text{ kg/m}^3$ . El volumen del líquido en el punto 3 será:

$$V = \frac{m}{\rho} = \frac{8 \times 10^{-4} \text{ kg}}{570 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 1,40 \times 10^{-6} \text{ m}^3 = 1,40 \text{ cm}^3$$

**4. Describe el estado de 2 kg de agua contenido en un recipiente de  $8\text{ m}^3$ , cuando la presión es de  $8\text{ kPa}$ .**

**Solución**

El volumen específico del agua será:

$$v = \frac{V}{m} = 4 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

A esta presión, los volúmenes específicos de la fase vapor y de la fase líquida son (ver tablas del agua):  $v_{\text{vapor}} = 18,10 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$  y  $v_{\text{liquido}} = 0,001008 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$ , respectivamente. El volumen específico aparente está comprendido entre estos dos valores  $v_{\text{vapor}} \geq v \geq v_{\text{liquido}}$ , por lo que el estado del agua es líquido-vapor. El título será:

$$x = \frac{v - v_{\text{liquido}}}{v_{\text{vapor}} - v_{\text{liquido}}} = 0,221$$

La temperatura del agua será de  $41,5^{\circ}\text{C}$

**5. Para determinar la masa de propileno que hay en un recipiente cerrado y sellado de 10 litros de volumen a la temperatura de 90°C, se enfría el recipiente hasta que aparezcan las primeras gotas de propileno, alcanzando una temperatura de 10°C. ¿Qué masa de propileno tenemos dentro del recipiente? ¿Cuál es la variación de presión del propileno en el proceso de enfriamiento?**

**Solución**

En el diagrama  $p-h$  del propileno trazamos las isotermas de 90°C (estado inicial) y de 10°C (estado final). El estado final, a su vez, se encuentra en vapor saturado por la aparición de las primeras gotas de propileno. La intersección de la isoterma de 10°C y la curva de la campana de vapor saturado muestra el punto del estado final. La isocora que pasa por el estado final es de 15 kg/m<sup>3</sup>. La densidad inicial y final es la misma por ser un recipiente cerrado y rígido. El estado inicial vendrá representado en el gráfico  $p-h$  en la intersección de la isoterma de 90°C y la isocora de 15 kg/m<sup>3</sup>.

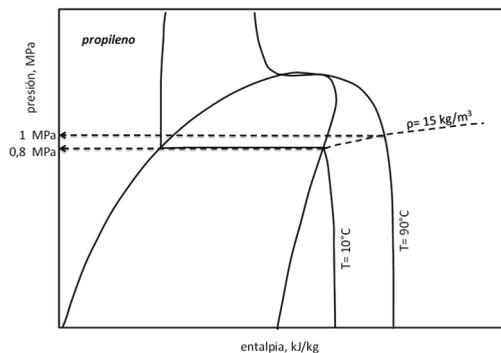


Diagrama  $p-h$  del propileno

La masa de propileno será:

$$m = \rho V = 15 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 10^{-4} \text{ m}^3 = 0.0015 \text{ kg}$$

La presión inicial es de 1 MPa y la final de 0.8 MPa, por lo que la variación de presión será:

$$\Delta p = p_2 - p_1 = 0.8 - 1 = -0.2 \text{ MPa}$$

**6. Calcule la masa del vapor de agua sobrecalentada a una presión de 10 MPa y una temperatura de 500°C en un recipiente de 500 litros de capacidad.**

**Solución**

La densidad del agua sobrecalentada a 10 MPa y 500°C determinada por las tablas de propiedades del agua es 30.5 kg/m<sup>3</sup>. Por lo tanto, la masa del agua sobrecalentada será:

$$m = \rho V = 30.5 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 0.5 \text{ m}^3 = 15.25 \text{ kg}$$

**7. Un sistema cerrado contiene una mezcla con 2 kg de agua líquida y 3 kg de vapor de agua en equilibrio a 0.5 MPa. Determinad la temperatura inicial. Se transfiriere calor al contenido hasta que la temperatura llega a 400 °C. La presión se mantiene constante durante el proceso. Determinad la variación de volumen en el sistema.**

**Solución**

Inicialmente el agua se encuentra en equilibrio líquido-vapor con un título de:

$$x_1 = \frac{m_{\text{vapor}}}{m_{\text{vapor}} + m_{\text{líquido}}} = \frac{2}{2 + 3} = 0.4$$

La temperatura del agua se puede determinar con las tablas de propiedades del agua, obteniendo una temperatura de 151.8°C.

El volumen específico del equilibrio líquido-vapor será:

$$v_1 = x_1 v_{\text{vap}} + (1 - x_1) v_{\text{liq}} = 0.4 \times 0.375 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} + 0.6 \times 0.001093 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} = 0.1507 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

El volumen inicial será:

$$V_1 = m v_1 = 5 \text{kg} \times 0.1507 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} = 0.753 \text{m}^3$$

La densidad final del agua a 400°C y una 0.5 MPa se determina en las tablas de propiedades del agua, siendo  $\rho_2 = 1.620 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ . El volumen final será:

$$V_2 = \frac{m}{\rho_2} = \frac{5 \text{kg}}{1.620 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 3.086 \text{m}^3$$

La variación de volumen será:

$$\Delta V = V_2 - V_1 = 3.086 - 0.753 = 2.333 \text{m}^3$$

**8. Calculad el volumen que ocupa 3 kg de agua a 2 MPa a) 210°C y b) 220°C.**

**Solución**

En las tablas de propiedades del agua determinamos que la densidad del agua a 200°C es de 865 kg/m<sup>3</sup> (estado líquido) y a 225°C es de 9.64 kg/m<sup>3</sup> (estado vapor). La temperatura de ebullición del agua a 2 MPa es de 212.4°C. El agua en el apartado a) se encuentra en estado líquido y en el apartado b) en estado vapor. La densidad del agua saturada a 2 MPa es de 887 kg/m<sup>3</sup>, y la densidad de vapor saturado a 2 MPa es de 10.05 kg/m<sup>3</sup>. La densidad del agua en el apartado a) se determina por interpolación lineal entre el valor a 200°C y la densidad del estado de líquido saturado a 212.4°C

$$\frac{\rho(210) - \rho(212.4)_{\text{líquido saturado}}}{\rho(200) - \rho(212.4)_{\text{líquido saturado}}} = \frac{210 - 212.4}{200 - 212.4}$$

$$\rho(210) = \left( \frac{210 - 212.4}{200 - 212.4} \right) \times (\rho(200) - \rho(212.4)_{\text{líquido saturado}}) + \rho(212.4)_{\text{líquido saturado}}$$

$$\rho(210) = \left( \frac{210 - 212.4}{200 - 212.4} \right) \times (865 - 850) + 850 = 852.9 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

El volumen del agua en el apartado a) será:

$$V = \frac{m}{\rho(210)} = \frac{3\text{kg}}{852.9 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 3.52 \times 10^{-3} \text{m}^3 = 3.52 \text{litros}$$

La densidad del agua en el apartado b) se determina por interpolación lineal entre la densidad del estado de vapor saturado a 212.4°C y el valor de 225°C.

$$\frac{\rho(220) - \rho(212.4)_{\text{vapor saturado}}}{\rho(225) - \rho(212.4)_{\text{vapor saturado}}} = \frac{220 - 212.4}{225 - 212.4}$$

$$\rho(220) = \left( \frac{220 - 212.4}{225 - 212.4} \right) \times (\rho(225) - \rho(212.4)_{\text{vapor saturado}}) + \rho(212.4)_{\text{vapor saturado}}$$

$$\rho(220) = \left( \frac{220 - 212.4}{225 - 212.4} \right) \times (9.64 - 10.05) + 10.05 = 9.80 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

El volumen del agua en el apartado b) será:

$$V = \frac{m}{\rho(220)} = \frac{3\text{kg}}{9.80 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 0.306 \text{m}^3 = 306 \text{litros}$$

La diferencia de volumen entre el apartado a) y el apartado b) es muy grande, teniendo en cuenta que la diferencia de temperatura es de sólo de 10°C. Esta gran diferencia de volumen se debe que el agua se encuentra de un estado diferente.

**9. Los parámetros de la ecuación de Antoine para el argón son A= 15.2330, B= 700.51 K y C = -5.84 K, dando la presión de saturación en mmHg en un intervalo de validez de la ecuación entre 81 y 94 K. Determina la presión de saturación del argón a 90 K y compararla con la obtenida en el gráfico p-h de argón.**

### Solución

Tomando la ecuación de Antoine,  $\ln p^{sat} [\text{mmHg}] = A - \frac{B}{T[\text{K}] + C}$  y sustituyendo los valores de los parámetros de Antoine para el argón, obtenemos el logaritmo neperiano de la presión de saturación a 90K.

$$\ln p^{sat} [\text{mmHg}] = 15.2330 - \frac{700.51}{90 - 5.84} = 6.91$$

Por lo que la presión de saturación será:

$$p^{sat} = 1002.25 \text{mmHg} \times \frac{1}{760 \frac{\text{mmHg}}{\text{atm}}} = 1.32 \text{atm}$$

El diagrama  $p$ - $h$  del argón muestra una isoterma de 90 K que disminuye al aumentar la entalpia hasta que entra en la campana de saturación, donde se hace horizontal. En ese momento nos encontramos en una situación de equilibrio liquido-vapor y la presión de saturación se lee directamente en el diagrama, corresponde a 0.13 MPa, o 1.32 atm, coincidiendo con el valor predicho por la ecuación de Antoine.

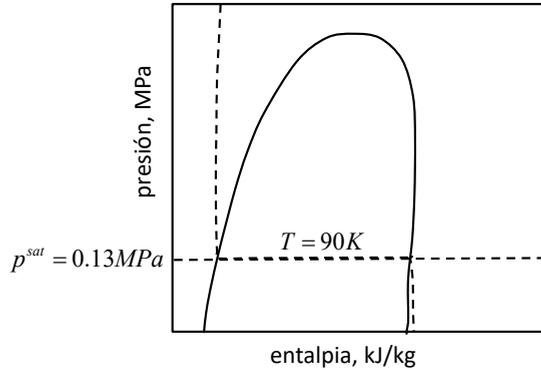


Gráfico  $p$ - $h$  del argón

**10. Veinte kilogramos de agua en equilibrio líquido-vapor ocupan un tanque de  $2 \text{ m}^3$ , siendo  $230^\circ\text{C}$  su temperatura. Calcule la presión en el tanque y la masa de líquido y de vapor presentes.**

**Solución**

La presión en el tanque será la presión que le corresponda al equilibrio l-v. Dicha presión podemos determinarla directamente de las tablas de propiedades del agua correspondiente a la temperatura de saturación  $T=230^\circ\text{C}$ . En las tablas se puede comprobar que el valor de la presión es  $p = 2.8 \text{ MPa}$

El volumen específico del agua es  $v = \frac{V}{m} = \frac{2}{20} = 0.01 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$ , y el título de vapor se determina, tomando los valores de volumen específico de la fase vapor ( $v_{\text{vap}} = 0.0714 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$ ) y de la fase líquida ( $v_{\text{liq}} = 0.001209 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$ ) de las tablas de propiedades del agua:

$$x = \frac{v - v_{\text{liq}}}{v_{\text{vap}} - v_{\text{liq}}} = \frac{0.01 - 0.001209}{0.0714 - 0.001209} = 0.125$$

La masa de la fase vapor y de la fase líquida será;

$$m_{\text{vap}} = x m_{\text{total}} = 0.125 \times 20 = 2.5 \text{ kg}$$

$$m_{\text{liq}} = (1 - x) m_{\text{total}} = 0.875 \times 20 = 17.5 \text{ kg}$$

**11. Cuarenta kilogramos de 1,1-difluoroetano (R-152a) en equilibrio líquido-vapor ocupan un tanque de 5 m<sup>3</sup>, siendo -20°C su temperatura. Calcule la presión en el tanque, así como la masa de líquido y de vapor presentes.**

**Solución**

La presión de saturación del equilibrio de líquido-vapor se lee directamente del gráfico a leer el valor de la presión en el punto de corte de la isoterma con el domo en la línea de líquido saturado. Dicho valor puede comprobarse que es aproximadamente  $p^{sat} = 1.25MPa$ .

La densidad del 1,1-difluoroetano se calcula de la siguiente manera:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{40}{5} = 8 \frac{kg}{m^3}$$

Las densidades de la fase líquida y de la fase vapor, así como la presión del 1,1-difluoroetano se determinan mediante el diagrama  $p-h$ . En la intersección de la isoterma de -20°C con la curva de líquido saturado pasa la isocora de 1000 kg/m<sup>3</sup> que es la densidad de la fase líquida. Del mismo modo, en la intersección de la isoterma de -20°C con la curva de vapor saturado pasa la isocora de 4 kg/m<sup>3</sup> que es la densidad de la fase vapor. La presión de saturación del equilibrio de líquido-vapor se lee directamente y tiene un valor de  $p^{sat} = 1.25MPa$ .

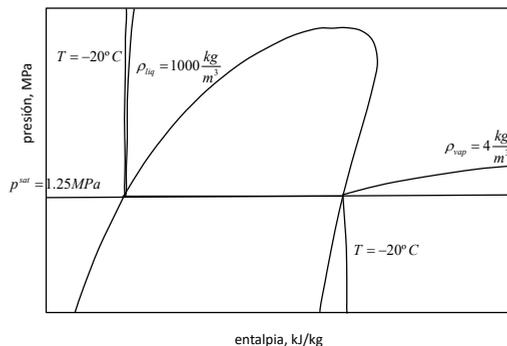


Gráfico  $p-h$  del 1,1-difluoroetano

El título de vapor se determina mediante la expresión siguiente:

$$x = \frac{v - v_{liq}}{v_{vap} - v_{liq}}$$

Siendo los volúmenes específicos las inversas de las densidades, es decir:

$$v = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{8} = 0.125 \frac{m^3}{kg}$$

$$v_{liq} = \frac{1}{\rho_{liq}} = \frac{1}{1000} = 0.001 \frac{m^3}{kg}$$

$$v_{vap} = \frac{1}{\rho_{vap}} = \frac{1}{4} = 0.25 \frac{m^3}{kg}$$

Por lo que el título es:

$$x = \frac{0.0125 - 0.001}{0.25 - 0.001} = 0.046$$

La masa de la fase vapor y de la fase líquida de 1,1-difluoroetano será;

$$m_{\text{vap}} = x m_{\text{total}} = 0.046 \times 40 = 1.84 \text{ kg}$$

$$m_{\text{lig}} = (1 - x) m_{\text{total}} = 0.954 \times 40 = 38.16 \text{ kg}$$

**12. En un depósito rígido se tienen inicialmente 100 kg de agua en equilibrio líquido-vapor con una temperatura y composición:  $t_0 = 221.8^\circ\text{C}$  y  $x_0 = 0.64$ . De este depósito se extraen 20 kg de agua líquida conservando constante la presión y el volumen total. Determinad el volumen total que ocupa entonces el vapor y el volumen específico total del recipiente.**

### Solución

A partir de las tablas del agua se obtiene que la presión de saturación a la temperatura dada ( $t_0 = 221.8^\circ\text{C}$ ) es  $p_{\text{sat}} = 2.4 \text{ MPa}$ .

En caso que no tuviéramos el valor de la presión por lectura directa en las tablas del agua (Tabla de los estados de saturación, entrada por temperaturas ya que este es el dato) se tendría que interpolar entre los valores tabulados más próximos.

Otro modo de obtener la presión de saturación a la temperatura dada puede obtenerse recurriendo a ecuaciones empíricas. Por ejemplo, haciendo uso de la ecuación de Antoine dada por  $\ln p_{\text{sat}} (\text{mmHg}) = A - \frac{B}{T(\text{K}) + C}$ . Donde las constantes de Antoine ( $A$ ,  $B$  y  $C$ ) se

encuentran tabuladas para la mayoría de sustancias. En nuestro caso las constantes de Antoine, para el agua son:  $A = 18,3036$ ,  $B = 3816,44 \text{ K}$  y  $C = -46,13 \text{ K}$ . Con estos valores se deduce que la presión de saturación a  $T = 221,8^\circ\text{C} = 494,95 \text{ K}$ , es:

$$p_{\text{sat}} = 18039.6 \text{ mmHg} = 23.73 \text{ atm} = 23.43 \text{ bar}$$

Como se observa muy próximo al valor encontrado directamente en las tablas.

Los valores de los volúmenes de saturación son:  $v_l = 0.001193 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$  y  $v_g = 0.00832 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$ .

Por tanto, el volumen del tanque puede determinarse del siguiente modo:

$$v = v_l + x(v_g - v_l) = 0.05368 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \Rightarrow V = m \cdot v = 5.368 \text{ m}^3$$

En el estado final, después de extraer 20 kg,  $m_f = 80 \text{ kg}$ , siendo el volumen final el mismo que inicialmente ( $5.368 \text{ m}^3$ ). Por tanto,

$$v = \frac{5,358}{80} = 0.0671 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

**Para seguir leyendo, inicie el  
proceso de compra, click aquí**