



# GUÍA DE ESTUDIO TERMODINÁMICA I

---

## Teoría y Ejercicios Resueltos

Susana Curbelo ♦ Sylvana Derjani

Preparadores: Gustavo Arellano ♦ Carlos Castro ♦ Karina Madrigal

Dpto. de Termodinámica y Fenómenos de Transferencia  
Universidad Simón Bolívar

# Tabla de contenido

## **CAPÍTULO 1**

**¿Qué es la Termodinámica?**

**Conceptos Básicos**

**Propiedades PVT**

**Ejemplos**

**Ejercicios Propuestos**

## **CAPÍTULO 2**

**Sustancias Puras**

**Estimación de propiedades**

**Diagramas Termodinámicos**

**Tablas de Vapor**

**Ecuaciones de Estado**

**Ejemplos**

**Ejercicios Propuestos**

## **CAPÍTULO 3**

**Trabajo Termodinámico**

**Calor**

**1era Ley de la Termodinámica**

**Ejemplos**

**Ejercicios Propuestos**

## **CAPÍTULO 4**

**Máquinas Térmicas**

**Principio de Carnot**

**Entropía**

**2da Ley de la Termodinámica**

**Eficiencia de Segunda Ley**

**Exergía y Disponibilidad**

**Ejemplos**

**Ejercicios Propuestos**

## Definiciones y Conceptos Básicos

Objetivos:

1. Hacer hincapié en la definición del sistema físico y los procesos que sufre el sistema entre estados. Haciendo énfasis en la identificación de estados intermedios.
2. Métodos numéricos para interpolación simple y doble en tabla.
3. Suposiciones básicas necesarias para entrar e interpolar en tablas.
4. Estimación de propiedades volumétricas de sustancia puras que no están tabuladas. Uso ecuaciones de estados y principio de estados correspondientes.

### 1.1 ¿Qué es la termodinámica?

---

La palabra **Termodinámica**, proviene del griego "Thermodynamics" que significa el estudio de las fuerzas que originan el calor. Describe los primeros esfuerzos por convertir calor en potencia. Tiene sus orígenes a mediados del siglo XVIII como consecuencia de la necesidad de describir y optimizar la operación de las máquinas de vapor, por lo que la termodinámica actual es el resultado de más de 250 años de fundamentación teórica y experimental.

Esta definición original en la actualidad a perdido validez, pues la termodinámica hoy día no solo abarca el estudio del calor sino de toda forma de energía y sus transformaciones, por lo que es conocida como "**la Ciencia de la Energía**". Además la termodinámica clásica, que es la abordada en estos cursos básicos, se ocupa de los estados de equilibrios y no de sistemas dinámicos.

Se podría definir la Termodinámica como: **el campo de la física que describe y relaciona las propiedades físicas de sistemas macroscópicos (conjunto de materia que se puede aislar espacialmente y que coexiste con un entorno infinito e imperturbable) de materia y energía.**

La termodinámica, se fundamenta en cuatro Leyes empíricas y provee las bases para describir el comportamiento de sistemas físicos complejos. A través del cálculo de las **propiedades** de un sistema y la deducción de **relaciones entre las propiedades** medibles del sistemas y aquellas otras que no se pueden medir.

## 1.2 Conceptos Básicos

Para estudiar, pues, la termodinámica, es imprescindible empezar dando algunas definiciones, como por ejemplo cuáles y cómo son los sistemas con los que vamos a tratar y las variables de los que depende.

### 1.2.1 Definición de los Sistemas

**Sistema:** Cantidad de materia o región del espacio escogida para su estudio y el cual representa un sub-sistema del universo. El sistema está separado de sus *alrededores* o *entorno*, por medio de una *frontera* la cual puede ser una superficie real o imaginaria que separa el sistema de sus alrededores.

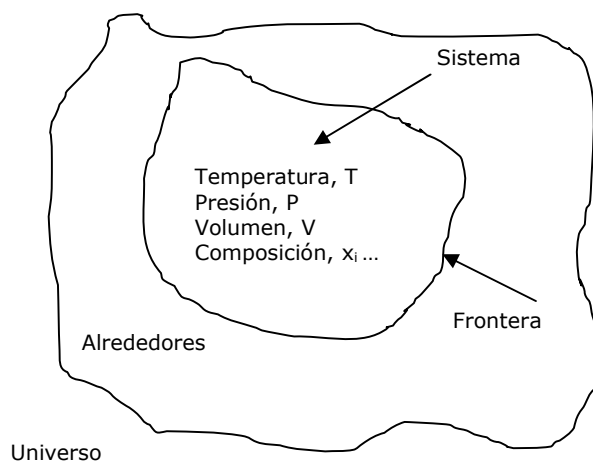
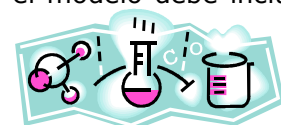


Figura 1.1

### 1.2.2 Clasificación de un Sistema Termodinámico

Desde el punto de vista termodinámico un sistema puede clasificarse tomando de acuerdo a las siguientes consideraciones o categorías:

- **Número de componentes (unario vs multicomponentes):** los sistemas los mas simples de describir son los "unarios", lo cual significa un "solo componente químico" o sustancia pura. Si el sistema posee más de un componente químico se denomina multicomponente y adicionales relaciones deben ser introducidas para describir su comportamiento.
- **Número de fases (homogéneo vs. heterogéneo):** la palabra homogéneo significa una única fase, es decir, sistemas compuestos por más de una fase (Ej. Agua y hielo) son considerados heterogéneos.
- **Habilidad para exhibir reacción química (no reactivo vs reactivo):** Si el sistema muestra la habilidad para exhibir reacción química el modelo debe incluir información referente a dichas reacciones químicas.
- **Permeabilidad de sus fronteras (abierto vs cerrado):**



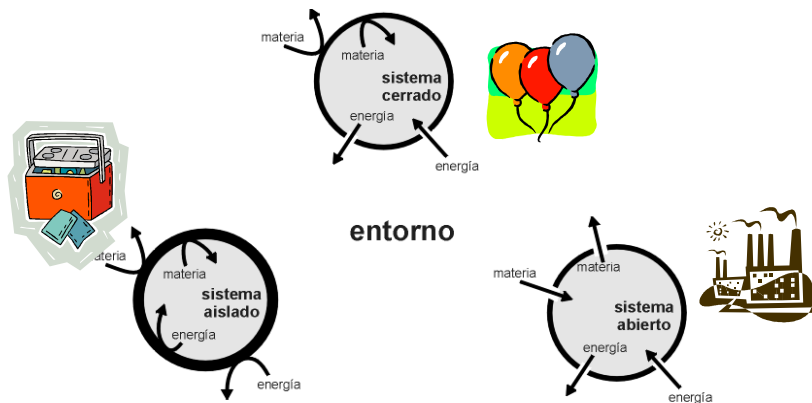


Figura 1.2

### 1.2.3 Tipos de Sistemas según la permeabilidad de sus fronteras:

- **Sistema Cerrado (masa de control):** cuando no existe transferencia de masa a través de la frontera. Aunque si puede existir intercambio de energía (calor y trabajo).
- **Sistema Abierto (volumen de control):** la materia es transferida entre el sistema y sus alrededores. Además puede existir transferencia de energía.
- **Sistema Aislado:** es aquel que no percibe influencia del medio ambiente. Por ejemplo, una cava cerrada.

Para este curso básico se restringirá la atención a sistemas simples, definidos como sistemas que son macroscópicamente homogéneos, isotrópicos, y desprovistos de carga eléctrica, que son lo suficientemente grandes para que los efectos de frontera puedan ser ignorados, y que no se encuentran bajo la acción de campos eléctricos, magnéticos o gravitacionales.

### 1.2.4 Descripción de Sistemas Abiertos

- **Descripción Lagrangiana:** fija una masa de control para el estudio y la sigue en función del tiempo. Esta descripción implica el conocimiento de las ecuaciones de movimiento [ $x(t)$ ,  $v(t)$ , etc.] para la masa de control lo cual no siempre se tiene o pueden resolver con facilidad.

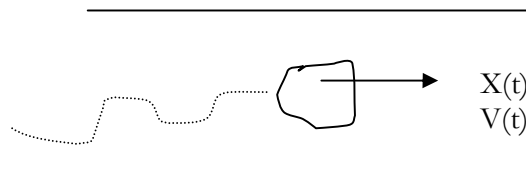


Figura 1.3

- **Descripción Euleriana:** fija un volumen de control a ser estudiado y observa y contabiliza todo lo que entra, sale, aparece, etc. del mismo.

$$\{E\} - \{S\} + \{G\} - \{D\} = \{A\}$$

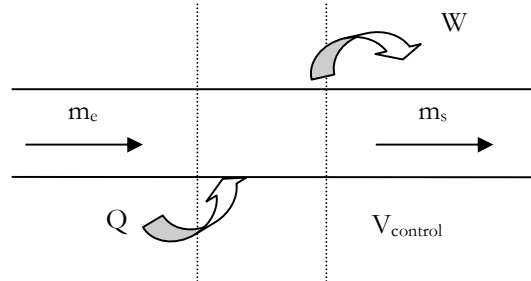


Figura 1.4

## 1.3 Descripción de los sistemas y de su comportamiento

### 1.3.1 Propiedad, Estado y Proceso:

**Propiedad termodinámica:** es toda característica o variable que cuantifica la situación del sistema en un momento dado (masa, volumen, temperatura, energía, etc.). La termodinámica también trata con magnitudes que no son propiedades, tales como flujo de masa y de energía en forma de calor y trabajo.

Aquí vale la pena destacar la diferencia entre una **Función de Estado** y una **Función de trayectoria** o **Variable de Proceso**.

Una **Función de Estado** es una variable que describe la condición de un sistema en un momento dado, es decir, **una propiedad del sistema**, independientemente del camino o proceso efectuado en el sistema para alcanzar el estado. Aquí entrarían la temperatura, la presión, el volumen, la masa, etc.

Mientras que una **Función de trayectoria** o **Variable de Proceso**, son aquellas variables que dependen del proceso experimentado por el sistema, es decir, del camino seguido para la obtención del estado. Este es el caso del calor y el trabajo.

Las propiedades termodinámicas pueden clasificarse en:

- **Propiedades Extensivas:** son aquellas que dependen del tamaño del sistema. Es decir, su valor para un sistema es la suma de los valores correspondientes a las partes en que se le subdivide. Por ejemplo: masa, volumen, energía, etc.)
- **Propiedades Intensivas:** son aquellas que no dependen del tamaño del sistema. Es decir, no son aditivas en el sentido señalado anteriormente. Las mismas pueden ser función de la posición y del tiempo, mientras que las extensivas pueden ser función únicamente del tiempo. Ejemplo de estas son: la temperatura, la presión, el volumen específico, la densidad, entre otras.
- **Propiedades Específicas:** son definidas como una propiedad intensiva por unidad de masa, por ejemplo:  $v=V/m$ ,  $u=U/m$ ,  $s=S/m$ , etc.

**Estado:** es la condición o situación de un sistema definida por sus *propiedades termodinámicas*. Este suele especificarse conocido un subconjunto de propiedades intensivas. Si el sistema en dos momentos distintos presenta los mismos valores en sus propiedades termodinámicas, se dice que está en un mismo estado.

**Proceso:** Cuando un sistema macroscópico pasa de un estado de equilibrio a otro, se dice que tiene lugar un *proceso termodinámico*. Cualquier cambio que experimente un sistema de un estado de equilibrio a otro se llama *proceso* y la serie de estados por los cuales pasa se llama *trayectoria*.

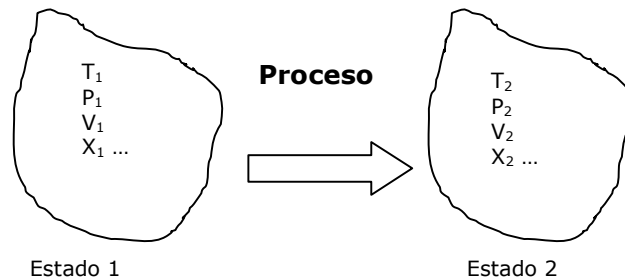


Figura 1.5

Cuando los procesos que se llevan a cabo a un valor de propiedad constante reciben nombres específicos, tales como: Isocóricos ( $v=cte$ ), isobáricos ( $P=cte$ ), isotérmicos ( $T=cte$ ), adiabáticos ( $Q=0$ ), isentálpicos ( $h=cte$ ), isentrópicos ( $s=cte$ ), etc.

Cuando en un sistema se da una secuencia de procesos que inicia y terminan en un mismo estado, y en consecuencia el sistema no experimenta cambio de estado alguno, se habla de un **Ciclo Termodinámico**.

### 1.3.2 Equilibrio termodinámico

La condición de equilibrio Termodinámico implica la no existencia de potenciales desbalanceados o fuerzas impulsoras dentro del sistema. En mecánica implica una condición de equilibrio de fuerzas, pero en termodinámica incluye no solo balance de fuerzas sino de un balance de otras influencias. En tal sentido para que exista equilibrio termodinámico debe haber:

- **Equilibrio térmico:** la temperatura es la misma en cada punto del sistema. Cuando la temperatura del sistema deja de variar con el tiempo.
- **Equilibrio mecánico:** no hay cambio de presión en el sistema
- **Equilibrio de fases:** cuando la masa de cada componente en cada fase permanece constante
- **Equilibrio químico:** si su composición química no cambia, por lo que sus potenciales químicos de cada compuesto en cada fase permanece constante.

Es por ello si un sistema está aislado de su entorno, y no se dan cambios observables en sus propiedades, se puede concluir que el sistema está en un estado de equilibrio. Ya que pese a que no puede interactuar con su entorno por estar aislado su estado podría cambiar como consecuencia de fenómenos espontáneos cuando sus propiedades intensivas evolucionan hacia valores uniformes.

**Proceso de Cuasiequilibrio o Cuasiestático:** es aquel que se desvía del equilibrio termodinámico en un modo infinitesimal. Por lo que todos los estados por donde pasa pueden considerarse estados de equilibrio. Constituye una idealización de muchos procesos reales, de forma de poder emplear modelos sencillos.

## 1.4 Propiedades PVT

---

Dada su relativamente sencilla forma de medición, las propiedades mensurables de mayor interés en termodinámica son el Volumen, la Presión y la Temperatura.

### 1.4.1 Concepto del Continuo

Desde una perspectiva macroscópica, la descripción de la materia se simplifica considerando que está distribuida de modo continuo a lo largo de una región, la validez de esta idealización es conocida como la hipótesis del continuo. La misma se deduce del hecho de que para un conjunto elevado de fenómenos de interés en ingeniería la descripción resultante del comportamiento de la materia está de acuerdo con los datos medidos.

Cuando las sustancia pueden ser tratadas como continuas es posible hablar de propiedades termodinámicas intensivas puntuales.

### 1.4.2 Volumen Específico

El **Volumen** ( $V$ ) es la cantidad de espacio que ocupa un cuerpo y representa el tamaño del sistema. En termodinámica se estila utilizar, la magnitud intensiva del volumen, es decir, el **volumen específico** o volumen por unidad masa, el cual es independiente del tamaño y en este caso es igual al inverso de la densidad.

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

En donde la densidad de acuerdo a la hipótesis del continuo puede ser definida como:

$$\rho = \lim_{V \rightarrow V'} \left( \frac{m}{V} \right)$$

donde  $V'$  es el menor volumen para el cual el sistema puede considerarse como continuo, es decir, dicho volumen contiene suficientes partículas para que los promedios estadísticos sean significativos.

**Unidades:** La unidad de medida de volumen en el Sistema Métrico Decimal es el metro cúbico, aunque el SI, también acepta (temporalmente) el litro y el mililitro que se utilizan comúnmente en la vida práctica.

$$[V] = m^3$$

Por lo tanto,  $[v] = m^3 / kg, cm^3 / g, pie^3 / lb_m$



Cuando resulta conveniente expresar dichas propiedades en términos molares, se divide la expresión por el Peso Molecular (PM) de la especie, obteniéndose:

$$\bar{v} = PM \cdot v \quad [\bar{v}] = m^3 / kmol, cm^3 / gmol, pie^3 / lbmol$$

**Medición:** El procedimiento a seguir para medir el volumen de un objeto, dependerá del estado en que se encuentre: gaseoso, líquido o sólido. En el caso de gases el volumen varía considerablemente según la temperatura y presión; también depende de si está o no contenido en un recipiente y, si lo está, adoptará la forma y el tamaño de dicho recipiente. Para medir el volumen de un líquido, se emplean diversos recipientes graduados, dependiendo de la exactitud con la que se desee conocer dicho volumen. Algunos sólidos tienen formas sencillas y su volumen puede calcularse en base a la geometría clásica. Por ejemplo, el volumen de un sólido puede calcularse aplicando conocimiento que proviene de la geometría.

Cuando un sólido no tiene una forma geométrica que permita determinar por cálculo su volumen, este se puede medir mediante la Técnica de **desplazamiento de líquido**, basada en el principio de Arquímedes. Por ejemplo, si se desea saber el volumen de una piedra pequeña, esta se puede sumergir en un recipiente graduado con un líquido. El aumento de nivel del líquido permitirá, por sustracción, determinar el volumen del sólido. Normalmente el líquido empleado será agua, pero si el sólido se disuelve en ella (por ejemplo la sal o el azúcar) se emplea otro líquido que no disuelva al sólido.

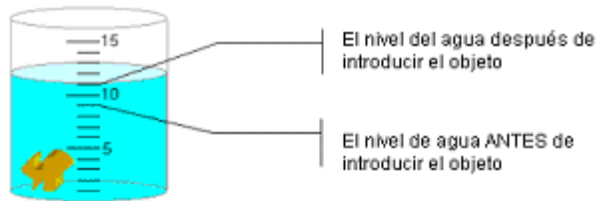


Figura 1.6

Otra manera de conocer el volumen de un sólido cuando no tiene una forma geométrica que permita calcular su volumen a través de las fórmulas conocidas es a través del **Principio de Cavalieri**. Veamos un ejemplo que visualiza este principio. Usando tres montoncitos de 15 fichas (monedas u objetos similares, todos iguales) y una cinta de cartulina cuyo ancho sea mayor que el diámetro de las fichas, ordena las fichas en 3 pilas de modo que sólo una sea recta y las otras dos sean oblicuas o sinuosas y a continuación pasa la cinta entre las fichas a la misma altura en las tres pilas.



Figura 1.7

Notarás que las áreas de las fichas que tocan la cinta son iguales para las tres pilas y si pasas la cinta a cualquier otra altura, las áreas de las fichas siguen siendo iguales. El Principio de Cavalieri asegura que si esto ocurre para cualquier altura entonces las tres pilas tienen el mismo volumen. Esta teoría estudia las magnitudes geométricas como compuestas de un número infinito de elementos, o indivisibles, que son los últimos términos de la descomposición que se puede hacer. La medida de las longitudes, de las superficies y de los volúmenes se convierte en efectuar la suma de la infinidad de

indivisibles: es el principio del cálculo de una integral definida. También puede ser considerado como el precursor del análisis infinitesimal moderno

### 1.4.3 Presión

Se define como la fuerza que ejercen las partículas de un fluido cuando chocan con recipiente que las contiene por unidad de área. La contraparte de la presión en sólidos es el *Esfuerzo*. Fuerza impulsora del trabajo de expansión.

$$P = \lim_{A \rightarrow A'} \frac{F_{Normal}}{A}$$

donde  $A'$  es la menor área para el cual el sistema puede considerarse como continuo.

**Unidades:** En el sistema internacional la presión y el esfuerzo son medidos en pascales, y sus múltiplos (kPa, Mpa, etc),

$$Pa = 1N/m^2$$

Mientras que en el sistema inglés se encuentran: los  $Psi = lb_f/in^2$ . Otras unidades de común uso para la presión son: *bar, atm, mmHg, etc*. La presión atmosférica estándar se puede definir como:

$$1atm = \begin{cases} 101,325kPa \\ 14,696 lb_f/in^2 \end{cases}$$

**Escalas:** Se puede hablar de dos escalas de presión una *escala absoluta* y una *escala relativa*.

- o **La Presión Absoluta:** es la presión real del fluido medida con respecto al cero absoluto de presión o vacío perfecto. Este es un punto teórico que corresponde al momento en el cual las moléculas del gas no se mueven, y coincide con el cero absoluto de temperatura.
- o **La Presión relativa o manométrica:** es aquella medida con respecto a una presión de referencia, generalmente la presión de la atmósfera local donde opera el instrumento. En estos términos, uno podría definir una *presión de vacío* como aquellos valores que están por debajo de la presión atmosférica local.

$$P_{abs} = P_{man} + P_{atm}$$

Generalmente, se suele diferenciar un valor de presión relativa de la presión absoluta del fluido colocando una *g* al final de la unidad correspondiente: *psig, barg, etc*.

**Medición:** el instrumento empleado para medir presión se denomina *manómetro* y existen diversas versiones del mismo basados en principios físicos diferentes, generalmente principios hidroestáticos  $p = p_{atm} + \rho gh$ . Podemos encontrar por ejemplo: manómetro tipo U, Reloj o Bourdon, piezómetros, etc.



#### 1.4.4 Temperatura

Una conveniente definición operacional de la temperatura es que es una medida de la energía cinética trasnacional promedio asociada con el movimiento microscópico de los átomos y moléculas.

De una manera cualitativa, se puede describir la temperatura de un objeto como aquella determinada por la sensación de tibio o frío al estar en contacto con él.

Es fácil demostrar que cuando dos objetos se colocan juntos (los físicos lo definen como contacto térmico), el objeto caliente se enfría mientras que el más frío se calienta hasta un punto en el cual no ocurren más cambios, momento en el cual se dice que se ha alcanzado el *equilibrio térmico*. Ahora si dos sistemas están separadamente en equilibrio térmico con un tercero, entonces ellos deben estar en equilibrio térmico entre sí. Esta es la llamada **Ley Cero de la Termodinámica** y puede ser escrita más formalmente como:

*"Si tres o más sistemas están en contacto térmico entre si y todos en equilibrio al mismo tiempo, entonces cualquier par que se tome separadamente están en equilibrio entre sí".* (Quinn, T.J. "Temperature").

**Escala y Unidades:** para la temperatura se dispone de dos escalas de medición, una absoluta y otra relativa. La **escala absoluta**, es referida al cero absoluto de temperatura, valor teórico referido al estado en el cual las moléculas no se mueven. En el SI la unidad para esta escala es el Kelvin, mientras que en el sistema anglosajón es el Ranking.

$$[T_{abs}] = K, ^\circ R$$

Por su parte en la **escala relativa** se toma como referencia dos temperaturas características de cambio de fases de una sustancia pura a presión constante. Para esta escala, el SI usa los grados Celsius y el inglés los grados Fahrenheit.

$$[T_{rel}] = ^\circ C, ^\circ F$$

La escala Celsius, tiene la misma magnitud que el kelvin, así las diferencia de temperaturas son idénticas en ambas escalas, aunque el cero se encuentre desplazado en 273,15 unidades. La escala Ranking es proporcional a la temperatura Kelvin:

$$T(^{\circ}R) = 1,8T(K)$$

En la escala Fahrenheit se emplea un grado del mismo tamaño que el de la escala Ranking pero el cero está desplazado. La relación entre ellas puede visualizarse en la figura siguiente:

	373,15 K	100 °C	212 °F	671,7 R
Punto de Ebullición del Agua Pura A 1 atm				
	273,15	0	32	491,7
Punto de Congelación del Agua Pura A 1 atm				
Cero Absoluto	0	-273,15	-459,7	0

$$T(K) = T(^{\circ}C) + 273.15 \quad T(^{\circ}F) = 1,8T(^{\circ}C) + 32 \quad T(^{\circ}R) = T(^{\circ}F) + 459,7 \quad T(^{\circ}R) = 1,8T(K)$$

**Medición:** el *termómetro* es un instrumento que mide la temperatura de un sistema en forma cuantitativa. Hay diversos tipos de termómetro, pero en general, todos miden temperatura de forma indirecta, a partir de la medición otra propiedad dependiente de la temperatura del sistema o **propiedad termométrica**.

- El volumen de un gas a presión constante
- La presión de un gas a volumen constante
- La resistencia eléctrica a tensión mecánica constante
- Fuerza electromotriz a tensión mecánica constante
- Radiación térmica a altas temperaturas

El método empleado en la actualidad consiste en relacionar la temperatura empírica con la propiedad termométrica de modo que sean directamente proporcionales. Esta relación es arbitraria, y permite establecer la escala a partir de un único punto fijo cuya temperatura se decide en convención. El punto fijo elegido es el punto triple del agua, en el que coexisten en el equilibrio agua en forma de sólido, líquido y vapor. El valor de temperatura asignado al punto triple es 273.16 K. Ejemplos de estos son:

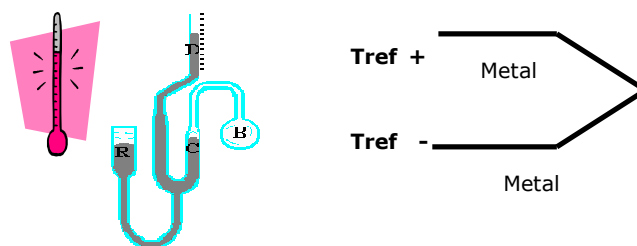


Figura 1.8. (a) Termómetro de bulbo, (b) de gas a volumen constante, (c) termopar

### 1.4.5 Dispositivos Cilindro-Pistón

Estos dispositivos, como su nombre lo indica, consisten en un tanque cilíndrico cuya tapa consta de un émbolo o pistón movable. Dada la fácil visualización y estimación de propiedades como presión y volumen, ante interacciones de energía, los mismos representan una herramienta importante y sencilla en el estudio del comportamiento volumétrico de fluidos. Por ejemplo, para el sistema de la figura, en el cual el pistón se encuentra en equilibrio mecánico con su atmósfera:

$$\text{Volumen: } V = A.h$$

$$\text{Presión: } P = P_{atm} + \frac{m_p g}{A}$$

Donde:

A: es el área de la base del cilindro

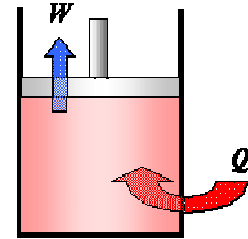
h: es la altura del pistón.

$m_p$ : la masa del pistón

g: la aceleración de gravedad

$P_{atm}$ : la presión atmosférica

Figura 1.9



## 1.5 Problemas Resueltos

---

► 1.1 Expresar las siguientes magnitudes en las unidades requeridas:

a. 1.82 BTU/h ft<sup>2</sup> °F en W/m<sup>2</sup> K

$$1,82 \frac{BTU}{h \cdot ft^2 \cdot ^\circ F} \left( \frac{1h}{3600s} \right) \left( \frac{1,055kW}{1 BTU/s} \right) \left( \frac{1000kW}{1kW} \right) \left( \frac{1ft}{30,48cm} \right)^2 \left( \frac{100cm}{1m} \right)^2 \left( \frac{1,8^\circ F}{1K} \right) = 10,334 \frac{W}{m^2 K}$$

b. 5.30 bar en kPa, mmHg, psi

$$5,30bar \left( \frac{10^5 Pa}{1bar} \right) \left( \frac{1kPa}{1000Pa} \right) = 530kPa$$

$$5,30bar \left( \frac{1atm}{1,01325bar} \right) \left( \frac{760mmHg}{1atm} \right) = 3975,3mmHg$$

$$5,30bar \left( \frac{1atm}{1,01325bar} \right) \left( \frac{14,7psia}{1atm} \right) = 76,8psia$$

c. 6 kW/m K en BTU/h ft °R

$$6 \frac{kW}{mK} \left( \frac{1 BTU/s}{1,055kW} \right) \left( \frac{3600s}{1in} \right) \left( \frac{1m}{100cm} \right) \left( \frac{30,48cm}{1ft} \right) \left( \frac{1K}{1,8^\circ R} \right) = 3466,91 \frac{BTU}{h ft^\circ R}$$

d. 18.3 lb<sub>f</sub>/in<sup>2</sup> en kg<sub>f</sub>/cm<sup>2</sup> y kN/m<sup>2</sup>

$$18,3 \frac{lb_f}{in^2} \left( \frac{4,45N}{1lb_f} \right) \left( \frac{1kg_f}{9,8N} \right) \left( \frac{1in}{2,54cm} \right)^2 = 1,288 \frac{kg_f}{cm^2}$$

$$18,3 \frac{lb_f}{in^2} \left( \frac{4,45N}{1lb_f} \right) \left( \frac{1kN}{1000N} \right) \left( \frac{1in}{2,54cm} \right)^2 \left( \frac{100cm}{1m} \right)^2 = 126,224 \frac{kN}{m^2}$$

e. 23 g/l en lb<sub>m</sub>/ft<sup>3</sup>

$$23 \frac{g}{L} \left( \frac{1kg}{1000g} \right) \left( \frac{2,2046lb_m}{1kg} \right) \left( \frac{1L}{0,0353ft^3} \right) = 1,436 \frac{lb_m}{ft^3}$$

f. 20 m/min en ft/s

$$20 \frac{m}{min} \left( \frac{1min}{60s} \right) \left( \frac{3,2808ft}{1m} \right) = 1,0936 \frac{ft}{s}$$

g. 35 kJ/kg en BTU/lb y cal/g

$$35 \frac{kJ}{kg} \left( \frac{0,42992 \text{ BTU/lb}}{1 \text{ kJ/kg}} \right) = 15,0472 \frac{\text{BTU}}{\text{lb}}$$

$$35 \frac{kJ}{kg} \left( \frac{1000J}{1kJ} \right) \left( \frac{1cal}{4,184J} \right) \left( \frac{1kg}{1000g} \right) = 8,365 \frac{cal}{g}$$

h. 10.6 cal/gmol °C en BTU/lbmol. °F

$$10,6 \frac{cal}{gmol^{\circ}C} \left( \frac{1kcal}{1000cal} \right) \left( \frac{3,9657\text{BTU}}{1kcal} \right) \left( \frac{1000g}{1kg} \right) \left( \frac{1kg}{2,205lb} \right) \left( \frac{1^{\circ}C}{1,8^{\circ}F} \right) = 10,591 \frac{\text{BTU}}{\text{lbmol}^{\circ}F}$$

i. 15 lbmol/ft<sup>3</sup>.s en gmol/m<sup>3</sup>.s

$$15 \frac{\text{lbmol}}{\text{ft}^3\text{seg}} \left( \frac{1kg}{2,205lb} \right) \left( \frac{1000g}{1kg} \right) \left( \frac{1\text{ft}^3}{0,028317\text{m}^3} \right) = 240234,53 \frac{\text{gmol}}{\text{m}^3\text{seg}}$$

► **1.2** Bajo ciertas circunstancias la variación de la densidad con la temperatura se puede modelar mediante una relación lineal de la forma:  $\rho = \rho_0 + AT$ , donde:

$\rho$  = densidad a la temperatura T (lb<sub>m</sub>/ft<sup>3</sup>)

$\rho_0$  = densidad a la temperatura T<sub>0</sub> de referencia (lb<sub>m</sub>/ft<sup>3</sup>)

T = temperatura (°F)

a. Si la ecuación es dimensionalmente consistente determine las unidades de A

b. Si para el agua líquida  $A = -7.116 \times 10^{-3}$  en las unidades correspondientes, cuáles serían sus nuevos valores si se requiere trabajar en el sistema internacional ( $\rho$  en kg/m<sup>3</sup> y T en K)

**Solución:**

**Parte a.**  $\rho = \rho_0 + AT$

Dimensionalmente:  $\left[ \frac{M}{L^3} \right] = \left[ \frac{M}{L^3} \right] + [A][\theta]$ , sustituyendo por las unidades

correspondientes en el sistema inglés:  $\left[ \frac{\text{lb}_m}{\text{ft}^3} \right] = \left[ \frac{\text{lb}_m}{\text{ft}^3} \right] + [A][^{\circ}F] \Rightarrow A = \left[ \frac{\text{lb}_m}{\text{ft}^3 \cdot ^{\circ}F} \right]$

**Parte b.** Desarrollando el factor de conversión queda:

$$-7,116 \times 10^{-3} \frac{\text{lb}_m}{\text{ft}^3 \cdot ^{\circ}F} \left( \frac{1kg}{2,2046\text{lb}_m} \right) \left( \frac{35,315\text{ft}^3}{1\text{m}^3} \right) \left( \frac{1,8^{\circ}F}{1K} \right) = -0,205 \frac{kg}{\text{m}^3 K}$$

► **1.3** Se tiene el sistema mostrado en la figura 1. Al recipiente A está conectado un manómetro diferencial cuyo fluido manométrico tiene una densidad de  $13,6 \text{ g/cc}$  y muestra una lectura de  $h = 1 \text{ m}$ . La lectura del manómetro de Bourdon conectado al recipiente B es de  $500 \text{ kPa}$  y el que está conectado al recipiente C indica una lectura de  $200 \text{ kPa}$ . Determinar las presiones absolutas en los tres recipientes. Considere una presión atmosférica de  $100 \text{ kPa}$  y una  $g = 10 \text{ m/s}^2$ .

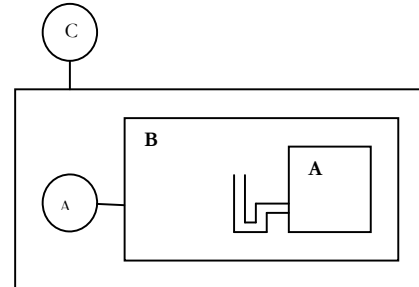


Figura 1.3

**Solución:**

Primero se estudia el recipiente C junto con el manómetro de Bourdon conectado a este recipiente.

$$P_C = P_{man-c} + P_{atm}$$

$$P_C = 200 \text{ kPa} + 100 \text{ kPa}$$

$$P_C = 300 \text{ kPa}$$

Con el recipiente B ocurre lo mismo, pero en este caso la presión se compara con la del recipiente C. Esto es, ya no se toma en cuenta la presión atmosférica, sino  $P_C$ :

$$P_B = P_{man-B} + P_C$$

$$P_B = 500 \text{ kPa} + 300 \text{ kPa}$$

$$P_B = 800 \text{ kPa}$$

Al recipiente A está conectado un manómetro diferencial, si sabemos que  $\rho = 13,6 \text{ g/cc}$  y  $\Delta h = 1 \text{ m}$ . Entonces:

$$P_A = P_B + gh\rho$$

$$P_A = 800 \text{ kPa} + 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} (1 \text{ m}) \left( 13,6 \frac{\text{g}}{\text{cc}} \right) \left( \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} \right) \left( \frac{100 \text{ cm}}{1 \text{ m}} \right)^3$$

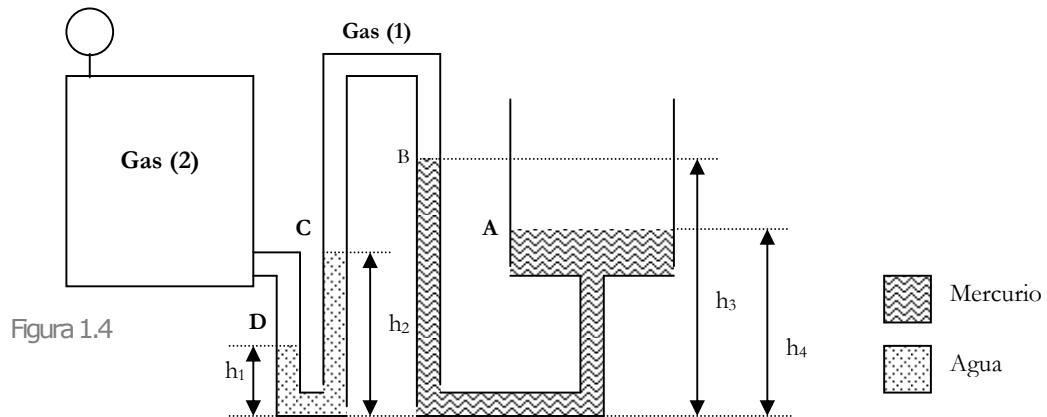
$$P_A = 800 \text{ kPa} + 136000 \text{ Pa} \left( \frac{1 \text{ kPa}}{1000 \text{ Pa}} \right)$$

$$P_A = 800 \text{ kPa} + 136 \text{ kPa}$$

$$P_A = 936 \text{ kPa}$$



- **1.4** Para el sistema mostrado en la figura 2, determine:
- la presión del Gas 1 y del Gas 2
  - lectura del manómetro Bourdon ubicado en el tanque 2.



**Solución:**

- La presión del gas 1 y la del gas 2

Cálculo de la Presión del gas 1:

$$P_B - P_A = -g\rho_{Hg}(h_3 - h_4)$$

$$P_A = P_{atm}$$

como  $P_B = P_{gas_1}$  debido que para un gas la presión no varía lo suficiente con la altura por ello se hizo esa consideración.

$$\Rightarrow P_{gas_1} = P_{atm} + g\rho_{Hg}(h_4 - h_3)$$

Cálculo de la Presión del gas 2:

$$P_D - P_C = g\rho_{H_2O}(h_2 - h_1)$$

Si:

$$P_C = P_B = P_{gas_1}$$

$$P_D = P_{gas_2}$$

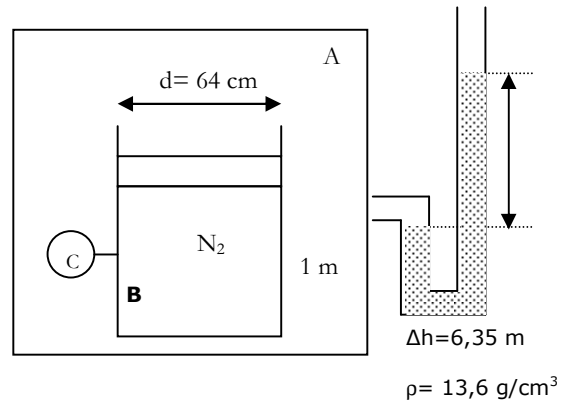
$$\Rightarrow P_{gas_2} = P_{atm} + g\rho_{Hg}(h_4 - h_3) + g\rho_{H_2O}(h_2 - h_1)$$

- Lectura del manómetro Bourdon

$$P_2 - P_{atm} = P_{man}$$

$$P_{man} = g[\rho_{H_2O}(h_2 - h_1) + \rho_{Hg}(h_3 - h_4)]$$

► **1.5** En el interior de un recipiente hermético se tiene un sistema cilindro pistón-ideal, que contiene 50 kg de nitrógeno a una temperatura de  $-170\text{ }^{\circ}\text{C}$ , tan y como se muestra en la figura. Si la presión atmosférica es de 100 kPa y la aceleración de gravedad es de  $10\text{ m/s}^2$ , determine la masa del pistón y la lectura en el manómetro C.



**Solución:**

Como piden la masa del pistón, se realiza el balance de fuerzas sobre el mismo de forma de relacionar el peso del pistón con el resto de las fuerzas involucradas:

**Balance de Fuerzas:**

$$P_B A = mg + P_A A \rightarrow m_p = \frac{(P_B - P_A)A}{g} \quad (1)$$

Ahora se requieren calcular las presiones en los compartimientos A y B así como el área del pistón:

$$A = \pi r^2 = \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 \rightarrow A = 3,4159(0,32)^2 = 0,3217\text{m}^2 \quad (2)$$

La presión en A se obtiene de la lectura del manómetro en "U" sabiendo que:

$$P_A = P_o + \rho g \Delta h \quad (3)$$

$$P_A = 100.000\text{Pa} + (13600\text{kg} / \text{m}^3)(10\text{ m} / \text{s}^2)(6.35\text{m}) = 963.600\text{Pa} = 963,6\text{kPa}$$

La presión en B, viene dada por la presión de  $\text{N}_2$  a las condiciones de:

$T_B =$	-170	$^{\circ}\text{C}$
$h_B =$	1	m
$D =$	0,64	m
$m_B =$	50	kg

$$V_B = h_B A = 0,3217\text{m}^3 \rightarrow v_B = \frac{V_B}{m} = 0.00643\text{m}^3 / \text{kg} \quad (4)$$

De las tablas de vapor en saturación vemos que

$$v_f = 0,00150 < v = 0,00643 < v_g = 0,02562(m^3 / kg) \rightarrow L+V,$$

Por tanto:  $P_B = P^{sat}(T_B) = 971,34kPa$

De la ecuación (1) se obtiene:

$$m_p = \frac{(P_B - P_A)A}{g} = \frac{(971,34 - 963,6)kPa \cdot 0,3217m^2}{10m / s^2} = 249kg$$

$$\therefore m_p = 249kg$$

1.6 El manómetro marca la presión en B relativa a A, por tanto:

$$P^m_C = P_B - P_A = 7,74kPa$$

---

## Estimación de Propiedades Termodinámicas de Sustancias Puras

Se describirán las herramientas disponibles para estimar propiedades de las Sustancias Puras, como lo son los Diagramas Termodinámicos, las Tablas de Vapor, las Ecuaciones de Estado y el Diagrama de Compresibilidad

### 2.1. Descripción de Sistemas Simples

---

El estado de un sistema macroscópico en equilibrio puede describirse mediante variables termodinámicas, propiedades medibles como la temperatura, la presión o el volumen. Es posible identificar y relacionar entre sí muchas otras variables (como la densidad, el calor específico, la compresibilidad o el coeficiente de expansión térmica), con lo que se obtiene una descripción más completa de un sistema y de su relación con el entorno.

Sin embargo, el sistema más simple a describir, viene a ser una **sustancia pura** ( $H_2O$ ,  $NH_3$ ,  $CO_2$ , etc) o mezclas uniformes de gases no reactivos (composición química fija) (Aire (g)), en una o varias fases. Según esto no hace falta medir todas las propiedades intensivas para definir el estado termodinámico del sistema. Estos sistemas se clasifican comúnmente como **sistemas simples compresibles**.

#### 2.1.1 Sustancia Pura y Fases de una Sustancia Pura

**Sustancia pura:** es aquella que es uniforme e invariable en su composición química. Una sustancia pura puede existir en más de una fase, pero su composición química debe ser la misma en cada fase.

**Fase:** es toda cantidad homogénea y uniforme de materia, tanto en términos de su composición química como de su estructura física o **estado de agregación**, es decir, que la materia es toda **sólida**, o toda **líquida** o toda **gaseosa**. En un sistema puede existir más de una fase.

Las fases encontradas comúnmente en la naturaleza son la: sólida, líquida y gaseosa.

- Un **sólido**, es caracterizado porque opone resistencia a los cambios de forma y los cambios de volumen. Son agregados generalmente rígidos, incompresibles, duros y resistentes. Poseen volumen constante y no se difunden, ya que no pueden desplazarse. Manteniendo constante la presión, a baja temperatura los cuerpos se presentan en forma sólida tal que los átomos se encuentran entrelazados formando generalmente estructuras cristalinas, lo que confiere al cuerpo la capacidad de soportar fuerzas sin deformación aparente.
- Un **líquido** es un fluido cuyo volumen es constante en condiciones de temperatura y presión constante, y su forma es definida por su contenedor. Las moléculas en el estado líquido ocupan posiciones al azar que varían con el tiempo. Las distancias intermoleculares son constantes dentro de un estrecho margen. Los líquidos presentan tensión superficial y capilaridad, generalmente se expanden cuando se incrementa su temperatura y se comprimen cuando se enfrían.
- Un **gas** es un estado de agregación de la materia en el cual las fuerzas interatómicas o intermoleculares de una sustancia son tan pequeñas que no adopta ni forma un volumen fijo, tendiendo a expandirse todo lo posible para ocupar todo el volumen del recipiente que la contiene. Los átomos o moléculas del gas se encuentran virtualmente libres de modo que son capaces de ocupar todo el espacio del recipiente que lo contiene.

Hoy día se han desarrollado o descubierto nuevas fases o estados de agregación, como el plasma, los geles, los cristales líquidos, etc.

- Un **Plasma** es un gas en el que los átomos se han roto. Está formado por electrones negativos y por iones positivos, átomos que han perdido electrones y han quedado con una carga eléctrica positiva y que están moviéndose libremente. Cuanto más caliente está el gas, más rápido se mueven sus moléculas y átomos, y a muy altas temperaturas las colisiones entre estos átomos moviéndose muy rápidamente son lo suficientemente violentas como para liberar los electrones. En la atmósfera solar, una gran parte de los átomos están permanentemente "ionizados" por estas colisiones y el gas se comporta como un plasma.
- Un **coloide, suspensión coloidal o dispersión coloidal**, es un sistema físico que está compuesto por dos fases: una continua, normalmente fluida, y otra dispersa en forma de partículas, por lo general sólidas, de tamaño mesoscópico (es decir, a medio camino entre los mundos macroscópico y microscópico). Así, se trata de partículas que no son apreciables a simple vista, pero mucho más grandes que cualquier molécula. En particular, la comunidad científica define la escala mesoscópica como la situada entre unos 10 nanómetros y 10 micrómetros.
- El **condensado de Bose-Einstein (CBE)**, predicho en 1924 por Satyendra Nath Bose y Albert Einstein, y obtenido en 1995 (los físicos Eric A. Cornell, Carl E. Wieman y Wolfgang Ketterle compartieron el Premio Nobel de Física de 2001 por este hecho). Este estado se consigue a temperaturas cercanas al cero absoluto y se caracteriza porque los átomos se encuentran todos en el mismo

lugar, formando un superátomo. Un ejemplo sería: Si sentáramos a cien personas en una misma silla, pero no una encima de la otra, sino que ocupando el mismo espacio, estaríamos en presencia del condensado de Bose-Einstein.

Existen otros posibles estados de la materia; algunos de éstos sólo existen bajo condiciones extremas, como en el interior de estrellas muertas, o al comienzo del Universo, después del big bang: Fluidos supercríticos, Coloide, Superfluido, Supersólido, Materia degenerada, Neutronio, Materia fuertemente simétrica, Materia débilmente simétrica, Condensado fermiónico, Plasma quark-gluón, Materia extraña o materia de quarks, Fermionico.

- Un **fluido supercrítico** es cualquier sustancia que se encuentre en condiciones de presión y temperatura superiores a su punto crítico. Pues bien, un fluido supercrítico es un cuasiestado con propiedades intermedias entre líquidos y gases.

En un diagrama de fases clásico, las curvas de fusión, sublimación y vaporización muestran las zonas de coexistencia de dos fases. Tan solo hay un punto de coexistencia de tres fases, el llamado punto triple (PT). El cambio de fase se asocia a un cambio brusco de entalpía y densidad. Pero por encima del punto crítico (PC) este cambio no se produce, por tanto, podríamos definir este punto como aquel por encima del cual no se produce licuefacción al presurizar, ni gasificación al calentar; y por ende un fluido supercrítico es aquel que se encuentra por encima de dicho punto.

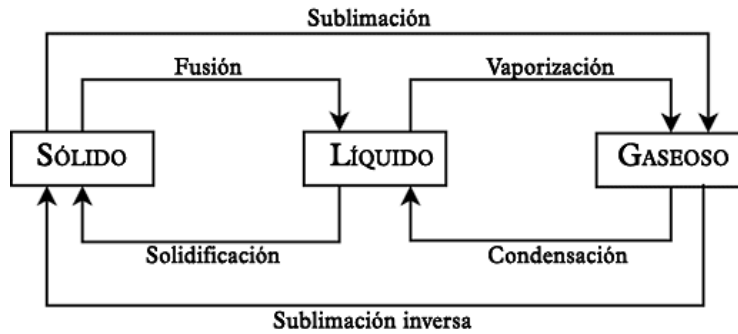
La región supercrítica tiene unas propiedades que la hacen peculiar:

- La densidad por encima del punto crítico depende básicamente de la presión y la temperatura, pero en cualquier caso está más cercana a la de los líquidos que a la de los gases. La densidad aumenta si lo hace la presión a temperatura constante y si disminuye la temperatura a presión constante.
- La viscosidad es mucho más baja que la de los líquidos, lo que le confiere propiedades hidrodinámicas muy favorables
- La bajísima tensión superficial permite una alta penetrabilidad a través de sólidos porosos y lechos empaquetados.
- Mayores coeficientes de difusión (difusividad) que en líquidos por lo que la transferencia de materia es más favorable

### 2.1.2 Procesos de Cambio de Fase de una Sustancia Pura

En física y química se denomina **cambio de fase** a la evolución de la materia entre varios estados de agregación sin que ocurra un cambio en su composición. Los tres estados básicos son el sólido, el líquido y el gaseoso, ya discutidos en el capítulo anterior.

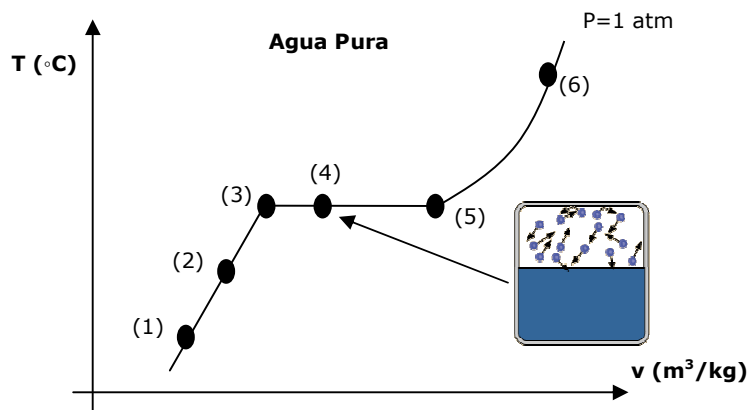
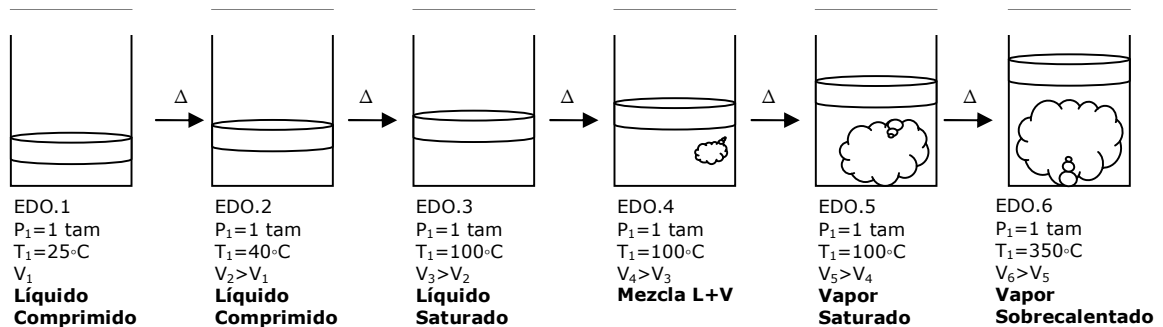
Para cada elemento o compuesto químico existen unas determinadas condiciones de presión y temperatura a las que se producen los cambios de fase o estado de agregación, debiendo interpretarse, cuando se hace referencia únicamente a la temperatura de cambio de fase, que ésta se refiere a la presión de 1 atm (la presión atmosférica).



**Figura 2.1. Procesos de Cambio de Fase**

De este modo, en condiciones normales (presión atmosférica y 20 °C) hay compuestos tanto en estado sólido como líquido y gaseoso. Un aumento de temperatura o una reducción de la presión favorecen la fusión, la evaporación y la sublimación, mientras que un descenso de temperatura o un aumento de presión favorecen los cambios opuestos. Por ejemplo:

- 4.500 °C — No hay sólidos.
- 6.000 °C — No hay líquidos (solo gases).
- 10.000 °C — Sólo plasma.



### 2.1.3 Postulado de Estado

El *postulado de estado*, establece que para cualquier sustancia pura basta con medir dos variables intensivas ( $T, P, v, \rho$ , etc.) independientes, para definir completamente el estado termodinámico de la sustancia. Esto simplifica mucho la descripción termodinámica de los sistemas, así como sugiere el empleo de diagramas cartesianos (2D) para la compilación de información termodinámica.

### 2.1.4 Dependencia entre T y P en saturación

En de un proceso de cambio de fase, la presión y temperatura son dependientes. Es decir, para una sustancia pura solo existe una temperatura para la cual dicha sustancia cambiará de fase a una presión dada. Y esa temperatura recibe el nombre de Temperatura de Saturación  $T^{\text{sat}}(P)$  y viceversa, la presión a la cual esa sustancia cambia de fase a una temperatura dada, es su presión de saturación  $P^{\text{sat}}(T)$ .

Como consecuencia de esta dependencia,  $T$  y  $P$  no bastan para determinar el estado termodinámico de una sustancia durante un cambio de fase o en mezcla de fase, y se debe recurrir a la definición de una propiedad auxiliar, válida únicamente en regiones de coexistencia de fases, denominada **calidad**.

**Calidad:** es una medida de la relación entre la masa de ambas fases, y se define como la relación entre la masa de vapor y la masa total de la mezcla.

$$x = \frac{m_{\text{vapor}}}{m_{\text{total}}} \text{ donde } x = \begin{cases} = 0, \text{ vaporsaturado} \\ = 1, \begin{cases} \text{Líquido Saturado} \\ \text{Sólido Saturado} \end{cases} \end{cases}$$

En el caso de una mezcla líquido-vapor la masa total representa la masa de líquido y la masa de vapor en el sistema, mientras que en una mezcla sólido-vapor, representa la masa de sólido más la masa de vapor dentro del sistema.

**Propiedades de una mezcla de fases:** Las propiedades de la mezcla vendrán dadas por un promedio de la propiedades de líquido saturado (o sólido saturado) y vapor saturado ponderado con la calidad. Por ejemplo, el volumen de una mezcla de L+V puede estimarse a partir de:

$$V = V_{\text{liq}} + V_{\text{vap}} = m_{\text{liq}}v_{\text{liq}} + m_{\text{vap}}v_{\text{vap}}$$

$$v = \frac{V}{m} = \frac{m_{\text{liq}}v_f}{m} + \frac{m_{\text{vap}}v_g}{m} = xv_f + (1-x)v_g$$

Por tanto,  $v = v_f(1-x) + v_gx$

Para el resto de las propiedades a definir se puede calcular de forma análoga:

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

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



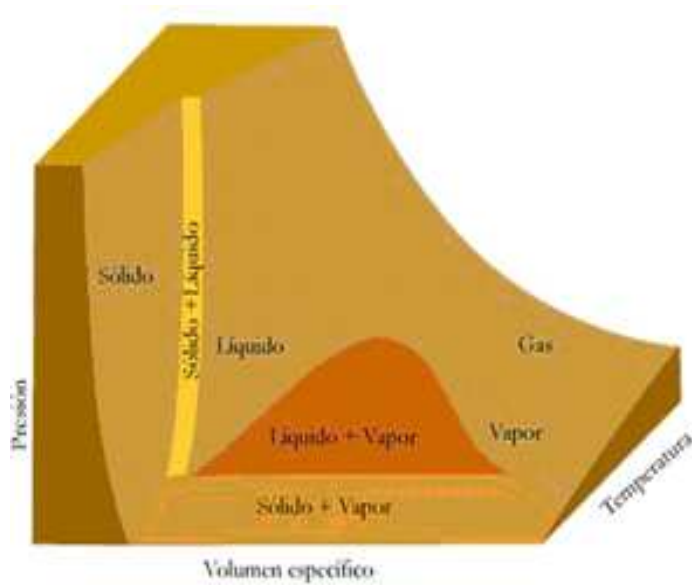
## 2.2. Comportamiento P-v-T de una Sustancias Puras

---

### 2.2.1 Diagramas Termodinámicos

Una forma práctica de condensar las relaciones existentes entre diversas variables termodinámicas de interés, es a través de diagramas cartesianos. A partir de la relación entre  $P$ ,  $T$  y  $v$  se pueden obtener diagramas cartesianos por a proyección en cada uno de los planos posibles de una superficie P-v-T.

#### Superficies P-v-T



#### Proyecciones de la Superficie P-v-T

- **Diagrama P-v**
- **Diagrama T-V**
- **Diagramas de Fases**

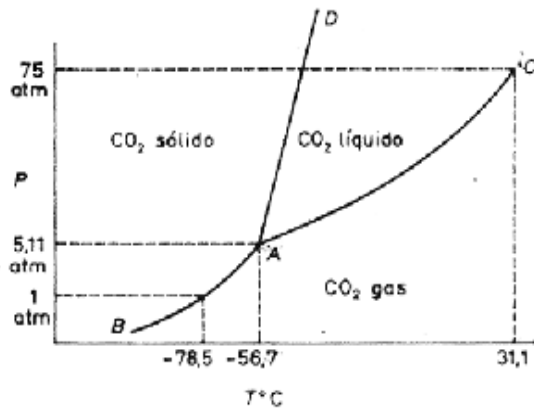
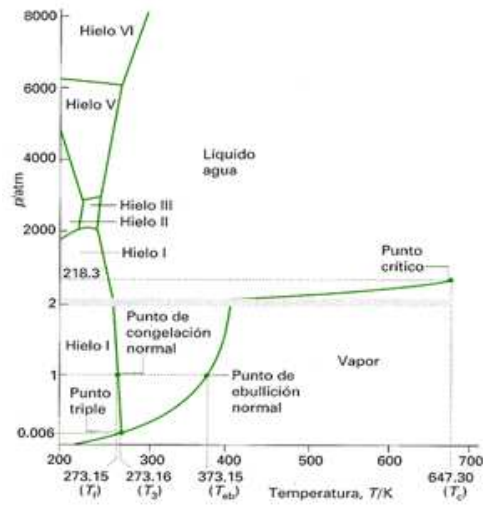


FIG. 3. El sistema CO<sub>2</sub>.

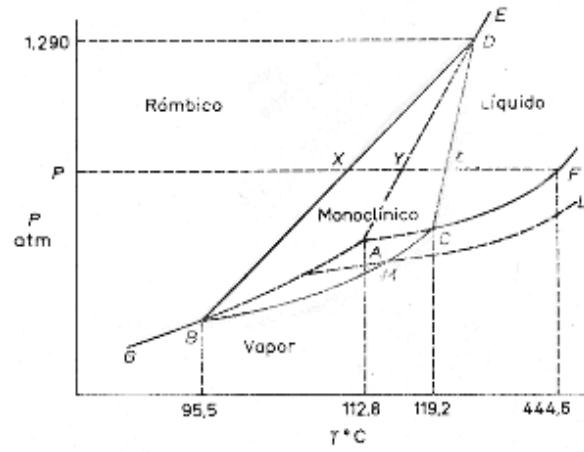


FIG. 4. El sistema azufre.

## 2.3. Estimación de Propiedades de una Sustancia Pura

### 2.2.2 Tablas de Vapor

De igual forma, la información proveniente de experimentación Las propiedades de las sustancias puras se pueden conseguir en forma tabulada.

- Combina modelos termodinámicos para lograr la descripción de cada fase
- Buena precisión
- Fácil uso
- Diseñadas para entrar con P y T
- Se dividen por zonas, de acuerdo a la fase o región de saturación de relevancia para el sistema:
  - Saturación: líquido-vapor o sólido-vapor
  - Líquido comprimido
  - Vapor sobrecalentado.

En general, para la mayoría de las sustancias, se considera el modelo de sólido y líquido incompresible, es decir, el volumen de la sustancia en estas fases se considera independiente de la presión en un proceso a temperatura constante, por lo que no se suele generar información para la zona de líquido comprimido, sólido y saturación sólido-líquido.

#### Estructura de las Tablas de Vapor

**Saturación:** en esta tabla se muestran los valores de las propiedades termodinámicas en la zona de saturación correspondiente. Por ejemplo, en el caso de una mezcla líquido-vapor, para cada temperatura tabulada se muestra la presión de saturación, los volúmenes específico, entalpías, energías internas y entropías, tanto del vapor saturado como del líquido saturado. En el caso de saturación sólido-vapor se muestran las mismas propiedades para la condición de sólido saturado y vapor saturado. El esquema general de esta tabla es el siguiente:

#### Ejemplo: Agua en Saturación Líquido-vapor

T (°C)	P (kPa)	vf (m <sup>3</sup> /kg)	vg (m <sup>3</sup> /kg)	uf (kJ/kg)	ug (kJ/kg)	hf (kJ/kg)	hg (kJ/kg)	sf (kJ/kgK)	sg (kJ/kgK)
0.01	0.6125	0.001000	205.71	1.33	2374.92	1.33	2500.9	0.0043	9.1549
5	0.8736	0.001000	146.84	22.05	2381.78	22.05	2510.1	0.0794	9.0243
10	1.2282	0.001000	106.30	42.02	2388.65	42.02	2519.2	0.1511	8.8998
15	1.7058	0.001001	77.876	62.98	2395.49	62.98	2528.3	0.2245	8.7803
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
100	101.42	0.001044	1.6718	419.36	2506.02	419.47	2675.6	1.3072	7.3541

El estado de una sustancia pura en mezcla líquido-vapor puede definirse al conocer:

- T y v (ó h, u, s)
- P y v (ó h, u, s)
- x y T (ó P, v, h, u, s)
- recuerde que T y P son dependientes en saturación

Donde calidad se define como la relación entre la masa de vapor y la masa total de la mezcla:

$$x = \frac{m_{vapor}}{m_{total}}$$

Las propiedades de la mezcla:

$$v = v_f(1 - x) + v_g x, \quad h = h_f(1 - x) + h_g x, \quad u = u_f(1 - x) + u_g x, \quad s = s_f(1 - x) + s_g x$$



**Líquido Comprimido:** para estas fases las tablas están caracterizadas por mostrar la información por sub-tablas de presión, por lo que están diseñadas para entrar con T y P.

### Ejemplo: Agua en Líquido Comprimido

P=0.10 MPa (Tsat=99.6°C)					P= 0.20 MPa (Tsat= 120.21°C)				
T (°C)	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kgK)	T (°C)	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kgK)
100									
150									
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1000									

El estado de una sustancia pura en líquido comprimido, puede definirse al conocer:

- P y T
- T y v (ó h, u, s)
- P y v (ó h, u, s)
- Recuerde que la calidad no está definida fuera de la zona de saturación.

Sino se dispone de tabla de líquido comprimido para la sustancia, siempre se puede utilizar el modelo de líquido incompresible. La aplicación de este modelo implica que:  
Para líquido incompresible:

$$v \approx v_f$$

$$u \approx u_f$$

$$h \approx h_f + v_f(p - p^{sat})$$

$$s \approx s_f, \text{ en cada caso a la T del sistema}$$



**Vapor Sobrecalentado:** para estas fases las tablas están caracterizadas por mostrar la información por sub-tablas de presión, por lo que están diseñadas para entrar con T y P.

### Ejemplo: Agua en Vapor Sobrecalentado

P=0.10 MPa (Tsat=99.6°C)					P= 0.20 MPa (Tsat= 120.21°C)				
T (°C)	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kgK)	T (°C)	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kgK)
100									
150									
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.

.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1000									

El estado de una sustancia pura en vapor sobrecalentado, puede definirse al conocer:

- P y T
- T y v (ó h, u, s)
- P y v (ó h, u, s)
- Recuerde que la calidad no está definida fuera de la zona de saturación.



**Sólido Comprimido:** se utiliza el **modelo de sustancia incompresible**

Para sólido comprimido se cumple:

$$v \approx v_i$$

$$u \approx u_i$$

$$h \approx h_i + C(T - T_i)$$

$$s \approx s_i + C \ln\left(\frac{T}{T_i}\right), \text{ en cada caso a la } T \text{ del sistema}$$

### Procedimiento de cálculo en tablas

- Entrar a la tabla por sustancia
- Determinar la (s) fase (s) en la cual se encuentra en sistema: saturación (L-V, S-V), líquido comprimido, vapor sobrecalentado, sólido comprimido
- Entrar a la tabla correspondiente a la fase
- Con 2 datos independientes determinar el estado

#### a. Datos T y P:

- Con P (o T) determino la fase:
 
$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Si } T=T^{\text{sat}} \text{ (o } P=P^{\text{sat}}) \rightarrow \text{L-V} \\ \text{Si } T>T^{\text{sat}} \text{ (o } P<P^{\text{sat}}) \rightarrow \text{VSC} \\ \text{Si } T<T^{\text{sat}} \text{ (o } P>P^{\text{sat}}) \rightarrow \text{LC} \end{array} \right.$$

Como se observa para el primer caso el problema no se puede resolver ya que T y P son dependientes en saturación, se requiere del conocimiento de otra propiedad (p.e. calidad). Para los dos casos restantes, el sistema está definido, conociendo la fase voy a la tabla correspondiente para determinar los valores de v, u, h y s.

#### b. Datos v y P (o T):

- Con P (o T) entro determino la fase:
 
$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Si } v_g > v > v_f \rightarrow \text{L-V} \\ \text{Si } v > v_g \rightarrow \text{VSC} \\ \text{Si } v < v_f \rightarrow \text{LC} \\ \text{Si } v = v_f \rightarrow \text{LSat} \\ \text{Si } v = v_g \rightarrow \text{VSat} \end{array} \right.$$

- Conociendo la fase voy a la tabla correspondiente para determinar los valores de T (o P), x, u, h y s

o **Para L-V:**

$$T = T^{\text{sat}},$$

$$x = \frac{v - v_f}{v_g - v_f},$$

$$h = h_f(1 - x) + h_g x,$$

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

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

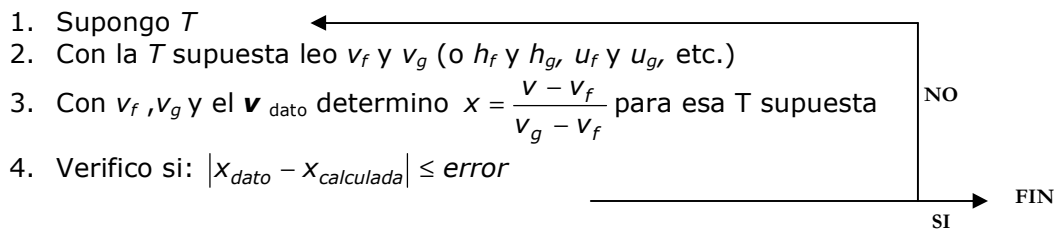
o **Para LC o VSC:** con P y v determino: T, u, h y s, la calidad no está definida.

**c. Dados x y v (ó u, h, s):**

- Ya sé que estoy en saturación (ojo: puede ser L-V o S-V)

La tabla de saturación no presenta valores ni de x ni de propiedades de la mezcla, así que las variables están implícitas en las ecuaciones mostradas para saturación. Lo cual implica un procedimiento iterativo para despejar T o P y luego determinar el resto del estado.

Para ello:



Una forma de acelerar la convergencia del tanteo es buscar un valor inicial de T cercano al real, lo cual se estima realizando la siguiente aproximación:

$$v \approx v_g x \Rightarrow v_g = \frac{v}{x}$$

### 2.2.3 Ecuaciones de Estado

Función matemática de la forma  $f(P, T, v) = 0$ , la cual permite la descripción analítica de los estados termodinámicos de una sustancia. Sin embargo, dada la complejidad de la relación PvT en todas las fases no existe una única ecuación de estado que funcione en todas las zonas del diagrama.

#### Modelo de Gases ideales

Materia en estado gaseoso es frecuentemente encontrada en sistemas de interés práctico: procesos de separación L-V, procesos de oxidación o corrosión, reacciones químicas fácilmente controladas en fase gaseosa, etc. El modelo mas sencillo empleado para representar gases es el de Gases Ideales.

El Modelo de Gas Ideal, proporciona una descripción simplificada del comportamiento de sistemas gaseosos a muy bajas presiones. Se desarrollo empíricamente a partir de la teoría cinética de los gases.

$$P\bar{V} = n\bar{R}T \quad \text{o} \quad PV = mRT$$

Donde R es la constante universal de los gases:

$$\bar{R} = 8.3144(\text{J} / \text{mol.K}) = 1.987(\text{cal} / \text{mol.K}) = 0.08206(\text{l.atm} / \text{mol.K})$$

El gas ideal es una sustancia imaginaria que obedece al comportamiento anterior. Se ha observado que los gases reales a bajas presiones y densidades se aproximan a ese comportamiento.

Suposiciones:

- Las partículas no interaccionan entre sí, excepto cuando chocan
- Las moléculas no ocupan volumen en relación al volumen del sistema. Por tanto, se aplica a sistemas poco densos.

#### Principio de Estados Correspondientes

Este principio expresa que las sustancias se comportan de manera diferente a T y P determinadas, pero se comportan de manera similar a T y P normalizadas con respecto su  $T_c$  y  $P_c$ . Si esto es verdad en el fondo todas las sustancias tienen un comportamiento afín al de un GI al expresarlas en términos de propiedades reducidas con respecto a su propio punto crítico. Esto da pie a generar un único o generalizado diagrama, que permita ver el comportamiento de cualquier sustancia en término de un **factor de compresibilidad** y propiedades reducidas. Donde el factor de compresibilidad es una medida de la desviación de un gas real del comportamiento de gas ideal, y se define como:

$$z = \frac{Pv}{RT} = \frac{v_{real}}{v_{ideal}} \quad \text{donde } z \rightarrow 1 \Rightarrow GI$$

Y las propiedades reducidas son:

$$T_r = T/T_c$$
$$P_r = P/P_c$$

### Ecuación de van der Waals

El gas ideal es una sustancia imaginaria que obedece al comportamiento anterior. Se ha observado que los gases reales a bajas presiones y densidades se aproximan a ese comportamiento. Para que cumpla con la ecuación antes descrita el sistema debe cumplir las siguientes suposiciones:

- Las partículas no interactúan entre sí, excepto cuando chocan
- Las moléculas no ocupan volumen en relación al volumen del sistema. Por tanto, se aplica a sistemas poco densos.
- Además la energía interna es únicamente función de la temperatura

Van der Waals en su tesis doctoral propuso un modelo en la búsqueda por representar gases reales, para ellos hizo las siguientes consideraciones:

- Las partículas del gas si ocupan un volumen finito
- Las moléculas del sistema si interactúan entre sí

Obteniendo la ecuación siguiente:

$$\left(P + \frac{a}{V^2}\right)(V - b) = \bar{R}T$$

Donde:

P: presión absoluta

V: volumen del gas

T: temperatura absoluta del sistema

$\frac{a}{V^2}$  : término de cohesión (considera las interacciones partícula-partícula)

b: co-volumen

Los parámetros de dicha ecuación pueden ser determinados por la evaluación de la misma en el punto crítico, punto en el cual la isoterma crítica presenta un punto de inflexión:

$$a = 27P_r b^2, \quad b = \frac{8a}{27RT_r} \quad \text{y} \quad v_r = 3b$$

La misma puede ser escrita en términos del volumen:

$$v^3 - \left(b + \frac{RT}{P}\right)v^2 + \frac{a}{P}v - \frac{ab}{P} = 0$$



○ **Otras Ecuaciones de Estado para Gases No-Ideales**

▪ Ecuación de Dieterici:  $P(V - b)\exp\left(\frac{a}{RTV}\right) = RT$

▪ Ecuación de Berthelot:  $\left(P + \frac{A}{TV^2}\right)(V - B) = RT$

▪ Ecuación de Kamerlingh-Onnes o Ecuación de Estado Virial:

$$\frac{PV}{RT} = 1 + BP + CP^2 + \dots$$

o

$$\frac{PV}{RT} = 1 + \frac{B'}{V} + \frac{C'}{V^2} + \dots$$

La ecuación virial, converge en fase gas y representar adecuadamente en rango entero de densidades y presiones por la expansión virial.

## 2.4. Problemas Resueltos

---

► **2.1** Complete la siguiente tabla de propiedades, justifique brevemente sus resultados.

	<b>Sustancia</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Presión (kPa)</b>	<b>Volumen (m<sup>3</sup>/kg)</b>	<b>Calidad</b>	<b>Estado</b>
(a)	Amoníaco	<b>-15</b>	350	0,001519	-	<b>LC</b>
(b)	Benceno	<b>485,7</b>	10000	0,00600	-	<b>VSC</b>
(c)	R-12	76,0	540	<b>0,04198</b>	-	<b>VSC</b>
(d)	Agua	<b>18,39</b>	0,1035	1300,0	-	<b>VSC</b>
(e)	Butano	152,01	3796,0	<b>0,00439</b>	-	<b>PC</b>

► **2.2** Complete la siguiente tabla de propiedades termodinámicas, justificando brevemente sus resultados:

<b>Sustancia</b>	<b>P (kPa)</b>	<b>T (K)</b>	<b>v (m<sup>3</sup>/kg)</b>	<b>Calidad</b>	<b>Estado</b>
Agua	3250	491,15	<b>0,001186</b>	-	<b>LC</b>
Amoníaco	1300	<b>338,86</b>	0,115840	-	<b>VSC</b>
Freón-12	<b>694,11</b>	<b>300,48</b>	0,015577	0,6	<b>L-V</b>
Metano	400	143,15	<b>0,28339</b>	-	<b>VSC</b>
Agua	0,05	250,15	<b>41,597</b>	-	<b>VSC</b>
Hexano	<b>1454,4</b>	457,15	0,0058914	<b>0,1973</b>	<b>L-V</b>
CO <sub>2</sub>	30	<b>44,68</b>	0,2814	-	<b>VSC</b>

► **2.3** Se tiene un recipiente rígido que contiene agua a 5 MPa y 100 °C (Edo. 1), en el cual se decide llevar a cabo el siguiente experimento:

- Se lleva isobáricamente hasta lograr la saturación (Edo. 2)
- Se induce una caída de presión de 2 MPa hasta lograr una calidad del 75% (Edo. 3)
- Mediante un proceso descrito por la ecuación  $PV^{1.9} = cte$  hasta alcanzar 8MPa (Edo. 4)
- Finalmente, se deja reposar hasta lograr el equilibrio termodinámico con el medio (Edo. 5)

Se le pide:

- a. Representar el proceso en un diagrama P-v, respetando la localización de la zonas de 2 fases
- b. Calcular el cambio total de volumen durante el proceso ( $\Delta V$ )

**Solución:**

- a. Representar el proceso en un diagrama P-v, respetando la localización de la zonas de 2 fases

**Estado 1**

T (°C) =	100
P (kPa) =	5000

Fase LC y  $v = 0,0010410 \text{ m}^3/\text{kg}$

**Estado 2**

P (kPa) =	5000
x =	0

T = 263,94 °C  
 $v = 0,0012864 \text{ m}^3/\text{kg}$

**Estado 3**

P (kPa) =	3000
x =	0.75

T = 233,85 °C  
 $v_f = 0,0012167 \text{ m}^3/\text{kg}$   
 $v_g = 0,066664 \text{ m}^3/\text{kg}$   
 $v = 0,050299 \text{ m}^3/\text{kg}$

- c. Cambio total de volumen ( $\Delta V$ )

$$\Delta v = v_5 - v_1 = -3,8 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 / \text{kg}$$

**Estado 4**

P (kPa) =	8000
-----------	------

$$PV^{1.9} = cte \Rightarrow P_3 V_3^{1.9} = P_4 V_4^{1.9}$$

$$\Rightarrow v_4^{1.9} = v_3^{1.9} \left( \frac{P_3}{P_4} \right) = \frac{3}{8} v_3^{1.9}$$

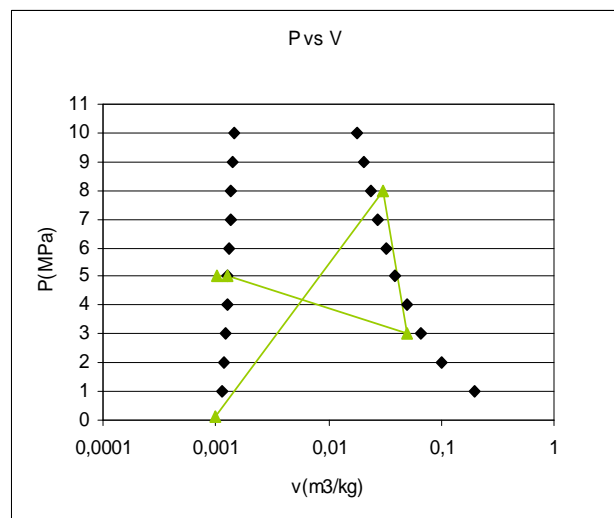
$$v = 0,03002 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$T = 350,46 \text{ °C}$$

**Estado 5**

P (kPa) =	100
T (°C) =	25

Fase LC y  $v = 0,0010030 \text{ m}^3/\text{kg}$



► **2.4** 0,5 moles de un gas ideal se encuentran confinados en un cilindro de 2 m de diámetro por medio de un pistón, en donde descansa una pesa. La masa del pistón y la pesa juntos es de 200 kg. La aceleración local de la gravedad es de  $9,8 \text{ m/s}^2$ , la presión atmosférica es de 101,57 kPa y la temperatura del ambiente es  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ . La altura inicial del pistón es de 2 m.

- ¿Cuál es la fuerza en newton ejercida en el gas por la atmósfera, el pistón y la pesa? Se supone que no hay fricción entre el pistón y el cilindro.
- ¿Cuál es la presión ejercida por el gas?
- El gas en el cilindro se calienta, se expande, empujando el pistón y la pesa hacia arriba. Si el pistón y la masa se levantan 1,7 m, ¿cuál es la temperatura del gas?
- Se quiere lograr el equilibrio térmico con el medio ambiente, y no se desea que el pistón se mueva, para ello utilizará unas trabas ¿Colocaría las trabas del lado del gas o de la masa? Justifique su respuesta. Luego de colocar las trabas y alcanzar el equilibrio térmico ¿cuál será la presión del gas?
- Posteriormente se retiran las trabas hasta alcanzar el equilibrio termodinámico ¿cuál es el volumen que ocupa el gas en ese estado?

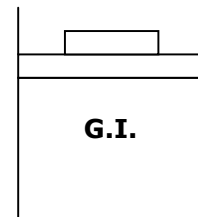
**Solución:**

**a. Fuerza ejercida por la atmósfera y el pistón:**

$$F_{gas} = P_o A + m_p g$$

$$\therefore F_{atm} = P_o A = P_o \left( \frac{\pi D^2}{4} \right) = 101,57(3,1416) = 319,09 \text{ kN}$$

$$\therefore F_{pistón} = m_p g = 1,960 \text{ kN}$$



**b. Presión ejercida por el gas:**

$$F_{gas} = P_o A + m_p g \Rightarrow P_{gas} = P_o + \frac{m_p g}{A} = 101,57 + \frac{1,960}{3,1416} = 102,19 \text{ kPa}$$

**c. Temperatura del Gas a  $h_2=1,7 \text{ m}$**

$$P_{gas_2} = P_{gas_1} = 102,19 \text{ kPa}$$

$$h_2 = 3,7 \text{ m} \Rightarrow V_2 = h_2 \cdot A = 0,33378 \text{ m}^3$$

$$\therefore T_2 = \frac{P_2 V_2}{nR} = \frac{(102,19)(0,33378)}{1(8,3144)} = 285,76 \text{ K}$$

**d. Presión del Gas al Equilibrio térmico con el ambiente:** trabas arriba para evitar que suba cuando se caliente

$$T_3 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$V_3 = V_2 = 11,62 \text{ m}^3$$

$$P_{gas_3} = \frac{nRT_3}{V_3} = \frac{1(8,3144)(298,15)}{11,62} = 106,57 \text{ kPa}$$

**e. Volumen al Equilibrio mecánico**

$$V = 12,12 \text{ m}^3 \text{ y } h = 3,85 \text{ m}$$

## Problemas Propuestos

► **2.1** La temperatura en la atmósfera hasta una elevación de 10.000 m sobre el nivel del mar, se puede estimar mediante la siguiente expresión:

$$T(^{\circ}\text{C}) = 15 - 0,00651 \cdot z(\text{m})$$

y la variación de presión con la altura está descrita por la siguiente ecuación diferencial:

$$\frac{dP}{dz} = -\rho g ,$$

Donde  $\rho$  es la densidad y  $g$  la aceleración de gravedad. Recordando que para un gas ideal:

$$\rho = M \frac{P}{RT}$$

Donde  $M$  es el peso molecular,  $R$  la constante universal de los gases. Determine la presión en la cima de una montaña de 3.000 m de altura.

**Datos adicionales:**  $M=29$  g/gmol (constante) y  $g=9,80$  m/s<sup>2</sup>

► **2.2** Un medidor de gas natural a alta presión indica un flujo de 10.000 pie<sup>3</sup>/d medidos a 500 psig y 85 °F. La presión atmosférica es normal ( $P_{\text{atm}}=14,7$  psi). El gas se vende a una Compañía de Electricidad estipulándose en el contrato que el costo es en base a considerar el flujo volumétrico a 16 °C y 1 atma, en m<sup>3</sup>/d. Si el gas natural se puede considerar como metano puro ( $M=16$ ), se le pide calcular el flujo que debe comprar diariamente la Compañía aplicando dos procedimientos de cálculo:

- Ley de Gases Ideales
- Diagrama de Compresibilidad

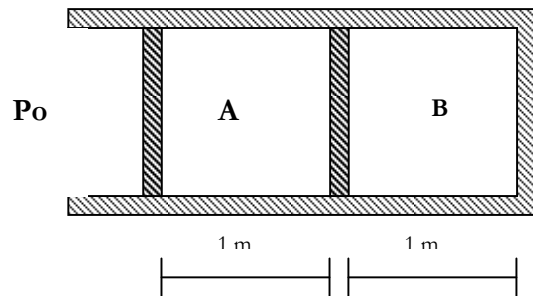
► **2.3** Complete la siguiente tabla, usando los criterios desarrollados en clase. Desarrolle su procedimiento de cálculo.

	Sustancia	P(kPa)	T(°C)	v (m <sup>3</sup> /Kg)	x	Fase
(a)	Agua			157	0,2	
(b)	Metano	450	50			
(c)	Nitrógeno	700		0,08026		
(d)	Dióxido de Carbono		-90,6	0,000777		
(e)	Amoníaco	1200		0,001660		
(f)	Freón -12		70	0,008923		

► **2.4** El sistema cilindro-pistón mostrado en la figura está separado en dos compartimientos por un pistón aislante, sin fricción y de espesor despreciable cuya área transversal es de 1 m<sup>2</sup>. El lado izquierdo contiene inicialmente, agua con una calidad del 80% y el derecho contiene amoníaco a 800 kPa y 100 C (estado 1). Se retira calor del compartimiento derecho hasta que comienza a condensar el amoníaco

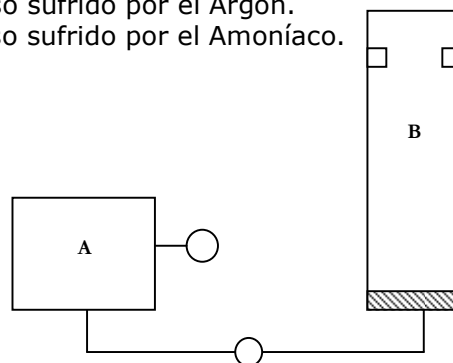
(estado 2), y luego se retira la clavija que mantiene sujeto el pistón central, y el sistema alcanza el equilibrio desplazándose el pistón izquierdo 50 cm a la izquierda (estado 3). En este momento la calidad de agua es 40%. Suponiendo que la presión atmosférica vale 100 kPa, calcule:

- La masa de agua y amoníaco (2 pts)
- La presión de amoníaco en el estado 2 (2 pts)
- El estado 3 del amoníaco (3 pts)
- Represente el proceso seguido por el agua en un diagrama T-v (1 pto)
- Represente el proceso seguido por el amoníaco en un diagrama P-v (1 pto)



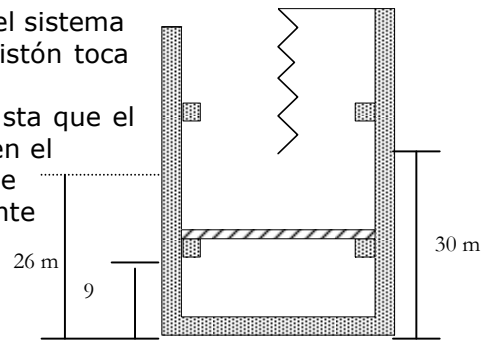
► **2.5** Se tienen dos cilindros A y B de área transversal  $0,1 \text{ m}^2$  y  $0,001 \text{ m}^2$  respectivamente, que están conectados mediante una válvula de paso que se encuentra inicialmente cerrada. El cilindro A contiene en su interior Argón a una temperatura de  $207,31 \text{ C}$ , además, posee un manómetro el cual indica una presión de  $400 \text{ kPa}$ . El cilindro B, contiene Amoníaco a una temperatura de  $-8 \text{ C}$  y una calidad de  $30,66\%$ , este cilindro dispone en su interior de un pistón, de espesor despreciable y masa de  $5,102 \text{ Kg}$ , reposando en el fondo (Estado 1). Se abre la válvula de paso, lentamente, de modo que el Argón comienza a fluir hacia el tanque B de manera isotérmica. Cuando el manómetro del tanque A indica la presión de  $300 \text{ kPa}$ , se cierra la válvula. En este momento el pistón se encuentra a  $5,26 \text{ m}$  de la base del cilindro B (Estado 2). A continuación (con la válvula cerrada) se procede a calentar el tanque B hasta que el pistón en este cilindro toque los topes, momento en el cual la calidad del amoníaco es de  $12,43\%$  (Estado 3).

- Calcule cada uno de los 3 estados tanto para el Argón como para el Amoníaco.
- Indique en un diagrama T-v el proceso sufrido por el Argón.
- Indique en un diagrama P-v el proceso sufrido por el Amoníaco.



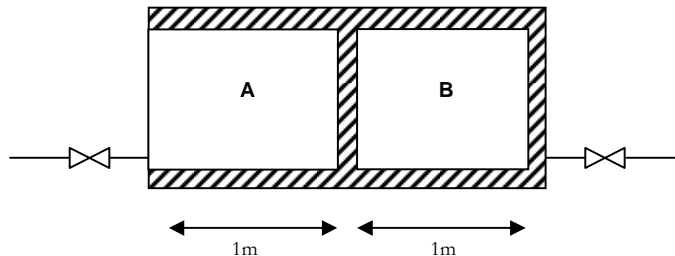
► **2.6** En el sistema cilindro- pistón mostrado en la figura se tienen 40 kg de agua a una temperatura de  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$  ocupando todo el volumen debajo el pistón, el cual inicialmente reposa sobre los topes inferiores, como se observa en la figura. Acoplado al cilindro se tiene un resorte de comportamiento lineal el cual tiene su posición de equilibrio a 26 m medidos desde la base del cilindro, la cual posee un área transversal de  $0,005\text{ m}^2$ . Sabiendo lo anterior determine:

- La Presión inicial del agua ( $P_1$ ). ¿En qué fase se encuentra?
- Si se calienta en sistema hasta una temperatura de  $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ , se observa que el pistón se eleva ligeramente. Determine la presión ( $P_2$ ) y la fase en la cual se encuentra el agua en dicho momento.
- Si se sigue calentado hasta que la calidad del sistema es del 2%, halle la temperatura ( $T_3$ ). ¿El pistón toca el resorte?
- Se continua el proceso de calentamiento hasta que el pistón toca los topes superiores, momento en el cual la temperatura es de  $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Determine la presión en este instante ( $P_4$ ) y la constante del resorte ( $k_{\text{res}}$ ).



► **2.7** El tanque rígido mostrado en la figura está dividido en dos secciones por un pistón aislante. En el instante inicial, la sección A contiene  $12,903\text{ kg}$  de agua y la sección B contiene decano a  $3,2\text{ MPa}$  y  $0,01139\text{ m}^3/\text{kg}$  (Edo. 1). Se retira calor lentamente del sistema hasta que el compartimiento B alcanza una temperatura de  $755\text{ K}$  y una presión de  $1,9\text{ MPa}$  (Edo. 2). Luego se abren ambas válvulas, retirándose agua de A y decano de B, hasta que la presión del agua alcanza  $430\text{ kPa}$  (Edo. 3). Durante este último proceso el pistón no se mueve y las temperaturas en ambas secciones permanecen constantes. Considere el espesor del pistón despreciable, cuya área transversal es de  $1\text{ m}^2$ . Determine:

- Cada uno de los estados termodinámicos alcanzados por ambas sustancias
- Cuanto se desplaza el pistón
- La masa de agua retirada de A y la masa de decano retirada de B
- Represente cualitativamente los procesos seguidos por ambas sustancias en un diagrama P-v



► **2.8** El sistema cilindro pistón presentado en la figura consta de dos compartimientos. El compartimiento A de 10 litros está lleno de agua con una calidad de 85%, adicionalmente está conectado a una línea de vapor a través de una válvula inicialmente cerrada. El compartimiento B contiene 10 litros de octano con un volumen específico inicial de  $0,3\text{m}^3/\text{kg}$ , adicionalmente presenta un resorte lineal soldado a la pared izquierda del cilindro con  $k = 50\text{kN/m}$  y su posición de equilibrio es a 10 cm de la pared izquierda. El sistema se encuentra en equilibrio a una presión manométrica de 150 kPa, se abre la válvula para que entre vapor al compartimiento A hasta que la presión manométrica final del octano es de 400 kPa y el volumen específico del agua es  $0,25\text{m}^3/\text{kg}$ . Considerando que el agua sigue un proceso isotérmico, sabiendo que el pistón es adiabático y tiene un diámetro de 30 cm, determine:

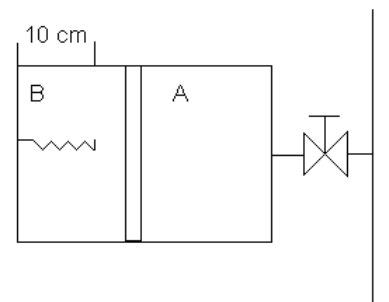
- La masa de vapor de agua que entró al sistema
- Los estados y procesos involucrados, para ambas sustancias
- Los diagramas P-v y T-v para el octano

**Datos extras:**

$K_r = 50\text{ N/m}$

Posición de equilibrio del resorte: 10 cm = 0,1m

Pistón de masa despreciable y de diámetro 30 cm



► **2.9** El sistema de la figura está constituido por dos cilindros, de áreas transversales  $300\text{ cm}^2$  y  $600\text{ cm}^2$  respectivamente, conectados mediante un tubo capilar de volumen despreciable que dispone de una válvula, inicialmente cerrada (vasos comunicantes). El cilindro A, contiene una 0,54 g de una mezcla L+V de Agua y está cerrado por un pistón (P1) abierto a la atmósfera (1 atm). El cilindro B, está vacío, y dispone de un pistón P2, inicialmente fijo y conectado al tope del cilindro por un resorte de comportamiento lineal (inicialmente de alargamiento nulo). Si se considera que todo el sistema se encuentra, en todo momento, en contacto con una fuente térmica a 293,15 K, a partir de esta situación inicial, evalúe los siguientes casos:

- Con P1 fijo, se abre la válvula. Note que al estar B vacío el agua se expandirá contra el vacío por lo que P2 no se desplazará. Calcule la nueva presión del agua y la fracción en fase líquida (Edo. 2)
- Si la masa de P1 es  $M=100\text{ kg}$ . Calcule la nueva presión del agua y la altura de P1, si se libera P1 manteniendo P2 fijo (Edo. 3)
- Con P1 fijo y P2 libre, se abre la válvula. Determine la nueva presión y altura de P2 (Edo. 4)

