

## Capítulo 4



# La viscosidad

## Capítulo 4

### La Viscosidad

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 modela al alemán L. Prandtl (1875-1953). Esta es una ciencia relativamente joven a la cual aun hoy se están haciendo importantes contribuciones.

## **SISTEMA DE UNIDADES**

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.

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.

Se denomina densidad a la cantidad de materia por unidad de volumen de una sustancia. Se designa por  $\rho$  y se define:  $\rho = M / V$

El peso específico corresponde a la fuerza con que la tierra atrae a una unidad de volumen. Se designa por  $P_e$ . La densidad y el peso específico están relacionados por:

$$P_e = \rho g$$

Donde  $g$  representa la intensidad del campo gravitacional.

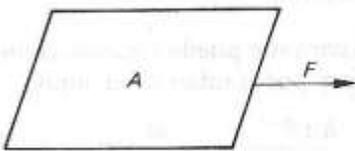
Se denomina densidad relativa o gravedad específica a la relación que exista entre la densidad de una sustancia cualquiera y una sustancia de referencia. Para los líquidos se utiliza la densidad del agua a 4°C como referencia, que corresponde a 1 g/cm<sup>3</sup> y para los gases se utiliza al aire con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

### Esfuerzo cortante y presión

El esfuerzo cortante, también llamado fuerza de cizallamiento, es aquella fuerza que se aplica tangencialmente a un área y que provoca deformaciones en los cuerpos. Se distingue de la presión en que esta última es la fuerza aplicada perpendicularmente a un área provocando la compresión.

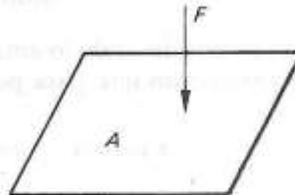
#### ESFUERZO CORTANTE

$$\tau = \frac{F}{A}$$



#### PRESIÓN

$$P = \frac{F}{A}$$



$$\begin{aligned} \tau &= \text{esfuerzo cortante } (=) ML^{-1}\theta^{-2} (=) FL^{-2} \\ P &= \text{presión } (=) ML^{-1}\theta^{-2} (=) FL^{-2} \\ F &= \text{fuerza } (=) ML\theta^{-2} (=) F \\ A &= \text{área } (=) L^2 \end{aligned}$$

Cuando se aplica un esfuerzo cortante sobre un fluido este se deforma. La resistencia a la deformación ofrecida por los fluidos recibe el nombre de viscosidad, la cual se define mediante la ley de Newton:

$$\tau = -\mu \frac{du}{dy}$$

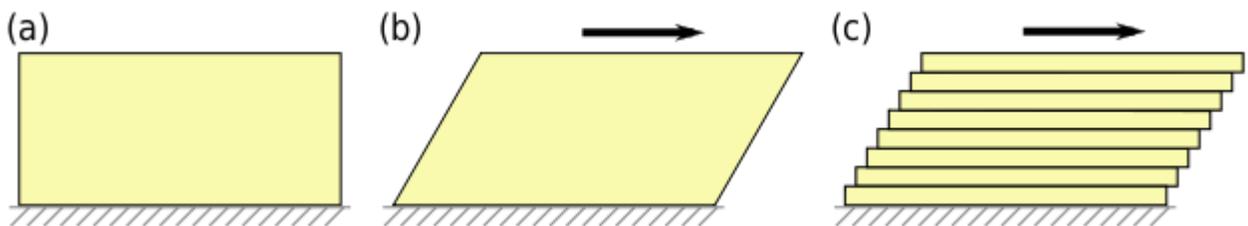
En donde  $\mu$  es la viscosidad dinámica del fluido,  $\tau$  es el esfuerzo cortante,  $u$  la velocidad,  $y$  la distancia. La viscosidad es aquella propiedad de un fluido por virtud de la cual ofrece resistencia al corte. Esta se puede clasificar en newtonianos, donde hay una relación lineal entre la magnitud del esfuerzo cortante aplicado y la rapidez de deformación resultante, y en no newtonianos, donde tal relación lineal no existe. **La Ley de la viscosidad de Newton** afirma que dada una rapidez de deformación angular en el fluido, el esfuerzo cortante es directamente proporcional a la viscosidad.

Esa ley la propuso Isaac Newton (1642- 1727) dentro de la publicación llamada "Philosophiae Naturalis principia mathematica" que se publicó en 1687 y en que se encuentra entre otras cosas sus análisis teóricos y experimentales sobre el movimiento de los fluidos y la naturaleza de la fricción interna de ellos, apareciendo así la primera definición de la viscosidad de un fluido.

La **viscosidad** es la oposición de un fluido a las deformaciones tangenciales. Un fluido que no tiene viscosidad se llama **fluido ideal**. En realidad todos los fluidos conocidos presentan algo de viscosidad, siendo el modelo de viscosidad nula una aproximación bastante buena para ciertas aplicaciones. La viscosidad sólo se manifiesta en líquidos en movimiento, ya que cuando el fluido está en reposo, la superficie permanece plana.

Imaginemos un bloque sólido (no fluido) sometido a una fuerza tangencial (por ejemplo: una goma de borrar sobre la que se sitúa la palma de la mano que empuja en dirección paralela a la mesa.) En este caso (a), el material sólido opone una resistencia a la fuerza aplicada, pero se deforma (b), tanto más cuanto menor sea su rigidez.

Si imaginamos que la goma de borrar está formada por delgadas capas unas sobre otras, el resultado de la deformación es el desplazamiento relativo de unas capas respecto de las adyacentes, tal como muestra la figura (c).



Deformación de un sólido por la aplicación de una fuerza tangencial.

En los líquidos, el pequeño rozamiento existente entre capas adyacentes se denomina viscosidad. Es su pequeña magnitud la que le confiere al fluido sus



peculiares características; así, por ejemplo, si arrastramos la superficie de un líquido con la palma de la mano como hacíamos con la goma de borrar, las *capas* inferiores no se moverán o lo harán mucho más lentamente que la superficie ya que son arrastradas por efecto de la pequeña resistencia tangencial, mientras que las capas superiores **fluyen** con facilidad. Igualmente, si revolvemos con una cuchara un recipiente grande con agua en el que hemos depositado pequeños trozos de corcho, observaremos que al revolver en el centro también se mueve la periferia y al revolver en la periferia también dan vueltas los trocitos de corcho del centro; de nuevo, las *capas* cilíndricas de agua se mueven por efecto de la viscosidad, disminuyendo su velocidad a medida que nos alejamos de la cuchara.

La viscosidad indica la facilidad con que un fluido fluye cuando actúan fuerzas externas sobre él. También se le suele considerar como una conductividad de momento, análoga a la conductividad de calor o al coeficiente de difusión.

En flujo de fluidos recibe el nombre de impulso o momento (en latín momentum) al producto de la masa por la velocidad.

$$\text{Momentum} = M u \quad \text{o en unidades fundamentales} = ML\theta^{-1}$$

Considerando lo anterior, el esfuerzo cortante puede tomarse como el flujo de momento que pasa por unidad de área y por unidad de tiempo:

$$\tau(=)FL^{-2}(=)ML^{-1}\theta^{-2}(=)\frac{ML\theta^{-1}}{L^2\theta}(=)\frac{\text{momentum}}{\text{area tiempo}} = \frac{M}{L\theta^2}$$

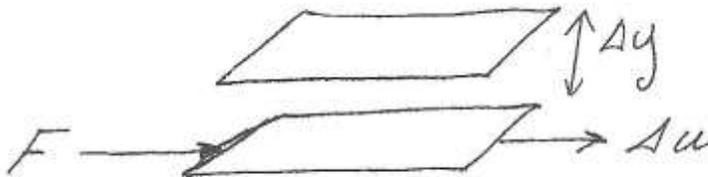
La viscosidad vendría a ser algo así como el grado de "pegajosidad" que tiene un líquido. Hablando un poco más claro se diría que la viscosidad es el rozamiento que tienen los líquidos. Cuando se piensa en un líquido con viscosidad se puede imaginar que hablamos de miel, de glicerina, de caramelo derretido o de algo por el estilo. Viscosidad es lo que tiene la miel, nótese que es como pegajosa. Le cuesta fluir. La miel se pega en todos lados. Si se vuelca un vaso con agua, el

agua se desparrama inmediatamente. En cambio si se da vuelta a un tarro con miel, la miel no se cae en seguida. Si se quiere saber a ojo que viscosidad tiene un líquido, se puede colocar este en la mano. Si se escapa rápido entre los dedos, tiene poca viscosidad (agua). Si se escapa despacio tiene mucha viscosidad, por ejemplo la miel, el champú, etc. Aunque por lo general se habla de que los líquidos tienen viscosidad cabe señalar que también los gases la poseen, aunque su viscosidad es mucho menor que la de los líquidos.

### Ejemplo 1.

Si la distancia entre 2 placas paralelas es de 0.00914 m y si la placa inferior se desplaza a una velocidad relativa de 0.366 m /s mayor que la superior y si el fluido usado es un aceite de soya cuya viscosidad es de  $4 \times 10^{-2}$  Pa-s a 303 K.

- Calcule el esfuerzo cortante y la velocidad de corte.
- Si se usa glicerina a 293 K con una viscosidad de 1.069 kg / m s en lugar del aceite de soya ¿Qué velocidad relativa se necesitará con la misma distancia entre las placas para obtener el mismo esfuerzo cortante que en el inciso a? Además ¿Cuál será la nueva velocidad de corte?



1.- Planteamiento.

$$\tau = -\mu \frac{\Delta u}{\Delta y}$$

2.- Cálculos

2.1.- Esfuerzo cortante y velocidad de corte.

$$\tau = 4 \times 10^{-2} \text{Pa-s} \left( \frac{0.366 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{0.00914 \text{m}} \right) = 1.6017 \text{ Pa} = 1.6017 \frac{\text{kg m}}{\text{s}^2 \text{m}^2} = 1.6017 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

$$\frac{\Delta u}{\Delta y} = 40 \frac{1}{\text{s}}$$

2.2.- Velocidades con glicerina.

$$1.6017 \text{ Pa} = 1.069 \frac{\text{kg}}{\text{m s}} \left( \frac{\Delta u}{0.00914} \right)$$

$$\Delta u = 0.01369 \frac{m}{s}$$

La velocidad de corte es entonces de  $0.01369/0.00914 = 1.498 \text{ s}^{-1}$

#### 4.-Resultados.

El esfuerzo cortante para la soya es de 1.6 Pa, la velocidad de corte de 40 1/s. Para la glicerina la velocidad relativa será de 0.01369 m/s y la velocidad e corte de 1.498 1/s

La viscosidad sólo se manifiesta en fluidos en movimiento, ya que cuando el fluido está en reposo adopta una forma tal en la que no actúan las fuerzas tangenciales que no puede resistir. Es por ello por lo que llenado un recipiente con un líquido, la superficie del mismo permanece plana, es decir, perpendicular a la única fuerza que actúa en ese momento, la gravedad, sin existir por tanto componente tangencial alguna.

Si la viscosidad fuera muy grande, el rozamiento entre capas adyacentes lo sería también, lo que significa que éstas no podrían moverse unas respecto de otras o lo harían muy poco, es decir, estaríamos ante un sólido. Si por el contrario la viscosidad fuera cero, estaríamos ante un superfluido que presenta propiedades notables como escapar de los recipientes aunque no estén llenos.

La viscosidad es una de las propiedades más importante de los fluidos, y por tanto esta requiere la mayor consideración en el estudio del flujo de fluidos. Esta es la resistencia que ejercen los fluidos al ser deformado cuando este se aplica un mínimo de esfuerzo cortante. La viscosidad de un fluido depende de su temperatura. Es por eso que en los líquidos a mayor temperatura la viscosidad disminuye mientras que en los gases sucede todo lo contrario lo contrario. Los líquidos y los gases corresponden a dos tipos diferentes de fluidos. Los primeros tienen un volumen constante que no puede alterarse apreciablemente si son sometidos a compresión, por ende se dice que son *fluidos incompresibles*. Los segundos no tienen un volumen propio, sino que ocupan el del recipiente que los contiene; son *fluidos compresibles* porque, a diferencia de los líquidos, sí pueden ser comprimidos.

La resistencia de un fluido al corte depende de su cohesión y de su rapidez de la transferencia de la cantidad del movimiento molecular. Un liquido, cuyas moléculas dejan espacios entre ellas mucho más cerradas que las de un gas, tienen fuerzas cohesivas mucho mayor que un gas. La cohesión parece ser la causa predominante de la viscosidad en un líquido; y ya que la cohesión decrece con la temperatura, la viscosidad decrece también.

La medida común métrica de la viscosidad absoluta es el **Poise**, que es definido como la fuerza necesaria para mover un centímetro cuadrado de área sobre una superficie paralela a la velocidad de 1 cm por segundo, con las superficies separadas por una película lubricante de 1 cm de espesor. La viscosidad varía inversamente proporcional con la temperatura. Por eso su valor no tiene utilidad si no se relaciona con la temperatura a la que el resultado es reportado.

En el SIU (Sistema Internacional de Unidades), la **unidad física de viscosidad** dinámica es el pascal-segundo (Pa·s), que corresponde exactamente a 1 N·s/m<sup>2</sup> o 1 kg/(m·s).

La unidad CGS para la viscosidad dinámica es el *poise*

$$(1 \text{ poise (P)} \equiv 1 \text{ g} \cdot (\text{s} \cdot \text{cm})^{-1} \equiv 1 \text{ dina} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^{-2} \equiv 0,1 \text{ Pa} \cdot \text{s}),$$

cuyo nombre homenajea al fisiólogo francés Jean Louis Marie Poiseuille (1799-1869). Se suele usar más su submúltiplo el *centipoise* (cP). El centipoise es más usado debido a que el agua tiene una viscosidad de 1,0020 cP a 20 °C.

$$\begin{aligned} 1 \text{ poise} &= 100 \text{ centipoise} = 1 \text{ g}/(\text{cm} \cdot \text{s}) = 0,1 \text{ Pa} \cdot \text{s} \\ 1 \text{ centipoise} &= 1 \text{ mPa} \cdot \text{s} \end{aligned}$$

En el sistema inglés, el Reyn fue nombrado en honor de Osborne Reynolds:

$$1 \text{ Reyn} = 1 \text{ lb f} \cdot \text{sec} \cdot \text{inches}^{-2} = 6.89476 \times 10^{-6} \text{ cp} = 6890 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

En Francia se intentó establecer la unidad *poiseuille* (Pl) como nombre para el Pa·s, sin éxito internacional. No se debe confundir el poiseuille con el poise, llamado así por la misma persona.

### Viscosidad cinemática.

Con frecuencia se suele usar la llamada viscosidad cinemática que se obtiene como cociente de la viscosidad dinámica (o absoluta) y la densidad.

$$\text{viscosidad cinemática } \nu = \frac{\mu}{\rho}$$

La unidad en el SI es el (m<sup>2</sup>/s). La unidad física de la viscosidad cinemática en el sistema CGS es el *stoke* (abreviado S o St), cuyo nombre proviene del físico irlandés George Gabriel Stokes (1819-1903). A veces se expresa en términos de *centistokes* (cS o cSt).

$$1 \text{ stoke} = 100 \text{ centistokes} = 1 \text{ cm}^2/\text{s} = 0,0001 \text{ m}^2/\text{s}$$

La viscosidad de los fluidos se puede obtener por medio de los llamados viscosímetros, los cuales son de muchos tipos. La viscosidad de muchos fluidos se puede obtener a partir de tablas, nomogramas y fórmulas. La viscosidad es función de la temperatura, en los gases la viscosidad aumenta con ella, mientras que en los líquidos disminuye.

La **viscosidad dinámica** (\*) es la propiedad de los fluidos que se caracteriza por su resistencia a fluir, debida al rozamiento entre sus moléculas. En el Sistema Internacional se mide en Pascales segundo, pero la unidad más utilizada es el **centipoise** (cps), equivalente a 1 mPa s.

(\*) La **viscosidad cinemática** es el cociente entre viscosidad dinámica y densidad, y se mide en centistokes.

#### **Conversiones**

- 1 Poise 100 cps (centipoise)
- 1 cps 1 mPa s (mili Pascal segundo)
- 1 Poise 0,1 Pa s (Pascal segundo)
- 1 cps 1 centistokes x Densidad

#### **Abreviaturas**

- Centipoise cps o cP
- Poise P
- Centistokes cSt o cS
- Saybolt Universales SSU

#### **Tabla (Viscosidades aproximadas de algunas sustancias)**

- Aire 0,01 cps
- Metanol 0,5 cps
- Agua 1 cps
- Leche 3 cps
- Glicol etileno 15 cps
- Vino 25 cps
- SAE 10 Aceite de motor 85 a 140 cps
- SAE 20 Aceite de motor 140 a 420 cps
- SAE 30 Aceite de motor 420-650 cps
- SAE 40 Aceite de motor 650 a 900 cps
- Aceite Castrol 1.000 cps
- Miel Karo 5.000 cps
- Miel 10.000 cps
- Chocolate 25.000 cps
- Salsa de tomate 50.000 cps
- Mostaza 70.000 cps
- Crema 100.000 cps
- Manteca de cacahuete 250.000 cps
- Compuestos asfalto 500.000 cps
- Polímeros fundidos 1.000.000 cps
- Masillas 2.000.000 cps
- Compuestos de caucho 5.000.000 cps

## Viscosidad de los gases

Los gases también poseen resisten a al cambio de movimiento, por lo que poseen viscosidad .Experimentalmente se ha encontrado que la viscosidad de los gases aumenta con la temperatura y que puede predecirse mediante ecuaciones tales como la que se muestra a continuación:

$$\mu = 2.6693 \times 10^{-21} \frac{\sqrt{PM \times T}}{\sigma^2 \Omega}$$

En dónde  $\mu$  es la viscosidad en  $\frac{g}{cm \times s}$  ;

$\sigma$  es el diámetro de colisión en cm ;  $\Omega$  es la integral de colisión

T es la temperatura absoluta en °K ;

$\frac{\epsilon}{K}$  es el parámetro del potencial en °K y PM es el peso molecular del gas.

Los valores del diámetro de colisión, la integral de colisión y el parámetro del potencial se pueden encontrar en apéndices.

### **Ejemplo 2**

Calcule la viscosidad del CO<sub>2</sub> a 800 K y 1 atm.

2.- Planteamiento

2.1.- Viscosidad.

$$\mu = 2.6693 \times 10^{-21} \frac{\sqrt{PM \times T}}{\sigma^2 \Omega}$$

3.- Cálculos

3.1.- Viscosidad

Los valores de  $\epsilon/k = 190$  K y de  $\sigma = 3.996 \times 10^{-8}$  cm

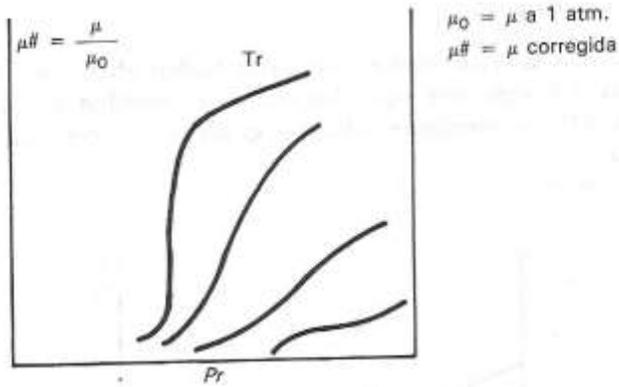
Con  $T / \epsilon/k = 4.21$  se obtiene el valor de  $\Omega = 0.9595$

$$\mu = \frac{2.6693 \times 10^{-21} \sqrt{44 \times 800}}{(3.996 \times 10^{-8})^2 (0.9595)} = 3.268 \times 10^{-4} \frac{g}{s \text{ cm}} = 0.03268 \text{ cps}$$

4.- Resultado

El valor de la viscosidad del bióxido de carbono a 800 K y 1 atm es de 0.03268, lo que concuerda con el valor en la literatura de 0.033 cps.

Si se está trabajando con presiones altas (mayores a 10 atm) los valores de la viscosidad de los gases deben corregirse mediante graficas del tipo siguiente:



Al tener una mezcla de gases, la viscosidad se calcula con la siguiente expresión:

$$\frac{PM_{mezcla}}{\mu_{mezcla}} = \frac{\bar{y}_1 PM_1}{\mu_1} + \frac{\bar{y}_2 PM_2}{\mu_2} + \frac{\bar{y}_3 PM_3}{\mu_3} + \dots + \frac{\bar{y}_n PM_n}{\mu_n}$$

$PM_n$  = peso molecular del gas  $n$   
 $\bar{y}_n$  = fracción mol del gas  $n$   
 $\mu_n$  = viscosidad del gas puro  $n$

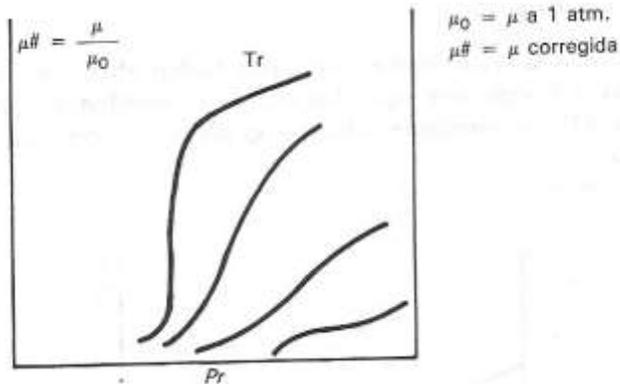
### Ejemplo 3.

¿Cuál será la viscosidad del nitrógeno a 50 ° C y 85 atm?

2.1.- Viscosidad a 1 atm

$$\mu = 2.6693 \times 10^{-21} \frac{\sqrt{PM \times T}}{\sigma^2 \Omega}$$

2.2.- Viscosidad a otra presión.



### 3.-Cálculos.

#### 3.1.- Viscosidad a 1 atm y 50 ° C

Los valores de  $e/k = 91.5 \text{ K}$  y de  $\sigma = 3.681 \times 10^{-8} \text{ cm}$

Con  $T / e/k = 3.53$  se obtiene el valor de  $\Omega = 0.9995$

$$\mu = \frac{2.6693 \times 10^{-21} \sqrt{28 \times 323}}{(3.681 \times 10^{-8})^2 (0.9995)} = 1.8748 \times 10^{-4} \frac{\text{g}}{\text{s cm}} = 0.0187 \text{ cps}$$

#### 3.2.- Viscosidad a 85 atm y 50 ° C

Temperatura crítica del Nitrógeno  $-147.1 \text{ °C} = 125.9 \text{ K}$ ; Temperatura reducida =  $323/125.9 = 2.56$

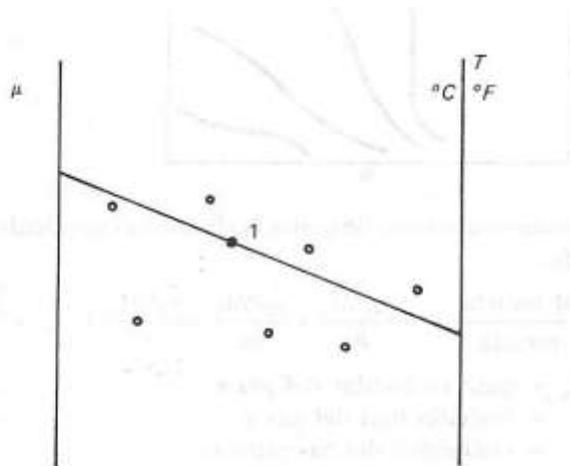
Presión crítica del nitrógeno  $33.5 \text{ atm}$ ; presión crítica =  $85/33.5 = 2.53$

De la gráfica  $\mu\# = 1.15$  ,  $\mu = 1.15 \times 0.0187 = 0.0215 \text{ cps}$

### 4.-Resultado.

La viscosidad del nitrógeno a  $50 \text{ °C}$  y  $85 \text{ atm}$  es de  $0.0215 \text{ cps}$ .

Los valores de la viscosidad de los gases suelen obtenerse mediante nomogramas del siguiente tipo, los cuales pueden obtenerse de los apéndices de los libros especializados.



### Viscosidad en los líquidos

La viscosidad de ciertos líquidos orgánicos puede predecirse a partir de la fórmula de Souders

$$\{\log(10\mu)\} = m \times \rho_L - 2.9$$

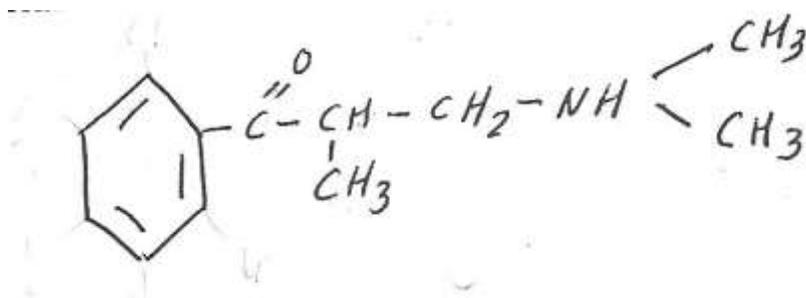
$$m = \frac{I}{PM} \quad I = \text{constante que depende de la estructura del líquido} = \sum An + \sum P$$

$\mu$  = viscosidad en cp

$\rho_L$  = densidad del líquido a 20°C en g/cm<sup>3</sup>

Ejemplo 4.

¿Cuál será la viscosidad a 20 ° C del siguiente compuesto si su densidad es de 1.013 kg /L?



## 2.- Planteamiento.

### 2.1.- Viscosidad.

$$\{\log(10\mu)\} = m \times \rho_L - 2.9$$

## 3.- Cálculos

### 3.1.- Peso molecular

$$PM = 192$$

### 3.2.- Contribuciones de Souders.

$$An = 50.2 (12) + 2.7(18) + 29.7 + 37 = 717.7$$

$$Pn = -15.5 (3) (\text{dobles enlaces}) - 21 (\text{anillos de 6 carbonos}) - 9 (\text{grupo lateral}) + 5 (\text{cetona}) = -71.5$$

$$I = 717.7 - 71.5 = 646.2$$

$$m = 646.2 / 192 = 3.366$$

### 3.3.- Viscosidad

$$\text{Log} (\log (10\mu)) = 3.366(1.013) - 2.9 = 0.509758$$

La viscosidad  $\mu = 171.4$  cps

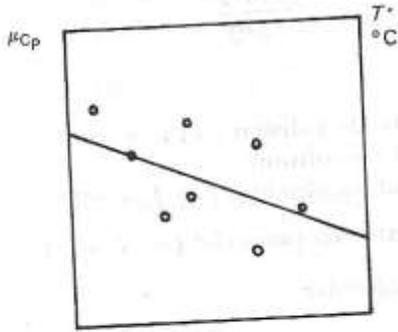
## 4.- Resultado.

La viscosidad es de 171.4 cps

La viscosidad de los líquidos disminuye con la temperatura. La siguiente fórmula representa la variación de la viscosidad de los líquidos con respecto a la temperatura:

$$\log \mu = a + \frac{b}{T} \quad \text{a y b son constantes en la fórmula de Andrade.}$$

La viscosidad de algunos líquidos y su variación con la temperatura se puede obtener a partir de nomogramas como los que se presentan en los apéndices de libros especializados.



Las mezclas de líquidos se pueden obtener a partir de la ecuación siguiente:

$$\log \mu = x_1 \log \mu_1 + x_2 \log \mu_2 + \dots + x_n \log \mu_n$$

En donde  $\mu_n$  es la viscosidad del líquido puro n.;  $x_n$  es la fracción mol del líquido.

### Ejemplo 5

Una mezcla líquida está formada por 50% de octano, 25 % de heptano y 25 % de hexano en mol a 25 ° C. ¿Cuál es la viscosidad absoluta de la mezcla? ¿Cuál es su densidad? ¿Cuál será su viscosidad cinemática?

#### 2.- Planteamiento.

##### 2.1.- Viscosidad de mezclas líquidas

$$\log \mu_{\text{mezcla}} = \tilde{x}_o \log \mu_o + \tilde{x}_h \log \mu_h + \tilde{x}_e \log \mu_e$$

##### 2.2.- Densidad de mezclas

$$\frac{1}{\rho} = \frac{x_o}{\rho_o} + \frac{\tilde{x}_h}{\rho_h} + \frac{\tilde{x}_e}{\rho_e}$$

#### 3.-Cálculos

##### 3.1.-Viscosidad

A partir del nomograma del apéndice

Viscosidades  $\mu_o=0.53$  cps;  $\mu_h = 0.39$ ;  $\mu_e= 0.32$  cps

Por lo tanto:  $\log\mu_{mezca} = 0.5 \log 0.53 + 0.25 \log 0.39 + 0.25 \log 0.32$

Entonces  $\mu_{mezca} = 0.4327$  cps =  $0.4327 \times 10^{-3}$  Pa-s

### 3.2.-Densidades

De acuerdo con los datos obtenidos a partir de nomogramas

Densidades:  $\rho_o=0.69$  kg /L ;  $\rho_h = 0.67$  kg /L;  $\rho_e= 0.65$  kg /L

$$\frac{1}{\rho} = \frac{0.5}{0.69} + \frac{0.25}{0.67} + \frac{0.25}{0.65} \quad ; \quad \rho_{mezca} = 0.6745 \text{ kg /L}$$

### 3.3.- Viscosidad cinemática

$$\text{viscosidad cinemática } \nu = \frac{0.4327 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{s m}}}{674.5 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 6.415 \times 10^{-7} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} = 0.6415 \text{ centistokes}$$

## 4.- Resultados.

La viscosidad absoluta de la mezcla es de 0.4327 cps y la viscosidad cinemática de 0.6415 centistokes.

La viscosidad de las suspensiones diluidas se puede obtener mediante la siguiente ecuación para concentraciones de la fase sólida menores del 10 % en volumen.

$$\mu_{suspensión} = \mu_L(1 + 2.5\varphi)$$

En donde:  $\mu_{suspensión}$  es la viscosidad de la suspensión;  $\mu_L$  viscosidad del líquido puro;  $\varphi$  es el volumen del sólido en suspensión.

Para concentraciones de la fase sólida hasta de un 30 % en volumen la viscosidad de las suspensiones se puede obtener mediante la fórmula siguiente:

$$\mu_{sus} = \mu_L \left[ \frac{0.59}{(0.77 - \varphi)^2} \right]$$

## Ejemplo 6

¿Cuál será la viscosidad del agua de un río a 25 ° C si lleva 5 % en volumen de tierra?

## 2.- Discusión

Para suspensiones de sólidos en líquidos que contienen entre 10 y 4% de volumen de sólidos la fórmula empleada sería:

$$\mu_{suspensión} = \mu_L(1 + 2.5\phi)$$

## 3.- Cálculos.

### 3.1.- Viscosidad.

La viscosidad del agua a 25 ° C es de 0.8937 cps.

Por lo tanto:

$$\mu_{suspensión} = 0.8937(1 + 2.5(0.05)) = 1.00 \text{ cps}$$

4.- La viscosidad será de 1 cps.

## Viscosímetros

Los equipos con que se determina la viscosidad de un fluido se denominan viscosímetros y se pueden dividir en dos categorías:

- a) viscosímetros para obtener viscosidades absolutas
- b) viscosímetros para obtener viscosidades cinemáticas

Los primeros se basan en la resistencia que ofrece el fluido al movimiento cuando una superficie sólida se mueve en su seno. Como ejemplo de estos viscosímetros tenemos los de caída de la esfera, de Codatte-Ratsahek, de plato y cono, de Stormer, etcétera.

Los viscosímetros que determinan viscosidades cinemáticas se basan en el tiempo que requiere un determinado volumen de fluido en pasar libremente a través de un orificio normalizado, por ejemplo, los viscosímetros de Saybolt, Saybolt Furol, Engler, etcétera.

## DESCRIPCIÓN DE EQUIPOS

1) *Viscosímetro de Stormer:*

Este viscosímetro consta de dos cilindros concéntricos siendo el interior móvil y el exterior fijo colocándose el fluido cuya viscosidad se quiere determinar en el espacio comprendido entre estos.

El cilindro interior se puede hacer girar por medio de un hilo enrollado en la polea superior y en cuyo extremo lleva un peso. Se puede deducir que, para este equipo, la viscosidad se expresa en función del par necesario para hacer girar el cilindro interior:

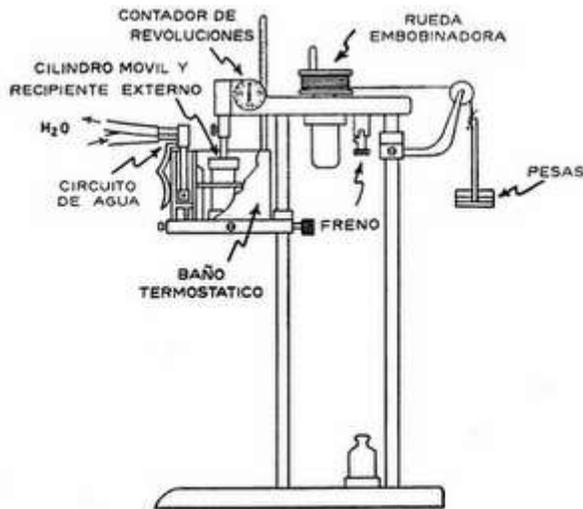


FIG. 1. Viscosímetro de Stormer. Las pesas en su caída hacen girar el cilindro móvil dentro del recipiente estacionario que contiene el líquido. La velocidad del cilindro se lee mediante el contador de revoluciones y un cronómetro.

## 2) Viscosímetro de caída de la esfera (de Poiseuille):

Este equipo es un simple tubo de vidrio o plástico (ver figura 2) que se llena con el fluido cuya viscosidad se quiere determinar y permite obtener la velocidad límite que alcanza la esfera de un material determinado (acero, vidrio, etcétera), que se deja caer en su seno.

El viscosímetro de caída de bola VISCO BALL se basa en el sistema de medida Höppler. Mide el tiempo en el que una esfera sólida necesita para recorrer una distancia entre dos puntos de referencia dentro de un tubo inclinado con muestra.

Los resultados obtenidos se determinan como viscosidad dinámica en la medida estandarizada en el Sistema Internacional (mPa·s).

El VISCO BALL determina la viscosidad de líquidos Newtonianos y gases (con una bola especial para gases), con precisión. Entre sus aplicaciones figuran la investigación, el control de procesos y el control de calidad.

Este viscosímetro se utiliza principalmente para sustancias de baja viscosidad, entre 0,6 y 100.000 mPa·s, como:

- Industria de aceites minerales (aceites, líquidos hidrocarburos)
- Industria alimentaria (soluciones de azúcar, miel, cerveza, leche, gelatina, zumos de frutas)
- Industria química (soluciones de polímeros, disolventes, soluciones de resinas, dispersiones de látex, soluciones adhesivas)
- Industria Cosmética/Farmacéutica (materias primas, glicerina, emulsiones, suspensiones, soluciones, extractos)
- Industria petrolera (crudo, aceite para máquinas, petróleo)
- Carburantes (petróleo, aceite diesel y parafina)



- Industria papelera (emulsiones, dispersiones de pigmentos, aditivos del papel)
- Pinturas y barnices (tintas para impresión, barnices, acuarelas, tintas)
- Detergentes

Cumple los requerimientos de las normativas DIN 53015 y ISO 12058.

## Ejemplo 7

Una esfera de 1 mm de diámetro y una densidad de 1.1 kg /L cae dentro de un líquido a una velocidad constante de  $5.45 \times 10^{-2}$  cm /s. Si la densidad del líquido es de 1000 kg / m<sup>3</sup> ¿Cuál es su viscosidad?

2.- Planteamiento.

2.1.- Para resolver este ejercicio se puede aplicar la ley de Stokes (se desarrollará en otro capítulo).

2.2.- Viscosidad

$$\mu = \frac{(\rho_p - \rho_l)gD_p^2}{18u}$$

En donde  $D_p$  es el diámetro de la partícula que cae, y  $\rho_p$  la densidad de esa partícula,  $u$  es la velocidad de caída y  $\rho_l$  la densidad del líquido.

3.- Cálculos.

3.1.- Viscosidad

$$\mu = \frac{(1100 - 1000) \frac{kg}{m^3}}{18(5 \times 10^{-4}) \frac{m}{s}} \times 9.81 \frac{m}{s^2} \times (0.001)^2 m^2 = 0.1 \frac{kg}{s \cdot m}$$

4.- Resultados

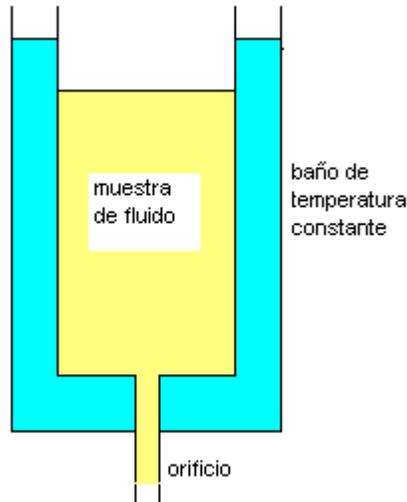
La viscosidad del líquido es de 100 cps

3) *Viscosímetro de Saybolt:*

Este equipo consiste en un recipiente destinado a contener el fluido cuya viscosidad se quiere determinar y que tiene en su parte inferior un orificio de diámetro normalizado. Este recipiente se halla a su vez dentro de otro que le sirve de baño calefactor, para poder determinar viscosidades a distintas temperaturas.

Este viscosímetro posee un mechero para calefacción solidario al equipo. Una clase especial de viscosímetro Saybolt es el denominado de *Saybolt – Furol*, que tiene idénticos principios de funcionamiento pero su orificio tiene un diámetro mayor y sirve para fluidos cuyas viscosidades son altas (desde 480 cps en adelante). La denominación “Furor” proviene de la contracción de las palabras “Fuel and Road Oil”.

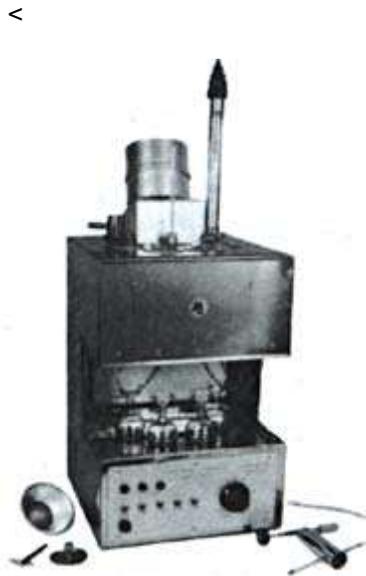
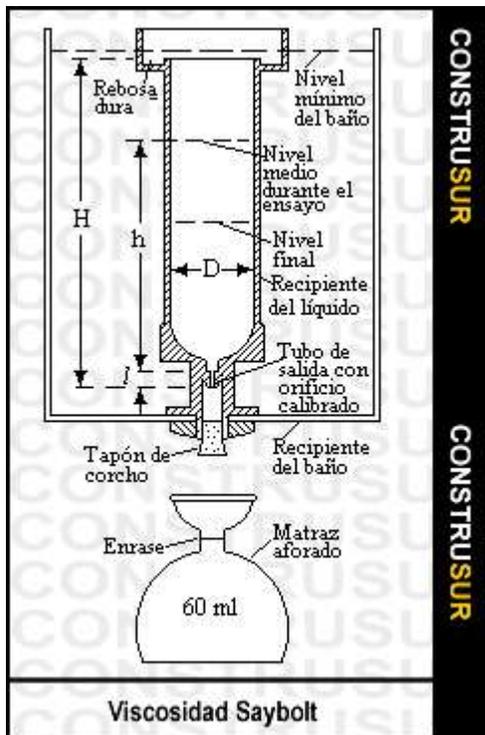
La facilidad con que un fluido fluye a través de un orificio de diámetro pequeño es una indicación de su viscosidad. Éste es el principio sobre el cual está basado el viscosímetro de Saybolt. La muestra de fluido se coloca en un aparato parecido al que se muestra en la figura.



Después de que se establece el flujo, se mide el tiempo requerido para coleccionar 60 mL del fluido. El tiempo resultante se reporta como la viscosidad del fluido en Segundos Universales Saybolt (SSU o. en ocasiones, SUS). En los viscosímetros Saybolt se utiliza un recipiente de 60 cm<sup>3</sup>.

Puesto que la medición no está basada en la definición fundamental de viscosidad, los resultados son solamente relativos. Sin embargo, sirven para comparar las viscosidades de diferentes fluidos.

La ventaja de este procedimiento es que es sencillo y requiere un equipo relativamente simple. Se puede hacer una conversión aproximada de SSU a viscosidad cinemática.



Si se cuenta con un viscosímetro Saybolt entonces:

$$v = 0.00226 \text{ SSU} - \left( \frac{1.95}{\text{SSU}} \right)$$

En donde SSU son los segundos Saybolt universal,  $\nu$  son Stokes.

Los Segundos Saybolt Furol se miden a 100°F (38°C) y a 212 °F (100 °C).

### Ejemplo 8

Se utiliza un viscosímetro Saybolt universal para determinar la viscosidad cinemática de la glicerina. Si el tiempo registrado es de 32 segundos ¿Cuál es la viscosidad en centistokes?

2.- Planteamiento

2.1.-Viscosidad.

$$\nu = 0.00226 \text{ SSU} - \left( \frac{1.95}{\text{SSU}} \right)$$

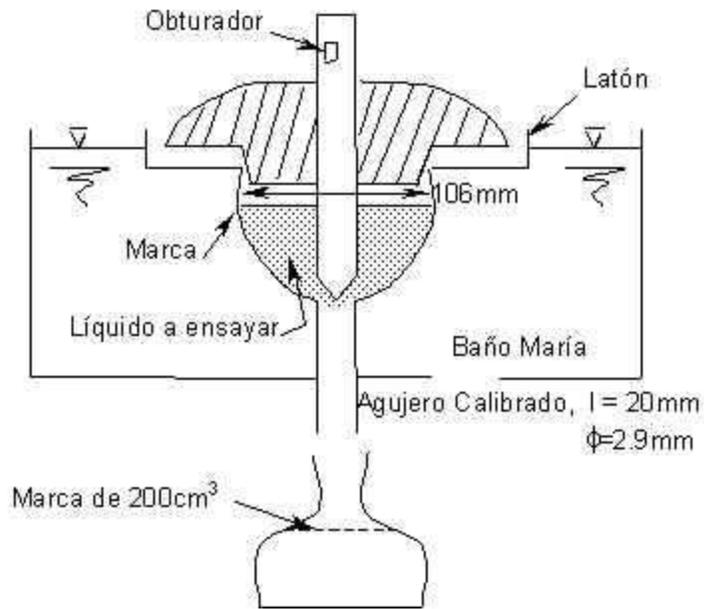
3.- Cálculos

$$\nu = 0.00226(32) - \frac{1.95}{32} = 0.01138 \text{ stokes}$$

4.- La viscosidades de 1.14 centistokes.

#### 4) Viscosímetro de Engler:

El principio de funcionamiento de este equipo es igual al de los viscosímetros Saybolt ver figura .Las diferencias residen en las formas de obturar los orificios normalizados y en que el viscosímetro de Engler no dispone de mecheros para calefacción incorporados, sino que la misma debe realizarse por algún medio externo.



Como ya fue mencionado, en los viscosímetros de Saybolt y Engler, se determinan viscosidades cinemáticas, que se obtienen midiendo el tiempo de efusión de 60ml de fluido a través de un orificio normalizado que se recogen en un balón aforado y previamente calibrado.

Los resultados de viscosidad cinemática obtenidos se expresan en base al tiempo de efusión en: Segundos Saybolt Universal o Segundos Engler Universal.

Los Segundos Engler miden la relación entre el tiempo de vaciado de un recipiente de 200 cm<sup>3</sup>, lleno de combustible, y el empleado por la misma cantidad de agua, usualmente a 20° C. Sin embargo, los combustibles pesados se suelen calentar a 50 ° C, aunque últimamente se utiliza la determinación a 37.8°C (100°F).

Estos resultados se pueden relacionar con la viscosidad cinemática en **centistokes** mediante la tabla que se presenta a continuación y también con la ecuación siguiente:

$$\nu = 0.00147\theta - \frac{3.74}{\theta} \text{ En donde } \theta \text{ son los segundos Engler.}$$

FUENTES DE ENERGIA TERMICA

Tabla 16.9

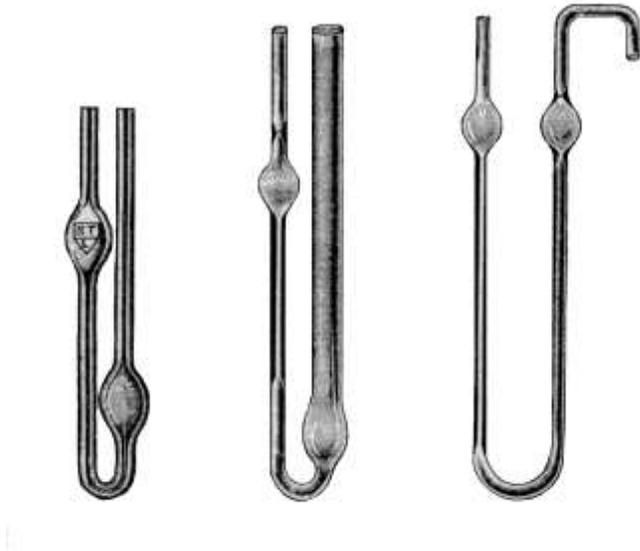
| Centi<br>stockes | Engler | Redwood | Saybolt |
|------------------|--------|---------|---------|
| 2                | 1,14   | 31      | 32,7    |
| 3                | 1,22   | 33,4    | 36,1    |
| 4                | 1,31   | 36      | 39,2    |
| 5                | 1,40   | 38,4    | 42,4    |
| 6                | 1,48   | 41      | 45,6    |
| 7                | 1,56   | 43,7    | 48,8    |
| 8                | 1,65   | 46,4    | 52,1    |
| 9                | 1,75   | 49,1    | 55,5    |
| 10               | 1,84   | 52      | 58,9    |
| 15               | 2,32   | 68      | 77,4    |
| 20               | 2,87   | 85,8    | 97,7    |
| 25               | 3,46   | 104,7   | 119,1   |
| 30               | 4,07   | 124     | 141     |
| 35               | 4,70   | 144     | 164     |
| 40               | 5,34   | 164     | 186     |
| 45               | 5,98   | 184     | 209     |
| 50               | 6,63   | 205     | 232     |
| 60               | 7,90   | 245     | 278     |
| 70               | 9,21   | 286     | 324     |
| 80               | 10,54  | 326     | 370     |
| 90               | 11,86  | 366     | 417     |
| 100              | 13,17  | 407     | 463     |
| 120              | 15,80  | 489     | 555     |
| 140              | 18,43  | 571     | 648     |
| 160              | 21,06  | 651     | 741     |
| 180              | 23,69  | 733     | 833     |
| 200              | 26,32  | 815     | 926     |
| 250              | 32,9   | 1018    | 1157    |
| 300              | 39,4   | 1222    | 1389    |
| 350              | 46,1   | 1425    | 1620    |
| 400              | 52,6   | 1628    | 1851    |
| 450              | 59,2   | 1832    | 2082    |
| 500              | 65,8   | 2036    | 2314    |
| 600              | 78,9   | 2443    | 2777    |
| 700              | 92,1   | 2850    | 3239    |
| 800              | 105,3  | 3258    | 3702    |
| 900              | 118,4  | 3666    | 4165    |
| 1000             | 131,6  | 4074    | 4628    |

5) Viscosímetro capilar de vidrio o viscosímetro de Ostwald

Los viscosímetros capilares de vidrio están diseñados para dejar pasar a través del capilar un volumen constante de líquido mediante la aplicación de una fuerza reproducible.

Esta fuerza es provista por la presión que ejerce la carga hidrostática debido a los diferentes niveles de las superficies líquidas en el mismo viscosímetro.

El tiempo durante el cual el líquido fluye, es por consiguiente, además de la corrección por energía cinética, proporcional a la razón, entre la viscosidad absoluta y la densidad, esta razón es por definición la viscosidad cinemática de un líquido. Se requiere un control exacto de la temperatura y el tiempo de flujo en el uso de este método. El viscosímetro de Ostwald es quizás el modelo que más se ha utilizado en la medida de viscosidades absolutas y relativas en líquidos puros y biológicos, en sus mezclas y, especialmente, en fluidos newtonianos.



Friedric

h Wilhelm Ostwald (1853-1932)

Se basa en la ley de Poiseuille que permite conocer la velocidad de flujo de un líquido a través de un tubo, en función de la diferencia de presiones bajo las que se establece el desplazamiento.

Para un fluido que se mueve a flujo laminar se puede aplicar la ecuación de Hagen – Poiseuille:

$$\mu = \frac{\pi \Delta P R^4}{8 L C \alpha}$$

En donde  $C$  es el flujo volumétrico en  $m^3/s$   $= \frac{V}{\theta}$  ;  $\therefore \mu = \frac{\pi \Delta P R^4}{8 L V} \theta$

El viscosímetro Ostwald está formado por un tubo capilar por el que desciende un fluido ayudado por las fuerzas gravitatorias.

Pero  $\Delta P = P_e h = \rho g h$

Entonces:

$$\mu = \frac{\pi \Delta P R^4}{8 L V} \theta = \frac{\pi (\rho g h) R^4}{8 L V} \theta$$

Si se usa el mismo tubo para medir las viscosidades entonces:

$R_1 = R_2$  ;  $L_1 = L_2$  ;  $h_1 = h_2$ ;  $V_1 = V_2$  y por lo tanto:

$$\frac{\mu_1}{\mu_2} = \frac{\frac{\pi \rho_1 g h_1 R_1^4 \theta_1}{8 L_1 V_1}}{\frac{\pi \rho_2 g h_2 R_2^4 \theta_2}{8 L_2 V_2}} = \frac{\rho_1 \theta_1}{\rho_2 \theta_2}$$

También:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{\theta_1}{\theta_2} \quad \text{Y por lo tanto } v_1 = v_2 \frac{\theta_1}{\theta_2}$$

Si se escoge bien un fluido de referencia a una temperatura T entonces:

$v_1 = C \times \theta$  En donde C es la constante del aparato y,  $v_1$  es la viscosidad cinemática del fluido que se está midiendo.

## Ejemplo 9

En un viscosímetro Ostwald se determina la viscosidad del tetracloruro de carbono a 20 ° C. El tiempo en el que fluye ese líquido es de 25 segundos, mientras que el agua lo hace en 42 segundos. ¿Cuál es la viscosidad del tetracloruro de carbono?

2.- Planteamiento

2.1.- Viscosidad

Para el viscosímetro Ostwald se cumple la relación:

$$v_1 = v_2 \frac{\theta_1}{\theta_2}$$

3.- Cálculos

3.1.- Viscosidad

$$v_{\text{tetracloruro}} = v_{\text{agua}} \frac{25}{42} = v_{\text{agua}}(0.595)$$

De tablas viscosidad absoluta  $\mu$  del agua a 20 ° C = 1.009 cps, densidad del agua  $\rho$  a 20 ° C = 0.998 kg/L

Viscosidad cinemática del agua

$$v = \frac{\mu}{\rho} = \frac{1.009 \times 10^{-2} \frac{g}{s \cdot cm}}{0.998 \frac{g}{cm^3}} = 0.01011 \frac{cm^2}{s}$$

Por lo tanto la viscosidad cinemática del tetracloruro de carbono será de:

$$v_{\text{tetracloruro}} = v_{\text{agua}} \frac{25}{42} = v_{\text{agua}}(0.595) = 0.01011(0.595) = 0.00601 \text{ stokes}$$

4. Resultado

La viscosidad cinemática del tetracloruro de carbono es de 0.6 centistokes.

6.- *Viscosímetro rotacional Brookfield.*

Los viscosímetros rotacionales son útiles en un amplio intervalo de viscosidades y particularmente son valiosos para el estudio de sistemas no newtonianos. Normalmente se emplean en el campo superior a los 50 poises.

.Los viscosímetros de rotación emplean la idea de que la fuerza requerida para rotar un objeto inmerso en un fluido puede indicar la viscosidad del fluido. El más

común de los viscosímetros de rotación son los del tipo Brookfield que determinan la fuerza requerida para rotar un disco o cilindro en un fluido a una velocidad conocida. El viscosímetro rotacional está compuesto de: cilindro giratorio, cilindro estacionario (bob), resorte de restitución, dial de lectura directa, un sistema de engranaje y perillas para el cambio de velocidades y un vaso contenedor de muestra de fluido.

Son instrumentos de medición y control de viscosidad, indispensables en el control de calidad de innumerables productos. Todos se suministran con certificado de fábrica, juego de agujas, instructivo, estuche y soporte. Todos los viscosímetros Brookfield utilizan el conocido principio de la viscosimetría rotacional; miden la viscosidad captando el par de torsión necesario para hacer girar a velocidad constante un husillo inmerso en la muestra de fluido. El par de torsión es proporcional a la resistencia viscosa sobre el eje sumergido, y en consecuencia, a la viscosidad del fluido.



Si el cilindro interior rota dentro del líquido a ciertas revoluciones por minuto (RPM) a este movimiento se opone una fuerza que actúa sobre las paredes del cilindro.

$$F = \frac{\text{Torque}}{R}$$

Y el esfuerzo cortante sobre el cilindro es:

$$\tau_w = \frac{T}{R} \times \frac{1}{2\pi RL} = \frac{T}{2\pi LR^2}$$

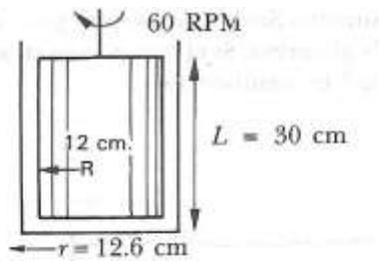
El esfuerzo cortante o flujo de momentum está relacionado con la viscosidad por:

$$\tau_w = -\mu\Omega \quad \text{y} \quad \Omega = 2\pi(\text{RPM})$$

### Ejemplo 10

Un cilindro de 12 cm de radio gira concéntricamente en el interior de un cilindro de 12.6 cm de radio. Ambos cilindros tienen una longitud de 30 cm. Determine la viscosidad del líquido que al encontrarse entre los dos cilindros provoca un torque de 9 kgX cm al producirse una velocidad angular de 60 RPM.

1.- Traducción



## 2.- Planteamiento.

### 2.1.- Viscosidad

$$\tau = -\mu \frac{du}{dy}$$

$$\mu = -\tau \frac{dy}{du}$$

$$\tau = \frac{T}{2\pi R^2 L}$$

$$\frac{dy}{du} = \frac{r - R}{u}$$

$$u = \frac{2\pi RPM}{60}$$

## 3.-Cálculos

### 3.1.-Viscosidad

$$u = \frac{2\pi}{60} \times 12 \times 60 = 0.754 \frac{m}{s}$$

$$\frac{dy}{du} = \frac{(0.126 - 0.12)m}{0.754 \frac{m}{s}} = 7.95 \times 10^{-3} s$$

$$\tau = \frac{0.09 \overrightarrow{kg \cdot m}}{(0.12m)^2 (2 \times \pi \times 0.3m)} = 3.315 \frac{\overrightarrow{kg}}{m^2}$$

$$\mu = 3.315 \frac{\overrightarrow{kg}}{m^2} (7.95 \times 10^{-3} s) = 0.02636 \frac{\overrightarrow{kg}}{m^2 \cdot s}$$

$$\mu = 0.02636 \frac{\overrightarrow{kg}}{m^2 \cdot s} \times \frac{9.81 N}{\overrightarrow{kg}} \times \frac{1 \frac{kg \cdot m}{s^2}}{1 N} \times \frac{1000g}{1kg} \times \frac{1m}{100cm} \times \frac{1poise}{1 \frac{g}{s \cdot cm}} \times \frac{100 cps}{1poise} = 258.59 cps$$

#### 4.- Resultado

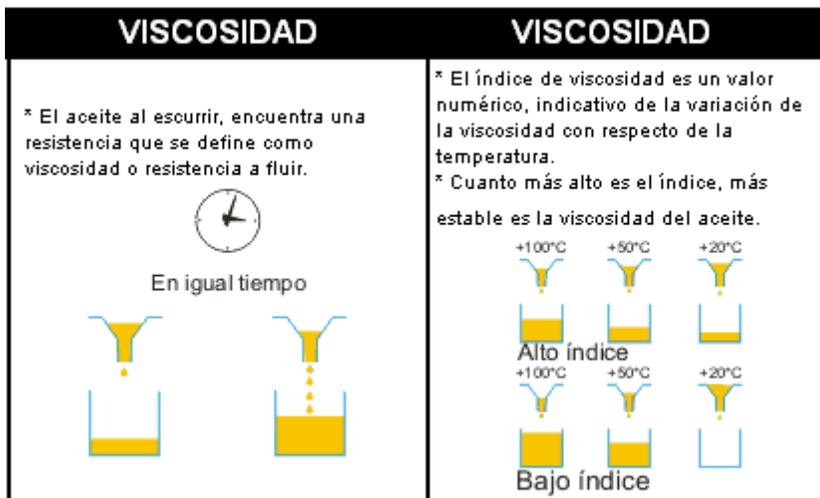
La viscosidad es de 258.59 cps.

#### Viscosidad y lubricantes

La viscosidad es la principal característica de la mayoría de los productos lubricantes. Es la medida de la fluidez a determinadas temperaturas. Si la viscosidad es demasiado baja el film lubricante no soporta las cargas entre las piezas y desaparece del medio sin cumplir su objetivo de evitar el contacto metal-metal.

Si la viscosidad es demasiado alta el lubricante no es capaz de llegar a todos los intersticios en donde es requerido. Al ser alta la viscosidad es necesaria mayor fuerza para mover el lubricante originando de esta manera mayor desgaste en la bomba de aceite, además de no llegar a lubricar rápidamente en el arranque en frío.

Los cambios de temperatura afectan a la viscosidad del lubricante generando así mismo cambios en ésta, lo que implica que a altas temperaturas la viscosidad decrece y a bajas temperaturas aumenta. Arbitrariamente se tomaron diferentes tipos de aceite y se midió su viscosidad a 40°C y 100°C, al aceite que sufrió menos cambios en la misma se le asignó el valor 100 de índice de viscosidad y al que varió en mayor proporción se le asignó valor 0 (cero) de índice de viscosidad. Luego con el avance en el diseño de los aditivos mejoradores del índice de viscosidad se logró formular lubricantes con índices mayores a 100.



La clasificación de los aceites atendiendo a su viscosidad ha generado en la etiqueta de los envases una serie de siglas. La sociedad de Ingenieros Automotores de los Estados Unidos (SAE) clasificó a los aceites según su viscosidad adoptando como temperatura de referencia 100 ° C y midiendo la viscosidad en centistoke (cst). Dividió el rango total de las viscosidades en grupos

arbitrarios: 20, 30,40 y 50. Esta clasificación no tuvo en cuenta que un aceite SAE 20 en condiciones de baja temperatura aumenta considerablemente su viscosidad por lo que surgieron así los aceites tipo W (Winter o invierno) que cubrían esa deficiencia. Se amplió entonces la clasificación incorporando los grados SAE 5W, SAE 10W, SAE 20 W. Con el uso de aditivos mejoradores del índice de viscosidad es posible formular aceites cuya viscosidad a altas y bajas temperaturas sea la requerida para el trabajo de los motores. De esta manera se obtuvieron los aceites multigrados. Los aceites y lubricantes se clasifican de acuerdo al nivel de servicio (\*API) y al grado de viscosidad (\*\*SAE). La SAE clasifica los aceites de motor de acuerdo con su viscosidad en: UNIGRADOS. Los cuales son: SAE 40 y SAE 50. MULTIGRADOS. Los cuales son: SAE 20W- 40, SAE 20W-50 y SAE 15W-40. De este par de aceites los multigrados brindan mayores beneficios, tales como: Facilitan el arranque en frío del motor protegiéndolo contra el desgaste.

**La clasificación S.A.E.** está basada en la viscosidad del aceite a dos temperaturas, en grados Fahrenheit, 0°F y 210°F, equivalentes a -18° C y 99° C, estableciendo ocho grados S.A.E. para los **monogrados** y seis para los **multigrados**. Por ejemplo, un aceite SAE 10W 50, indica la viscosidad del aceite medida a -18 grados y a 100 grados, **en ese orden**. Nos dice que el **ACEITE** se comporta en frío como un SAE 10 y en caliente como un SAE 50. Así que, para una mayor protección en **frío**, se deberá recurrir a un aceite que tenga el primer número lo más bajo posible y para obtener un mayor grado de **protección en caliente**, se deberá incorporar un aceite que posea un elevado número para la segunda.

| Grado SAE | Viscosidad cinemática en cSt a 100°C |
|-----------|--------------------------------------|
| 0W        | 3.8                                  |
| 5W        | 3.8                                  |
| 10W       | 4.1                                  |
| 15W       | 5.6                                  |
| 20W       | 9.3                                  |
| 25W       | 9.3                                  |
| 20        | 5.6-9.3                              |
| 30        | 9.3-12.5                             |
| 40        | 12.5-16.7                            |
| 50        | 16.3-21.9                            |
| 60        | 21.9-26.1                            |

## Ejercicios de autoevaluación

1.- ¿Cuál será la viscosidad del pentano gaseoso a 200 ° C ya 1 atm?

R.- La viscosidad es de 0.0108 cos.

2.- ¿Cuál será la viscosidad del benceno líquido a 55 ° C?

R.- La viscosidad es de 0.41 cps.

3.- ¿Cuál será la viscosidad de unos gases de combustión formados por 16% de CO<sub>2</sub>, 5% de O<sub>2</sub> y 79 % de N<sub>2</sub> en volumen? La temperatura de los gases es de 400° C y la presión de 1 atm.

R.- La viscosidad de la mezcla es de 0.03408 cps.

4.- Calcule la viscosidad del nitrobenzeno a 20 ° C por Souders.

R.- la viscosidad es de 2.8 cps.

5.- ¿Cuál es la viscosidad de una salmuera de NaCl al 25 % y 30 ° C?

R.- La viscosidad es de 1.85 cps.

6.- Un volumen de heptano fluye a través de un viscosímetro tipo Ostwald en 83.8 s mientras que un volumen igual de agua requiere 142.3 s. Calcule la viscosidad del heptano a 20 | C, sabiendo que a esa temperatura las densidades del heptano y del agua son 0.689 y 0.998 kg / L respectivamente, y que la viscosidad del agua a esa temperatura es de 1 cps.

R.-La viscosidad es de 0.406 cps.

7.- ¿Cuál será la viscosidad de una mezcla líquida de 30% de benceno, 40% de tolueno y 30 % de orto xileno en mola 30° C?

R.-La viscosidad de la mezcla es de 0.616 cps.

8.- Obtenga la viscosidad del aire líquido a 100K.

R.- La viscosidad es de 0.1352 cps.

9.- ¿Cuál es la viscosidad del vapor de agua a 300°C y 10 atm de presión?

R.- La viscosidad es de 0.0215 cps.

10.-En un viscosímetro Ostwald se determina la viscosidad del tetracloruro de carbono a 20 ° C. El tiempo en el que fluye ese líquido es de 25 segundos, mientras que el agua lo hace en 42 segundos. ¿Cuál es la viscosidad del tetracloruro de carbono?

R.- La viscosidades de 0.9598 cps.

## Apéndices

**Apéndice XIV. Viscosidades del agua líquida.**

| <i>Temperatura</i><br>°C | <i>Viscosidad</i><br>en<br><i>Cp</i> | <i>Temperatura</i><br>°C | <i>Viscosidad</i><br>en<br><i>Cp</i> | <i>Temperatura</i><br>°C | <i>Viscosidad</i><br>en<br><i>Cp</i> |
|--------------------------|--------------------------------------|--------------------------|--------------------------------------|--------------------------|--------------------------------------|
| 0                        | 1.792                                | 33                       | 0.7523                               | 67                       | 0.4233                               |
| 1                        | 1.731                                | 34                       | 0.7371                               | 68                       | 0.4174                               |
| 2                        | 1.673                                | 35                       | 0.7225                               | 69                       | 0.4117                               |
| 3                        | 1.619                                | 36                       | 0.7085                               | 70                       | 0.4061                               |
| 4                        | 1.567                                | 37                       | 0.6947                               | 71                       | 0.4006                               |
| 5                        | 1.519                                | 38                       | 0.6814                               | 72                       | 0.3952                               |
| 6                        | 1.473                                | 39                       | 0.6685                               | 73                       | 0.3900                               |
| 7                        | 1.428                                | 40                       | 0.6560                               | 74                       | 0.3849                               |
| 8                        | 1.386                                | 41                       | 0.6439                               | 75                       | 0.3799                               |
| 9                        | 1.346                                | 42                       | 0.6321                               | 76                       | 0.3750                               |
| 10                       | 1.308                                | 43                       | 0.6207                               | 77                       | 0.3702                               |
| 11                       | 1.271                                | 44                       | 0.6097                               | 78                       | 0.3655                               |
| 12                       | 1.236                                | 45                       | 0.5988                               | 79                       | 0.3610                               |
| 13                       | 1.203                                | 46                       | 0.5883                               | 80                       | 0.3565                               |
| 14                       | 1.171                                | 47                       | 0.5782                               | 81                       | 0.3521                               |
| 15                       | 1.140                                | 48                       | 0.5683                               | 82                       | 0.3478                               |
| 16                       | 1.111                                | 49                       | 0.5588                               | 83                       | 0.3436                               |
| 17                       | 1.083                                | 50                       | 0.5494                               | 84                       | 0.3395                               |
| 18                       | 1.056                                | 51                       | 0.5404                               | 85                       | 0.3355                               |
| 19                       | 1.030                                | 52                       | 0.5315                               | 86                       | 0.3315                               |
| 20                       | 1.005                                | 53                       | 0.5229                               | 87                       | 0.3276                               |
| 20.2                     | 1.000                                | 54                       | 0.5146                               | 88                       | 0.3239                               |
| 21                       | 0.9810                               | 55                       | 0.5064                               | 89                       | 0.3203                               |
| 22                       | 0.9579                               | 56                       | 0.4985                               | 90                       | 0.3165                               |
| 23                       | 0.9358                               | 57                       | 0.4907                               | 91                       | 0.3130                               |
| 24                       | 0.9142                               | 58                       | 0.4832                               | 92                       | 0.3095                               |
| 25                       | 0.8937                               | 59                       | 0.4759                               | 93                       | 0.3060                               |
| 26                       | 0.8737                               | 60                       | 0.4688                               | 94                       | 0.3027                               |
| 27                       | 0.8545                               | 61                       | 0.4618                               | 95                       | 0.2994                               |
| 28                       | 0.8360                               | 62                       | 0.4550                               | 96                       | 0.2962                               |
| 29                       | 0.8180                               | 63                       | 0.4483                               | 97                       | 0.2930                               |
| 30                       | 0.8007                               | 64                       | 0.4418                               | 98                       | 0.2899                               |
| 31                       | 0.7840                               | 65                       | 0.4355                               | 99                       | 0.2868                               |
| 32                       | 0.7679                               | 66                       | 0.4293                               | 100                      | 0.2838                               |

Apéndice XXI. Viscosidad de algunas soluciones acuosas.

| Soluta                          | Concentración, % (en masa) | Temperatura, °C |      |      |      |      |
|---------------------------------|----------------------------|-----------------|------|------|------|------|
|                                 |                            | 0               | 20   | 30   | 40   | 60   |
|                                 |                            | Viscosidad: Cp  |      |      |      |      |
| NaOH                            | 5                          | —               | 1.3  | 1.05 | 0.85 | —    |
|                                 | 15                         | —               | 2.78 | 2.10 | 1.65 | —    |
|                                 | 25                         | —               | 7.42 | 5.25 | 3.86 | —    |
| NaCl                            | 5                          | 1.86            | 1.07 | 0.87 | 0.71 | 0.51 |
|                                 | 15                         | 2.27            | 1.36 | 1.07 | 0.89 | 0.64 |
|                                 | 25                         | 3.31            | 1.89 | —    | —    | —    |
| NaNO <sub>3</sub>               | 10                         | —               | 1.07 | 0.88 | 0.72 | 0.54 |
|                                 | 20                         | —               | 1.18 | 1.03 | 0.86 | 0.62 |
|                                 | 30                         | —               | 1.33 | 1.3  | 1.07 | 0.79 |
| Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> | 10                         | —               | 1.74 | 1.38 | 1.1  | —    |
|                                 | 20                         | —               | 4.02 | 2.91 | 2.25 | —    |
|                                 | 30                         | —               | —    | 8.35 | 5.6  | —    |
| KOH                             | 10                         | —               | 1.23 | 1.0  | 0.83 | —    |
|                                 | 20                         | —               | 1.63 | 1.33 | 1.11 | —    |
|                                 | 30                         | —               | 2.36 | 1.93 | 1.57 | —    |
| KCl                             | 5                          | 1.7             | 0.99 | 0.8  | 0.66 | 0.48 |
|                                 | 15                         | 1.58            | 1.0  | 0.83 | 0.69 | 0.52 |
|                                 | 20                         | —               | 1.02 | 0.85 | 0.72 | 0.54 |
| KNO <sub>3</sub>                | 5                          | 1.68            | 0.98 | 0.8  | 0.66 | 0.49 |
|                                 | 15                         | —               | 0.98 | 0.8  | 0.69 | 0.51 |
|                                 | 30                         | —               | —    | 0.89 | —    | —    |
| NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> | 10                         | 1.58            | 0.96 | 0.79 | 0.66 | 0.5  |
|                                 | 30                         | 1.51            | 1.0  | 0.84 | 0.73 | 0.57 |
|                                 | 50                         | —               | 1.33 | 1.14 | 0.99 | 0.77 |
| MgCl <sub>2</sub>               | 10                         | 2.8             | 1.5  | —    | —    | —    |
|                                 | 20                         | 5.3             | 2.7  | —    | —    | —    |
|                                 | 35                         | 19.3            | 10.1 | —    | —    | —    |
| CaCl <sub>2</sub>               | 10                         | 2.17            | 1.27 | —    | —    | —    |
|                                 | 20                         | 3.14            | 1.89 | —    | —    | —    |
|                                 | 35                         | 8.9             | 5.1  | —    | —    | —    |

Fuente: K. F. Pavlov. *Problemas y ejemplos para el curso de operaciones básicas y aparatos en tecnología química*. MIR, Moscú, 1981, Tabla 8. Página 550.

$$1 \text{ Cp} = 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

Ejemplo: viscosidad de NaOH al 5% y 20°C = 1.3 (10<sup>-3</sup>) Pa · s  
= 1.3 Cp (centipoises).

FUENTES DE ENERGIA TERMICA

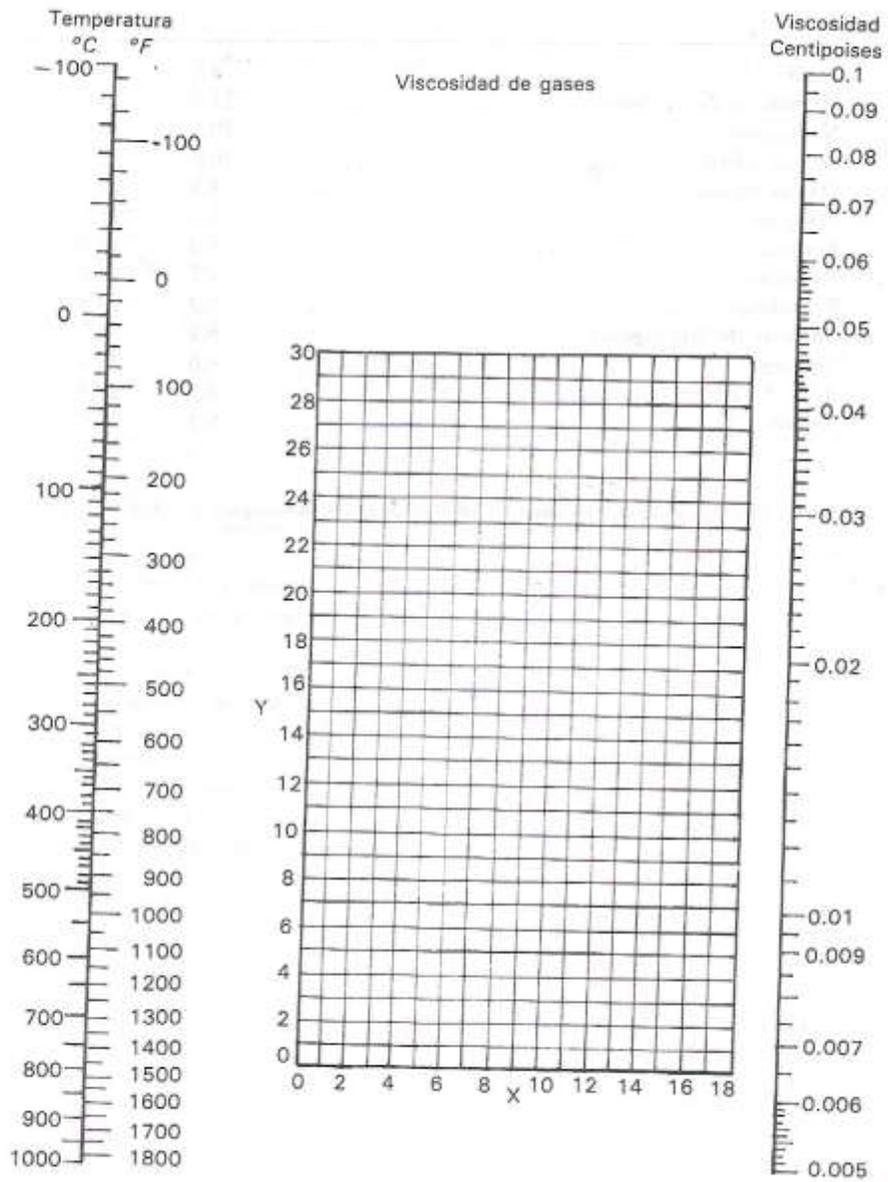
Tabla 16.9

| Centi<br>stockes | Engler | Redwood | Saybolt |
|------------------|--------|---------|---------|
| 2                | 1,14   | 31      | 32,7    |
| 3                | 1,22   | 33,4    | 36,1    |
| 4                | 1,31   | 36      | 39,2    |
| 5                | 1,40   | 38,4    | 42,4    |
| 6                | 1,48   | 41      | 45,6    |
| 7                | 1,56   | 43,7    | 48,8    |
| 8                | 1,65   | 46,4    | 52,1    |
| 9                | 1,75   | 49,1    | 55,5    |
| 10               | 1,84   | 52      | 58,9    |
| 15               | 2,32   | 68      | 77,4    |
| 20               | 2,87   | 85,8    | 97,7    |
| 25               | 3,46   | 104,7   | 119,1   |
| 30               | 4,07   | 124     | 141     |
| 35               | 4,70   | 144     | 164     |
| 40               | 5,34   | 164     | 186     |
| 45               | 5,98   | 184     | 209     |
| 50               | 6,63   | 205     | 232     |
| 60               | 7,90   | 245     | 278     |
| 70               | 9,21   | 286     | 324     |
| 80               | 10,54  | 326     | 370     |
| 90               | 11,86  | 366     | 417     |
| 100              | 13,17  | 407     | 463     |
| 120              | 15,80  | 489     | 555     |
| 140              | 18,43  | 571     | 648     |
| 160              | 21,06  | 651     | 741     |
| 180              | 23,69  | 733     | 833     |
| 200              | 26,32  | 815     | 926     |
| 250              | 32,9   | 1018    | 1157    |
| 300              | 39,4   | 1222    | 1389    |
| 350              | 46,1   | 1425    | 1620    |
| 400              | 52,6   | 1628    | 1851    |
| 450              | 59,2   | 1832    | 2082    |
| 500              | 65,8   | 2036    | 2314    |
| 600              | 78,9   | 2443    | 2777    |
| 700              | 92,1   | 2850    | 3239    |
| 800              | 105,3  | 3258    | 3702    |
| 900              | 118,4  | 3666    | 4165    |
| 1000             | 131,6  | 4074    | 4628    |

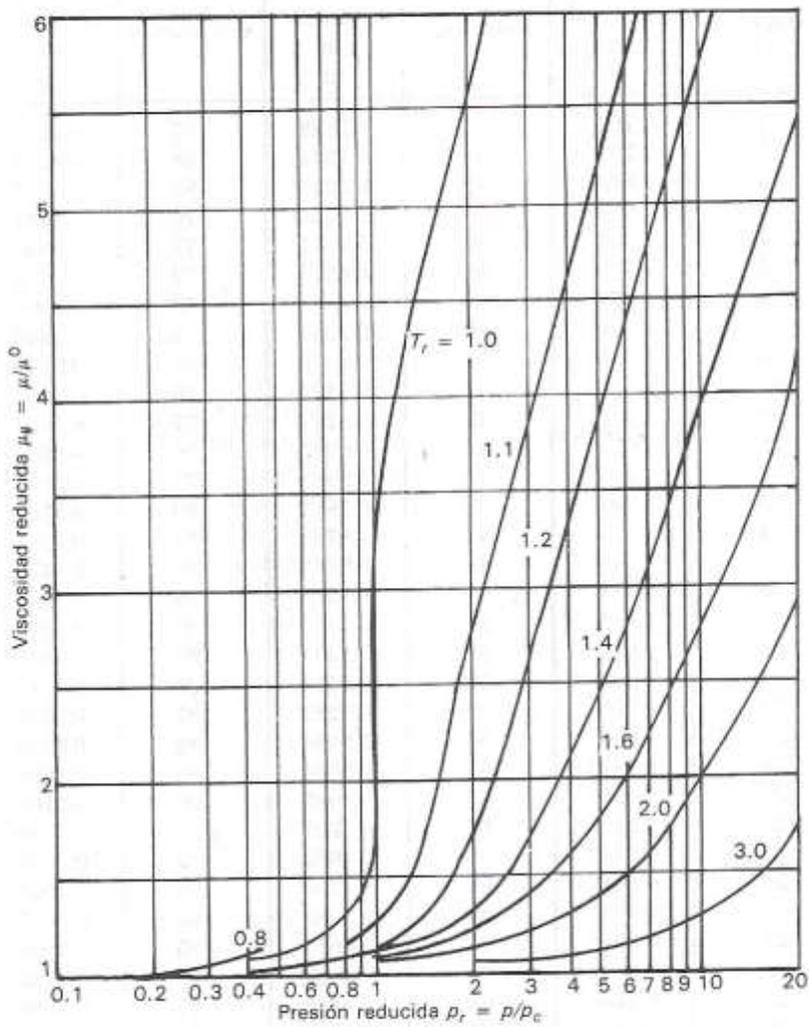
Apéndice XIX. Viscosidad de los gases.

| Gas                                     | X    | Y    |
|---|------|------|
| Acetato de etilo.....                   | 8.5  | 13.2 |
| Acetona.....                            | 8.9  | 13.0 |
| Acetileno.....                          | 9.8  | 14.9 |
| Ácido acético.....                      | 7.7  | 14.3 |
| Agua.....                               | 8.0  | 16.0 |
| Aire.....                               | 11.0 | 20.0 |
| Alcohol etílico.....                    | 9.2  | 14.2 |
| Alcohol metílico.....                   | 8.5  | 15.6 |
| Alcohol propílico.....                  | 8.4  | 13.4 |
| Amoníaco.....                           | 8.4  | 16.0 |
| Argón.....                              | 10.5 | 22.4 |
| Benceno.....                            | 8.5  | 13.2 |
| Bromo.....                              | 8.9  | 19.2 |
| Buteno.....                             | 9.2  | 13.7 |
| Butileno.....                           | 8.9  | 13.0 |
| Bióxido de azufre.....                  | 9.6  | 17.0 |
| Bióxido de carbono.....                 | 9.5  | 18.7 |
| Bisulfuro de carbono.....               | 8.0  | 16.0 |
| Bromuro de hidrógeno.....               | 8.8  | 20.9 |
| Cianógeno.....                          | 9.2  | 15.2 |
| Ciclohexano.....                        | 9.2  | 12.0 |
| Cianuro de hidrógeno.....               | 9.8  | 14.9 |
| Cloro.....                              | 9.0  | 18.4 |
| Cloroformo.....                         | 8.9  | 15.7 |
| Cloruro de etilo.....                   | 8.5  | 15.6 |
| Cloruro de hidrógeno.....               | 8.8  | 18.7 |
| Cloruro de nitrosilo.....               | 8.0  | 17.6 |
| Etano.....                              | 9.1  | 14.5 |
| Éter etílico.....                       | 8.9  | 13.0 |
| Etileno.....                            | 9.5  | 15.1 |
| Flúor.....                              | 7.3  | 23.8 |
| Freón 11.....                           | 10.6 | 15.1 |
| Freón 12.....                           | 11.1 | 16.0 |
| Freón 21.....                           | 10.8 | 15.3 |
| Freón 22.....                           | 10.1 | 17.0 |
| Freón 113.....                          | 11.3 | 14.0 |
| Helio.....                              | 10.9 | 20.5 |
| Hexano.....                             | 8.6  | 11.8 |
| Hidrógeno.....                          | 11.2 | 12.4 |
| 3H <sub>2</sub> + 1N <sub>2</sub> ..... | 11.2 | 17.2 |
| Yodo.....                               | 9.0  | 18.4 |
| Yoduro de hidrógeno.....                | 9.0  | 21.3 |
| Mercurio.....                           | 5.3  | 22.9 |

Apéndice XIX. (Continuación)



Apéndice XV. Variación de la viscosidad con la presión y la temperatura.

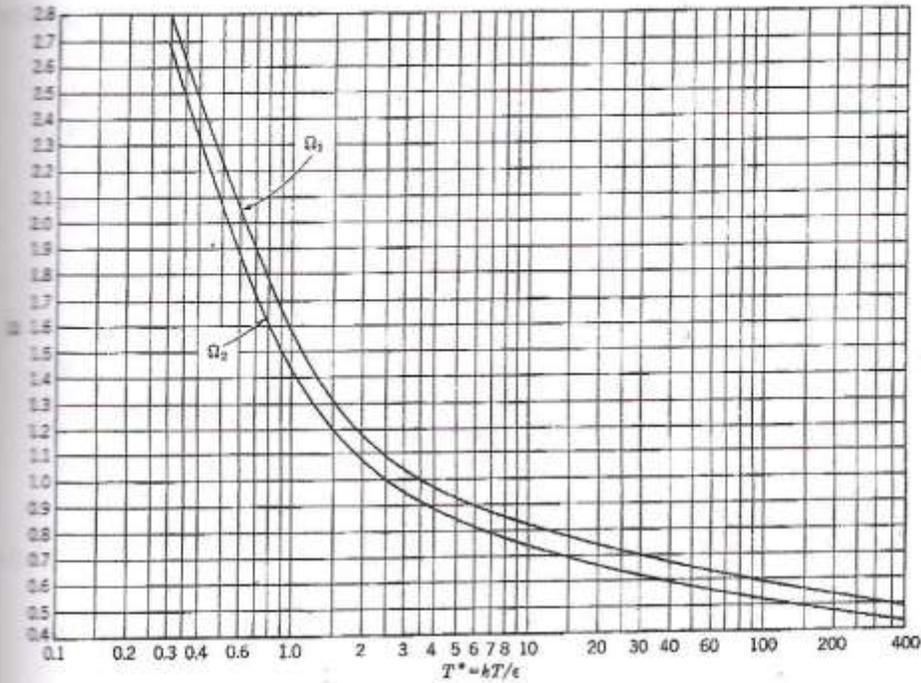


Viscosidad reducida en función de la presión y la temperatura reducidas.

Fuente: N. L. Carr, R. Kobayashi & D. B. Burroughs, Am. Inst. Min. & Met. Engrs., Petroleum Tech., 6, 47, (1954).

Apéndice XI. Constantes de Lennard-Jones.

|                                  | $\sigma \cdot 10^{-8}$ (cm) | $\epsilon/K$ ( $^{\circ}K$ ) | $\mu \cdot 10^6$ (g/cm.s) |
|----------------------------------|-----------------------------|------------------------------|---------------------------|
| H <sub>2</sub>                   | 2.915                       | 38.0                         | 34.7                      |
| He                               | 2.576                       | 10.2                         | 25.4                      |
| Ne                               | 2.789                       | 35.7                         | 156.0                     |
| Ar                               | 3.418                       | 124.0                        | 264.0                     |
| Kr                               | 3.498                       | 225.0                        | 396.0                     |
| Xe                               | 4.055                       | 229.0                        | 490.0                     |
| Aire                             | 3.617                       | 97.0                         | 193.0                     |
| N <sub>2</sub>                   | 3.681                       | 91.5                         | 180.0                     |
| O <sub>2</sub>                   | 3.433                       | 113.0                        | 250.0                     |
| CO                               | 3.590                       | 110.0                        | 190.0                     |
| CO <sub>2</sub>                  | 3.996                       | 190.0                        | 343.0                     |
| NO                               | 3.470                       | 119.0                        | 258.0                     |
| N <sub>2</sub> O                 | 3.879                       | 220.0                        | 332.0                     |
| SO <sub>2</sub>                  | 4.290                       | 252.0                        | 411.0                     |
| F <sub>2</sub>                   | 3.653                       | 112.0                        | —                         |
| Cl <sub>2</sub>                  | 4.115                       | 357.0                        | 420.0                     |
| Br <sub>2</sub>                  | 4.268                       | 520.0                        | —                         |
| I <sub>2</sub>                   | 4.982                       | 550.0                        | —                         |
| CH <sub>4</sub>                  | 3.822                       | 137.0                        | 159.0                     |
| C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>    | 4.221                       | 185.0                        | 237.0                     |
| C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>    | 4.232                       | 205.0                        | 215.0                     |
| C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>    | 4.418                       | 230.0                        | 210.0                     |
| C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>    | 5.061                       | 254.0                        | 228.0                     |
| i-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> | 5.341                       | 313.0                        | 239.0                     |
| n-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> | 5.769                       | 345.0                        | 238.0                     |
| n-C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> | 5.909                       | 413.0                        | 248.0                     |
| n-C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> | 7.451                       | 320.0                        | 259.0                     |
| Ciclohexano                      | 6.093                       | 324.0                        | 284.0                     |
| C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>    | 5.270                       | 440.0                        | 312.0                     |
| CH <sub>4</sub>                  | 3.822                       | 137.0                        | 159.0                     |
| CH <sub>3</sub> Cl               | 3.375                       | 855.0                        | 338                       |
| CH <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>  | 4.759                       | 406.0                        | —                         |
| CHCl <sub>3</sub>                | 5.430                       | 327.0                        | 410.0                     |
| CCl <sub>4</sub>                 | 5.881                       | 327.0                        | 413.0                     |
| C <sub>2</sub> N <sub>2</sub>    | 4.380                       | 339.0                        | —                         |
| COS                              | 4.130                       | 335.0                        | —                         |
| CS <sub>2</sub>                  | 4.438                       | 488.0                        | 404.0                     |



En la gráfica anterior  $\Omega_1 = \Omega_2$

La estimación del valor de las constantes de Lennard-Jones que no se encuentren en la tabla del apéndice, puede calcularse por medio de las siguientes ecuaciones:

$$\frac{\epsilon}{k^*} = 0.77 T_c, \quad \sigma = 0.841 (V_c)^{0.33} = 2.44 \left( \frac{T_c}{P_c} \right)^{0.31} \text{ en donde } T_c, V_c, P_c \text{ son los valores críticos de los gases.}$$

Apéndice XIII. Constante de Souders.

|                 | <i>An</i> |
|-----------------|-----------|
| CH <sub>2</sub> | 55.6      |
| H               | 2.7       |
| C               | 50.2      |
| O               | 29.7      |
| OH              | 57.1      |
| COO             | 90.0      |
| COOH            | 104.4     |
| NO <sub>2</sub> | 80.0      |
| N               | 37.0      |
| Cl              | 60.0      |
| Br              | 79.0      |
| I               | 110.0     |

|   | <i>Pn</i> |
|---|-----------|
| Doble enlace  | -15.5     |
| Anillo de 5 carbonos  | -24.0     |
| Anillo de 6 carbonos  | -21.0     |
| Grupo lateral en un anillo de 6 carbonos  |           |
| Peso molecular 17   | - 9.0     |
| Peso molecular 16   | -17.0     |
| Orto y para   | 3.0       |
| Meta  | 1.0       |
| $\begin{array}{c} R \quad R \\ \diagdown \quad / \\ CHCH \\ / \quad \diagdown \\ R \quad R \end{array}$ | 8.0       |
| $\begin{array}{c} R \\   \\ R-C-R \\   \\ R \\   \\ H-C-R \end{array}$                                  | 13.0      |
| $\begin{array}{c} R \\   \\ H-C-R \\    \\ O \\   \\ CH_3-C-R \\    \\ O \end{array}$                   | 10.0      |
| $\begin{array}{c} R \\   \\ CHX \\   \\ -CH=CHCH_2X \end{array}$  | 5.0       |
|   | 6.0       |
|   | 4.0       |

(X es un grupo negativo)

**Apéndice XX.** Nomograma para determinar la viscosidad de los líquidos.

(X y Y son las coordenadas para determinación de la viscosidad según la gráfica).

| Líquido                       | X    | Y    | Densidad a 20°C<br>g/cm <sup>3</sup> |
|-------------------------------|------|------|--------------------------------------|
| Aceite de linaza.....         | 7.5  | 27.2 | 0.930-0.938 (15°)                    |
| Acetaldehído.....             | 15.2 | 4.8  | 0.783 (18°)                          |
| Acetato de amilo.....         | 11.8 | 12.5 | 0.879                                |
| Acetato de butilo.....        | 12.3 | 11.0 | 0.882                                |
| Acetato de etilo.....         | 13.7 | 9.1  | 0.901                                |
| Acetato de metilo.....        | 14.2 | 8.2  | 0.924                                |
| Acetato de vinilo.....        | 14.0 | 8.8  | 0.932                                |
| Acetona, 100%.....            | 14.5 | 7.2  | 0.792                                |
| Acetona, 35%.....             | 7.9  | 15.0 | 0.948                                |
| Ácido acético, 100%.....      | 12.1 | 14.2 | 1.049                                |
| Ácido acético, 70%.....       | 9.5  | 17.0 | 1.069                                |
| Ácido butírico.....           | 12.1 | 15.3 | 0.964                                |
| Ácido clorhídrico, 31.5%..... | 13.0 | 16.6 | 1.157                                |
| Ácido clorosulfónico.....     | 11.2 | 18.1 | 1.787 (25°)                          |
| Ácido fórmico.....            | 10.7 | 15.8 | 1.220                                |
| Ácido isobutírico.....        | 12.2 | 14.4 | 0.949                                |
| Ácido nítrico, 95%.....       | 12.8 | 13.8 | 1.493                                |
| Ácido nítrico, 60%.....       | 10.8 | 17.0 | 1.367                                |
| Ácido propiónico.....         | 12.8 | 13.8 | 0.992                                |
| Ácido sulfúrico, 110%.....    | 7.2  | 27.4 | 1.98                                 |
| Ácido sulfúrico, 98%.....     | 7.0  | 24.8 | 1.836                                |
| Ácido sulfúrico, 60%.....     | 10.2 | 21.3 | 1.498                                |
| Agua.....                     | 10.2 | 13.0 | 0.998                                |
| Alcohol alílico.....          | 10.2 | 14.3 | 0.854                                |
| Alcohol amílico.....          | 7.5  | 18.4 | 0.817                                |
| Amoniaco, 100%.....           | 12.6 | 2.0  | 0.817 (-79°)                         |
| Amoniaco, 26%.....            | 10.1 | 13.9 | 0.904                                |
| Anhídrido acético.....        | 12.7 | 12.8 | 1.832                                |
| Anilina.....                  | 8.1  | 18.7 | 1.022                                |
| Anisol.....                   | 12.3 | 13.5 | 0.990                                |
| Benceno.....                  | 12.5 | 10.9 | 0.879                                |
| Bromo.....                    | 14.2 | 13.2 | 3.119                                |
| Bromotolueno.....             | 20.0 | 15.9 | 1.41                                 |
| Bromuro de etilo.....         | 14.5 | 8.1  | 1.431                                |
| Bromuro de propilo.....       | 14.5 | 9.6  | 1.353                                |
| Butanol.....                  | 8.6  | 17.2 | 0.810                                |
| Ciclohexanol.....             | 2.9  | 24.3 | 0.962                                |
| Clorobenceno.....             | 12.3 | 12.4 | 1.107                                |
| Cloroformo.....               | 14.4 | 10.2 | 1.489                                |

| <i>Líquido</i>                   | X    | Y    | <i>Densidad a 20°C<br/>g/cm<sup>3</sup></i> |
|----------------------------------|------|------|---|
| Clorotolueno, orto.....          | 13.0 | 13.3 | 1.082                                       |
| Clorotolueno, meta.....          | 13.3 | 12.5 | 1.072                                       |
| Clorotolueno, para.....          | 13.3 | 12.5 | 1.070                                       |
| Cloruro de calcio, sol. 25%..... | 6.6  | 15.9 | 1.228                                       |
| Cloruro estánnico.....           | 13.5 | 12.8 | 2.226                                       |
| Cloruro de etilo.....            | 14.8 | 6.0  | 0.917 (6°)                                  |
| Cloruro de metilo.....           | 15.0 | 3.8  | 0.952 (0°)                                  |
| Cloruro de propilo.....          | 14.4 | 7.5  | 0.890                                       |
| Cloruro de sodio, sol. 25%.....  | 10.2 | 16.6 | 1.186 (25°)                                 |
| Cloruro de sulfurilo.....        | 15.2 | 12.4 | 1.667                                       |
| Cresol, meta.....                | 2.5  | 20.8 | 1.034                                       |
| Dibromoetano.....                | 12.7 | 15.8 | 2.495                                       |
| Dicloroetano.....                | 13.2 | 12.2 | 1.256                                       |
| Diclorometano.....               | 14.6 | 8.9  | 1.336                                       |
| Difenilo.....                    | 12.0 | 18.3 | 0.992 (73°)                                 |
| Dióxido de azufre.....           | 15.2 | 7.1  | 1.434 (0°)                                  |
| Dióxido de carbono.....          | 11.6 | 0.3  | 1.101 (-37°)                                |
| Etanol, 100%.....                | 10.5 | 13.8 | 0.789                                       |
| Etanol, 95%.....                 | 9.8  | 14.3 | 0.804                                       |
| Etanol, 40%.....                 | 6.5  | 16.6 | 0.935                                       |
| Éter etílico.....                | 14.5 | 5.3  | 0.708 (25°)                                 |
| Etilbenceno.....                 | 13.2 | 11.5 | 0.867                                       |
| Fenol.....                       | 6.9  | 20.8 | 1.071 (25°)                                 |
| Formiato de etilo.....           | 14.2 | 8.4  | 0.923                                       |
| Freón-11.....                    | 14.4 | 9.0  | 1.494 (17°)                                 |
| Freón-12.....                    | 16.8 | 5.6  | 1.486 (-30°)                                |
| Freón-21.....                    | 15.7 | 7.5  | 1.426 (0°)                                  |
| Freón-22.....                    | 17.2 | 4.7  | 3.87 (0°)                                   |
| Freón-113.....                   | 12.5 | 11.4 | 1.576                                       |
| Glicerina, 100%.....             | 2.0  | 30.0 | 1.261                                       |
| Glicerina, 50%.....              | 6.9  | 19.6 | 1.126                                       |
| Glicol.....                      | 6.0  | 23.6 | 1.113                                       |
| Heptano.....                     | 14.1 | 8.4  | 0.684                                       |
| Hexano.....                      | 14.7 | 7.0  | 0.659                                       |
| Hidróxido sódico, 50%.....       | 3.2  | 25.8 | 1.525                                       |
| Ioduro de etilo.....             | 14.7 | 10.3 | 1.933                                       |
| Ioduro de propilo.....           | 14.1 | 11.6 | 1.747                                       |
| Isobutanol.....                  | 7.1  | 18.0 | 0.779 (26°)                                 |
| Isopropanol.....                 | 8.2  | 16.0 | 0.789                                       |
| Keroseno.....                    | 10.2 | 16.9 | 0.78-0.82                                   |
| Mercurio.....                    | 18.4 | 16.4 | 13.546                                      |
| Metanol, 100%.....               | 12.4 | 10.5 | 0.792                                       |
| Metanol, 90%.....                | 12.3 | 11.8 | 0.820                                       |

| Líquido                      | X    | Y    | Densidad a 20°C<br>g/cm <sub>3</sub> |
|------------------------------|------|------|--------------------------------------|
| Metanol, 40%.....            | 7.8  | 15.5 | 0.935                                |
| Metiletilcetona.....         | 13.9 | 8.6  | 0.805                                |
| Naftaleno.....               | 7.9  | 18.1 | 1.145                                |
| Nitrobenzeno.....            | 10.6 | 16.2 | 1.205 (18°)                          |
| Nitrotolueno.....            | 11.0 | 17.0 | 1.16                                 |
| Octano.....                  | 13.7 | 10.0 | 0.703                                |
| Octanol.....                 | 6.6  | 21.1 | 0.827                                |
| Oxalato de dietilo.....      | 11.0 | 16.4 | 1.079                                |
| Oxalato de dimetilo.....     | 12.3 | 15.8 | 1.148 (54°)                          |
| Oxalato de dipropilo.....    | 10.3 | 17.7 | 1.038 (0°)                           |
| Pentacloroetano.....         | 10.9 | 17.3 | 1.671 (25°)                          |
| Pentano.....                 | 14.9 | 5.2  | 0.630 (18°)                          |
| Propanol.....                | 9.1  | 16.5 | 0.804                                |
| Sodio.....                   | 16.4 | 13.9 | 0.97                                 |
| Sulfuro de carbono.....      | 16.1 | 7.5  | 1.263                                |
| Tetracloroetano.....         | 11.9 | 15.7 | 1.600                                |
| Tetracloroetileno.....       | 14.2 | 12.7 | 1.624 (15°)                          |
| Tetracloruro de carbono..... | 12.7 | 13.1 | 1.595                                |
| Tetracloruro de titanio..... | 14.4 | 12.3 | 1.726                                |
| Tolueno.....                 | 13.7 | 10.4 | 0.866                                |
| Trementina.....              | 11.5 | 14.9 | 0.861-0.867                          |
| Tribromuro de fósforo.....   | 13.8 | 16.7 | 2.852 (15°)                          |
| Tricloroetileno.....         | 14.8 | 10.5 | 1.466                                |
| Tricloruro de arsénico.....  | 13.9 | 14.5 | 2.163                                |
| Tricloruro de fósforo.....   | 16.2 | 10.9 | 1.574                                |
| Xileno, orto.....            | 13.5 | 12.1 | 0.881                                |
| Xileno, meta.....            | 13.9 | 10.6 | 0.867                                |
| Xileno, para.....            | 13.9 | 10.9 | 0.861                                |

Fuente: A. Vian y J. Ocón. *Elementos de ingeniería química*. Aguilar. 1976. Madrid. Tabla A.2-14 Págs. 794, 795, 796.

