

Ingeniería

Revista de la Universidad de Costa Rica
JULIO/DICIEMBRE 1994 VOLUMEN 4 Nº 2



PREDICCIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE COMPUESTOS ORGÁNICOS

Sebastián Rodríguez-Clachar*
Alexander Vásquez-Calvo**

RESUMEN

Se presenta un modelo matemático para la predicción de la conductividad térmica de hidrocarburos líquidos, incluyendo compuestos que tienen oxígeno en su estructura. Se utilizó como fluido de referencia la familia de las normales parafinas a presión atmosférica y se agregaron dos factores de corrección para cuantificar el efecto de la geometría molecular y la polaridad. Se empleó el principio de estados correspondientes para generalizar el modelo y aplicarlo a presiones diferentes a la atmosférica. Se confrontó el modelo contra más de 600 datos experimentales y se obtuvo un error promedio menor al 5%.

SUMMARY

A mathematical model to predict the thermal conductivity of organic liquids, including compounds that contain oxygen within their structure is presented. The family of normal paraffins at normal pressure was used as reference fluid. Two correction factors were added to quantify the effect of molecular geometry and polarity. The corresponding state principle was used to generalize the model and apply it at pressures above the atmospheric. The model was tested against more than 600 experimental points, it was obtained a mean error lower than 5%.

INTRODUCCION

La conductividad térmica es una propiedad de transporte asociada a los procesos de transferencia de calor, por lo que su conocimiento es fundamental para el diseño, modelaje y desarrollo de sistemas en los que se encuentren involucradas sustancias que intercambian energía térmica.

Desde el punto de vista formal la conductividad térmica describe el transporte intermolecular de energía entre una o varias fases cuando las partículas están sujetas a los efectos de un campo térmico.

Se han desarrollado gran cantidad de modelos teóricos con el objeto de predecir la conductividad térmica de gases y sólidos (Reid et al., 1977, Succar and Hayakawa, 1983). No obstante, la predicción de la conductividad térmica de sustancias líquidas es más compleja porque deben tomarse en cuenta muchas simplificaciones y consideraciones teóricas para obtener un modelaje aceptablemente realista de la estructura de la fase líquida. Por esta razón, es difícil establecer una correlación teórica adecuada para la conductividad térmica y otras propiedades, ya sean volumétricas o de transporte para la fase líquida; esta limitación es válida aun para líquidos sencillos desde el punto de vista estructural y químico.

Por falta de un mayor conocimiento de la relación de fuerzas que actúan sobre la fase líquida, es necesario subdividir estos fluidos en familias que guarden alguna semejanza química entre sí, con el fin de establecer relaciones matemáticas que predigan sus propiedades físicas y químicas dentro de ámbitos de confiabilidad razonables.

Se ha observado que para la mayor parte de los líquidos orgánicos, la conductividad térmica tiene una fuerte dependencia con la temperatura, disminuyendo en términos generales cuando esta aumenta. La presión ejerce un efecto menos significativo; su influencia empieza a ser notable a partir de los 3,5 MPa, aumentando de forma aproximadamente lineal a presiones moderadas hasta presentar un comportamiento cuadrático para presiones altas. Para mezclas binarias de líquidos orgánicos, el comportamiento de λ respecto a la fracción molar depende de la afinidad química de las especies y puede variar desde un comportamiento lineal para compuestos estructuralmente semejantes, hasta exhibir un mínimo pronunciado en el caso de sustancias poco afines. Lo anterior puede generalizarse para mezclas ternarias y de orden superior.

La medición experimental de la conductividad térmica, ya sea de líquidos o gases, requiere de

* Ingeniero Químico
** Profesor Escuela de Ingeniería Química, Universidad de Costa Rica. M. Sc.

técnicas de difícil implementación desde el punto de vista instrumental; además de estas dificultades, la formación de corrientes de convección natural en el seno del líquido, motivadas por el gradiente de temperatura asociado al fenómeno, aumentan la incertidumbre del registro experimental. A raíz de este tipo de dificultades, es bastante conveniente contar con ecuaciones predictivas para la conductividad térmica que permitan realizar estimaciones rápidas y precisas sin necesidad de mediciones experimentales.

Existen varios métodos para medir la conductividad térmica de líquidos (Anderson, 1978; Narasimhan et al., 1975; Rowley, 1986); estos métodos se pueden agrupar en dos clasificaciones: en estado transitorio y en estado estable.

Ambos están fundamentados en el cambio de temperatura producido por un flujo de calor eléctricamente inducido sobre una muestra. La precisión de los datos recolectados está directamente relacionada con la precisión con que se logre medir la temperatura, la densidad eléctrica, el tiempo y en algunos casos, otras propiedades físicas como la densidad y la capacidad calórica. Con el transcurso de los años, al mejorar las técnicas experimentales de medición y los métodos para adquisición de datos, el valor experimental de la conductividad térmica también han variado, efecto que puede apreciarse gráficamente para el tolueno a 20 oC en la figura 1. Los datos de esta figura fueron tomados de Mallan et al., 1970 y Rowley, R. L., 1986.

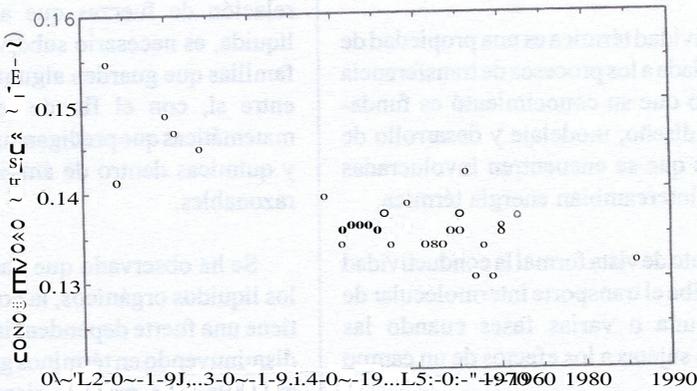


Fig. I Variación de la conductividad térmica del tolueno a 20°C a través de los años.

En la literatura (Anderson, P., 1978; Jaimeson, D. Tetal., 1975; Missenrad, A., 1965) es posible encontrar muchos modelos que pueden ser usados para predecir la conductividad térmica, tanto para líquidos puros como para mezclas binarias y ternarias. El uso de algunos de estos modelos puede ser extendido para mezclas de orden superior (Saksena and Harminder, 1974; Li, 1976); sin embargo, requieren el conocimiento exacto de la composición de la mezcla, hecho que imposibilita el uso de estas correlaciones con mezclas complejas.

Las propiedades de transporte como: viscosidad, difusividad y conductividad térmica obedecen a principios físicos similares, por lo que es de esperar que su descripción matemática pueda fundamentarse en una base teórica suficientemente general. La excelente representación de la viscosidad (Lugo y Briano, 1991) y de la conductividad térmica (Vásquez y Briano, 1993) de líquidos orgánicos simples y sus mezclas, usando el formalismo de mezclas continuas mediante la perturbación de un fluido hipotético de referencia, hace suponer que se pueden obtener

resultados similares en el modelaje de la conductividad térmica de líquidos orgánicos de estructura química un tanto más complicada, como es el caso de elementos que tienen oxígeno en su estructura sin que el modelo pierda validez para los fluidos más sencillos.

1. PROCEDIMIENTO

1.1 CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE HIDROCARBUROS LÍQUIDOS

Para iniciar la determinación del modelo, se generaron datos de conductividad térmica para diversas sustancias orgánicas que cubrieron un amplio ámbito de configuración molecular, familias químicas, temperatura de ebullición y temperatura crítica; todos estos datos fueron generados a presión atmosférica.

Se seleccionaron 37 compuestos: 28 parafinas, 5 cetonas y 5 cicloparafinas, cubriendo un ámbito de temperatura reducida ¹ de 0,3 hasta 0,8 y el ámbito de temperatura de ebullición desde 263 hasta 638 K con intervalos de 10 K. Con estas sustancias se generaron alrededor de 2.000 puntos de conductividad térmica, usando las siguientes correlaciones:

- a) Kandiyoti et al., (1971) desarrollaron su modelo a partir de la mecánica estadística a través de una relación entre la conductividad térmica y la viscosidad, estimada con una modificación de la ecuación de *Enskog* (*Bird et al.*, 1960) para fluidos densos.
- b) Mustafaev et al., (1985) desarrollaron su modelo con base en el principio de los estados correspondientes, asumiendo que la variación de las propiedades de los líquidos orgánicos homólogos es proporcional a la cantidad $(T_b - T)$.
- c) Teja and Rice, (1981); estos investigadores también utilizaron el principio de los estados correspondientes, además, del formalismo

teórico de los dos fluidos de referencia para generar su modelo; y

- d) Ogiwara et al., (1980), investigadores que utilizaron, como punto de partida, en su modelo, los trabajos de Horrocks y McLaughlin (1980), referentes al modelaje de la estructura reticular de los líquidos y su impacto sobre la naturaleza vibracional de la conductividad térmica.

Para modelar la conductividad térmica de cada parafina en específico, se seleccionó entre las anteriores correlaciones aquella que produjera la menor desviación porcentual, según sus autores.

La información adicional necesaria para el uso de estos modelos matemáticos, las constantes críticas, el factor acéntrico y el peso molecular de las sustancias seleccionadas fueron obtenidos del apéndice A de Reid et al. (1977).

1.2 NORMAL PARAFINAS Y FLUIDO DE REFERENCIA

En trabajos de modelaje de propiedades de sustancias es práctica común utilizar un compuesto base en condiciones específicas como sustancia patrón. Estas sustancias pueden ser reales, como el n-tetradecano a presión atmosférica, utilizado en la predicción de la viscosidad de sustancias orgánicas (*Lugo y Briano*, 1991) o pueden ser compuestos imaginarios, como el caso de los gases ideales. A estas sustancias se les conoce como fluidos de referencia.

El fluido de referencia seleccionado debe exhibir un comportamiento idóneo respecto a la propiedad que se desea modelar. Desde el punto de vista matemático, la propiedad de interés y otras propiedades asociadas deberán ser representadas con modelos de relativa simplicidad.

En este trabajo se utilizó a la familia de las normal parafinas, o parafinas de cadena lineal sin ramificaciones, a presión atmosférica como fluido

¹ La temperatura reducida (T_r) se define como la razón entre la temperatura de las sustancias y su temperatura crítica

de referencia dado que estas sustancias se caracterizan porque muchas de sus propiedades fisicoquímicas tales como: peso molecular, temperatura y presión crítica, factor acéntrico y otras, siguen un comportamiento polinomial de segundo o tercer grado respecto a su temperatura de ebullición normal. En la figura N° 2 se puede observar la funcionalidad cuadrática del volumen crítico de las normal parafinas respecto a la temperatura de ebullición.

Como punto de partida, se utilizó una correlación propuesta por Baroncini et al. (1984) para determinar la conductividad térmica de parafinas. Esta correlación matemática fue desarrollada a partir del modelo semiempírico propuesto por Viswanath (1967):

$$A = A \frac{(1 - T_r)^{0.38}}{T_r^6} \tag{1}$$

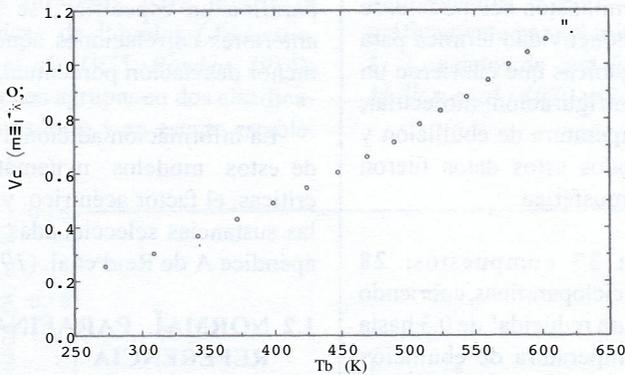


Fig.2 Funcionalidad de V_c respecto a T_b para las n-parafinas.

En las investigaciones de Baroncini, A es un parámetro característico obtenido por regresión numérica directa de los datos experimentales para cada sustancia. En este artículo se considera que A es una función de la temperatura de ebullición normal de cada componente. Para obtener tal funcionalidad, se ajustaron datos de conductividad térmica de compuestos orgánicos mediante regresión no lineal.

El ajuste producido mostró que la dependencia del parámetro A con la temperatura de ebullición sigue una forma cuadrática.

$$A = (T_b) = \alpha_0 + \alpha_1(T_b) + \alpha_2(T_b)^2 \tag{2}$$

los coeficientes de ajuste u_j para esta ecuación son: 0.1980, -2.202E-4 y 2.451E-7 respectivamente.

El comportamiento del modelo desarrollado respecto a datos experimentales obtenidos de diversas fuentes se muestra en la figura N° 3.

2. IDENTIFICADORES DE LAS SUSTANCIAS

La temperatura de ebullición normal de las sustancias orgánicas puede ser visualizada como una variable caracterizadora dado que se puede utilizar como variable independiente para describir el comportamiento de dichas sustancias tal como lo muestra la figura 2 y la ecuación 2 para el caso de las normal parafinas.

El peso molecular, la presión crítica, el momento dipolar y otras de las propiedades físicas y químicas de las sustancias que dan información a cerca de la naturaleza química, estructura y características electrostáticas de las moléculas, son también llamadas identificadores de la sustancia.

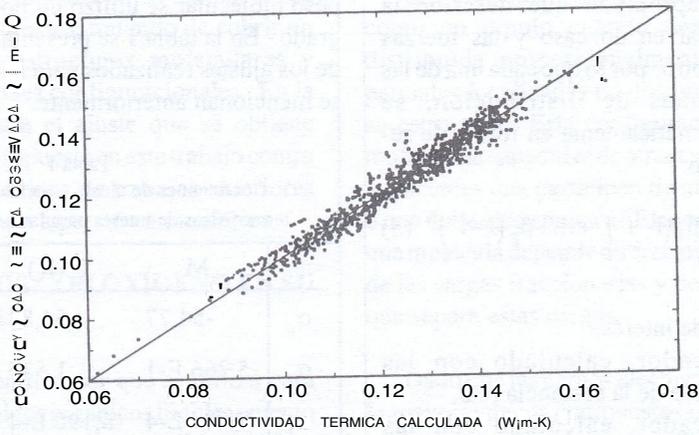


Fig. 3 Relación entre λ_{ob} y λ^{**} con la ecuación 1.

El éxito que se pueda obtener en la predicción de propiedades termodinámicas y de transporte a través del formalismo teórico de los fluidos de referencia, depende fuertemente de la correcta selección de los identificadores de las sustancias. La mayoría de los trabajos en este campo han considerado la situación de una sola variable independientemente distribuida. Un análisis mediante estados correspondientes; sin embargo, establece que se requiere un mínimo de dos o aun tres parámetros distribuidos independientemente para caracterizar fluidos reales. (Teja and Rice, 1981)

Cuando se utiliza más de un identificador surgen muchas posibles combinaciones entre estos; en el caso más simple dos identificadores ambos podrían estar independientemente distribuidos y la función de distribución tendría la forma:

$$P(I_1, I_2) = P(I_1)P(I_2) \tag{3}$$

donde I_1 e I_2 son los identificadores. Este nunca es el caso para los fluidos reales dado que ambas variables se deben encontrar relacionadas mediante la estructura y el tamaño molecular y obligatoriamente debe existir algún grado de correlación entre ellas. En el límite opuesto, ambas variables podrían estar totalmente correlacionadas, es decir, I_2 sería una función de I_1 o viceversa. Es evidente que todas las situaciones reales caerán entre ambos límites.

3. OTROS LÍQUIDOS ORGÁNICOS

Al aplicar el modelo de conductividad térmica obtenido para las normal parafinas (ecuación 1) a sustancias diferentes a estas, se producen resultados con desviaciones significativas. El grado de desviación está asociado a la diferencia estructural de las sustancias respecto al fluido de referencia. Para fines de modelaje, se consideró que las desviaciones observadas respecto al comportamiento del fluido de referencia obedecen a dos factores independientes: la geometría molecular y la relación de fuerzas electrostáticas intermoleculares. Dado que ambos factores son independientes, se consideró que el efecto de cada uno de ellos sobre la conductividad térmica es aditivo:

$$\lambda = \lambda^0 + f(M) + f(\mu) \tag{4}$$

El primer término de la derecha de esta ecuación representa la conductividad térmica del fluido de referencia a la temperatura real de la sustancia; el segundo y tercer término representan las funciones de corrección.

Para modelar el efecto de ambas distorsiones se consideró que la diferencia entre la conductividad térmica del fluido de referencia y el fluido real es una función continua asociada a

un identificador apropiado que describe la geometría molecular en un caso y las fuerzas electrostáticas en el otro; por lo que cada una de las funciones continuas de distribución, se representaron matemáticamente en forma de series de Taylor como:

$$B = \beta^0 + \beta_1 (I - I^0) + \beta_2 (I - I^0)^2 + \dots + \beta_n (I - I^0)^n \quad (5)$$

en donde:

B es la propiedad de interés,

I es el identificador, calculado con las propiedades físicas de la sustancia real,

I^0 es el identificador, calculado con las propiedades físicas del fluido de referencia y β_i son coeficientes de ajuste.

Es claro que entre mayor sea la diferencia $(I - I^0)$, mayor será el efecto de este parámetro sobre la variable de interés.

Para utilizar la teoría de estados correspondientes en su forma macroscópica, se hace uso de las propiedades críticas de las sustancias, hecho que se observa en la ecuación 1, en la que se requiere del conocimiento de la temperatura reducida. Para el caso específico de este trabajo, en el que se usa una familia completa de compuestos como fluido de referencia, las propiedades críticas y por consiguiente las propiedades reducidas del fluido de referencia no son valores puntuales, más bien están asociadas a una función continua en términos de la temperatura de ebullición normal; por esta razón a estas, se les llama propiedades equivalentes y matemáticamente tienen la forma:

$$X^0 = \alpha_0 + \alpha_1 T_b + \alpha_2 T_b^2 + \dots \quad (6)$$

donde X^0 es la propiedad física del fluido de referencia.

Bastó con un polinomio de segundo grado para obtener una representación adecuada de la temperatura crítica y la presión crítica; para el

peso molecular se utilizó un polinomio de tercer grado. En la tabla 1 se presentan los coeficientes de los ajustes realizados para las propiedades que se mencionan anteriormente.

Tabla 1
Coeficientes de ajuste para las propiedades termofísicas de interés para las normal parafinas

	M	Te (K)	Pe (kPa)
a_0	-54,77	54,83	7,253
a_1	5,266 E-1	1,535	-15,42
a_2	-7,887 E-4	-6,190 E-4	8,828E-3
a_3	1,332 E-6	---	---

El peso molecular M se utilizó como identificador para modelar los efectos de la estructura molecular de las sustancias. Dado que MO da una idea del tamaño de las moléculas del fluido de referencia y sabiendo que las moléculas de las normal parafinas son estructuras lineales, la diferencia $(M - MO)$ da una idea aproximada de la estructura molecular del fluido real, esto es, si $(M - MO)$ tiende a cero, la molécula en cuestión es aproximadamente lineal, al irse incrementando el valor de la diferencia, la estructura de dicha molécula irá aumentando en complejidad.

La forma del modelo para conductividad térmica de sustancias orgánicas de polaridad reducida que se propone es entonces:

$$\lambda = \lambda^0 + \alpha_1 (M - M^0) + \alpha_2 (M - M^0)^2 \quad (7)$$

λ^0 es la conductividad térmica del fluido de referencia a la temperatura y presión de interés. Este parámetro se calcula mediante la Ecuación 1.

Los coeficientes a_1 y a_2 de la anterior ecuación tienen los valores -1,229 E-3 Y -4,599 E-5 respectivamente.

El modelo fue probado con 19 sustancias de cuatro familias diferentes, tratando de cubrir un amplio rango de estructuras moleculares y diferentes condiciones configuracionales. En la figura 4 se compara el ajuste que se obtiene usando el modelo propuesto en este trabajo contra otros modelos obtenidos de trabajos anteriores para el n-hexadecano a presión atmosférica.

4. COMPUESTOS CON OXÍGENO EN SU ESTRUCTURA

El segundo identificador que se utilizó para discriminar los líquidos orgánicos fue el momento dipolar, que cuantifica las fuerzas electrostáticas a nivel molecular.

Una molécula poliatómica se puede considerar como un dipolo cuando tiene su carga neta distribuida proporcionalmente en dos cargas parciales localizadas en dos puntos diferentes de su estructura. Esta configuración le otorga a la molécula la capacidad de atraer un par de electrones adyacentes que participen de un enlace covalente o una nube electrónica n. El momento dipolar μ de una molécula depende directamente de la magnitud de las cargas fraccionarias y de la distancia lineal que separa estas cargas.

Dado que las cargas electrostáticas presentes en la mayoría de los compuestos orgánicos se deben básicamente a los electrones libres, en compuestos oxigenados y a nubes electrónicas en compuestos

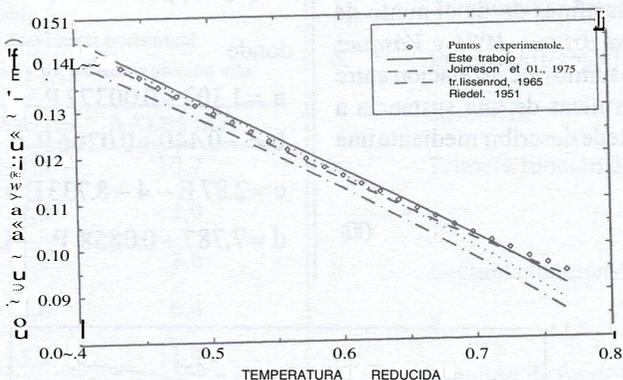


Fig. 4 A. del n-hexadecano a presión atmosférica

cíclicos y aromáticos, se consideró que el momento dipolar es un identificador adecuado para describir la naturaleza electrostática de los líquidos de interés.

La función de corrección por este efecto es

$$f(\mu) = a + bT, \tag{8}$$

donde a y b son funciones del momento dipolar y tienen la forma de un polinomio de tercer grado

$$X = \sum_{i=1}^3 X_i \mu^i \tag{9}$$

en esta ecuación x es la función a o b y los coeficientes X_i se reportan en la tabla 2

Tabla 2

Coefficientes de ajuste para las funciones a y b

i	aE2	bE2
1	11,965	10,055
2	9,349	8,677
3	1,878	1,904

Existen otras sustancias orgánicas como los alcoholes y los ácidos en los que se manifiestan fuerzas electrostáticas de otra naturaleza, como la formación de puentes de hidrógeno y los complejos de transferencia de carga, donador-aceptor de

electrones (Prausnitz *et al.*, 1986). Estas fuerzas intermoleculares, al producirse por mecanismos diferentes a los mencionados anteriormente, no pueden ser explicados adecuadamente por medio del efecto del momento dipolar y por consiguiente, estas familias de sustancias quedan fuera del alcance de este estudio.

5. DATOS A ALTA PRESIÓN

Como última variable para el modelo de conductividad térmica de sustancias orgánicas puras, se considera el efecto de la presión. Siguiendo los mismos postulados de trabajos similares (Reid *et al.*, 1977) que compila los resultados de Lenoir, 1957 y Missenrad 1970, además de trabajos más afines desde el punto de vista teórico (Lugo and Briano, 1991 y Vásquez and Briano, 1993), se asumió que la relación entre las conductividades térmicas de una sustancia a baja y alta presión se puede describir mediante una función continua

$$\frac{\lambda^p}{\lambda_{p=0}} = f(T_r, P_r) \quad (10)$$

donde λ^p es la conductividad térmica a alta presión y $\lambda_{p=0}$ la conductividad térmica a la presión atmosférica. En este trabajo se considera presión alta a cualquier presión mayor a la atmosférica y presión baja a la presión atmosférica o un valor cercano a esta.

Para determinar la forma de esta función se utilizaron técnicas de regresión no lineal y el resultado se comparó con más de 300 datos experimentales reportados en la recopilación de Jaimeson (1975), se obtuvo un error promedio de 5% y un error máximo de 20%. El resultado se presenta en la siguiente ecuación

$$f(T_r, P_r) = a + bT_r + ce^{dT_r} \quad (11)$$

donde

$$a = 1.302 - 0.00372 P_r$$

$$b = -0.440 + 0.0206 P_r$$

$$c = 2.87E-4 - 8.733E-6 P_r + 7.66E-8 P_r^2$$

$$d = 7.787 + 0.0858 P_r - 6.64E-4 P_r^2$$

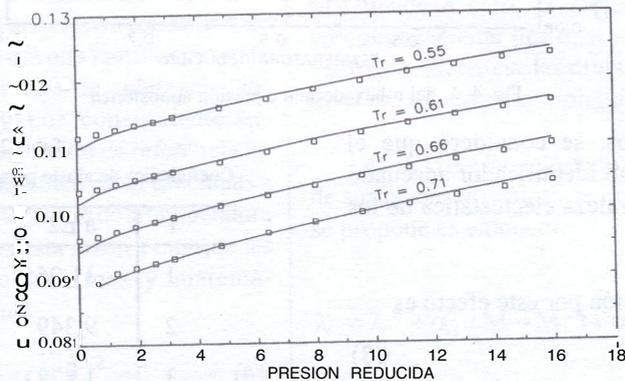


Fig. 5 Conductividad térmica del n-hexadecano a presiones superiores a la atmosférica

En la figura 5 se presenta el ajuste obtenido para la conductividad térmica mediante la ecuación 8 para el normal decano a cuatro temperaturas reducidas. Los datos experimentales se tomaron de Jaimeson *et al.* (1975)

6. RESULTADOS

Se determinó que la familia de las normal parafinas puede ser utilizada satisfactoriamente como fluido de referencia para predecir la conductividad térmica de líquidos orgánicos.

El peso molecular es un identificador adecuado para describir la estructura molecular de los compuestos en estudio, aunque su utilidad decrece en forma importante al aumentar la polaridad de las sustancias.

El momento dipolar sirve adecuadamente para describir la polaridad de los líquidos orgánicos siempre y cuando no existan grupos funcionales que incrementen la electronegatividad de las moléculas en forma excesiva. Por esta razón, la conductividad térmica de compuestos como ácidos y alcoholes, no puede ser calculada satisfactoriamente mediante el modelo propuesto. Los porcentajes de error calculados para cada familia se presentan en la tabla 3.

Tabla 3
Distribución de la desviación porcentual por familia de compuestos y para datos a presión alta

Familia	AAD%	AAD%max
Alcanos	5,0	10,7
Alquenos	2,3	3,9
Ramificados	1,2	3,0
Cíclicos	4,6	6,4
Aromáticos	5,3	11,7
Oxigenados	3,0	7,1
Alta Presión	1,9	7,4

AAD% es la desviación absoluta promedio calculada como

$$AAD\% = \text{abs} \left[\frac{A_{\text{calculada}} - A_{\text{experimental}}}{A_{\text{experimental}}} \right] \cdot 100$$

y AAD% max es la desviación absoluta porcentual máxima.

7. NOMENCLATURA

- A Coeficiente de ajuste para la ecuación 1.
- AAD% Porcentaje de desviación absoluto promedio.
- B Propiedad termofísica de una sustancia.
- I Identificador de una sustancia.
- M Peso molecular.
- P_c Presión crítica.
- T_b Temperatura de ebullición.
- T_c Temperatura crítica.
- X Propiedad termofísica equivalente de una sustancia.
- a Primera función de ajuste de la ecuación 8.
- b Segunda función de ajuste de la ecuación 8.
- p Función de probabilidad.

GRIEGAS

- a Coeficientes de ajuste para la ecuación 2.
- β Coeficientes de ajuste para la ecuación 5.
- λ Conductividad térmica.
- μ Momento dipolar.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Anderson, P., 1978, *Thermal conductivity and heat capacity of cyclohexane under pressure*, J. Phys. Chem., 39, (1-E)
- Baroncini, C.; Latini, G.; Pierpaoli, P., 1984, *Thermal conductivity of organic liquid binary mixtures: measurements and prediction method*, Int. J. Thermophysics, 5, (4)
- Bird, R. B.; Stewart, W. E.; Lightfoot, E. N., 1960, *Transport phenomena*, Edit. Wiley Int., N. Y.: 245
- Horrocks, I. K.; Mc Laughlin, E., 1980, *Transport coefficients of the Lennard-Jones fluid by molecular dynamics*, J. Chem. Phys., 73, (7)
- Jaimeson, D. T., Irving, J. B. and Tudhope, J. S., 1975, *Liquid Thermal Conductivity, A data survey to 1973*, HMSO Edinburgh
- Kandiyoty, R.; Mc Laughlin, E.; Pitman, I. F. T., 1971, *Liquid State Thermal Conductivity of n-Paraffin Hydrocarbons.*, J. Chem. Soc. Farad. Trans. 1., 75: 860-866
- Li, C. C., 1976, *Thermal conductivity of liquid mixtures*, AIChE Journal, 22, (5)
- Lugo, J. and Briano, I. G., 1991, In: Astarita, G. and Sandler, S. (Editors), *Kinetic and Thermodynamic lumping of multicomponent mixtures*, Elsevier Sci. Publ.: 325
- Mallan, G. M.; Michaelian, M. S.; Lockhart, F. J., 1972, *Liquid Thermal Conductivities of Organic Compounds and Petroleum Fractions*, J. Chem. Eng. Data, 17: 412-415
- Missenrad, A., 1965, *Conductivité thermique des solides, liquides, gaz et de leurs melanges*, Eyrolles, París
- Mustafaev, R. A.; Tagiev, S. I.; Gabulov, D. M.; Mussaev, T. P., 1985, *A Method of Calculating the Thermophysical Parameters of Liquid Aromatic Hydrocarbons*, Teplofiz. Vys. Temp., 23: 1076-1081
- Narasimhan, K. S.; Swami, K. M.; Narayana, K. L., 1975, *New correlation for thermal conductivity*, Chem. Eng., 82, (8)
- Ogiwara, K.; Arai, Y.; Saito, Sh., 1980 *Thermal conductivities of liquid hydrocarbons and their binary mixtures*, Ind. Eng. Chem. Fundam., 19, (3)
- Prausnitz, I. M., Lichtenthaler, R. N. and Gomez de Acevedo, E., 1986, *Molecular thermodynamics of fluid phase equilibria*, 2^o Ed., Prentice Hall, London
- Reid, R. C., Prausnitz, J. M. and Sherwood, T. C., 1977, *The properties of gases and liquids*, 3^o Ed., Mc Graw Hill B. C., N. Y.
- Riedel, L., 1951, *A new correlation to predict thermal conductivity of hydrocarbons in liquid phase*, Chem. Eng. Tech., 23: 321-465
- Rowley, R. L., 1986, *Measurements and prediction of liquid mixture thermal conductivity and viscosity*, Report # DE-FG02-84ER13193, Birgham Young University, Ohio
- Saksena, M. P., Harminder, J., 1974, *Thermal conductivity of binary liquid mixtures*, Ind. Eng. Chem. Fund., 13, (3)
- Succar, J. and Hayakawa, K. I., 1983, *Empirical Formulae for Predicting Thermal Physical Properties of food at freezing or defrosting temperatures*, Lebensm. Wiss. u Technol., 16, (6): 326
- Teja, A. S.; Rice, P., 1981, *A generalized corresponding states method for prediction of the thermal conductivity of liquids and liquid mixtures*, Chem. Eng. Sci., 36, (7)
- Vásquez, A. and Briano, I. G., 1993, *Thermal Conductivity of Hydrocarbon Mixtures: A perturbation approach*, Ind. and Eng. Chem. Res., 32
- Viswanath, D. S., 1967, *On thermal conductivity of liquids*, Am. Ins. Chem. Eng. J., 13, (5)