

METODOS GENERALIZADOS DE ESTIMACIÓN DE PROPIEDADES DE TRANSPORTE: CONDUCTIVIDAD

Dr. C. Yamilé Martínez Ochoa¹, Dr. C. Agustín Benítez Hernández ¹

1. Departamento de Química e Ingeniería Química. Facultad de Ingenierías Química – Mecánica. Universidad de Matanzas. Autopista a Varadero. Km 3 ½. Matanzas. Cuba CP 44 740, Cuba.

Resumen.

El diseño o análisis de todo proceso químico se rige por modelos matemáticos en los cuales es importante tener en cuenta las propiedades de los fluidos que intervienen en los procesos de transferencia o transporte. Dentro de las propiedades de transporte se encuentra la conductividad que indica la resistencia que ofrece un material al flujo de calor. Cuando se carece de datos experimentales para la determinación de la conductividad se procede a estimarla a través de métodos reportados en la bibliografía especializada. El objetivo del presente trabajo es realizar un compendio de los métodos de estimación de la conductividad de gases, líquidos y sólidos reportados por diferentes autores.

***Palabras claves:** conductividad, propiedades de transporte, propiedades físicas, fenómenos de transporte.*

Introducción.

El diseño o análisis de todo proceso químico se rige por modelos matemáticos y estos a su vez se constituyen haciendo uso de diferentes leyes, como son: las leyes de conservación de la materia, energía y el movimiento; o las leyes cinéticas que describen las reacciones químicas, bioquímicas y las ecuaciones de velocidad de transporte, además dependen de las propiedades que tenga el fluido que estará sujeto al transporte, las que pueden ser físicas, termodinámicas y de transporte.

Dentro de las propiedades de transporte se encuentra la conductividad térmica (k), la cual interviene en la mayor parte de los problemas de transmisión de calor y es característica de los fluidos (gases y líquidos) y sólidos. Su importancia en el transporte de energía es análoga a la de viscosidad en el transporte de cantidad de movimiento.

Según Perry's (1999) la conductividad térmica (k) se define como la resistencia que ofrece un material o sustancia a la conducción de la energía calorífica. Depende de la naturaleza de la sustancia y del estado termodinámico.

Los materiales de alta conductividad térmica son buenos conductores de calor y el coeficiente k se halla dentro de los límites de 20 - 400 W/mK, en cambio los materiales de baja conductividad presentan las características de aislantes.

Desarrollo.

Cuando se carece de datos tabulados o experimentales se pueden estimar las propiedades de transporte por métodos empíricos utilizando otros datos de la sustancia en cuestión o de las sustancias puras que componen la mezcla.

Los métodos de estimación de las propiedades de transporte propuestos a lo largo del tiempo son muy diversos y van desde los que se basan en teorías rigurosas hasta los simples ajustes polinómicos, sin embargo, existen tres grupos de ecuaciones o métodos que han sido aceptados para este fin. Estos son, según Aucejo (1999), los siguientes:

- Las ecuaciones basadas en la teoría cinética de los gases ideales

- Las ecuaciones basadas en el teorema de los estados correspondientes
- Las ecuaciones basadas en procedimientos estructurales

Ecuaciones basadas en la teoría cinética de los gases ideales

Estas ecuaciones se obtienen a partir del modelo de los gases ideales que considera un gas puro constituido por moléculas esféricas, rígidas y que no se atraen, de diámetro d y masa m con una concentración de n moléculas por unidad de volumen. El volumen de una molécula es despreciable en comparación con el volumen del espacio intermolecular. Cada molécula se mueve aleatoriamente, en diferentes direcciones con una misma velocidad promedio (v) y recorre un espacio (l) entre dos colisiones consecutivas denominado recorrido libre medio. (Aucejo,1999; Bird,1992; Garcell, 1992)

A partir de este modelo muy elemental se llegó a la expresión generalizada para las propiedades de transportes:

$$\delta = \frac{1}{3} l \cdot v \quad (1)$$

El recorrido libre medio de las moléculas (l) y la velocidad media aritmética pueden determinarse a través de las siguientes expresiones:

$$l = \frac{1}{\sqrt{2} \pi d^2 n} \quad (2)$$

$$v = \sqrt{\frac{8 K T}{\pi m}} \quad (3)$$

donde:

K: Constante de Boltzman. (1,38. 10⁻²³ J/mol K)

A partir de estas expresiones elementales, se obtiene que la propiedad de transporte viene dada por:

$$\delta = \frac{2}{3 d^2 n} \sqrt{\frac{K T}{\pi^3 m}} \quad (4)$$

La validez de esta expresión para el cálculo de propiedades de transporte es muy reducida, ya que responde a un modelo de gas muy simplificado.

Esta expresión sencilla es modificada conforme a la teoría cinética que describe el comportamiento de los gases reales.

Ecuaciones basadas en el teorema de los estados correspondientes

El teorema de los estados correspondientes fue propuesto por Van der Waals en 1873 y establece que: “ todos los gases cuando se comparan a la misma presión reducida y temperatura reducida, tienen el mismo factor de compresibilidad, y todos se desvían del comportamiento ideal en el mismo grado”. Esto quiere decir que, aunque la relación entre el volumen y la presión a temperatura constante es diferente para cada sustancia, si esta relación se establece entre la presión

reducida P_r y el volumen reducido V_r , a una temperatura reducida dada T_r , el resultado es el mismo para todos los compuestos. (Aucejo, 1999)

Esta ley se cumple adecuadamente en sistemas formados por moléculas sencillas y con pequeñas modificaciones para moléculas polares. Es un procedimiento que ha dado buenos resultados aplicados a hidrocarburos, sobre todo para aquellas propiedades que dependen de las fuerzas intermoleculares.

Ecuaciones basadas en procedimientos estructurales.

Los procedimientos agrupados bajo esta denominación se derivan de la suposición de que las propiedades de los compuestos químicos están relacionadas con la estructura molecular. Si se divide la molécula en átomos, grupos de átomos, enlaces, etc., las propiedades podrían calcularse a partir de la contribución de cada una de estas partes elementales. A veces, no es la propiedad la que se estima por este procedimiento, sino algún parámetro relacionado con ella. (Aucejo, 1999)

GASES

A continuación se relacionan diferentes métodos reportados en la bibliografía especializada para estimar la conductividad de gases puros y mezclas de gases multicomponentes.

1. Conductividad térmica de gases a bajas presiones

El coeficiente de conductividad térmica de los gases puros a bajas presiones, de peso molecular M , puede ser estimado por varios métodos.

Para los gases la conductividad térmica (k) se encuentra entre 0.003 - 0.5 W/mK y se incrementa con el aumento de la temperatura.

➤ **Ecuaciones basadas en la teoría cinética de los gases ideales**

● Ecuación de Chapman – Enskog

Partiendo del modelo de los gases ideales Chapman en Inglaterra y Enskog en Suecia desarrollaron, independientemente, una teoría cinética rigurosa de los gases monoatómicos a baja densidad. (Bird, 1992)

Atendiendo a esta teoría, la expresión para determinar la **conductividad de gases no polares monoatómicos** toma la forma siguiente:

$$k = A \frac{\sqrt{T/M}}{\sigma^2 \Omega_k} \quad (5)$$

donde

k : Conductividad térmica del gas

T : Temperatura

M : Masa molecular

σ : Diámetro de colisión (diámetro característico de la molécula). Es uno de los parámetros del Potencial (6-12) de Lennard – Jones.

Ω_k : Función integral de colisión (adimensional). Factor de corrección de la desviación respecto al comportamiento de la esfera rígida.

A: Constante empírica que depende del sistema de unidades en que se trabaje

Los valores de la constante empírica A según varios autores, se muestran a continuación:

Tabla 1: Valores de la constante empírica A según varios autores

A	Unidades			Autor
	k	T	σ	
$8,3225 \cdot 10^{-2}$	W/m K	K	Å	Garcell, 1992; Brodkey, 1988
$1,9891 \cdot 10^{-4}$	cal/cm.s (K)	K	Å	Betancourt, 2003; Bird, 1992
$2,63 \cdot 10^{-23}$	W/m K	K	M	Aucejo, 1999

La expresión anterior muestra que la conductividad térmica de los gases a bajas presiones es independiente de la presión.

La función integral de colisión (Ω_k) es una función decreciente con la temperatura adimensional y es idéntica a la función integral de colisión (Ω_v) que se define para la determinación de la viscosidad.

La temperatura adimensional se determina como:

$$T^* = \frac{T}{\varepsilon/K} \quad (6)$$

donde:

ε/K : Es uno de los parámetros del Potencial (6-12) de Lennard – Jones.

Los valores de los parámetros del Potencial (6-12) de Lennard - Jones (σ y ε/K) se reportan en la bibliografía para algunos compuestos. En el Anexo 1 se muestra el valor de estas constantes reportados por Betancourt (2003), Aucejo (1999), Bird (1992), Garcell (1992) y Brodkey (1988)

Cuando no se encuentran reportados en la bibliografía para las sustancias de trabajo los parámetros de Potencial 6-12 de Lennard – Jones, estos pueden ser estimados a través de propiedades del fluido. En Garcell (1992), Bird (1992), Betancourt (2003), Martínez y Benítez (2008) pueden encontrarse ecuaciones empíricas para estimar los parámetros del Potencial 6-12 de Lennard – Jones (σ y ε/K) a partir de las propiedades del fluido en el punto crítico, de la temperatura normal de ebullición del líquido o del punto de fusión del sólido.

La función integral de colisión para moléculas no polares ($\Omega_{v, \text{no polar}}$) puede ser estimada mediante las siguientes expresiones según Betancourt (2003), Garcell (1992) y Brodkey (1988):

$$\Omega_{v, \text{nopolar}} = 1,6016 \left(T^* \right)^{0,474} \quad \text{para } 0,3 < T^* \leq 2,0 \quad (7)$$

$$\Omega_{v, \text{nopolar}} = 1,306 - 0,085 \left(T^* \right) \quad \text{para } 2,0 < T^* \leq 4,2 \quad (8)$$

$$\Omega_{v, \text{nopolar}} = 1,1809 \left(T^* \right)^{0,1525} \quad \text{para } 4,2 < T^* \leq 100 \quad (9)$$

Aucejo (1999) y Bird (1992) reportan tabulada la función de la integral de colisión para moléculas no polares en función de la temperatura adimensional. Betancourt (2003), Aucejo (1999) y Brodkey (1988) reportan un modelo matemático para los datos de la función integral de colisión para moléculas no polares en función de la temperatura adimensional para que pueda ser utilizado en ordenadores sin tener que acudir a la tabla:

$$\Omega_{v,nopolar} = \frac{A}{T^{*B}} + \frac{C}{e^{DT^*}} + \frac{E}{e^{FT^*}} \quad \text{para } 0,3 \leq T^* \leq 100 \quad (10)$$

donde:

$$\begin{aligned} A &= 1,16145 & D &= 0,77320 \\ B &= 0,14874 & E &= 2,16178 \\ C &= 0,52487 & F &= 2,43787 \end{aligned}$$

Para estimaciones rápidas, Betancourt (2003) y Brodkey (1988) reportan una ecuación simplificada para la estimación de la función integral de colisión para moléculas no polares:

$$\Omega_{v,nopolar} = \frac{1,604}{T^{*1/2}} \quad \text{para } 0,4 \leq T^* \leq 1,4 \quad (11)$$

La función de la integral de colisión para moléculas polares ($\Omega_{v,polar}$) es una modificación de la función de la integral de colisión para moléculas no polares y se determina como:

$$\Omega_{v,polar} = \Omega_{v,nopolar} + \frac{0,2 \delta^2}{T^*} \quad (12)$$

Aucejo (1999) y Bird (1992) tabulan la función de la integral de colisión para moléculas no polares en función de la temperatura adimensional. En el Anexo 2 se reporta dicha tabla.

- Ecuación de Eucken

Es necesario realizar una generalización de la ecuación para determinar la conductividad de gases monoatómicos que sirva para la determinación de la conductividad de gases poliatómicos debido a que las moléculas poliatómicas además de la energía cinética de traslación poseen también energía de rotación y vibración.

La ecuación para estimar la **conductividad de gases poliatómicos** es la siguiente:

$$k = A \frac{\sqrt{T/M}}{\sigma^2 \Omega_k} \left[\frac{4}{15} \left(\frac{C_v M}{R} \right) + \frac{3}{5} \right] \quad (13)$$

donde:

k: Conductividad térmica del gas

T: Temperatura

M: Masa molecular

σ : Diámetro de colisión (diámetro característico de la molécula)

Ω_k : Función integral de colisión (adimensional). Factor de corrección de la desviación respecto al comportamiento de la esfera rígida.

C_v : Capacidad calórica a volumen constante (J/kg K)

R: Constante de los gases (J/mol K)

A: Constante empírica que depende del sistema de unidades en que se trabaje. Los valores de la constante empírica A según varios autores, se muestran en la Tabla 1 presentada anteriormente.

- Ecuación Bromley, Stiel y Thodos (Aucejo, 1999; Perry's, 1999)

Estas ecuaciones son útiles para estimar la **conductividad de gases que no sean hidrocarburos** a partir del conocimiento de la viscosidad de los mismos.

Para gases monoatómicos

$$k = 2,5 \mu \frac{C_v}{M} \quad (14)$$

Para moléculas lineales:

$$k = \frac{\mu}{M} \left(1,30 C_v + 14644,0 - \frac{2928,8}{T_r} \right) \quad (15)$$

Para moléculas no lineales:

$$k = \frac{\mu}{M} \left(1,5 C_v + 16903,36 - \frac{2928,8}{T_r} \right) \quad (16)$$

donde:

k: Conductividad térmica (W/mK)

μ : Viscosidad (Pa.s)

C_v : Capacidad calórica a volumen constante (J/kmol K)

M: Masa molecular (kg/kmol)

T_r : Temperatura reducida (T/T_c)

T_c : Temperatura crítica (K)

Con estas ecuaciones se obtienen errores en un intervalo de 8 – 10 %, pero pueden ser mayores para compuestos polares. Las ecuaciones no pueden ser usadas para moléculas asociadas, por ejemplo ácidos orgánicos.

- Ecuación de Micis y Thodos

Según Perry's (1999) la predicción de la **conductividad térmica de gases de hidrocarburos a bajas presiones** (< 350 kPa) se determina por las ecuaciones de Micis y Todos.

Para el metano y compuestos cíclicos a $T_r < 0,1$

$$k = 4,45 \cdot 10^{-7} T_r \frac{C_p}{\lambda} \quad (17)$$

Para el metano y compuestos cíclicos a $T_r > 0,1$ y para cualquier otro hidrocarburo a cualquier temperatura.

$$k = 10^{-7} \left(4,52 T_r - 5,14 \right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{C_p}{\lambda} \right) \quad (18)$$

En estas ecuaciones se tiene que:

$$\lambda = T_c^{\frac{1}{6}} M^{\frac{1}{2}} \left(\frac{101,325}{P_c} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (19)$$

donde:

k: Conductividad térmica (W/mK)

T_r : Temperatura reducida (T/T_c)

T: Temperatura (K)

T_c : Temperatura crítica (K)

C_p : Capacidad calórica a presión constante (J/kmol K)

M: Masa molecular (kg/kmol)

P_c : Presión crítica (kPa)

Con estas ecuaciones se obtienen errores por debajo de un 5 %.

➤ Efecto de la Temperatura

La conductividad de los gases a bajas presiones aumenta con la temperatura de forma casi lineal. Sin embargo no se dispone de un ningún método fiable para poder extrapolar la conductividad térmica a partir de un valor conocido. (Aucejo, 1999)

$$\frac{k_{T_2}}{k_{T_1}} = \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{1,786} \quad (20)$$

donde:

k_{T_2} ; k_{T_1} : Conductividad térmica a la temperatura T_2 y T_1 respectivamente

Si se dispone de valores de conductividad térmica a más de dos valores de temperatura se puede ajustar el modelo a una expresión polinómica.

2. Conductividad térmica de gases a altas presiones

➤ Ecuaciones basadas en el Teorema de los estados correspondientes

La determinación de la conductividad térmica de gases a altas presiones puede realizarse a través del método gráfico, similar al de la determinación de la viscosidad, haciendo uso de los valores críticos de presión, temperatura, volumen y conductividad.

En la Figura 2 se muestra el gráfico que propone este método donde se determina la conductividad reducida (k_r) a partir de la temperatura reducida (T_r) y la presión reducida (P_r). Para completar el cálculo de la conductividad se necesitan valores de la conductividad en el punto crítico.

En el Anexo 3 se muestran valores de las constantes críticas para algunos gases.

Si no se disponen de datos experimentales de la conductividad del gas en el punto crítico, ésta puede estimarse a través de las siguientes ecuaciones recomendadas por (Bird, 1992 y Garcell 1992):

$$k_c = \frac{0,0394 P_c^{9/16}}{M^{1/3} T_c^{1/5}} \quad (21)$$

donde

k_c : Conductividad térmica crítica (W/mK)

T_c : Temperatura crítica (K)

P_c : Presión crítica (atm)

M : Masa molar (kg/kmol)

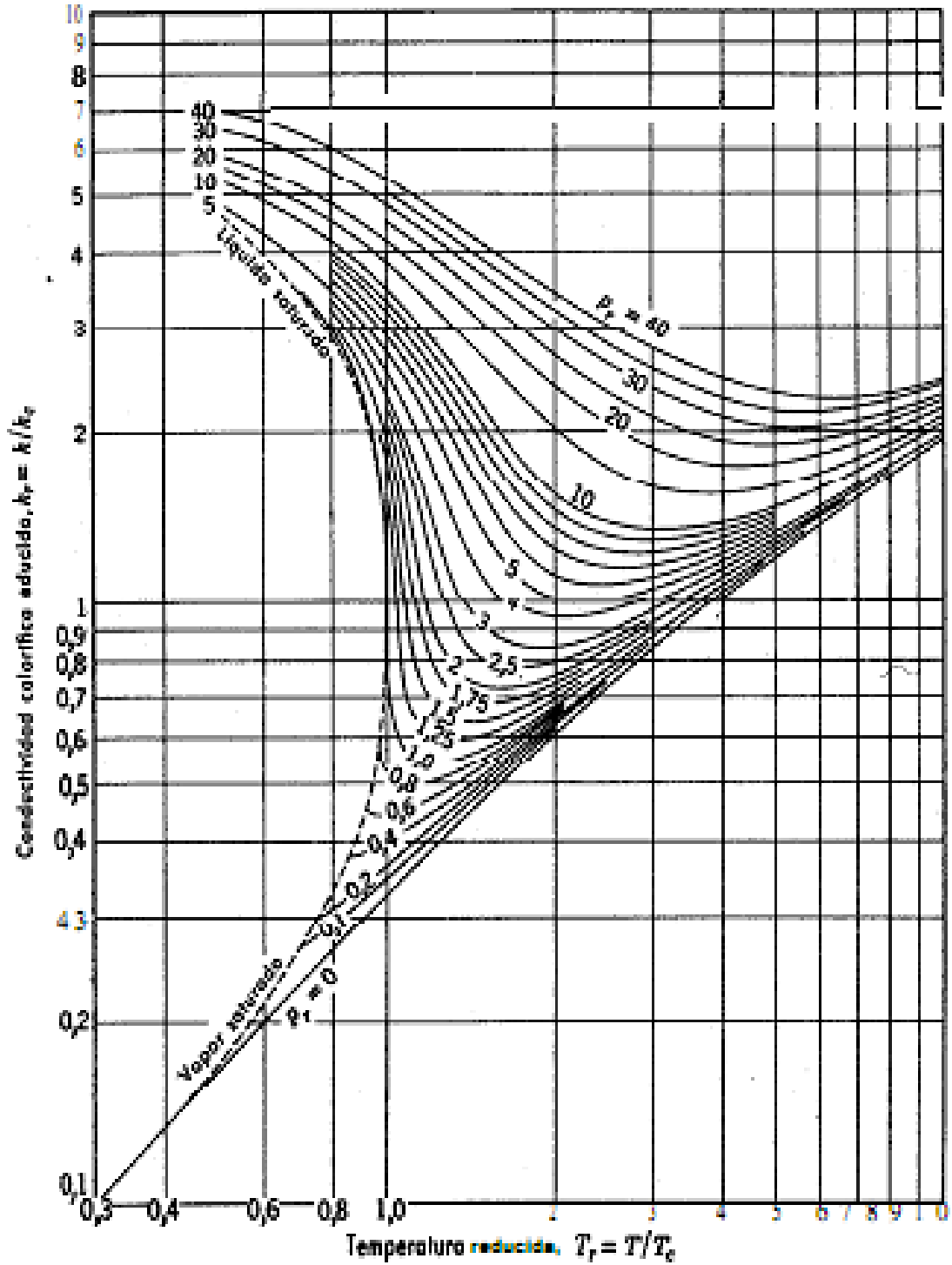


Figura 1: Conductividad térmica reducida en función de temperatura y presión reducidas

Existen reportadas en la bibliografía ecuaciones más precisas para estimar la conductividad de gases a altas presiones, las cuales se exponen a continuación (Perry's 1999; Aucejo 1999).

- Ecuación de Stiel y Thodos

$$k = k^o + \frac{A \cdot 10^{-8} \left(B \rho_r + C \right)}{Z_c^5 \left(\frac{M^{1/2} T_c^{1/6}}{P_c^{2/3}} \right)} \quad (22)$$

Donde:

k: Conductividad térmica a alta presión (W/mK)

k⁰: Conductividad térmica a presión atmosférica (W/mK)

ρ_r: Densidad reducida

V_c: Volumen molar crítico (m³/kmol)

V: Volumen molar a T y P (m³/kmol)

T_c: Temperatura crítica (K)

M: Masa molecular (kg/kmol)

P_c: Presión crítica (Pa)

Z_c: Factor de compresibilidad crítico

R: Constante de los gases ideales (8,314 · 10⁻⁹ Pa m³/kmol K)

A, B y C: Constantes que se muestran en la Tabla 2

Tabla 2: Valores de las constantes A, B y C para su uso en la ecuación 22

Rango	A	B	C
ρ _r < 0,5	2,702	0,535	-1,000
0,5 < ρ _r < 2	2,528	0,670	-1,069
2 < ρ _r < 2,8	0,574	1,155	2,016

El factor de compresibilidad se calcula como:

$$Z_c = \frac{P_c V_c}{R T_c} \quad (23)$$

La densidad reducida se calcula como:

$$\rho_r = \frac{V_c}{V} \quad (24)$$

3. Conductividad térmica de mezclas de gases a bajas presiones

➤ Ecuaciones basadas en la teoría cinética de los gases ideales

- Ecuación de Wassiljewa (Aucejo, 1999; Perry's 1999)

$$k_m = \frac{\sum_{i=1}^n y_i k_i}{\sum_{j=1}^n y_j \phi_{ij}} \quad (25)$$

donde:

k_m : Conductividad térmica de la mezcla (W/mK)

n : Número de componentes en la mezcla.

y_i y y_j : Fracciones molares de los componentes i y j respectivamente

k_i : Conductividad térmica del componente i puro a la temperatura de interés (W/mK)

ϕ_{ij} : Parámetro de interacción. Para el caso en que $i = j$ el término $\phi_{ij} = 1$.

La ecuación anterior requiere conocer los valores de conductividad térmica de los componentes puros que forman la mezcla a la temperatura y presión de esta.

En la bibliografía se reportan diferentes ecuaciones para estimar el parámetro de interacción ϕ_{ij}

✓ Ecuación de Wilke (Bird, 1992; Garcell 1992)

Esta ecuación es la misma que se propone para el cálculo de la viscosidad de mezclas gaseosas

$$\phi_{ij} = \frac{1}{\sqrt{8}} \left(1 + \frac{M_i}{M_j} \right)^{-1/2} \left[1 + \left(\frac{\mu_i}{\mu_j} \right)^{1/2} \left(\frac{M_j}{M_i} \right)^{1/4} \right]^2 \quad (26)$$

✓ Ecuación de Lindsay y Bromley (Aucejo, 1999; Perry's 1999)

$$\phi_{ij} = \frac{1}{4} \left\{ 1 + \left[\frac{\mu_i}{\mu_j} \left(\frac{M_j}{M_i} \right)^{3/4} \left(\frac{T + S_i}{T + S_j} \right) \right]^{1/2} \right\}^2 \left(\frac{T + S_{ij}}{T + S_i} \right) \quad (27)$$

$$S_{i,j} = 1,5 T_{bi,j} \quad (28)$$

$$S_{ij} = S_{ji} = C \sqrt{S_i \cdot S_j} \quad (29)$$

En estas ecuaciones se tiene que:

μ_i y μ_j : Viscosidades de los componentes i y j a la temperatura y presión de la mezcla.

M_i y M_j : Masas moleculares de los componentes i y j

S_{ij} : Constantes de temperatura (K)

$C = 1,0$ excepto cuando uno o ambos componentes son polares, en ese caso $C = 0,73$

T : Temperatura de la mezcla (K)

T_{bi} : Temperatura normal de ebullición (K)

Para el caso del helio (He) y el Hidrógeno (H₂) se toma el valor de $S_{i,j} = 79 \text{ K}$

4. Conductividad térmica de mezclas de gases a altas presiones

Para la corrección de la presión se utiliza la Ecuación de Stiel y Thodos (Ecuación 22) donde la mezcla es tratada hipotéticamente como un componente puro y utilizando las propiedades críticas de la mezcla y la masa molar promedio.

LIQUIDOS

A continuación se relacionan diferentes métodos reportados en la bibliografía especializada para estimar la conductividad de líquidos puros y mezclas de líquidos multicomponentes.

La teoría cinética molecular de los líquidos está mucho menos desarrollada que la de los gases, es por eso que el conocimiento que se tiene referente a las propiedades de transporte es fundamentalmente empírico.

La conductividad térmica de los líquidos es superior a la correspondiente a la de su vapor a la misma presión y temperatura. Presenta una pequeña dependencia de la presión y, normalmente, disminuye al aumentar la temperatura.

1. Conductividad térmica de líquidos puros a bajas presiones

- Ecuación de Bridgman (Bird, 1992)

Brigman propuso en 1923 una teoría sencilla de transporte y energía en líquidos puros. Suponía que las moléculas estaban dispuestas en una red cúbica con una separación entre sus centros. Admite también que la energía se transmite desde un plano de la red a otro contiguo con la velocidad del sonido (v_s) en el fluido considerado. El desarrollo se basa en una nueva interpretación, correspondiente a la teoría de los gases de la esfera rígida

$$k = A \left(\frac{N}{V} \right)^{2/3} K v_s \quad (30)$$

donde:

N: Número de Avogadro ($6,023 \cdot 10^{23}$ (moléculas $\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$))

V: Volumen molar ($\text{cm}^3/\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$)

K: Constante de Boltzmann ($1,3805 \cdot 10^{-16}$ erg molécula⁻¹ K⁻¹)

v_s : Velocidad del sonido.

A: Constante (Para líquidos monoatómicos $A = 3$; para líquidos poliatómicos $A = 2,8$)

La velocidad del sonido a baja frecuencia (v_s) viene dada por la siguiente ecuación:

$$v_s = \sqrt{\frac{C_p}{C_v} \left(\frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_t} \quad (31)$$

El término $(\partial P/\partial \rho)_t$ se puede obtener de la medición de la compresibilidad térmica, de una

ecuación de estado o bien de una correlación de compresibilidad. La relación (C_p/C_v) para los líquidos es prácticamente igual a la unidad excepto en las proximidades del punto crítico.

- Ecuación de Sato: (Brodkey 1988, Betancourt 2003)

Para estimar la conductividad térmica de líquidos orgánicos se recomienda la siguiente ecuación:

$$k = \frac{1,105}{M^{1/2}} \left(\frac{C_p}{C_{pb}} \right) \left(\frac{\rho}{\rho_b} \right)^{4/3} \left(\frac{T_b}{T} \right) \quad (32)$$

Donde:

k: Conductividad térmica (W/mK)

M: Masa molar (kg / kmol)

C_p: Capacidad calórica (J/kg K)

C_{pb}: Capacidad calórica a la temperatura de ebullición (J/kg K.)

ρ: Densidad de la sustancia(kg/m³)

ρ_b: Densidad de la sustancia a la temperatura de ebullición (kg/m³)

T: Temperatura de cálculo (K)

T_b: Temperatura de ebullición (K)

- **Ecuación de Latini y Col.**

Para la estimación de la conductividad térmica en **líquidos orgánicos** se utiliza la siguiente expresión (Aucejo, 1999)

$$k = \frac{A (T_c - T_r)^{0,38}}{T_r^{1/6}} \quad (33)$$

donde:

k: Conductividad térmica del líquido (W/m K)

T_r: Temperatura reducida (T/T_c)

T: Temperatura (K)

T_c: Temperatura crítica (K)

A: Parámetro característico de cada compuesto (W/m K)

El parámetro A es independiente de la temperatura. Se puede estimar a partir de datos experimentales y utilizar después para calcular la conductividad en otras condiciones. Estudios realizados sobre una cantidad de sustancias han constatado que, en una misma familia de compuestos químicos, también puede estimarse el parámetro A en función de la temperatura normal de ebullición (T_b), la temperatura crítica (T_c) y el peso molecular (M) a través de la siguiente expresión:

$$A = \frac{A^* T_b^\alpha}{M^\beta T_c^\gamma} \quad (34)$$

Los valores de las constantes A^* , α , β y γ se muestran a continuación para las familias químicas más conocidas (Aucejo, 1999)

Tabla 3: Valores de las constantes A^* , α , β y γ para las familias químicas más conocidas.

Familia química	A^*	α	β	γ
Hidrocarburos saturados	0,0035	1,2	0,5	0,167
Olefinas	0,0361	1,2	1,0	0,167
Cicloparafinas	0,031	1,2	1,0	0,167
Aromáticos	0,0346	1,2	1,0	0,167
Alcoholes	0,00339	1,2	0,5	0,167
Ácidos orgánicos	0,00319	1,2	0,5	0,167
Cetonas	0,00383	1,2	0,5	0,167
Ésteres	0,0415	1,2	1,0	0,167
Éteres	0,0385	1,2	1,0	0,167
Refrigerantes (R20, R21, R 22, R23)	0,562	0	0,5	- 0,167
Otros refrigerantes	0,494	0	0,5	- 0,167

- Ecuación de Baroncini y col.

Se utiliza para la estimación de la conductividad de **líquidos puros que no sean hidrocarburos** a temperaturas reducidas entre 0,3 y 0,8 y presiones por debajo de 3,5 MPa (Perry's, 1999)

$$k = \left(\frac{a b c}{m} \right) \frac{\left(1 - T_r \right)^{0,38}}{T_r^{1/6}} \quad (35)$$

donde:

k: Conductividad térmica del líquido (W/m K)

T_r : Temperatura reducida (T/T_c)

T: Temperatura (K)

T_c : Temperatura crítica (K)

a: Parámetro constante

b: Parámetro constante que es función de la Temperatura de ebullición (T_b) (K)

c: Parámetro constante que es función de la Temperatura crítica (T_c) (K)

m: Parámetro constante que es función del peso molecular

Los valores de las constantes a, b, c y m se muestran a continuación para varias familias químicas (Perry's, 1999)

Tabla 4: Valores de las constantes a, b, c y m se muestran a continuación para varias familias químicas.

Familia química	a	b	c	M
Ácidos orgánicos*	0,00319	$T_b^{6/5}$	$T_c^{-1/6}$	$M^{1/2}$
Alcoholes, fenoles	0,00339	$T_b^{6/5}$	$T_c^{-1/6}$	$M^{1/2}$
Ésteres**	0,0415	$T_b^{6/5}$	$T_c^{-1/6}$	M
Éteres***	0,0385	$T_b^{6/5}$	$T_c^{-1/6}$	M
Haluros	0,494	1,0	$T_c^{1/6}$	$M^{1/2}$
Refrigerantes (R20 – R23)	0,562	1,0	$T_c^{1/6}$	$M^{1/2}$
Cetonas	0,00383	$T_b^{6/5}$	$T_c^{-1/6}$	$M^{1/2}$
alquilxilanos	0,00482	$T_b^{6/5}$	$T_c^{-1/6}$	$M^{1/2}$
alquil-aryl-cloroxilanos	0,6510	1,0	$T_c^{1/6}$	$M^{1/2}$

* No usar para el ácido fórmico, murfítico y ácidos oleicos

** No usar para el butyl estearato

*** No usar para refrigerantes desde el R20–R23 (CHCl_3 , CHFCl_2 , CHClF_2 , o CHF_3)

- Método de Missenard

Este método se utiliza para los **líquidos puros que no sean hidrocarburos** en los cuales no puede aplicarse la Ecuación de Baroncini y col. Este método puede utilizarse a temperatura T (K) y a presiones por debajo de 3,5 MPa y se obtienen errores alrededor de un 8 %.

$$k = k'_L \left[\frac{3 + 20 \left(\frac{T - T_r}{T_c} \right)^{2/3}}{3 + 20 \left(1 - \frac{273,15}{T_c} \right)^{2/3}} \right] \quad (36)$$

$$k'_L = 2,656 \cdot 10^{-7} \frac{\rho_b^{1/2} C_p}{M^{1/2} V^{1/4}} \quad (37)$$

donde:

k: Conductividad térmica (W/mK)

k': Conductividad térmica a 273,15 K (W/mK)

T_r : Temperatura reducida (T/T_c)

T_c : Temperatura crítica (K)

T: Temperatura (K)

T_b : Temperatura normal de ebullición (K)

ρ : Densidad molar a 273,15 K (kmol/m^3)

C_p : Capacidad calórica a 293,15 K (J/ kmol K)

M: Masa molecular

N: Número de átomos en la molécula.

- Método de Pachaiyappan y col. (Perrys'1999)

Se utiliza para estimar la conductividad térmica de **líquidos hidrocarburos** a temperaturas reducidas entre 0,25 y 0,8 y presiones por debajo de 3,4 MPa

$$k = C \rho M^n \left[\frac{3 + 20 \left(-T_r \right)^{2/3}}{3 + 20 \left(1 - \frac{293,15}{T_c} \right)^{2/3}} \right] \quad (38)$$

donde:

k: Conductividad térmica del líquido (W/m K)

M: Masa molecular

ρ : Densidad molar a 293,15 K (kmol/m³)

T_r: Temperatura reducida (T/T_c)

T: Temperatura (K)

T_c: Temperatura crítica (K)

C y n: Constantes (Para hidrocarburos de cadena recta no ramificados n = 1,001 y C = 1,811 · 10⁻⁴ y para hidrocarburos cíclicos y ramificados, n = 0,7717 and C = 4,407 · 10⁻⁴)

Con este método se obtienen errores de un 5 %

Para presiones por encima de 3,4 MPa es necesario hacer correcciones al valor de la conductividad estimado.

- Método de Kanitkar y Thodos

Se utiliza para estimar la conductividad térmica de **líquidos hidrocarburos** a temperaturas por encima de la temperatura de ebullición y todas las presiones. Con este método se obtienen errores alrededor de un 10 %.

$$k = \frac{\alpha e^{\beta \rho_r}}{\lambda} \quad P < 10\,000 \text{ kPa} \quad (39)$$

$$k = \frac{2,596 \cdot 10^{-4} P_r^{1,6} + \alpha e^{\beta \rho_r}}{\lambda} \quad P > 10\,000 \text{ kPa} \quad (40)$$

$$\lambda = T_c^{1/6} M^{1/2} \left(\frac{101,325}{P_c} \right)^{2/3} \quad (41)$$

$$\beta = 0,40 + 0,986 e^{-0,64 \lambda} \quad (42)$$

$$\alpha = 0,0112 \beta^{-3,332} \quad (43)$$

donde:

k: Conductividad térmica del líquido (W/m K)

T: Temperatura (K)

P: Presión (kPa)

ρ_r : Densidad reducida (V_c/V)

V_c : Volumen molar crítico (m³/kmol)

V: Volumen molar a T y P (m³/kmol)

M: Masa molecular

P_c : Presión crítica (kPa)

P_r : Presión reducida (kPa) (P/P_c)

T_r : Temperatura reducida (T/T_c)

T_c : Temperatura crítica (K)

➤ Efecto de la temperatura

En general, la conductividad térmica de líquidos disminuye con la temperatura, aunque hay líquidos que constituyen una excepción de este comportamiento.

Para la mayoría de los líquidos orgánicos, el efecto de la temperatura sobre la conductividad térmica puede correlacionarse mediante la siguiente ecuación, según Garcell (1992)

$$k = \frac{B C_p \rho^{4/3}}{T} \quad (44)$$

donde:

k: Conductividad térmica (W/mK)

C_p : Capacidad calorífica a presión constante (J/kg K).

ρ : Densidad (Kg/m³).

T: Temperatura (K)

B: Constante que se puede determinar si se tiene al menos un valor de conductividad (k) para una temperatura dada.

En valores cercanos al punto de ebullición la influencia de la temperatura es prácticamente lineal, o sea:

$$k = A - BT \quad (45)$$

2. Conductividad térmica de líquidos puros a altas presiones

Según Aucejo (1999) para presiones moderadas (hasta 50 0 60 bar), el efecto de la presión sobre la conductividad térmica de los líquidos es prácticamente despreciable, excepto en las regiones próximas al punto crítico donde el comportamiento de la sustancia se asemeja más al de un gas denso que al de un líquido.

La estimación de las conductividad térmica de líquidos a presiones más elevadas puede realizarse por varios métodos, los cuales se muestran a continuación:

- Método de Missenard

El factor de corrección propuesto por Missenard (Perrys's 1999; Aucejo 1999) se utiliza para predecir la conductividad térmica de **líquidos que no son hidrocarburos** a presiones por encima de 3,5 MPa. Con este método se logran errores entre un 5 y un 20 %

$$k = k'_L \left[0,98 + 0,0079 P_r T_r^{1,4} + 0,63 T_r^{1,2} \left(\frac{P_r}{30 + P_r} \right) \right] \quad (46)$$

donde:

k: Conductividad térmica del líquido a la temperatura T (K) y presión deseada P (MPa) (W/m K)

k_L' : Conductividad térmica del líquido a la temperatura (K) y presión de 0,1 MPa (W/m K)

T: Temperatura (K)

P: Presión (MPa)

P_r: Presión reducida (kPa) (P/P_c)

P_c: Presión crítica (kPa)

T_r: Temperatura reducida (T/T_c)

T_c: Temperatura crítica (K)

- Método de Lenior

Para estimar la conductividad térmica de líquidos que sean hidrocarburos a presiones por encima de 3,4 MPa es necesario hacer correcciones al valor de la conductividad estimado para bajas presiones por el método de Pachaiyappan y col. (Perry's, 1999).

Para realizar la corrección de la presión se afecta el valor de la conductividad a baja presión por el factor (F/F') donde F es un factor de conductividad que se determina a la temperatura deseada y a alta presión mientras que F' se determina a igual temperatura y a baja presión, usualmente a presión atmosférica.

El factor de conductividad se determina como:

$$F = 17,77 + 0,065 P_r - 7,764 T_r - \frac{2,045 T_r^2}{e^{0,2 P_r}} \quad (47)$$

donde:

T_r: Temperatura reducida

P_r: Presión reducida (P/P_c)

P: Presión (MPa)

P_c: Presión crítica (MPa)

La conductividad a alta presión se calcula como:

$$k = k' \left(\frac{P}{P_c} \right) \quad (48)$$

donde:

k: Conductividad a alta presión (W/mK)

k': Conductividad a baja presión, determinada por el método de Pachaiyappan y col. (W/mK)

3. Conductividad térmica de mezclas de líquidos a bajas presiones

La ecuación más general de las recomendadas para estimar la mezcla de líquidos es la propuesta por Li (Garcell, 1992; Perry's 1999), la cual es aplicable a mezclas de líquidos acuosos y no acuosos a presiones por debajo de 3,5 MPa

- Ecuación de Li

$$k_{Lm} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \phi_i \phi_j k_{Li,j} \quad (49)$$

en la que:

$$\phi_i = \frac{x_i V_i}{\sum_{j=1}^n x_j V_j} \quad (50)$$

En estas ecuaciones se tiene que:

$$k_{Li,j} = 2 \left(\frac{1}{k_{Li}} + \frac{1}{k_{Lj}} \right)^{-1} \quad (51)$$

donde:

k_{Lm}: Conductividad de la mezcla a la temperatura T (K) (W/mK)

n: Número de componentes en la mezcla.

x_i y x_j: Fracciones molares de los componentes i y j respectivamente

V_{i,j}: Volumen molar de los componentes i y j a la temperatura (T) (m³/kmol)

k_{i,j}: Conductividad térmica de los componentes i y j a la temperatura (T) (W/m K)

4. Conductividad térmica de mezclas de líquidos a altas presiones

Para la determinación de la conductividad de mezclas de líquidos a presiones por encima de 3,5 MPa se utiliza la ecuación de Missenard (46). En esta ecuación la mezcla se trata hipotéticamente como un componente puro y usando las propiedades críticas de la mezcla.

5. Conductividad térmica de sólidos

La conductividad térmica de sólidos depende de numerosos factores, siendo difícil su predicción a partir de ecuaciones empíricas, por lo que puede determinarse experimentalmente o localizarse en la bibliografía especializada.

La conductividad térmica de sólidos varía con la temperatura según la siguiente ecuación:

$$k = k_{L0} (1 + \alpha T) \quad (52)$$

α : Constante que se puede determinar si se tiene al menos un valor de conductividad (k) para una temperatura dada.

Conclusiones.

Se muestra un compendio de los métodos de estimación de la viscosidad tanto de gases como de líquidos a baja y altas presiones reportados por diferentes autores.

Bibliografía.

- Aucejo, A. 1999. *Introducció a l'Enginyena Química*. Biblioteca Universitaria. Barcelona. 1999. ISBN: 84-7306-556-5.
- Betancourt, R. 2003. *Transferencia molecular de calor, masa y/o cantidad de Movimiento. Cap 3 Estimación de propiedades de transporte*. [on-line], descargado: 30-mar-2006. v.1. p.400. http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/manizales/4090013/Links/PDF/cap_3.pdf
- Bird, R.B.; Stewart, W.E.; Lighthfoot, E.N. 1992. *Fenómenos de Transporte*. Barcelona: Editorial Reverté, (España), ISBN 84-291-7060-2.
- Brodkey, R.S.; Hershey, H.C. 1988. *Transport phenomena - A unified approach*. New York (USA): McGraw-Hill Book Company. McGraw-Hill: Chemical engineering series, ISBN 0-07-007963-3.
- Garcell, L. 1992. *Transferencia de cantidad de movimiento, calor y masa*. Ciudad de La Habana: Editorial Pueblo y Educación
- Martínez, Y; Benítez, A. 2008. *Métodos generalizados de estimación de propiedades de transporte: Viscosidad*. UMCC: CD de Monografías. ISBN: 978 - 959 - 16 - 0948 - 9. Disponible en: <http://cict.umcc.cu/monografias/monos/2008/facultad%20Quimica-Mecanica/m0893.pdf>
- Perry R.H. 1984. *Perry's Chemical Engineers Handbook*. New York (USA): McGraw-Hill, Inc. ISBN 0-07-049841-5. (6th Ed.).

Perry R.H. 1999. *Perry's Chemical Engineers Handbook*. New York (USA): McGraw-Hill, Inc.
ISBN 0-07-049841-5. (7th Ed.).

ANEXO 1: PARÁMETROS DEL POTENCIAL (6-12) DE LENNARD – JONES PARA ALGUNOS COMPUESTOS.

Fórmula	Nombre	σ (Å)	ϵ_0/K (K)	Fórmula	Nombre	σ (Å)	ϵ_0/K (K)
Ar	Argón	3,542	93,3	iso-C ₄ H ₁₀	Isobutano	5,278	330,1
He	Helio	2,551	10,22	C ₂ H ₅ OC ₂ H ₅	Eter etílico	5,678	313,8
Kr	Kriptón	3,655	178,9	CH ₃ COOC ₂ H ₅	Acetato de etilo	5,205	521,3
Ne	Neón	2,820	35,7	n-C ₅ H ₁₂	n-Pentano	5,784	341,1
Xe	Xenón	4,047	231,0	C(CH ₃) ₄	2,2 dimetil propano	6,464	193,4
Aire	Aire	3,711	78,6	C ₆ H ₆	Benceno	5,349	412,3
AsH ₃	Arsina	4,145	259,8	C ₆ H ₁₂	Ciclohexano	6,182	297,1
BCl ₃	Cloruro de boro	5,127	337,7	n-C ₆ H ₁₄	n-Hexano	5,949	399,3
BF ₃	Fluoruro de boro	4,198	186,3	Cl ₂	Cloro	4,115	357,0
B(OCH ₃) ₃	Borato de metilo	5,503	396,7	F ₂	Fluor	3,657	112,6
Br ₂	Bromo	4,296	507,9	HBr	Bromuro de hidrógeno	3,353	449,0
CCl ₄	Tetracloruro de carbono	5,947	322,7	HCN	Cianuro de hidrógeno	3,630	569,1
CF ₄	Tetrafluoruro de carbono	4,662	134,0	HCl	Cloruro de hidrógeno	3,339	344,7
CHCl ₃	Cloroformo	5,389	340,2	HF	Fluoruro de hidrógeno	3,148	330,0
CH ₂ Cl ₂	Cloruro de metileno	4,898	356,3	HI	yoduro de Hidrógeno	4,211	288,7
CH ₃ Br	Bromuro de metilo	4,118	449,2	H ₂	Hidrógeno	2,827	59,7
CH ₃ Cl	Cloruro de metilo	4,182	350,0	H ₂ O	Agua	2,641	889,1
CH ₃ OH	Metanol	3,623	481,8	H ₂ O ₂	Peróxido de hidrógeno	4,196	289,3
CH ₄	Metano	3,758	148,6	H ₂ S	Sulfuro de hidrógeno	3,623	301,1
CO	Monóxido de carbono	3,690	91,7	Hg	Mercurio	2,969	750,0
COS	Sulfuro de carbonilo	4,130	336,0	HgBr ₂	Bromuro de mercurio	5,080	686,2
CO ₂	Dióxido de carbono	3,941	195,2	HgCl ₂	Cloruro de mercurio	4,550	750,0
CS ₂	Disulfuro de carbono	4,483	467,0	HgI ₂	Yoduro de mercurio	5,625	695,6
C ₂ H ₂	Acetileno	4,033	231,8	I ₂	Yodo	5,160	474,2
C ₂ H ₄	Etileno	4,163	224,7	NH ₃	Amoniaco	2,900	558,3
C ₂ H ₆	Etano	4,443	215,7	NO	Oxido nítrico	3,492	116,7
C ₂ H ₅ Cl	Cloruro de etilo	4,898	300,0	NOCl	Cloruro de	4,112	395,3

					nitrosilo		
C ₂ H ₅ OH	Etanol	4,530	362,6	N ₂	Nitrógeno	3,798	71,4
C ₂ N ₂	Cianógeno	4,361	348,6	N ₂ O	Oxido nitroso	3,828	232,4
CH ₃ OCH ₃	Eter metílico	4,307	395,0	O ₂	Oxígeno	3,467	186,7
CH ₂ CHCH ₃	Propileno	4,678	298,9	PH ₃	Fosfina	3,981	251,5
CH ₃ CCH	Metilacetileno	4,761	251,8	SF ₆	Hexafluoruro de azufre	5,128	222,1
C ₃ H ₆	Ciclopropano	4,807	248,9	SO ₂	Dióxido de azufre	4,112	335,4
C ₃ H ₈	Propano	5,118	237,1	SiF ₄	Tetrafluoruro de silicio	4,880	171,9
n-C ₃ H ₇ OH	n-propil alcohol	4,549	576,7	SiH ₄	Hidruro de silicio	4,084	287,6
CH ₃ COCH ₃	Acetona	4,600	560,2	SnBr ₄	Bromuro de estaño	6,388	563,7
CH ₃ COOC H ₃	Acetato de metilo	4,936	469,8	UF ₆	Hexafluoruro de uranio	596,7	236,8
n-C ₄ H ₁₀	n-butano	4,687	531,4				

ANEXO 2: VALORES DE LA FUNCIÓN INTEGRAL DE COLISIÓN PARA LA DETERMINACIÓN DE LA VISCOSIDAD, CONDUCTIVIDAD Y DIFUSIVIDAD EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA ADIMENSIONAL.

$T^* = KT/\varepsilon$ δ $T^* = KT/\varepsilon_{AB}$	$\Omega_v = \Omega_k$	Ω_D	$T^* = KT/\varepsilon$ δ $T^* = KT/\varepsilon_{AB}$	$\Omega_v = \Omega_k$	Ω_D	$T^* = KT/\varepsilon$ δ $T^* = KT/\varepsilon_{AB}$	$\Omega_v = \Omega_k$	Ω_D
0,30	2,785	2,662	1,65	1,264	1,153	4,00	0,9700	0,8836
0,35	2,628	2,476	1,70	1,248	1,140	4,10	0,9649	0,8788
0,40	2,492	2,318	1,75	1,234	1,128	4,20	0,9600	0,8740
0,45	2,368	2,184	1,80	1,221	1,116	4,30	0,9553	0,8694
0,50	2,257	2,066	1,85	1,209	1,105	4,40	0,9507	0,8652
0,55	2,156	1,966	1,90	1,197	1,094	4,50	0,9464	0,8610
0,60	2,065	1,877	1,95	1,186	1,084	4,60	0,9422	0,8568
0,65	1,982	1,798	2,00	1,175	1,075	4,70	0,9382	0,8530
0,70	1,908	1,729	2,10	1,156	1,057	4,80	0,9343	0,8492
0,75	1,841	1,667	2,20	1,138	1,041	4,90	0,9305	0,8456
0,80	1,780	1,612	2,30	1,122	1,026	5,00	0,9269	0,8422
0,85	1,725	1,562	2,40	1,107	1,012	6,00	0,8963	0,8124
0,90	1,675	1,517	2,50	1,093	0,9996	7,00	0,8727	0,7896
0,95	1,629	1,476	2,60	1,081	0,9878	8,00	0,8538	0,7712
1,00	1,587	1,439	2,70	1,069	0,9770	9,00	0,8379	0,7556
1,05	1,549	1,406	2,80	1,058	0,9672	10	0,8242	0,7424
1,10	1,514	1,375	2,90	1,048	0,9576	20	0,7432	0,6640
1,15	1,482	1,346	3,00	1,039	0,9490	30	0,7005	0,6232
1,20	1,452	1,320	3,10	1,030	0,9406	40	0,6718	0,5960
1,25	1,424	1,296	3,20	1,022	0,9328	50	0,6504	0,5756
1,30	1,399	1,273	3,30	1,014	0,9256	60	0,6335	0,5596
1,35	1,375	1,253	3,40	1,007	0,9186	70	0,6194	0,5464
1,40	1,353	1,233	3,50	0,9999	0,9120	80	0,6076	0,5352
1,45	1,333	1,215	3,60	0,9932	0,9058	90	0,5973	0,5256
1,50	1,314	1,198	3,70	0,9870	0,8998	100	0,5882	0,5130
1,55	1,296	1,182	3,80	0,9811	0,8942	200	0,5320	0,4644
1,60	1,279	1,167	3,90	0,9755	0,8888	400	0,4811	0,4170

ANEXO 3: MASA MOLECULAR Y CONSTANTES CRÍTICAS DE ALGUNOS COMPUESTOS.

Fórmula	Nombre	Peso molecular	Constantes críticas				
			T _c (K)	P _c · 10 ⁻⁵ (Pa)	V _c (cm ³ /mol)	μ _c · 10 ⁵ (Pa.s)	k _c · 10 ² (W/mK)
H ₂	Hidrógeno	2.016	33.30	12.97	65.0	0.347	-
He	Helio	4.003	5.26	2.29	57.8	0.254	-
Ne	Neón	20.183	44.50	27.26	41.7	1.560	3,32
Ar	Argón	39.944	151.00	48.64	75.2	2.640	2,97
Kr	Kriptón	83.800	209.40	55.02	92.2	3.96	2,07
Xe	Xenón	131.300	289.80	58.77	118.8	4.90	1,68
Aire	Aire	28.970	132.00	36.88	86.6	1.93	3,80
N ₂	Nitrógeno	28.020	126.20	33.94	90.1	1.80	3,63
O ₂	Oxígeno	32.000	154.40	50.36	74.4	2.50	4,41
O ₃	Ozono	48.000	268.00	67.89	89.4	-	-
CO	Monóxido de carbono	28.010	133.00	34.96	93.1	1.90	3,62
CO ₂	Dióxido de carbono	44.010	304.20	73.86	94.0	3.43	5,11
NH ₃	Amoniaco	17.030	405.50	113.96	-	-	
NO	Monóxido de nitrógeno	30.010	180.00	64.85	57.0	2.58	4,95
N ₂ O	Monóxido de dinitrógeno	44.020	309.70	72.65	96.3	3.32	5,48
NO ₂	Dióxido de nitrógeno	46.010	431.00	101.30	-	-	-
SO ₂	Dióxido de azufre	64.070	430.70	78.83	122.0	4.11	4,13
Cl ₂	Cloro	70.910	417.00	77.11	124.0	4.20	4,06
Br ₂	Bromo	159.830	584.00	103.35	144.0	-	-
I ₂	Yodo	253.820	800.00	-	-	-	-
CH ₄	Metano	16.040	190.70	46.41	99.3	1.59	6,62
C ₂ H ₂	Acetileno	26.040	309.50	62.42	113.0	2.37	
C ₂ H ₄	Etileno	28.050	282.40	50.66	124.0	2.15	
C ₂ H ₆	Etano	30.070	305.40	48.84	148.0	2.10	8,50
C ₃ H ₆	Ciclopropano	42.080	365.00	46.10	233.0	2.33	
C ₃ H ₈	Propano	44.090	370.00	42.56	200.0	2.28	

$n\text{-C}_4\text{H}_{10}$	n-butano	58.120	425.20	37.99	255.0	2.39	
Iso- C_4H_{10}	Isobutano	58.120	408.10	36.48	263.0	2.39	
$n\text{-C}_5\text{H}_{12}$	n-Pentano	72.150	469.80	33.74	311.0	2.38	
$n\text{-C}_6\text{H}_{14}$	n-Hexano	86.170	507.90	30.29	368.0	2.48	
$n\text{-C}_7\text{H}_{16}$	n-Heptano	100.200	540.20	27.36	426.0	2.54	
$n\text{-C}_8\text{H}_{18}$	n-Octano	114.220	569.40	24.92	485.0	2.59	
$n\text{-C}_9\text{H}_{20}$	n-Nonano	128.250	595.00	22.80	543.0	2.65	
C_6H_{12}	Ciclohexano	84.160	553.00	40.53	308.0	2.84	
C_6H_6	Benceno	78.110	562.60	49.24	260.0	3.12	
CH_3Cl	Cloruro de metilo	50.490	416.30	66.77	143.0	3.38	
CH_2Cl_2	Cloruro de metileno	84.940	510.00	60.79	-		
CHCl_3	Cloroformo	119.390	536.60	54.72	240.0	4.10	
CCl_4	Tetracloruro de carbono	153.840	556.40	45.60	276.0	4.13	
C_2N_2	Cianógeno	52.040	400.00	59.78	-		
COS	Sulfuro de carbonilo	60.080	378.00	61.81	-		
CS_2	Disulfuro de carbono	76.140	552.00	79.03	170.0	4.04	