

Algunos Métodos de Estimación para Viscosidad

μ

ÍNDICE

VISCOSIDAD DE GASES PUROS A BAJA PRESIÓN.....	2
Teoría cinética de Chapman-Enskog	
Método de Stiel y Thodos	
VISCOSIDAD DE GASES PUROS A ALTA PRESIÓN	3
Diagrama de viscosidad reducida	
VISCOSIDAD DE MEZCLAS DE GASES A BAJA PRESIÓN.....	3
Método de Wilke	
VISCOSIDAD DE MEZCLAS DE GASES A ALTA PRESIÓN.....	3
VISCOSIDAD DE LÍQUIDOS PUROS	3
Introducción	
Método de Przedzicki y Sridhar	
Método de Orrick y Erbar	
Método de van Velzen	
Extrapolación de Lewis-Squires	
Método de Lucas para líquidos a alta presión	
VISCOSIDAD DE MEZCLAS DE LÍQUIDOS	6
Reglas de mezclado	
VISCOSIDAD DE SUSPENSIONES Y EMULSIONES.....	6
Ecuación de Einstein	
Ecuación de Taylor	
FUENTES CONSULTADAS	6

INTRODUCCIÓN

La viscosidad es la constante de proporcionalidad que aparece en la ley de Newton de la viscosidad, relacionando el esfuerzo cortante (o densidad de flujo de momentum) con el gradiente de velocidad (o rapidez de deformación). En su forma más simple, la ley de Newton de la viscosidad se puede expresar como:

$$\tau_{xy} = -\mu \frac{\partial v_y}{\partial x}$$

Los fluidos que se comportan de acuerdo a esta ley se denominan “fluidos newtonianos”, e incluyen a la mayoría de los fluidos simples. La viscosidad es una propiedad del fluido que depende de la temperatura y, en algunos casos, también depende de la presión.

La unidad SI de la viscosidad es Pa·s, que equivale a kg/m·s. Sin embargo, la viscosidad se expresa frecuentemente en submúltiplos del poise (1 P ≡ 1 g/cm·s = 0.1 kg/m·s) tales como el centipoise (cP) para líquidos y el micropoise (μP) para gases.

La viscosidad cinemática es el cociente de la viscosidad entre la densidad ($\nu = \mu / \rho$). Cuando la viscosidad está dada en Pa·s y la densidad en kg/m³, la viscosidad cinemática estará dada en m²/s.

La viscosidad de un gas a baja presión aumenta con la temperatura, y se considera independiente de la presión. La viscosidad de un líquido disminuye con la temperatura y es poco afectada por la presión excepto a presiones muy elevadas. Algunos valores representativos de viscosidad se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Algunos valores representativos de viscosidad

(aproximadamente a temperatura ambiente excepto donde se indica otra temperatura)

GASES (μP)		LÍQUIDOS (cP)	
H ₂	88	N ₂ (-196°C)	0.158
He	196	Acetona	0.324
O ₂	175	H ₂ O (0°C)	1.792
N ₂	203	H ₂ O (20°C)	1.005
Aire	181	H ₂ O (100°C)	0.284
CO ₂	146	Hg	1.5
NH ₃	103	Sangre (37°C)	3-4
H ₂ O (100°C)	125	H ₂ SO ₄	26.7
		Glicerina	1200
		Jarabe de maíz	1400
		Miel	2000-10000

NOTACIÓN

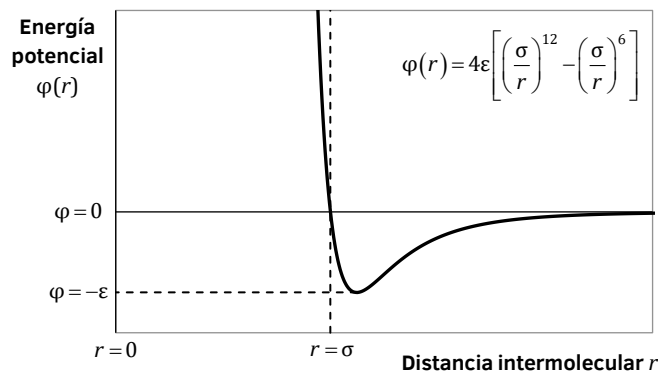
Ya que la mayoría de los métodos emplean correlaciones empíricas dimensionales, es necesario usar las unidades especificadas en esta lista salvo cuando se indica lo contrario en el método. Algunos símbolos que se emplean sólo en un método no se incluyen en esta tabla pero se definen en el método.

SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN	UNIDADES
M	Peso molecular	g/mol
P	Presión	bar
P_c	Presión crítica	bar
P_r	Presión reducida, $P_r = P / P_c$	-
P_{vap}	Presión de vapor	bar
T	Temperatura	K
T_b	Temperatura de ebullición normal (1 atm)	K
T_c	Temperatura crítica	K
T_m	Punto de fusión normal (1 atm)	K
T_r	Temperatura reducida, $T_r = T / T_c$	-
\tilde{V}_b	Volumen molar de líquido saturado en el punto de ebullición normal	cm ³ /mol
\tilde{V}_c	Volumen molar en el punto crítico	cm ³ /mol
\tilde{V}_m	Volumen molar de sólido en el punto de fusión	cm ³ /mol
w	Fracción peso	-
x	Fracción mol (en fase líquida)	-
y	Fracción mol (en fase gaseosa)	-
ϵ	Energía característica	J
Φ_{ij}	Parámetro de interacción (método de Wilke)	-
ϕ	Fracción volumen	-
κ	Constante de Boltzmann, 1.38066×10^{-23} J/K	J/K
μ	Viscosidad	Pa·s
μ_c	Viscosidad en el punto crítico	Pa·s
μ_{ef}	Viscosidad efectiva	Pa·s
μ_m	Viscosidad de la mezcla	Pa·s
μ_r	Viscosidad reducida, $\mu_r = \mu / \mu_c$	-
ν	Viscosidad cinemática, $\nu = \mu / \rho$	m ² /s
σ	Díámetro de colisión	Å
ω	Factor acéntrico	-
Ω_μ	Integral de colisión para viscosidad	-

VISCOSIDAD DE GASES PUROS A BAJA PRESIÓN
TEORÍA CINÉTICA DE CHAPMAN-ENSKOG

La "teoría cinética de los gases" fue desarrollada de forma independiente por Sydney Chapman y David Enskog entre 1910 y 1920. A partir de esta teoría, es posible obtener predicciones para la viscosidad, la conductividad térmica y la difusividad en un gas.

El modelo de gas ideal es adecuado para describir un gas a temperaturas suficientemente altas o presiones suficientemente bajas. Una suposición de este modelo es que el gas está formado por partículas que no ejercen ninguna fuerza entre sí. Sin embargo, las moléculas en un gas real experimentan fuerzas que son de atracción o de repulsión, según la distancia entre ellas. Se han desarrollado diversos modelos para describir esta interacción, siendo uno de los más populares el potencial de Lennard-Jones $\varphi(r)$, que se muestra en la figura.



En el caso de la viscosidad, la teoría cinética de los gases predice la siguiente ecuación para la viscosidad de un gas a baja presión:

$$\mu = 2.6693 \times 10^{-6} \frac{(MT)^{0.5}}{\sigma^2 \Omega_\mu}$$

donde σ (diámetro de colisión) y ε (energía característica, que suele emplearse dividida entre la constante de Boltzmann κ) son parámetros específicos del gas (Tabla 2).

Tabla 2. Parámetros de Lennard-Jones

Sustancia	σ	ε / κ	Sustancia	σ	ε / κ
	(Å)	(K)		(Å)	(K)
H ₂	2.827	59.7	UF ₆	5.967	236.8
He	2.551	10.22	Hg	2.969	750.0
Ne	2.820	32.8	CH ₄	3.758	148.6
Ar	3.542	93.3	C ₂ H ₆	4.443	215.7
Kr	3.655	178.9	C ₂ H ₄	4.163	224.7
Xe	4.047	231.0	C ₂ H ₂	4.033	231.8
aire	3.711	78.6	C ₃ H ₈	5.118	237.1
N ₂	3.798	71.4	CH ₂ =CH-CH ₃	4.678	298.9
O ₂	3.467	106.7	CH≡C-CH ₃	4.761	251.8
H ₂ O	2.649	356	n-C ₄ H ₁₀	4.687	531.4
CO	3.690	91.7	iso-C ₄ H ₁₀	5.278	330.1
CO ₂	3.941	195.2	n-C ₅ H ₁₂	5.784	341.1
COS	4.130	336.0	C(CH ₃) ₄	6.464	193.4
CS ₂	4.483	467.0	n-C ₆ H ₁₄	5.949	399.3
C ₂ N ₂	4.361	348.6	ciclopropano	4.807	248.9
NH ₃	2.900	558.3	ciclohexano	6.182	297.1
NO	3.492	116.7	benceno	5.349	412.3
N ₂ O	3.828	232.4	CH ₃ -OH	3.626	481.8
SO ₂	4.112	335.4	C ₂ H ₅ -OH	4.530	362.6
F ₂	3.357	112.6	CH ₃ -CO-CH ₃	4.600	560.2
Cl ₂	4.217	316.0	CH ₃ -O-CH ₃	4.307	395.0
Br ₂	4.296	507.9	C ₂ H ₅ -O-C ₂ H ₅	5.678	313.8
I ₂	5.160	474.2	CH ₃ Cl	4.182	350.0
HF	3.148	330.0	CH ₂ Cl ₂	4.898	356.3

Sustancia	σ	ε / κ	Sustancia	σ	ε / κ
	(Å)	(K)		(Å)	(K)
HCl	3.339	344.7	CHCl ₃	5.389	340.2
HBr	3.353	449.0	CCl ₄	5.947	322.7
HI	4.211	288.7	CCl ₂ F ₂	5.116	280.0
HCN	3.630	569.1	SiH ₄	4.084	207.6
H ₂ S	3.623	301.1	SiF ₄	4.880	171.9
SF ₆	5.128	222.1			

Cuando se desconoce σ y ε / κ , se pueden estimar con base en el punto crítico o el punto de ebullición o fusión normales (Tabla 3).

Tabla 3. Estimación de diámetro de colisión y energía característica

referencia	punto crítico (preferible)	punto crítico (alternativa)	punto de ebullición	punto de fusión
$\sigma =$	$0.841\tilde{V}_c^{1/3}$	$2.44\left(\frac{T_c}{P_c}\right)^{1/3}$	$1.166\tilde{V}_b^{1/3}$	$1.222\tilde{V}_m^{1/3}$
$\frac{\varepsilon}{\kappa} =$	$0.77T_c$	$0.77T_c$	$1.15T_b$	$1.92T_m$

La integral de colisión Ω_μ (Tabla 4) se puede consultar tabulada en función de la temperatura adimensional T^* , definida como:

$$T^* = \frac{\kappa T}{\varepsilon} \quad \text{o bien} \quad T^* = \frac{T}{\varepsilon / \kappa}$$

Tabla 4. Integral de colisión (Lennard-Jones)

T^*	Ω_μ	T^*	Ω_μ	T^*	Ω_μ	T^*	Ω_μ
0.25	3.0353	1.30	1.4000	2.7	1.0700	4.8	0.9326
0.30	2.8458	1.35	1.3760	2.8	1.0591	4.9	0.9288
0.35	2.6791	1.40	1.3538	2.9	1.0489	5.0	0.9252
0.40	2.5316	1.45	1.3331	3.0	1.0394	6.0	0.8948
0.45	2.4003	1.50	1.3139	3.1	1.0304	7.0	0.8719
0.50	2.2831	1.55	1.2959	3.2	1.0220	8.0	0.8535
0.55	2.1781	1.60	1.2791	3.3	1.0141	9.0	0.8382
0.60	2.0839	1.65	1.2633	3.4	1.0066	10	0.8249
0.65	1.9991	1.70	1.2486	3.5	0.9995	12	0.8026
0.70	1.9226	1.75	1.2347	3.6	0.9927	14	0.7844
0.75	1.8535	1.80	1.2216	3.7	0.9864	16	0.7690
0.80	1.7909	1.85	1.2092	3.8	0.9803	18	0.7556
0.85	1.7341	1.90	1.1975	3.9	0.9745	20	0.7439
0.90	1.6825	1.95	1.1865	4.0	0.9690	25	0.7196
0.95	1.6354	2.00	1.1760	4.1	0.9637	30	0.7003
1.00	1.5925	2.1	1.1565	4.2	0.9587	35	0.6844
1.05	1.5533	2.2	1.1388	4.3	0.9539	40	0.6710
1.10	1.5173	2.3	1.1227	4.4	0.9493	50	0.6491
1.15	1.4843	2.4	1.1079	4.5	0.9448	75	0.6111
1.20	1.4539	2.5	1.0943	4.6	0.9406	100	0.5855
1.25	1.4259	2.6	1.0817	4.7	0.9365	150	0.5512

VISCOSIDAD DE GASES PUROS A BAJA PRESIÓN
MÉTODO DE STIEL Y THODOS

$$\mu = 9.91 \times 10^{-8} \frac{NM^{1/2}P_c^{2/3}}{T_c^{1/6}}$$

N es aquí una función de la temperatura reducida:

$$N = \begin{cases} 3.4T_r^{0.94} & \text{para } T_r \leq 1.5 \\ 1.778(4.58T_r - 1.67)^{0.625} & \text{para } T_r > 1.5 \end{cases}$$

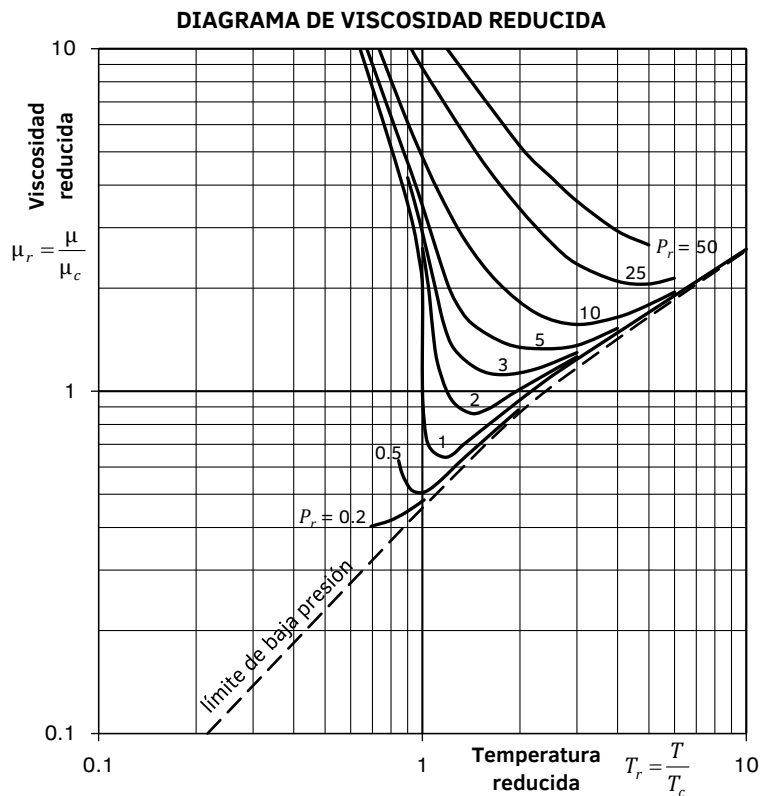
Este método se desarrolló originalmente para hidrocarburos puros, pero se puede emplear para otros gases no hidrocarburos excepto el hidrógeno.

VISCOSIDAD DE GASES PUROS A ALTA PRESIÓN

DIAGRAMA DE VISCOSIDAD REDUCIDA

No existe un valor específico de presión a partir del cual se considere "alta". Normalmente los métodos para gases a baja presión comienzan a mostrar desviaciones significativas a presiones de 10 atm o mayores.

Con base en el principio de estados correspondientes, es posible relacionar la viscosidad reducida $\mu_r = \mu/\mu_c$ con la temperatura y presión reducidas:



Adaptado de Bird (2002), Poling (2000) y White (1991)

Pocas veces se cuenta con datos de la viscosidad en el punto crítico; algunos valores se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5. Viscosidad en el punto crítico (en micropoise).

compuesto	μ_c	compuesto	μ_c	compuesto	μ_c
H ₂	34.7	CS ₂	404	n-C ₄ H ₁₀	239
He	25.4	NH ₃	250	iso-C ₄ H ₁₀	239
Ne	156	NO	258	n-C ₅ H ₁₂	238
Ar	264	N ₂ O	332	n-C ₆ H ₁₄	248
Kr	396	SO ₂	411	ciclohexano	284
Xe	490	Cl ₂	420	benceno	312
Aire	193	CH ₄	159	CH ₃ -OH	284
N ₂	180	C ₂ H ₆	210	C ₂ H ₅ -OH	285
O ₂	250	C ₂ H ₄	215	CH ₃ Cl	338
H ₂ O	450	C ₂ H ₂	237	CHCl ₃	410
CO	190	C ₃ H ₈	228	CCl ₄	413
CO ₂	343	CH ₂ =CH-CH ₃	233		

Valores recopilados de Bird (2002), Perry (2004), Incropera (2006), y Kim (2002).

Para compuestos que no aparecen en la Tabla 5, la viscosidad crítica se puede estimar con alguna de las siguientes correlaciones:

$$\mu_c = 6.16 \times 10^{-6} \frac{(MT_c)^{1/2}}{\tilde{V}_c^{2/3}} \quad \text{o bien} \quad \mu_c = 7.7 \times 10^{-7} \frac{M^{1/2} P_c^{2/3}}{T_c^{1/6}}$$

VISCOSIDAD DE MEZCLAS DE GASES A BAJA PRESIÓN

MÉTODO DE WILKE

Este método emplea las fracciones mol y las viscosidades de los componentes puros a la misma temperatura. Para una mezcla binaria, este método se expresa como:

$$\mu_m = \frac{y_1 \mu_1}{y_1 + y_2 \Phi_{12}} + \frac{y_2 \mu_2}{y_2 + y_1 \Phi_{21}}$$

y para una mezcla multicomponentes se generaliza a:

$$\mu_m = \sum_{i=1}^n \frac{y_i \mu_i}{\sum_{j=1}^n y_j \Phi_{ij}}$$

Los Φ son parámetros de interacción binarios que se deben calcular para cada par de compuestos i y j . La ecuación general es:

$$\Phi_{ij} = \frac{1}{\sqrt{8}} \left(1 + \frac{M_i}{M_j} \right)^{-1/2} \left[1 + \left(\frac{\mu_i}{\mu_j} \right)^{1/2} \left(\frac{M_j}{M_i} \right)^{1/4} \right]^2$$

El correspondiente parámetro Φ_{ji} (con subíndices intercambiados) se puede encontrar también con la fórmula simplificada:

$$\Phi_{ji} = \frac{\mu_j M_i}{\mu_i M_j} \Phi_{ij}$$

Cuando ambos subíndices son iguales, el parámetro $\Phi_{ii} = 1$.

VISCOSIDAD DE MEZCLAS DE GASES A ALTA PRESIÓN

Se puede recomendar el método de Lucas (Poling, 2000). Ya que este método es capaz de predecir correctamente la viscosidad de mezclas de gases a baja presión, se recomienda como método de uso general en programas de computadora.

VISCOSIDAD DE LÍQUIDOS PUROS

INTRODUCCIÓN

La viscosidad de un líquido disminuye al aumentar la temperatura. Son pocos los modelos que permitan predecir la viscosidad de un líquido a partir de otra información conocida, por lo que generalmente se necesitan datos experimentales, que se suelen correlacionar el logaritmo de la viscosidad con la inversa de la temperatura. Dos correlaciones frecuentemente empleadas son la ecuación de Andrade:

$$\ln \mu = A + \frac{B}{T}$$

o con la ecuación de Vogel:

$$\ln \mu = A + \frac{B}{T + C}$$

donde los parámetros A , B y C deben estimarse a partir de datos experimentales.

VISCOSIDAD DE LÍQUIDOS PUROS

MÉTODO DE PRZEZDZIECKI Y SRIDHAR

$$\mu = \frac{\tilde{V}_0}{E(\tilde{V} - \tilde{V}_0)}$$

En este método, μ es la viscosidad en cP, \tilde{V} es el volumen molar de líquido en cm³/mol a la temperatura de interés, y E y \tilde{V}_0 están dados por:

$$\tilde{V}_0 = \frac{\tilde{V}_m}{0.342(T_m/T_c) + 0.894} + 0.0085\omega T_c - 2.02$$

$$E = \frac{\tilde{V}_c}{12.94 + 0.10M - 0.23P_c + 0.0424T_m - 11.58(T_m/T_c)} - 1.12$$

Se recomienda que el volumen molar \tilde{V} (a la temperatura de interés) y \tilde{V}_m (a la temperatura T_m) se estimen con el método de Gunn y Yamada:

$$\tilde{V} = \frac{f(T)}{f(T_{ref})} \tilde{V}_{ref} \quad \tilde{V}_m = \frac{f(T_m)}{f(T_{ref})} \tilde{V}_{ref}$$

donde \tilde{V}_{ref} es el valor experimental del volumen molar de líquido a la temperatura T_{ref} , y la función $f(T)$ es:

$$f(T) = H_1(1 - \omega H_2)$$

con H_1 y H_2 funciones de la temperatura reducida T_r :

$$H_1 = 0.33593 - 0.33953T_r + 1.51941T_r^2 - 2.02512T_r^3 + 1.11422T_r^4$$

$$H_2 = 0.29607 - 0.09045T_r - 0.04842T_r^2$$

Este método puede dar errores grandes cuando la temperatura es baja ($T_r < 0.55$).

VISCOSIDAD DE LÍQUIDOS PUROS MÉTODO DE ORRICK Y ERBAR

Este método no se puede emplear para compuestos que contengan nitrógeno o azufre. El método emplea contribución de grupos para estimar dos constantes A y B . La ecuación del método es:

$$\ln \frac{\mu}{\rho M} = A + \frac{B}{T}$$

donde la densidad ρ , en g/cm³, es del líquido a la temperatura de interés. Para líquidos que tengan un punto de ebullición por debajo de 20 °C, usar la densidad de líquido saturado a 20 °C. Para líquidos con punto de fusión por encima de 20 °C, usar la densidad de líquido en el punto de fusión.

Tabla 6. Contribuciones de grupos para el método de Orrick y Erbar

GRUPO	ΔA	ΔB
$\begin{array}{c} \\ \text{R}-\text{C}-\text{R} \\ \\ \text{R} \end{array}$	-0.15	35
$\begin{array}{c} \text{R} \\ \\ \text{R}-\text{C}-\text{R} \\ \\ \text{R} \end{array}$	-1.20	400
doble enlace	0.24	-90
anillo de cinco miembros	0.10	32
anillo de seis miembros	-0.45	250
anillo aromático	0	20
sustitución orto	-0.12	100
sustitución meta	0.05	-34
sustitución para	-0.01	-5
-Cl	-0.61	220
-Br	-1.25	365
-I	-1.75	400
-OH	-3.00	1600
-COO-	-1.00	420
-O-	-0.38	140
$\begin{array}{c} \\ -\text{C}=\text{O} \end{array}$	-0.50	350
-COOH	-0.90	770
carbonos (N = átomos de carbono que no estén ya considerados en los grupos anteriores)	-(6.95+0.21N)	275+99N

VISCOSIDAD DE LÍQUIDOS PUROS

MÉTODO DE VAN VELZEN

Es un método de contribución de grupos bastante exacto para compuestos orgánicos, aunque no se debe emplear para temperaturas muy por encima del punto de ebullición ($T_r \approx 0.75$). La ecuación principal es:

$$\log_{10} \mu = B \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) - 3.0$$

La viscosidad obtenida estará en Pa·s, pero si se omite el término -3.0 se obtiene la viscosidad en cP.

Los valores de B y T_0 se determinan de la siguiente forma: Se comienza con el número de carbonos en la molécula N , que se emplea para calcular un número ajustado de carbonos N^* , al sumarle contribuciones correspondientes a estructura y grupos funcionales:

$$N^* = N + \sum \Delta N_i$$

Las contribuciones ΔN_i para los principales grupos se muestran en la Tabla 5. Es importante recalcar que las contribuciones señaladas como "corrección" deben incluirse adicionalmente a las contribuciones principales.

Con el número ajustado de carbonos N^* se calcula primero una contribución base B_0 , de acuerdo a las siguientes ecuaciones:

si $N^* \leq 20$:	$B_0 = 24.79 + 66.885(N^*) + 1.3173(N^*)^2 - 0.00377(N^*)^3$
si $N^* > 20$:	$B_0 = 530.59 + 13.740(N^*)$

Luego, a esa contribución base B_0 se agregan las contribuciones de los grupos (también de acuerdo a la Tabla 7) para obtener B :

$$B = B_0 + \sum \Delta B_i$$

Finalmente, T_0 se calcula también en base al número ajustado de carbonos N^* :

si $N^* \leq 20$:	$T_0 = 28.86 + 37.439(N^*) - 1.3547(N^*)^2 - 0.02076(N^*)^3$
si $N^* > 20$:	$T_0 = 238.59 + 8.164(N^*)$

Tabla 7. Contribuciones de grupos para el método de van Velzen

ESTRUCTURA O GRUPO FUNCIONAL	ΔN_i	ΔB_i	NOTAS	
n-alcános	0	0		
isoalcános	$1.389 - 0.238N$	15.51		
hidrocarburos saturados con dos grupos metilo en posición iso-	$2.319 - 0.238N$	15.51		
n-alquenos	$-0.152 - 0.042N$	$-44.94 + 5.410N^*$		
n-alcadienos	$-0.304 - 0.084N$	$-44.94 + 5.410N^*$		
isoalquenos	$1.237 - 0.280N$	$-36.01 + 5.410N^*$		
isoalcadienos	$1.085 - 0.322N$	$-36.01 + 5.410N^*$		
hidrocarburos con un doble enlace y dos grupos metilo en posición iso-	$2.626 - 0.518N$	$-36.01 + 5.410N^*$	[A]	
hidrocarburos con dos dobles enlaces y dos grupos metilo en posición iso-	$2.474 - 0.560N$	$-36.01 + 5.410N^*$	[A]	
ciclopentanos	$N < 16$ $N \geq 16$	$0.205 + 0.069N$ $3.971 - 0.172N$	$-45.96 + 2.224N^*$ $-339.67 + 23.135N^*$	[B]
ciclohexanos	$N < 17$ $N \geq 17$	1.48 $6.517 - 0.311N$	$-272.85 + 25.041N^*$ $-272.85 + 25.041N^*$	[C]
alquil-bencenos	$N < 16$ $N \geq 16$	0.60 $3.055 - 0.161N$	$-140.04 + 13.869N^*$ $-140.04 + 13.869N^*$	[CDEG] [DEG]
compuestos halogenados				

ESTRUCTURA O GRUPO FUNCIONAL	ΔN_i	ΔB_i	NOTAS
fluoruros	1.43	5.75	
cloruros	3.21	-17.03	[DE]
bromuros	4.39	-101.97 + 5.954N*	[DE]
yoduros	5.76	-85.32	[DE]
configuraciones especiales (correcciones)			
-C(Cl) _x -	1.91 - 1.459x	-26.38	
-CCl-CCl-	0.96	0	
-C(Br) _x -	0.50	81.34 - 86.850x	
-CBr-CBr-	1.60	-57.73	
CF ₃ en alcoholes	-3.93	341.68	
CF ₃ en otros compuestos	-3.93	25.55	
alcoholes			
primarios	10.606 - 0.276N	-589.44 + 70.519N*	[F]
secundarios	11.200 - 0.605N	497.58	[F]
terciarios	11.200 - 0.605N	928.83	[F]
dioles (corrección)		557.77	[H]
fenoles (corrección)	16.17 - N	213.68	[GIJ]
-OH en cadena lateral de un anillo aromático (corrección)	-0.16	213.68	
polifenoles	-5.340 + 0.815N	-188.40 + 9.558N*	[G]
aldehídos	3.38	146.45 - 25.11N*	
aldehídos con un anillo aromático en su estructura (corrección)	2.70	-760.65 + 50.478N*	
ácidos	N < 11 N ≥ 11	6.795 + 0.365N 10.71	-249.12 + 22.449N* -249.12 + 22.449N* [K]
ácidos con un metilo en posición iso-		-249.12 + 22.449N*	[L]
ácidos con anillos aromáticos en su estructura (corrección)	4.81	-188.40 + 9.558N*	
ésteres	4.337 - 0.230N	-149.13 + 18.895N*	[D]
ésteres con anillos aromáticos en su estructura (corrección)	-1.174 + 0.376N	-140.04 + 13.895N*	
anhídridos	7.97 - 0.50N	-33.50	
anhídridos con un anillo aromático en su estructura (corrección)	2.70	-760.65 + 50.478N*	
cetonas	3.265 - 0.122N	-117.21 + 15.781N*	[D]
cetonas con anillos aromáticos en su estructura (corrección)	2.70	-760.65 + 50.478N*	
éteres	0.298 + 0.209N	-9.39 + 2.848N*	[D]
éteres aromáticos	11.5 - N	-140.04 + 13.869N*	[M]
aminas			
amina primaria	3.581 + 0.325N	25.39 + 8.744N*	[D]
amina primaria en la cadena lateral de un anillo aromático (corrección)	-0.16	0	
amina secundaria	1.390 - 0.461N	25.39 + 8.744N*	[D]
amina terciaria	3.27	25.39 + 8.744N*	[D]
amina primaria aromática (-NH ₂ en el anillo aromático)	15.04 - N	25.39 + 8.744N*	
amina secundaria o terciaria con uno o más anillos aromáticos unidos al nitrógeno de la amina			[E]
amidas	13.12 + 1.49N	524.63 - 20.72N*	
amidas con un anillo aromático en su estructura (corrección)	2.70	-760.65 + 50.478N*	
nitrocompuestos			
1-nitro	7.812 - 0.236N	-213.14 + 18.330N*	
2-nitro	5.84	-213.14 + 18.330N*	[N]
3-nitro	5.56	-338.01 + 25.086N*	
4-nitro, 5-nitro	5.36	-338.01 + 25.086N*	
nitrocompuestos aromáticos	7.182 - 0.236N	-213.14 + 18.330N*	[E]
nitrilos	4.039 - 0.0103N	-241.66 + 27.937N*	
nitrilo con metilo en posición iso-	-0.7228 + 0.1755N	286.26 - 31.009N*	
nitrilo aromático	2.321 - 0.2357N	-26.063 - 11.516N*	
dinitrilo	10.452 - 1.1276N	3599.9 - 199.96N*	
sulfuros	3.9965 - 0.1861N	-76.676 + 8.143N*	
sulfuros con metilo en posición iso-	0.1601	-25.026	

NOTAS:

- [A] Por cada grupo -CH₃ adicional en posición -iso se debe aumentar ΔN en 1.389 - 0.238N.
- [B] No recomendado para $N = 5$ ó $N = 6$.
- [C] No recomendado para $N = 6$ ó $N = 7$.
- [D] Para ésteres, alquilbencenos, hidrocarburos halogenados y cetonas: si la cadena de hidrocarburo tiene un grupo metilo en posición iso-, hay que disminuir ΔN en 0.24 y aumentar ΔB en 8.93, por cada uno de dichos grupos. Para éteres y aminas, disminuir ΔN en 0.50 y aumentar ΔB en 8.93, por cada uno de los grupos iso-.
- [E] Para alquilbencenos, nitrobencenos, bencenos halogenados, y aminas secundarias y terciarias, en los que al menos un grupo aromático está unido al nitrógeno de un grupo amino, hay que agregar las siguientes correcciones: Si $N < 16$, aumentar ΔN en 0.60; si $N \geq 16$, aumentar ΔN en 3.055 - 0.161N por cada grupo aromático; y para cualquiera que sea el valor de N, aumentar ΔB en (-140.04 + 13.869N*).
- [F] Para alcoholes, si existe un grupo metil en posición iso-, incrementar ΔN en 0.24 y ΔB en 94.23.
- [G] Cuando existe sustitución en más de una posición de un anillo aromático, se requieren las siguientes correcciones adicionales:
- orientación orto- sin grupo -OH: $\Delta N = 0.51$ y $\Delta B = 54.84$.
 - orientación orto- con grupo -OH: $\Delta N = 0.51$ y $\Delta B = -571.94$.
 - orientación meta-: $\Delta N = 0.11$ y $\Delta B = 27.25$.
 - orientación para-: $\Delta N = 0.04$ y $\Delta B = 17.57$.
- [H] Para ΔN , úsese las contribuciones del alcohol y añádase $N - 2.50$.
- [I] Si el compuesto tiene un -OH o un -NH₂ aromático, o si hay un éter aromático, emplear la contribución ΔN que hay en la tabla, pero despreciar otros sustituyentes del anillo, tales como halógenos, -CH₃, -NO₂ y similares. Sin embargo, sí hay que tomar en cuenta estos sustituyentes para el cálculo de ΔN .
- [J] Para alcoholes aromáticos y compuestos con un -OH en una cadena lateral, se debe incluir la contribución del alcohol (primario, secundario, etcétera).
- [K] No recomendado para $N = 1$ ó $N = 2$.
- [L] Calcular ΔN como si fuera un ácido de cadena lineal y reducir ΔN en 0.24 por cada grupo metilo en posición iso-. Respecto a ΔB , calcular como si fuera un ácido de cadena lineal (no hay corrección adicional).
- [M] El valor de ΔN no es una corrección al valor regular del éter, pero el de ΔB sí es una corrección al valor regular del éter.
- [N] Nótese que la contribución del alqueno es necesaria.

VISCOSIDAD DE LÍQUIDOS PUROS

EXTRAPOLACIÓN DE LEWIS-SQUIRES

Si sólo se tiene un dato de viscosidad, es posible obtener una estimación de la viscosidad a otra temperatura empleando la ecuación de Lewis-Squires, aunque los errores pueden estar entre 5 a 15% o mayores:

$$\mu^{-0.2661} = \mu_{(1)}^{-0.2661} + \frac{T - T_{(1)}}{37.073}$$

donde las viscosidades están en Pa·s y las temperaturas pueden estar en °C o K, ya que sólo se usa su diferencia, y $\mu_{(1)}$ es el valor conocido de la viscosidad a la temperatura $T_{(1)}$. Este método no debe emplearse para temperaturas muy por encima del punto de ebullición normal.

VISCOSIDAD DE LÍQUIDOS PUROS

MÉTODO DE LUCAS PARA LÍQUIDOS A ALTA PRESIÓN

Para presiones relativamente bajas, la presión prácticamente no afecta la viscosidad de un líquido. A presiones moderadas o altas, la viscosidad de líquido aumenta con la presión. En este caso se puede usar la ecuación de Lucas:

$$\frac{\mu}{\mu_{sat}} = \frac{1 + D(0.47214\Delta P_r)^4}{1 + C\omega\Delta P_r}$$

donde μ es la viscosidad del líquido a alta presión y μ_{sat} es la viscosidad del líquido saturado a la misma temperatura. ΔP_r es la diferencia reducida entre la presión y la presión de vapor:

$$\Delta P_r = \frac{P - P_{vap}}{P_c}$$

y los parámetros A , C y D son funciones de la temperatura reducida:

$$A = 0.9991 - \frac{4.674 \times 10^{-4}}{1.0523T_r^{-0.03877} - 1.0513}$$

$$C = -0.07921 + 2.1616T_r - 13.4040T_r^2 + 44.1706T_r^3 - 84.8291T_r^4 + 96.1209T_r^5 - 59.8127T_r^6 + 15.6719T_r^7$$

$$D = \frac{0.3257}{(1.0039 - T_r^{2.573})^{0.2906}} - 0.2086$$

VISCOSIDAD DE MEZCLAS DE LÍQUIDOS REGLAS DE MEZCLADO

Para una mezcla líquida de hidrocarburos se puede emplear la regla de mezclado propuesta por Kendall y Monroe:

$$\mu_m^{1/3} = \sum_{i=1}^n x_i \mu_i^{1/3}$$

Para una mezcla líquida definida de no hidrocarburos, la regla de mezclado recomendada es:

$$\ln \mu_m = \sum_{i=1}^n x_i \ln \mu_i$$

VISCOSIDAD DE SUSPENSIONES Y EMULSIONES ECUACIÓN DE EINSTEIN

Para el caso de suspensiones de partículas sólidas en líquidos, es posible en la mayoría de los casos tratar este sistema de dos fases como si fuera una sola fase homogénea que tiene una viscosidad efectiva μ_{ef} . El primer modelo que se desarrolló fue la ecuación de Einstein, que aplica para suspensiones diluidas de esferas:

$$\frac{\mu_{ef}}{\mu_0} = 1 + \frac{5}{2} \phi$$

donde μ_0 es la viscosidad del líquido puro. Para suspensiones diluidas de partículas de forma diferente a la esférica, la constante 5/2 cambia por un coeficiente que depende de la forma de las partículas.

Para suspensiones concentradas de esferas ($\phi > 0.05$), puede emplearse la ecuación de Mooney:

$$\frac{\mu_{ef}}{\mu_0} = \exp\left(\frac{\frac{5}{2} \phi}{1 - (\phi / \phi_0)}\right)$$

donde ϕ_0 es una constante empírica entre 0.52 y 0.74.

VISCOSIDAD DE SUSPENSIONES Y EMULSIONES ECUACIÓN DE TAYLOR

Para emulsiones o suspensiones de pequeñas gotas de un líquido en otro, la viscosidad efectiva suele ser mucho menor que en el caso de suspensiones de partículas sólidas. En este caso puede emplearse la ecuación de Taylor:

$$\frac{\mu_{ef}}{\mu_0} = 1 + \left(\frac{\mu_0 + \frac{5}{2} \mu_1}{\mu_0 + \mu_1}\right) \phi$$

En la que μ_0 es la viscosidad de la fase continua y μ_1 es la viscosidad de la fase dispersa.

FUENTES CONSULTADAS

- Bird, Stewart y Lightfoot (2002). "Transport Phenomena". 2ª edición, Wiley.
- Perry (2004). "Manual del Ingeniero Químico". 7ª edición, McGraw-Hill.
- Poling, Prausnitz y O'Connell (2000). "The Properties of Gases and Liquids". 5ª Edición, McGraw-Hill
- Reid, Prausnitz y Poling (1987). "The Properties of Gases and Liquids". 4ª edición, McGraw-Hill.
- Welty, Wicks y Wilson (1997). "Fundamentos de Transferencia de Momento, Calor y Masa", Limusa.

LA LETRA PEQUEÑA

EL ÚNICO PROPÓSITO DE ESTE DOCUMENTO ES SERVIR COMO RECURSO DIDÁCTICO; SU USO DEBE SER EXCLUSIVAMENTE ACADÉMICO. PARTES DE ESTE DOCUMENTO PUEDEN ESTAR SUJETAS A RESTRICCIONES POR DERECHOS DE AUTOR EN ALGUNOS PAÍSES.

ALGUNOS DE LOS MÉTODOS HAN SIDO ADAPTADOS PARA EMPLEAR CONSISTENTEMENTE SIMBOLOGÍA Y/O SISTEMA DE UNIDADES, PARA FACILITAR LA APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS, O PARA CONCILIAR EN LO POSIBLE DISCREPANCIAS ENTRE LAS DIVERSAS FUENTES CONSULTADAS.

NO SE DA NINGUNA GARANTÍA, EXPLÍCITA O IMPLÍCITA, SOBRE LA EXACTITUD DE LA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO, POR LO QUE NO SE RECOMIENDA SU USO EN LA PREPARACIÓN DE DISEÑOS FINALES DE EQUIPOS INDUSTRIALES, PROCESOS QUÍMICOS, O SISTEMAS DE VIAJE A TRAVÉS DEL TIEMPO. EN ESTOS CASOS, SE RECOMIENDA CONSULTAR LAS FUENTES BIBLIOGRÁFICAS ORIGINALES.