

**Dr. Antonio Valiente Barderas  
UNAM. C.U. Facultad de Química  
México.**

## **Capítulo 2**

### **Unidades y variables en flujo de fluidos**



## Capítulo II

### Unidades y variables

Para clasificar a los materiales que se encuentran en la naturaleza se pueden utilizar diversos criterios. Desde el punto de vista de la ingeniería, uno de los más interesantes lo constituye aquel que considera el comportamiento de los elementos frente a situaciones especiales. De acuerdo a ello se definen los estados básicos de sólido, plástico, fluidos y plasma. De aquí la de definición que nos interesa es la de fluidos, la cual se clasifica en líquidos y gases.

La clasificación de fluidos mencionada depende fundamentalmente del estado y no del material en sí. De esta forma lo que define al fluido es su comportamiento y no su composición. Entre las propiedades que diferencian el estado de la materia, la que permite una mejor clasificación sobre el punto de vista mecánico es la que dice la relación con la forma en que reacciona el material cuando se le aplica una fuerza.

Los fluidos reaccionan de una manera característica a las fuerzas. Si se compara lo que ocurre a un sólido y a un fluido cuando son sometidos a un esfuerzo de corte o tangencial se tienen reacciones características que se pueden verificar experimentalmente y que permiten diferenciarlos.

Con base al comportamiento que desarrollan los fluidos se definen de la siguiente manera: "*Fluido es una sustancia que se deforma continuamente, o sea se escurre, cuando está sometido a un esfuerzo de corte o tangencial*". De esta definición se desprende que un fluido en reposo no soporta ningún esfuerzo de corte.

*Un **fluido** es pues, una sustancia o medio continuo que se deforma continuamente en el tiempo ante la aplicación de una presión o tensión tangencial sin importar la magnitud de ésta.*

La parte de la física que se ocupa de la acción de los fluidos en reposo o en movimiento, así como de las aplicaciones y mecanismos de ingeniería que utilizan fluidos se llama **Mecánica de fluidos**. La mecánica de fluidos es fundamental en campos tan diversos como la aeronáutica, la ingeniería química, civil e industrial, la meteorología, las construcciones navales y la oceanografía.

La mecánica de fluidos puede subdividirse en dos campos principales: la estática de fluidos, o hidrostática, que se ocupa de los fluidos en reposo, y la dinámica de fluidos, que trata de los fluidos en movimiento. El término de hidrodinámica se aplica al flujo de líquidos o al flujo de los gases a baja velocidad, en el que puede considerarse que el gas es esencialmente incompresible. La aerodinámica, o dinámica de gases, se ocupa del comportamiento de los gases cuando los cambios de velocidad y presión son lo suficientemente grandes para que sea necesario incluir los efectos de la compresibilidad.

Entre las aplicaciones de la mecánica de fluidos están la propulsión a chorro, las turbinas, los compresores y las bombas. La hidráulica estudia la utilización en ingeniería de la presión del agua o del aceite.

Los principios básicos del movimiento de los fluidos se desarrollaron lentamente a través de los siglos XVI al XIX como resultado del trabajo de muchos científicos como Da Vinci, Galileo, Torricelli, Pascal, Bernoulli, Euler, Navier, Stokes, Kelvin, Reynolds y otros que hicieron interesantes aportes teóricos a lo que se denomina hidrodinámica. También en el campo de hidráulica experimental hicieron importantes contribuciones Chezy, Ventura, Hagen, Manning, Pouseuille, Darcy, Froude y otros, fundamentalmente durante el siglo XIX. Hacia finales del siglo XIX la hidrodinámica y la hidráulica experimental presentaban una cierta rivalidad. Por una parte, la hidrodinámica clásica aplicaba con rigurosidad principios matemáticos para modelar el comportamiento de los fluidos, para lo cual debía recurrir a simplificar las propiedades de estos. Así se hablaba de un fluido real. Esto hizo que los resultados no fueran siempre aplicables a casos reales. Por otra parte, la hidráulica experimental acumulaba antecedentes sobre el comportamiento de fluidos reales sin dar importancia a la formulación de una teoría rigurosa.

La Mecánica de Fluidos moderna aparece a principios del siglo XX como un esfuerzo para unir estas dos tendencias: experimental y científica. Generalmente se reconoce como fundador de la mecánica de fluidos moderna al alemán L. Prandtl (1875-1953). Esta es una ciencia relativamente joven a la cual aún hoy se están haciendo importantes contribuciones.

En ingeniería es necesario cuantificar los fenómenos que ocurren y para ello se requiere expresar las cantidades en unidades convencionales. Los sistemas de unidades utilizados están basados en ciertas dimensiones básicas, o primarias, a partir de las cuales es posible definir cualquier otra utilizando para ello leyes físicas, dimensionalmente homogéneas que las relacionan. Las dimensiones básicas más usadas son: longitud, tiempo, masa y temperatura. La forma en que se seleccionan las dimensiones básicas a partir de las se pueden definir las restantes, y las unidades que se les asignan, da origen a diferentes sistemas de unidades. Desde 1971 se ha intentado universalizar el uso del denominado Sistema Internacional de Unidades, SI, el cual corresponde a la extensión y el mejoramiento del tradicional sistema MKS.

Magnitudes	Definición	Dimensiones	MASA CGS, SI o MKS	FUERZA MKS,SI, Ingles
Longitud	L	L	1cm 1m	1 m 1 ft
Tiempo	$\theta$	$\theta$	1 seg 1seg	1 seg 1 sec
Masa	M	M	1g 1kg	1 utm 1 slug
Fuerza	$F = M a$	$MLS^{-2}$	1 dina=10 <sup>-5</sup> N 1N	1kgf=9,81lbf=4,448N
Energía	$W=F L$	$ML^2 S^{-2}$	1 erg 1Joule	1 kgfxm 1 ft-lbf
Trabajo			1 cal	1 cal
Calor				
Potencia	$P=W/\theta$	$M L^2S^{-2} \theta^{-1}$	1 erg/seg 1Watt	1kgf.m/s 1lbf.ft/sec
Viscosidad	$\mu$	$ML^{-1} \theta^{-1}$	1poise, 1kg/m.s	1kgf.s/m <sup>2</sup> 1lbf.sec/ft <sup>2</sup>
Presión	$p = F/A$	$ML^{-1} \theta^{-2}$	1baria 1Pa=1N/m <sup>2</sup>	1 kgf/m <sup>2</sup> 1lbf/ft <sup>2</sup>
Temperatura	T	T	1 kelvin 1 kelvin	1 kelvin , 1°Rankine

En los procesos industriales y en los laboratorios se necesita *medir*, es decir, encontrar el tamaño y la cantidad de las variables que se están manejando: temperatura, concentración, pH, cantidad de materia, etc.

Una *dimensión* es una propiedad que puede medirse, como la longitud, el tiempo o la masa. Las variables fundamentales suelen llamarse dimensiones básicas. Estas son la masa (M), el espacio (L), el tiempo ( $\theta$ ), y la temperatura (T); cada una de éstas se puede representar por un símbolo. Otras propiedades dependen de las dimensiones básicas y pueden ponerse en función de ellas tal como el volumen ( $L^3$ ), la velocidad ( $L/\theta$ ) y la densidad ( $M/L^3$ ).

Cualquiera que sea la naturaleza de una cantidad física, se emplea para medirla otra cantidad fija de la misma especie, a la que se llama *unidad*. Toda cantidad medida o contada tiene un valor numérico (2, 0.007,  $3 \times 10^5$ , etc.) y una unidad (metro, gramos, kilocalorías, etc.). En los cálculos químicos resulta indispensable, escribir tanto el valor numérico como la unidad de la medición.

Las unidades pueden tratarse como entidades algebraicas, de manera que las cantidades que tienen una misma unidad pueden sumarse o restarse.

### Ejemplo 1:

$$5\text{kg} + 7\text{kg} = 12\text{Kg} \quad ; \quad 3560\text{ kcal} - 1340\text{ kcal} = 2220\text{ kcal}$$

Sin embargo a veces es necesario especificar lo que se suma o se resta, ya que como dice el dicho "no se pueden sumar peras con manzanas"

## Ejemplo 2

5kg de manzanas + 7 kg de peras = 12 kg (de peras + manzanas o de mezcla).

Por otro lado los valores numéricos y sus correspondientes unidades pueden combinarse por medio de la multiplicación o división.

## Ejemplo 3

$$5 \text{ N} \times 7 \text{ m} = 35 \text{ Nm} = 35 \text{ J}$$

$$30 \text{ kcal} / 3 \text{ h} = 10 \text{ kcal} / \text{h}$$

$$70 \frac{\text{km}}{\text{h}} \times 4\text{h} = 280\text{km}$$

$$75\text{kcal} \times \frac{1}{3\text{h}} \times \frac{1}{\text{m}^2} = 25 \frac{\text{kcal}}{\text{h m}^2}$$

Una cantidad medida puede expresarse en términos de cualquier unidad que tenga la dimensión apropiada.

## Ejemplo 4

Una cierta cantidad de frijoles se puede expresar en gramos, kilogramos, libras, toneladas o con cualquier otra unidad de masa. Obviamente el valor numérico de la masa dependerá de la variable seleccionada. Lo que no puede hacerse es sumar o restar cantidades que tengan diferentes unidades aunque pertenezcan a la misma dimensión.

Por ejemplo; NO se pueden sumar 6 kg de frijoles con 10 libras de frijoles. Para hacer la suma se deberá emplear equivalencias entre las unidades, la equivalencia llamada *factor de conversión* suele expresarse mediante una igualdad o un cociente.

## Ejemplo 5

$$2.2 \text{ libras} = 1 \text{ kg.} \quad \frac{2.2 \text{ libras}}{1 \text{ kg}} = 1$$

Para convertir una cantidad expresada en términos de una unidad en su equivalente en términos de otra unidad se debe utilizar el factor de conversión partiendo del hecho de que en álgebra, multiplicar por 1 no afecta al resultado.

Así:

$$6 \text{ kg frijoles} + 10 \text{ libras frijoles} \times \frac{1\text{kg}}{2.2 \text{ libras}} = 10.545\text{kg frijoles}$$

Con frecuencia en los cálculos químicos hay que efectuar la operación de conversión varias veces, empleando varios factores de conversión, por lo que al hacer las operaciones se parecen estas a las de los eslabones de una cadena.

### Ejemplo.6

Convertir 5 cm / s a pies por hora

Solución

$$5 \frac{cm}{s} \times \frac{1 m}{100 cm} \times \frac{pie}{0.305 m} \times \frac{3600 s}{h} = 590.1638 \frac{pie}{h}$$

Resultado

5 cm /s equivalen a 590.1638 pies / h

Por lo tanto, al hacer una transformación lo que se requiere es multiplicar tantas veces por uno como transformaciones se requieran. La mejor manera de evitar el error común de multiplicar cuando se tiene que dividir y viceversa, es escribir las unidades en los cálculos de este tipo. El procedimiento será el correcto cuando se cancelen las unidades viejas y sólo resulten al final las unidades nuevas.

Los sistemas de unidades más empleados en los cálculos químicos son el SI (sistema internacional de unidades), el MKS (absoluto y gravitacional) y el sistema Inglés (gravitacional y absoluto) de unidades. Algunos factores de conversión pueden obtenerse del apéndice.

En los sistemas absolutos, las unidades fundamentales son la longitud, la masa y el tiempo y de ellas se derivan las demás. Por ejemplo, en el Sistema Internacional y el MKS absoluto las unidades fundamentales son *el metro*, el *kilogramo masa* y el *segundo*. En esos sistemas la aceleración está dada en  $m / s^2$  y la fuerza es el Newton (aquella fuerza que a la unidad de masa le imprime la unidad de aceleración  $kg m / s^2$ ). En los sistemas absolutos las unidades fundamentales son la longitud, el tiempo y la fuerza. Por ejemplo en el sistema MKS gravitacional las unidades son *el metro*, el *segundo* y el *kilogramo fuerza o kilopond* (la fuerza que al kilogramo masa le provoca una aceleración de  $9.81 m / s^2$ ), siendo la masa una unidad derivada llamada *geokilo*.

De manera que para convertir la fuerza en Newtons a kilogramos fuerza (abreviado  $k\bar{g}$ ) se debe utilizar un factor de conversión que en este caso se denomina por  $g_c$  y que es igual a:

$$g_c = \frac{9.81 N}{k\bar{g}} = 9.81 \frac{\frac{kgm}{s^2}}{k\bar{g}} = 1 \frac{\frac{s^2}{N}}{N} = 32.2 \frac{\frac{s^2}{lb}}{lb}$$

El peso de un objeto es la fuerza que ejerce sobre el objeto la atracción gravitacional.

$$\text{Peso} = F = \text{masa} \times g$$

En donde  $g$  es la aceleración de la gravedad. En la Tierra la aceleración debida a la gravedad en promedio es de  $9.81 m / s^2$

## Ejemplo 7

Supongamos que una persona tenga una masa de 50 kg. ¿Cuál sería su peso?

Solución.

El peso sería de:

$$\text{Peso} = 50 \text{ kg} \times 9.81 \text{ m/s}^2 = 490.5 \text{ N} = 490.5 / g_c = 50 \text{ kg}$$

*Resultado*

Una persona que tiene una masa de 50 kg en la Tierra pesa 50 kg o 490.5 N

## Congruencia de una relación matemática

Cualquier igualdad matemática válida requiere que ambos términos sean congruentes dimensionalmente, es decir, que cuando se sustituyan las literales de la ecuación matemática por las dimensiones correspondientes (masa, longitud, tiempo y temperatura) ambos términos de la ecuación tengan las mismas dimensiones.

Una ecuación puede ser dimensionalmente correcta, pero no serlo en cuanto al tipo de unidades que se emplean para medir las diferentes dimensiones, por lo que es necesario asegurarse de que se emplea el mismo tipo de sistema de unidades en los dos lados de la ecuación. Cuando no se tiene lo anterior se deberán hacer las conversiones necesarias.

## Ejemplo 8

La densidad de todos los cuerpos varía con la temperatura. En algunos líquidos esa variación puede expresarse por medio de la siguiente fórmula:

$$\rho = \rho_o + A t$$

Donde  $\rho = \text{kg} / \text{m}^3$  a una temperatura  $t$  en  $^{\circ}\text{C}$

$\rho_o = \text{kg} / \text{m}^3$  a la temperatura base  $t_o$

¿Cuáles deben ser las unidades de A?

*Solución:*

Recordando que, para que una ecuación sea correcta desde el punto de vista de las unidades, ambos lados de la ecuación deben tener las mismas unidades, por lo que:

$$\begin{aligned}\rho &= \rho_o + A t \\ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} &= \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} + A ^{\circ}\text{C} \\ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} - \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} &= A ^{\circ}\text{C} \\ \therefore A &= \frac{\text{kg}}{\text{m}^3 \text{ } ^{\circ}\text{C}}\end{aligned}$$

*Resultado*

Las unidades de A deben ser  $\text{kg} / \text{m}^3 \text{ } ^{\circ}\text{C}$ . Este factor se llama coeficiente de dilatación.

## **Mol**

La masa atómica de un elemento es la masa de un átomo en relación con la masa del isótopo del carbono  $^{12}\text{C}$  a la que se da un valor de 12.

La masa molecular (usualmente llamada peso molecular) de un compuesto es la suma de las masas atómicas de los átomos que constituyen la molécula del compuesto. Por ejemplo la masa molecular o peso molecular del  $\text{CH}_4$  se obtendría mediante la suma de  $4 \times 1 + 12 = 16$ .

Un gramo mol o mol de una sustancia es la cantidad de esa sustancia cuya masa en gramos es numéricamente igual a su masa molecular. Si se trata de un átomo se hablará de átomo gramo.

Se pueden utilizar otras unidades derivadas de la mol tales como el kg mol, la libra mol, que se definen de manera semejante.

Si el peso molecular de una sustancia es PM, entonces hay PM en kg / kg mol, PM en g / mol y PM en lb / lb mol de esa sustancia.

### **Ejemplo 9**

¿Cuántas moles hay en 56 kg de  $\text{CH}_4$ ?

*Solución:*

$$56 \text{ kg de } \text{CH}_4 \times \frac{\text{kgmol de } \text{CH}_4}{16 \text{ kg de } \text{CH}_4} \times \frac{1000 \text{ mol}}{1 \text{ kgmol}} = 3500 \text{ mol}$$

*Resultado*

En 56 kg de metano hay 3500 mol

## **Gastos**

En los procesos de la industria se debe tener un estricto control sobre la materia y energía que entra y sale de ellos. Los procesos continuos involucran el movimiento de sustancias de un punto a otro del sistema, algunas veces entre los equipos del proceso, otras desde las instalaciones de producción hasta el almacén o viceversa. La rapidez a la que se transporta una sustancia a través de una línea, proceso o equipo se denomina *gasto* y puede medir tanto gases, líquidos o sólidos como a sus mezclas. El gasto se puede expresar como:

*Gasto másico*

*Gasto volumétrico o caudal*

*Gasto molar.*

Las dimensiones correspondientes a cada caso son:

Gasto másico = Masa / Tiempo =  $M / \theta$

Gasto volumétrico = Volumen / Tiempo =  $L^3 / \theta$

Gasto molar = moles / tiempo =  $M / \theta$

El gasto se utiliza para medir gases, líquidos, sólidos o mezclas. Es conveniente identificar cada uno de los casos con literales especiales:

Tabla 3 Distintos tipos de gastos.

	Gasto másico	Gasto volumétrico o caudal	Gasto molar
De gases	G	Ca	$\tilde{G}$
De líquidos	L	Ca	$\tilde{L}$
De sólidos	S	Ca	$\tilde{S}$
De mezclas	M	Ca	$\tilde{M}$

Para medir los gastos se pueden utilizar muchos dispositivos colocados en las líneas de proceso, para que den lecturas continuas de la cantidad de materia que está procesándose. En sus gran mayoría estos dispositivos son caudalímetros (miden flujos volumétricos) o medidores de velocidad, siendo menos frecuentes los aparatos que miden la masa (masímetros).

Entre los caudalímetros podemos citar al rotámetro que es un tubo vertical que contiene un flotador; cuanto mayor sea el caudal, tanto mayor será la altura que alcanza el flotador en el tubo (Figura 1.-3).

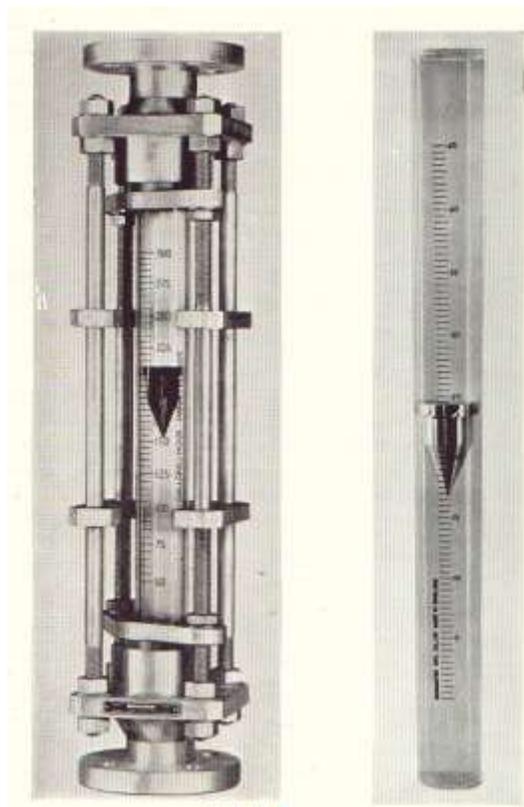


Figura 3. Rotámetro

Otro caudalímetro muy usado es el medidor de discos, el cual es un aparato provisto de discos giratorios que se instala en la línea, el paso del fluido hace mover los discos, cada giro es equivalente a un cierto caudal el cual se registra en una carátula (Figura 4).

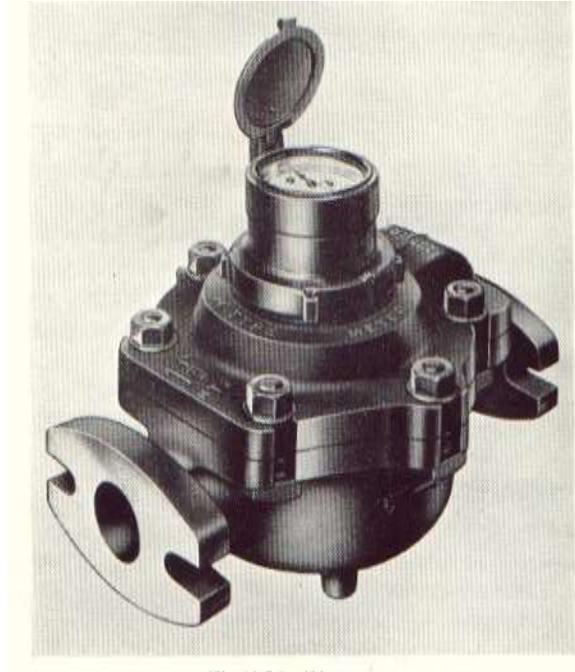


Figura 4. Medidor de discos

Entre los medidores de velocidad están el medidor de orificio que es una obstrucción en el ducto que tiene una abertura estrecha, a través de la cual pasa el fluido. La presión del fluido disminuye al pasar por esta obstrucción y esta caída de presión (que se mide con un manómetro) varía con la velocidad del fluido (Figura 5).

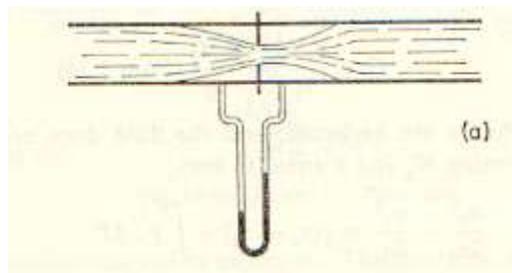


Figura 5. Medidor de orificio

Otro medidor de velocidad es el tubo Pitot

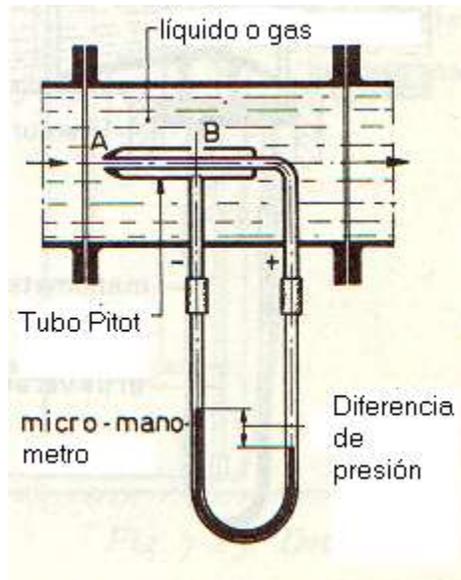


Figura 6. Tubo de Pitot

Si lo que se obtiene es la velocidad, el *caudal* puede obtenerse por:

$$Ca = v (A)$$

en donde  $v$  es la velocidad media en la línea y  $A$  es el área de la sección transversal.

Con el caudal puede obtenerse el gasto *másico* ya que:

$$L = Ca \rho$$

Donde  $\rho$  es la densidad de la sustancia que se está procesando.

Para obtener el gasto molar bastará con dividir el gasto másico entre el peso molecular de la corriente.

$$\tilde{L} = L / PM$$

### Ejemplo 10

Por una línea de 2 pulgadas de diámetro interno viaja agua a la velocidad media de 1 m / s ¿Cuál es el caudal que está pasando? ¿Qué gasto másico y molar de agua pasa por la línea? Dato: la densidad del agua puede tomarse como de 1000 kg / m<sup>3</sup>.

*Solución*

El diámetro de la línea en m es:

$$2 \text{ pulgadas} \times \frac{2.54 \text{ cm}}{\text{pulgada}} \times \frac{1 \text{ m}}{100 \text{ cm}} = 0.0508 \text{ m}$$

Por lo tanto el área de paso o área transversal es:

$$A = \pi R^2 = 3.14 \times (0.0254 \text{ m})^2 = 0.0020258 \text{ m}^2$$

El caudal es:

$$Ca = v A = 1 \text{ m/s} (0.0020258) \text{ m}^2 = 0.0020258 \text{ m}^3 / \text{s} = 7.2928 \text{ m}^3 / \text{h}$$

El gasto másico es:

$L = Ca \rho = 7.29928 \text{ m}^3 / \text{h} ( 1000 \text{ kg} / \text{m}^3 ) = 7299.28 \text{ kg} / \text{h} = 2.0258 \text{ kg} / \text{s}$   
 El gasto molar es:

$$\tilde{L} = \frac{L}{PM} = \frac{7299.28 \frac{\text{kg}}{\text{h}}}{18 \frac{\text{kg}}{\text{kgmol}}} = 405.51 \frac{\text{kgmol}}{\text{h}} = 0.1126 \frac{\text{kgmol}}{\text{s}}$$

### Resultados

El caudal es de  $7.2928 \text{ m}^3 / \text{h}$ , el gasto másico es de  $2.0258 \text{ kg} / \text{s}$  y el gasto molar es de  $0.1126 \text{ kg mol de agua} / \text{s}$

## **Propiedades de los fluidos**

En la naturaleza se presentan cuatro estados de agregación de la materia, a saber: sólido, líquido, gaseoso y plasma.

La diferencia principal entre los gases, los líquidos y los sólidos consiste en que los primeros tienen fluidez, o sea cohesión pequeña entre las moléculas, falta de fuerzas de rozamiento entre las moléculas en reposo, en virtud de la cual el líquido acepta con facilidad la forma del recipiente donde está contenido. En los recipientes los líquidos forman una superficie libre y si el líquido se echa sobre un plano se desparrama sobre este formando una película fina. El gas también tiene la propiedad de fácil movilidad de las partículas, es decir fluidez, pero a diferencia del líquido es compresible, no forma superficie libre y ocupa todo el volumen del recipiente que lo contiene. La fluidez de las partículas del líquido y del gas los reúne bajo el nombre de fluidos. Los fluidos, como todos los materiales, tienen propiedades físicas que permiten caracterizar y cuantificar su comportamiento así como distinguirlos de otros. Algunas de estas propiedades son exclusivas de los fluidos y otras son típicas de todas las sustancias. Características como la viscosidad, tensión superficial y presión de vapor solo se pueden definir en los líquidos y gases. Sin embargo la densidad, el peso específico y la densidad relativa o (gravedad específica) son atributos de cualquier materia.

### Densidad

Como se ha observado la densidad es una variable necesaria para obtener los gastos de las corrientes. La densidad es una variable que relaciona la masa con el volumen de un cuerpo.

$$\rho = M / V = M / L^3$$

Las unidades de la densidad pueden ser  $\text{kg} / \text{m}^3$ ,  $\text{kg} / \text{l}$ ,  $\text{Libras} / \text{ft}^3$ ,  $\text{libras} / \text{galón}$ , etc.

Una variable relacionada con la densidad es la llamada densidad relativa que es la relación de la densidad de una sustancia con respecto a la densidad de una sustancia tomada como referencia. La sustancia de referencia en el caso de sólidos y líquidos suele ser el agua; en los gases se toma el aire.

$$\rho_R = \frac{\text{densidad de una sustancia}}{\text{densidad del agua}}$$

Como se puede deducir, la densidad relativa no tiene dimensiones

Debido a la dilatación que sufren los cuerpos al aumentar la temperatura, la densidad de los cuerpos varía con la temperatura, por lo que al hablar de densidades y de densidades relativas se debe especificar la temperatura a la cual se hace la medición, es costumbre entonces decir:

Densidad  $\rho$  a 20 °C

Densidad relativa  $\rho_R$  a 15 /4

Indicándose que la densidad de la sustancia se midió a 15 °C y la del agua se tomó a 4 ° C.

La densidad de los líquidos y sólidos más comunes puede encontrarse en la bibliografía clásica (manuales)

La densidad de las sustancias sólidas poco conocidas puede obtenerse fácilmente mediante una probeta y una báscula.

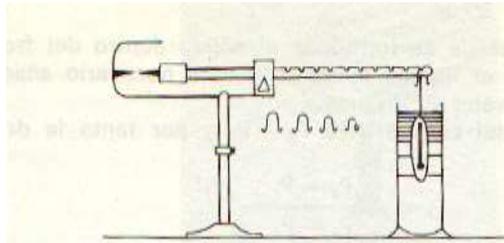


Figura 7. Balanza de Morh-Westphal para obtención de densidades.

La densidad de los líquidos y sus mezclas también se puede obtener mediante ese procedimiento, aunque con mucha frecuencia se emplean densímetros o aerómetros para medirla. La determinación de la densidad de un líquido puede efectuarse tanto pesándola directamente, como utilizando la ley de Arquímedes con la ayuda de los densímetros o aerómetros.



El densímetro se sumerge en el líquido y flota en éste. Cuanto mayor es la densidad de un líquido, tanto menos se sumerge el tubo del densímetro. En la escala del tubo están indicadas las densidades.

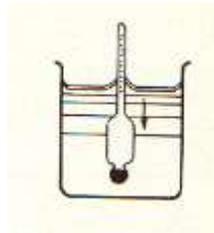


Figura 8. Densímetro o aerómetro

En la industria alimentaria se suelen usar aerómetros calibrados en grados para obtener la densidad, estos grados no son de temperatura por lo que no hay que confundirlos. Las escalas más empleadas son en grados Baumé, grado Gay Lussac, grados Proof, etc.

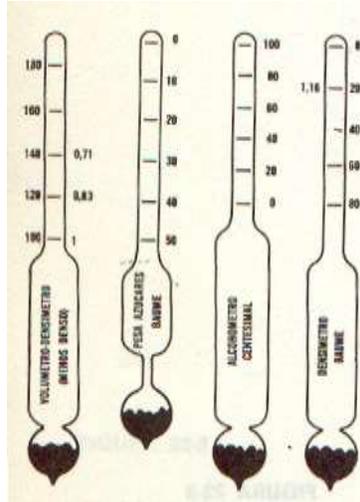


Figura 9. Tipos de areómetros

La forma más conocida de densímetro es la que se usa para medir la densidad de leche, llamado lactómetro, que sirve para conocer la calidad de la leche. La densidad específica de la leche de vaca varía de 1,027 hasta 1,035. Como la leche contiene otras sustancias, aparte de agua (87%), también se puede saber la densidad específica de albúmina, azúcar, sal, y otras sustancias más ligeras que el agua.

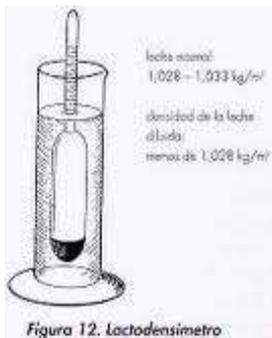


Figura 12. Lactodensímetro

Para comprobar el estado de carga de una batería se utiliza variedad de densímetro. Está constituido por una probeta de cristal, con una prolongación abierta, para introducir por ella el líquido a medir, el cual se absorbe por el vacío y el asado interno que crea una manzana de goma situada en la parte superior de la probeta. En el interior de la misma va situada una ampolla de vidrio, cerrada y llena de aire, equilibrada con un peso a base de perdigones de plomo. La ampolla va graduada en unidades densimétricas, de 1 a 1,30.

- Lactómetro - Para medir la densidad específica y calidad de la leche.
- Sacarómetro - Para medir la cantidad de azúcar de una melaza.
- Salímetro - Para medir la densidad específica de las sales.
- Areómetro Gay –Lussac – Para medir concentraciones de alcohol en las bebidas alcohólicas.
-

### Densidad relativa

Se denomina densidad relativa o gravedad específica a la relación que exista entre la densidad de una sustancia cualquiera y una sustancia de referencia. Para los líquidos se utiliza la densidad del agua a 4°C como referencia, que corresponde a 1 g/cm<sup>3</sup> y para los gases se utiliza al aire con densidad a 20°C y la presión de 1,013 bar es 1.204 kg/m<sup>3</sup>.

La densidad relativa es el cociente de la densidad de una sustancia a la densidad de la sustancia de referencia. La sustancia de referencia en el caso de sólidos y líquidos es el agua, en los gases se suele tomar el aire.

$$\rho_R = \frac{\rho_S}{\rho_{AGUA}}$$

Debido a que la densidad de una sustancia y la del agua se afectan con la temperatura, pero no en el mismo grado, es necesario especificar la temperatura cuando se habla de densidad relativa. Así que:

$$\rho_R = 0.7 \text{ a } \frac{60^\circ F}{60^\circ F}$$

Significa que la densidad relativa de la sustancia es de 0.7 cuando la densidad de la sustancia y la del agua se midieron a 60 ° F. Entre las escalas de densímetros que utilizan a la densidad relativa están:

La escala Baumé que se basa en considerar el valor de 10°Bé al agua destilada. Existen fórmulas de conversión de °Bé en densidades:

- Para líquidos más ligeros que el agua:  $^\circ Be = \left(\frac{140}{\rho_R}\right) - 130$
- Para líquidos más densos que el agua:  $^\circ Be = 145 - \left(\frac{145}{\rho_r}\right)$

En donde  $\rho_R$  es la densidad relativa a 60°F/60°F

La densidad en grados API (American Petroleum Institute) es la escala más usada para medir la densidad relativa de los productos derivados del petróleo. Se usa para medir líquidos más ligeros que el agua.

$$^\circ API = \frac{141.5}{\rho_R} - 131.5$$

En donde  $\rho_R$  es la densidad relativa a 60°F/60°F.

Los petróleos se suelen clasificar de acuerdo a su densidad en grados °API:

Crudo liviano API>31,  
 Crudo medio 22 a 31 ° API,  
 Crudo pesado 10 a 23 ° API,  
 Crudo extra pesado < 10° API

EL petróleo mexicano se divide en tres crudos:

Crudo Istmo con 33.6 ° API que es un crudo liviano; Crudo Maya con 22° API lo que lo hace un crudo medio y el crudo Olmeca con 39.3°API que es el crudo más liviano y con menos contenido de azufre.

## Ejemplo 11

Un camión transporta 8000 litros de gasóleo cuya densidad es de 26°API  
 ¿Cuántas toneladas de gasóleo son las que transporta?

### 2.- Planteamiento

#### 2.1.- Densidad

$$^{\circ}API = \frac{141.5}{\rho_r} - 131.5$$

#### 2.2.- Masa

$$\rho_r = \rho_{agua} \rho_{sustancia}$$

$$\rho_{sustancia} = \frac{Masa}{Volumen}$$

### 3.-Cálculos

#### 3.1.- Densidad

$$\rho_r = \frac{141.5}{131.5+26} = 0.8984$$

$$\rho_{sustancia} = 0.8984 \left( 1000 \frac{kg}{m^3} \right) = 898.4 \frac{kg}{m^3}$$

#### 3.2.- Masa

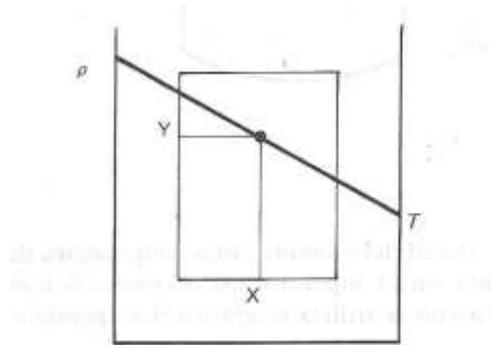
$$M = 898.4 \frac{kg}{m^3} \times 8m^3 = 7187.2 kg = 7.18 toneladas$$

### 4.- Resultado

El camión transporta 7.18 toneladas.

## Ejemplo 12

Encuentre la densidad del benceno a 50 ° C.



La densidad del benceno se puede obtener mediante un densímetro o mediante el nomograma del apéndice, ya que con las coordenadas  $X=32.7$ ,  $Y =63$  y la temperatura de 50 ° C se obtiene la densidad relativa de 0.885 o de 885 kg / m<sup>3</sup>.

Resultado: Mediante el nomograma la densidad es de 885 kg /m<sup>3</sup>.

### Densidades de los gases

La densidad de un gas ideal se puede obtener mediante la aplicación de la ley de los Gases Ideales.

$$pV = nRT = \frac{m}{PM} RT$$

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{p PM}{R T}$$

En donde  $p$  es la presión,  $T$  la temperatura absoluta,  $m$  la masa,  $V$  el volumen,  $PM$  el peso o masa molecular y  $R$  la constante de los gases.

Si el gas no es ideal entonces:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{p PM}{z R T}$$

En donde  $z$  es el factor de compresibilidad que es función de la presión y temperatura críticas del gas.

## Ejemplo 13

Encuentre la densidad del CO<sub>2</sub> a la temperatura de 23 ° C y a 586 mm de Hg.

Si el gas se comporta como ideal:

*Solución*

$$\rho = \frac{586 \text{ mmHg} \times 44 \frac{\text{kg}}{\text{kgmol}}}{760 \frac{\text{mm Hg}}{1 \text{ atm}} \times 0.082 \frac{\text{m}^3 \text{ atm}}{\text{kgmol} \text{ }^\circ \text{ K}} \times (23 + 273^\circ \text{ K})} = 1.397 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

### Otros densímetros y escalas

#### Grados Gay Lussac

Estos densímetros miden el porcentaje de alcohol en volumen en una muestra.

Peso específico

$^\circ\text{G}_L = \%$  de alcohol en volumen

Otras escalas relacionadas son:

Los grados Proof ingleses también miden el contenido de alcohol

$^\circ\text{G}_L = \text{Grados (Proof ingleses} \times 4) / 7$

Los grados Proof norteamericanos

$^\circ\text{G}_L = (\text{Grados Proof norteamericanos}) / 2$

#### Grados Brix

Son densímetros empleados para medir la cantidad de azúcar en una solución.

$^\circ\text{Brix} = (\text{gramos de sacarosa}) / (100\text{g de líquido})$

Otras escalas semejantes son, los grados Balling y los grados Plato que se utilizan para lo mismo y que son iguales a los Brix.

#### Grados Twaddell

$^\circ\text{T}_W = 200(\rho_R - 1)(10)$

Una propiedad relacionada con la densidad, es el *peso específico*, el cual se define como el peso de la unidad de volumen.

$$P_e = \text{Peso} / \text{Volumen} = \text{N} / \text{m}^3, \text{ Kg fuerza} / \text{m}^3$$

Las dimensiones de peso específico son =  $M / (\theta^2 L^2)$

Debido a la relación que existe entre el kilogramo masa y el kilogramo fuerza, si se sabe el valor numérico de la densidad de una sustancia en  $\text{kg} / \text{m}^3$ , se podrá obtener el peso específico de la misma, el cual tendrá el mismo valor numérico pero ahora sus unidades serán de  $\text{kg fuerza} / \text{m}^3$

El peso específico corresponde a la fuerza con que la tierra atrae a una unidad de volumen. Se designa por  $P_e$ . El peso específico es una magnitud vectorial, su valor depende de la aceleración de la gravedad en el punto determinado. La densidad y el peso específico están relacionados por:

$$P_e = \rho g$$

Donde  $g$  representa la intensidad del campo gravitacional que en la Tierra se toma comúnmente como  $9.81 \text{ m} / \text{s}^2$ .

### Volumen específico

El volumen específico es el recíproco de la densidad absoluta.

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

Es decir el volumen específico es el volumen que ocupa 1 kg de masa de una sustancia. El volumen específico del agua destilada a la presión atmosférica y a 4 ° C es aproximadamente igual a  $10^{-3} \frac{m^3}{kg}$ . Es interesante observar que la densidad del aire a la presión atmosférica y a 4 ° C es aproximadamente 1.3 kg / m<sup>3</sup>, y su volumen específico es de 1 / 1.3 m<sup>3</sup>/ kg; es decir, 1 kg de aire a la presión atmosférica ocupa aproximadamente 800 veces más espacio que 1 kg de agua.

### Coeficiente térmico de dilatación

La dilatación de un cuerpo durante el calentamiento se caracteriza por el coeficiente térmico de dilatación volumétrica  $\beta$  que expresa la variación relativa del volumen de un cuerpo al variar la temperatura un grado.

$$\beta = \frac{V_{t_2} - V_{t_1}}{V_{t_1}} \frac{1}{t_2 - t_1}$$

En donde  $V_{t_2}$  es el volumen del líquido a la temperatura  $t_2$ ;  $V_{t_1}$ , el volumen del líquido a  $t_1$ .

El coeficiente térmico de dilatación volumétrica del agua a T 0 20 ° C es igual a 0.00015 °C<sup>-1</sup>. El coeficiente volumétrico de los gases es 1 /273.

### Compresibilidad

La compresibilidad es la propiedad que tienen los cuerpos de reducir su volumen, bajo la acción de fuerzas externas. El volumen de los líquidos varía muy poco con la presión, mientras que el de los gases ideales varía de acuerdo con:

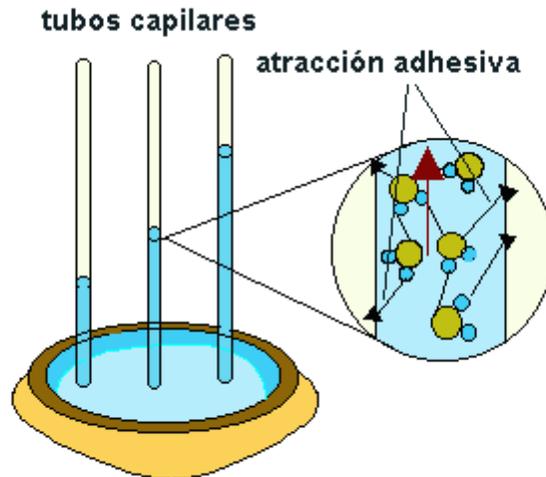
$$P_1 V_1 = P_2 V_2$$

### Cohesión, adhesión y tensión superficial

La primera propiedad permite a las partículas fluidas resistir a pequeños esfuerzos de tensión. La formación de una gota se debe a la cohesión. Cuando un líquido está en contacto con un sólido, la atracción ejercida por las moléculas del sólido puede ser mayor que la atracción existente entre las moléculas del propio líquido. Ocurre entonces la adhesión.

En la superficie de un líquido en contacto con el aire, se tiene la formación de una verdadera película elástica debida a que la atracción entre las moléculas del líquido es mayor que la ejercida por el aire y las moléculas superficiales son atraídas hacia el interior del líquido y tienden a volver el área de la superficie un mínimo. Es el fenómeno de tensión superficial.

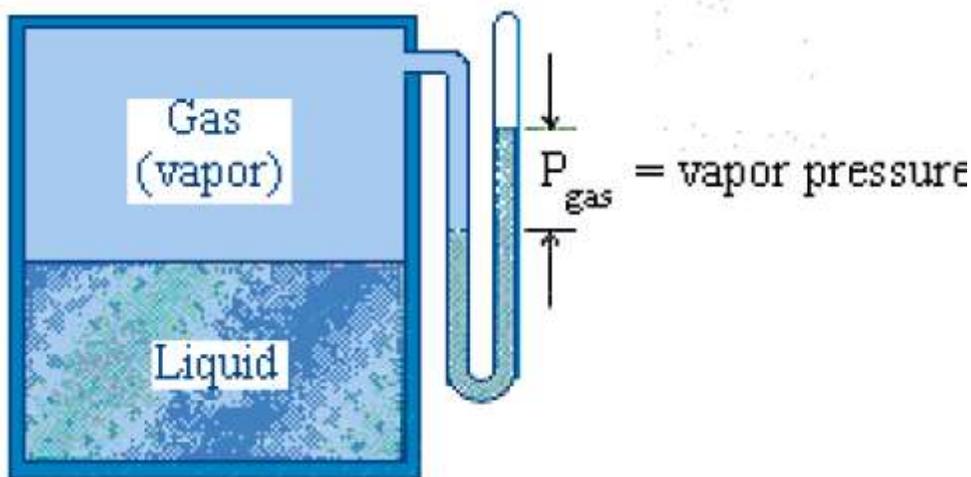
Las propiedades de adhesión, cohesión y tensión superficial son responsables de los fenómenos de capilaridad. La elevación de un líquido, dentro de un tubo de pequeño diámetro, es inversamente proporcional al diámetro. Como son frecuentemente empleados tubos de vidrio y de plástico para medir presiones (piezómetros), es aconsejable el empleo de tubos con diámetro superiores a 1 cm, para que los efectos de la capilaridad sean despreciables. En un tubo de 1 mm de diámetro, el agua puede subir hasta 3.5 cm.



Tensión de vapor

En la superficie libre de un líquido a cualquier temperatura hay un constante movimiento de moléculas que escapan de dicha superficie, es decir, el líquido se evapora. Si el líquido se encuentra en un recipiente cerrado, y sobre su superficie queda un espacio libre, este espacio se llega a saturar de vapor y ya no se evaporará más líquido. Si se aumenta la temperatura,

aumenta la presión de saturación y se evaporará más líquido. Es decir, todo fluido tiene para cada temperatura una presión  $P^o$  llamada presión de saturación del vapor a esa temperatura, o lo que es lo mismo, a cada presión corresponde una temperatura  $T_s$  llamada temperatura de saturación del vapor. Esta propiedad es fundamental para el estudio de la cavitación.



La viscosidad

La viscosidad de los fluidos es una propiedad importantísima que se manifiesta durante su movimiento. Al moverse un fluido las capas que se mueven a mayor velocidad arrastran a las capas contiguas. La propiedad de los fluidos de oponer resistencia a las fuerzas tangenciales que tratan de desplazar unas partículas con respecto a otras se llama viscosidad. Esta propiedad se abordará con mayor detalle en otro capítulo.

### Fluido ideal

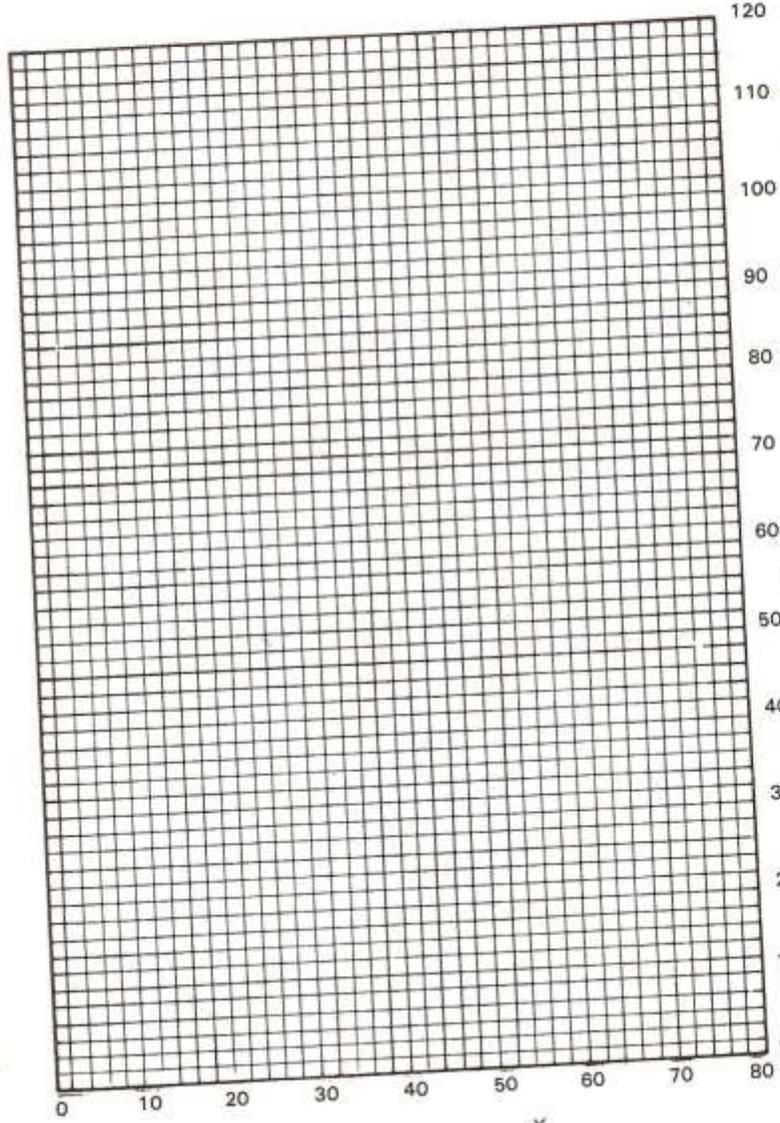
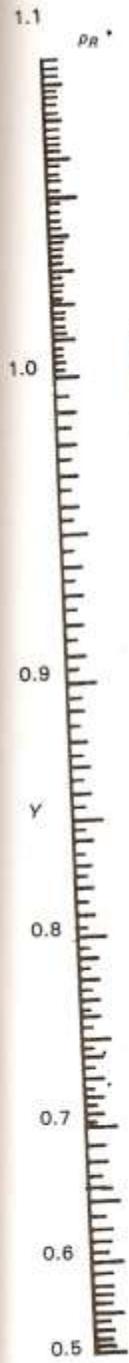
En mecánica de fluidos se define a un fluido ideal como aquel cuya viscosidad es nula es decir  $\mu=0$ . En ningún fluido real la viscosidad es nula. Los dos fluidos más importantes para un ingeniero, el aire y el agua, son poco viscosos, pero ninguno es un fluido ideal. Un fluido ideal circulando por una tubería no experimentaría pérdida alguna de energía. Un avión volando en un aire ideal y un submarino navegando en agua ideal no experimentarían resistencia a o arrastre alguno. La experiencia contradice, pues la hipótesis de que el agua o el aire sean fluidos ideales, paradoja de D'Alambert. Sin embargo, Prandtl con su teoría de la capa límite transformó la hidrodinámica de fluido ideal en una mecánica de fluidos muy aprovechable para los fluidos reales de pequeña viscosidad, como el aire y el agua.

Apéndice III. Densidades de líquidos en función de la temp  
Valores de (X, Y)

<i>Compuesto</i>	X	Y
Acetato de etilo	35.0	65.0
Acetato de metilo	40.1	70.3
Acetato de propilo	33.0	65.5
Acetona	26.1	47.8
Acetonitrilo	21.8	44.9
Acetileno	20.8	10.1
Ácido acético	40.6	93.5
Ácido butílico	31.3	78.7
Ácido isobutílico	31.5	75.9
Ácido propiónico	35.0	83.5
Alcohol etílico	24.5	48.6
Alcohol isoamílico	20.5	52.0
Alcohol metílico	25.8	49.1
Alcohol n. propílico	23.8	50.8
Amoniaco	22.4	24.6
Anilina	33.5	92.5
Benceno	32.7	63.0
Isobutano	13.7	16.5
Butirato de isometilo	33.0	64.1
Butirato de n-metilo	31.5	65.5
Ciclohexano	19.6	44.0
Clorobenceno	41.7	105.0
Cloruro de etilo	42.7	62.4
Cloruro de metilo	52.3	62.9
Decano	16.0	38.2
Dietilamina	17.8	33.5
Dióxido de carbono	78.6	45.4
Duodecano	14.3	41.4
Propionato de metilo	36.5	68.3
Propionato de etilo	32.1	63.9
Propionitrilo	20.1	44.6
Sulfuro de etilo	25.7	55.3
Sulfuro de metilo	31.9	57.4

<i>Compuesto</i>	<i>X</i>	<i>Y</i>
n-Eicosano	14.8	47.5
Etano	10.8	4.4
Éter etílico	22.6	35.8
Éter metílico	27.2	30.1
Éter metil-etílico	25.0	34.4
Éter propil-etílico	20.0	37.0
Etil mercaptano	32.0	55.5
Fenol	35.7	103.8
Fosfina	28.0	22.1
Fluorobenceno	41.9	36.7
Formiato de etilo	22.6	35.8
Formiato de metilo	46.4	74.6
Formiato de propilo	33.8	66.7
n-Heptadecano	15.6	45.7
n-Heptano	12.6	29.8
n-Hexadecano	15.8	45.0
n-Hexano	13.5	27.0
Metil mercaptano	37.3	59.5
n-Nonadecano	14.9	47.0
n-Nonano	16.2	36.5
n-Octadecano	16.2	46.5
n-Octano	12.7	32.5
n-Pentadecano	15.8	44.2
n-Pentano	12.6	22.6
Isopentano	13.5	22.5
Piperidina	27.5	60.0
Propano	14.2	12.2
n-Tetradecano	15.8	43.3
n-Tridecano	15.3	42.4
Trietilamina	17.9	37.0
n-Undecano	14.4	39.2

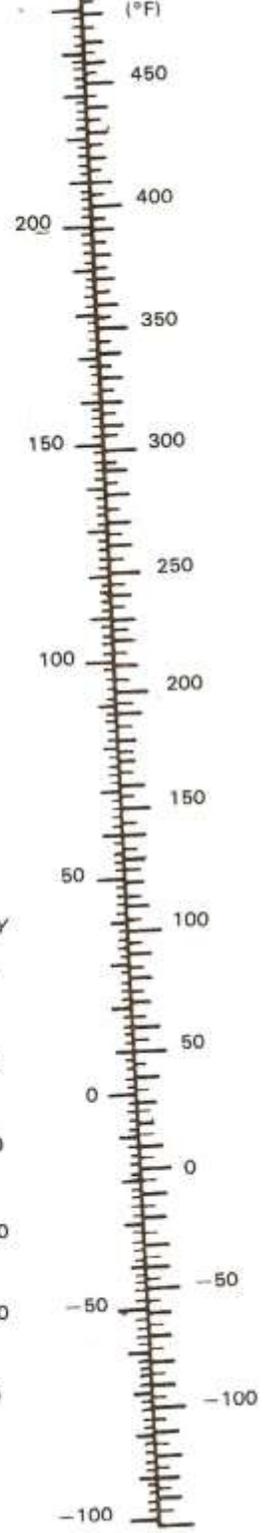
APENDICES



(°C)

500

(°F)



Densidad Líquidos Orgánicos.

## Problemas de autoevaluación

1.-Calcule la presión que existe dentro de un cilindro de 400 l que contiene 80 kg de CO<sub>2</sub> a 50 ° C. Haga primero el cálculo como gas ideal y luego como gas real.  
R.-La presión si es gas ideal es de 120 atm, como gas real sería de 75 atm.

2.- El gas natural saliente de un pozo petrolero está a 100 atm de presión y 80 °C y tiene la siguiente composición:

metano	40%	En mol
etano	2%	En mol
nitrógeno	58 %	En mol

Calcule el volumen ocupado por 1000 kg de ese gas ¿Cuál será su densidad absoluta?

R.-El volumen es de 1.95 m<sup>3</sup> y la densidad de 83.65 kg / m<sup>3</sup>.

3.- La densidad relativa de un petróleo es de 0.907. Determine su densidad en grados API.

R.-

4.- En una destilería se deben tratar 10 000 l/h medidos a 20 °C de una mezcla alcohólica que contiene 18% en peso de alcohol. ¿Qué cantidad en kg /h de líquido se debe procesar?

R.- La masa sería de 9527 kg /h

5.-Encuentre la densidad del tolueno a 65 ° C.

R.- La densidad es de 0.83 kg /L

6.-La viscosidad del agua a 15 °C es de:

$$7.6494 \times 10^{-4} \frac{lb}{ft s}$$

¿Cuál será la viscosidad del agua a la misma temperatura en Sistema internacional de unidades (SI)?

R.-

$$1.140 \times 10^{-3} \frac{kg}{m s}$$

7.- ¿Cuál es la densidad de la acetona a 25 ° C?

R.-785 kg /m<sup>3</sup>.

8.- Calcule la presión que existe dentro de un cilindro de 400L que contiene 80 kg de CO<sub>2</sub> a 50 ° C. Haga primero el cálculo como gas ideal y luego como gas real.

R.-La presión de acuerdo con la teoría de los gases ideales sería de 120 atm. La presión de acuerdo con los gases reales sería de 73 atm.