



Universidad Nacional Autónoma de México

FACULTAD DE QUIMICA

71

CONDUCTIVIDAD TERMICA DE LIQUIDOS

172

TESIS PROFESIONAL

Que para obtener el título de:
INGENIERO QUIMICO
p r e s e n t a :
FIDEL GARCIA CAZARIN

México, D. F.

1976.



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Las Tesis
AGE _____
FECHA 1976
PROC. 175



QUINIA



FACULTAD DE QUIMICA
DEPTO. DE PASANTES Y
EXAMENES PROFESIONALES.

FORMA C

Universidad Nacional Autónoma de México (AUTORIZACION PARA ESCRIBIR DEFINITIVAMENTE EL TEMA REVISADO)

C. Director Gral. de Servicios Escolares
Universidad Nacional Autónoma de México,
P r e s e n t e .

Me permito comunicar a usted, que el tema de T E S I S .

Titulado: "CONDUCTIVIDAD TERMICA DE LIQUIDOS".

que presenta: EL SR. FIDEL GARCIA CAZARIN

Pasante de la Carrera de: INGENIERO QUIMICO

Fué aceptado por el Jurado nombrado para dicho examen, el cual quedó integrado en la siguiente forma:

Presidente Prof.: VLADIMIR ESTIVILL RIERA

V o c a l " : RUDI P. STIVALET CORRAL

Secretario " : GUILLERMO ALCAYDE LACORTE

1er. Suplente " : ANTONIO FRIAS MENDOZA

2o. Suplente " : JOSE FCO. GUERRA RECASENS

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU "
Cd. Universitaria D.F., a 30 de ABRIL de 1976

EL JEFE DEL DEPTO. DE PASANTES
Y EXAMENES PROFESIONALES.

QUIM. JULIO TERAN Z.

INTEGRACION DEL H. JURADO DESIGNADO PARA EL TEMA M:

PRESIDENTE Prof. VLADIMIR ESTIVILL RIERA
VOCAL " RUDI P. SPIVALET CORRAL
SECRETARIO " GUILLERMO ALCAYDE LACORTE
1er. SUPLENTE " ANTONIO FRIAS MENDOZA
2o. SUPLENTE " JOSE Fco. GUERRA REBASENS

Sito donde se desarrolló el tema: FAC. DE QUIMICA
CENTRO DE INVESTIGACION DE ENFERMEZAS, BIBLIOTECA
DE PILEX.

Nombre completo y firma del sustentante: FIDEL GARCIA CAZANTE
ASESOR:

I. G. GUILLERMO ALCAYDE LACORTE

A mis padres:

Con todo el cariño del mundo

A mis hermanos:

Ricardo
Francisca
Amelia
Adolfo
Angel
Alfredo
Antonio
Minerva
Othón
Luz del Carmen
Elvira
Filiberto

Por su cariño y entusiasmo

A la memoria de mi hermana:

Reina

A la memoria de mi primo:

Juan de Dios

A mis maestros:

Con todo respeto

A mis amigos

A Maria Luisa:

Por su nobleza.

I N D I C E

Capítulo	Pag.
1.- Objetivos	1
2.- Introducción	2
3.- Generalidades	4
4.- Ecuaciones teóricas para calcular la conductividad térmica de líquidos	6
4.1 Ecuación de Enskog	6
4.2 Ecuación de Bridgman	7
4.3 Ecuación de Kardos	7
4.4 Ecuación de Oshida	8
4.5 Ecuación de Eyring	10
4.6 Ecuación de Rao	11
4.7 Ecuación de Sakiades y Coates	12
4.8 Ecuación de Shirokov	17
4.9 Ecuación de Predvoditelev	17
4.10 Ecuación de Predvoditelev y Vargaftik	18
4.11 Tabla de ecuaciones teóricas para calcular la conductividad térmica de líquidos puros . . .	20
5.- Ecuaciones empíricas para calcular la conductividad térmica de líquidos puros	21
5.1 Ecuación de Weber	21
5.2 Ecuación de Smith	22
5.3 Ecuación de Palmer	22
5.4 Ecuación de Smith (1936)	23
5.5 Ecuación de Mohanty	23
5.6 Ecuación de Robbins y Kingree	24
5.7 Ecuación de Sheffy y Jhonson	28
5.8 Ecuación de Denbigh	28
5.9 Ecuación de Pachaiyappan, Ibrahim y Bulor . . .	29
5.10 Ecuación de Tsien	32

5.11 Ecuación de Borovik	32
5.12 Ecuación de Ewing Et Al	33
5.13 Tabla de ecuaciones empíricas para calcular la conductividad térmica de líquidos puros	34
6.- Métodos para calcular la conductividad térmica de mezclas de líquidos	36
6.1 Método de Filippov y Novoselova	36
6.2 Método de Barratt y Nettleton	36
6.3 Método de Jordan y Coates	37
6.4 Método de Nel	37
6.5 Método de Crover y Inudsen	38
6.6 Método de Tareef	38
6.7 Reglas de Kern	40
7.- Dependencia de la conductividad térmica de los líquidos con la presión y temperatura	41
7.1 Ecuación de Lenoir	42
7.2 Ecuación de Filippov	44
7.3 Ecuación de Vargaftik	44
8.- Datos sobre la influencia de la temperatura en la conductividad térmica	48
8.1 Alcanos C_1 a C_4	49
8.2 Hidrocarburos ramificados	50
8.3 Hidrocarburos ramificados	51
8.4 Alquenos C_2 a C_4	52
8.5 Alquenos C_5 a C_8	53
8.6 Propadienos y Butadienos	54
8.7 2-Butenos	55
8.8 Alquinos	56
8.9 Hidrocarburos ciclicos	57

8.10	Compuestos cíclicos	58
8.11	Compuestos de Benceno	59
8.12	Tolueno y Xilenos	60
8.13	Alcoholes simples	61
8.14	Alcoholes ramificados	62
8.15	Alcoholes diversos	63
8.16	Dipropilen glicol	65
8.17	Cetonas	66
8.18	Aldéhdos	67
8.19	Otros aldéhdos	68
8.20	Hidrocarburos Fluorados	69
8.21	Hidrocarburos Clorados	70
8.22	Compuestos clorados	71
8.23	Otros Hidrocarburos clorados	72
8.24	Hidrocarburos Bromados	73
8.25	Acetatos	74
8.26	Acrilatos	75
8.27	Oxidos	76
8.28	Acidos	77
8.29	Eteres	78
8.30	Esteres	79
8.31	Nitrilos	80
8.32	Compuestos de Nitrógeno	81
8.33	Otros compuestos de Nitrógeno	82
8.34	Etilaminas	83
8.35	Metilaminas	84
9.-	Datos sobre la influencia de la concentración en la conduc- tividad térmica de mezclas binarias	85
10.-	Conclusiones	91
11.-	Bibliografía	93

O B J E T I V O S

- 1.- Presentación de las principales ecuaciones teóricas para calcular la conductividad térmica de líquidos puros.
- 2.- Presentación de las principales ecuaciones empíricas para calcular la conductividad térmica de líquidos puros.
- 3.- Seleccionar de las ecuaciones teóricas y empíricas para conductividad térmica de líquidos, las que den prácticamente resultados más satisfactorios.
- 4.- Presentación de las principales ecuaciones teóricas y empíricas para calcular la conductividad térmica de mezclas binarias de líquidos.
- 5.- Seleccionar el mejor método para calcular la conductividad térmica de mezclas binarias de líquidos.
- 6.- Presentación de un método para calcular la conductividad térmica de mezclas multicomponentes.
- 7.- Influencia de la presión en la conductividad térmica.
- 8.- Método para evaluar la influencia de la presión en la conductividad térmica de líquidos.
- 9.- Influencia de la temperatura en la conductividad térmica de líquidos.
- 10.- Seleccionar un método para evaluar la influencia de la temperatura en la conductividad térmica.
- 11.- Recolección de datos de la literatura sobre la influencia de la temperatura en la conductividad térmica.
- 12.- Recolección de datos de la literatura sobre la influencia de la concentración en la conductividad térmica de mezclas binarias.

I N T R O D U C C I O N

En el diseño de operación de plantas de manufactura química, los ingenieros tratan con diversos tipos de fluidos. Es imperativo conocer tan exacto como sea posible las propiedades físicas y termodinámicas de esos fluidos.

Entre las necesidades inherentes a procesos químicos, - pueden incluirse por ejemplo: la determinación de mecanismos de - reacción, cinética de reacción, requerimientos de energía, dimensiones de equipo, condiciones optimas de operación, etc. Esto sólo se puede lograr a través de una correcta predicción de las velocidades de transferencia de momentum, masa y calor, que a su vez - requieren de conocimiento de ciertas propiedades de esos fluidos.

Ahora bien, los datos disponibles en la literatura referentes a esas propiedades, por una parte, se encuentran totalmente dispersos en las numerosas publicaciones científicas y técnicas - existentes, con lo cual se ve incrementado enormemente el tiempo - empleado para localizarlos; por otra parte, los rangos de temperatura y presión que cubren estos datos, son usualmente muy pequeños motivo que obliga a efectuar extrapolaciones poco confiables, antes de poder aplicarlos a situaciones prácticas.

Ante tal perspectiva, una serie de investigadores se ha preocupado por encontrar caminos que ayuden a solucionar ese problema, desarrollando para ello una variedad de técnicas de estimación, teóricas, empíricas o combinaciones de ambas, que permitan predecir esas propiedades, de esta manera se ha llegado a métodos muy confiables en algunas ocasiones y de poca confiabilidad en - otras.

Una de esas propiedades, implicada directamente con los fenómenos de transferencia de calor es la conductividad térmica y el objetivo fundamental de este trabajo es presentar en un principio, las principales técnicas de estimación para la conductividad térmica que descansan sobre un fundamento teórico, mencionando este en cada caso, inmediatamente despues, presento aquellas técnicas

de estimación que están basadas en conocimientos totalmente empíricos, pero que resultan ser las de más utilidad la mayoría de las veces, dando a conocer las aplicaciones, confiabilidad y observaciones en cada caso. Se incluyen también algunas técnicas de estimación empíricas para la conductividad térmica de mezclas de líquidos. Otro capítulo, trata de la variación de la conductividad térmica con la presión y temperatura y por último se presenta una recopilación de datos experimentales de conductividad térmica de líquidos y de mezclas de ellos, que se hallan dispersos en la literatura.

CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE LÍQUIDOS

Generalidades

Para poder establecer una teoría real de la conductividad térmica de un líquido, es necesario tener una información básica acerca de los siguientes datos: la forma molecular, las fuerzas intermoleculares, estructura del líquido y mecanismos moleculares de la conducción térmica. En la práctica poca de esta información se puede obtener, por lo que resulta necesario acudir a sistemas idealizados, que en la mayoría de los casos se alejan del fenómeno real. Pese a esto, la teoría de la conductividad térmica de líquidos se estudia intensamente, habiéndose desarrollado técnicas generales de estimación, aunque no confiables completamente.

Muchos autores extienden la teoría cinética de gases diluidos, para aplicarla a gases densos y líquidos, desarrollando de esta forma ecuaciones para evaluar la conductividad térmica de líquidos.

La fase gaseosa se puede describir como aquella en la que las moléculas tienen una relativa libertad para moverse y transmitir cantidad de movimiento y energía por un mecanismo de colisión. Los campos de fuerzas intermoleculares aunque no sean insignificantes, no afectan en forma drástica los valores de la conductividad térmica. Un modelo molecular de esferas rígidas en donde se desprecien las interacciones debido a las distancias que separan a las moléculas proporcionara una buena aproximación de esta situación. En la fase líquida la situación es distinta; la proximidad estrecha de las moléculas resalta notablemente las fuerzas de atracción intermoleculares; hay poco movimiento al azar de las moléculas individuales, como se evidencia por el bajo valor de los coeficientes de difusión de líquidos y frecuentemente un líquido se modela como una red con cada molécula encerrada por sus vecinos más próximos, donde la energía y la cantidad de movimiento se intercambian principalmente por oscilaciones de moléculas en los campos de fuerzas mutuas que rodean a cada molécula.

Para muchos líquidos orgánicos simples, la conductividad térmica es de diez a cien veces mayor que la de los gases a baja presión a la misma temperatura. Esta diferencia entre los valores de conductividad térmica de la fase gaseosa y líquida indica un cambio distinto en el mecanismo de transmisión de energía.

Muchos autores, estudian con detalle la importancia en la diferencia de mecanismos de transporte de los líquidos comparados con los gases y en base a esto han obtenido ecuaciones para calcular la conductividad térmica de líquidos, las cuales difieren la mayoría de los casos de los valores experimentales.

La influencia de la presión y la temperatura en la conductividad térmica, están representadas por las ecuaciones de Le--noir y Filippov respectivamente, las cuales no tienen ningún fundamento teórico definido, pero que se ajustan aproximadamente a los valores experimentales. Sin embargo en algunos casos ninguna de las ecuaciones anteriores describe el comportamiento de ciertos líquidos.

Las unidades más comunes de la conductividad térmica son: $\text{Cal/cm(s)}(^{\circ}\text{K})$ o $\text{Cal/cm(s)}(^{\circ}\text{C})$. En el sistema inglés las unidades son: $\text{Btu/ft(hr)}(^{\circ}\text{R})$. En el sistema internacional la conductividad térmica se expresa en $\text{Watt/m} (^{\circ}\text{K})$, otras unidades de conductividad térmica son: $\text{Joules/cm(s)} (^{\circ}\text{K})$, $\text{Watt/m} (^{\circ}\text{C})$.

TEORIAS EN LA CONDUCTIVIDAD TERMICA

El primer encuentro real para proporcionar una teoría de la conductividad térmica, fué hecho por Enskog (12, 16) quien extendió la teoría cinética rigurosa de gases diluidos, para aplicar la a gases densos y líquidos.

Enskog considera que al comprimir un gas, la relación entre el diámetro molecular y la trayectoria libre media, cambia de hacerse despreciable a el orden de la unidad. Durante éste proceso, la frecuencia de colisión se altera por dos causas: se incrementa al decrecer la trayectoria libre media y disminuye porque las moléculas están lo suficientemente encerradas para protegerse de las colisiones de las otras moléculas.

Enskog mostró que la frecuencia de colisión en un gas denso o en un líquido difiere del valor del mismo gas diluido a la misma temperatura por un factor Y , el cual depende solamente de el estado termodinámico local y el diámetro molecular d_m y está dado por:

$$Y = 1 + 0.625(b/V) + 0.2869(b/V)^2 + 0.115(b/V)^3 + \dots$$

Donde $b = (2/3)\pi N d_m^3$ es el segundo coeficiente virial para esferas rígidas. Y , es la función de distribución de estado radial. El segundo efecto de incrementar la compresión es la importancia en el aumento de la transferencia de colisión, energía y momentum. Con estas consideraciones Enskog, modificó la ecuación de Boltzmann para altas densidades resuelta por el método de Chapman-Enskog usado en la teoría de gases diluidos y derivó ecuaciones para el coeficiente de transporte de manera análoga al gas diluido tratado.

La ecuación obtenida por Enskog fué la siguiente:

$$k = k_0 b / V (1/y + 1.2 + 0.7574y)$$

Donde:

k = Conductividad térmica del líquido

k_0 = Conductividad térmica del gas diluido

b = Coeficiente virial

V = Volumen

$$y = (b/V)Y$$

Esta ecuación da un error del 13%.

Método de Bridgmann (5, 22, 23)

Bridgmann propuso en 1923, una teoría sencilla del transporte de energía en líquidos puros. Suponía que las moléculas estaban dispuestas en una red cúbica con una separación entre centros l.

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. La ecuación de Bridgmann es la siguiente:

$$k = 2RV_s / s^2$$

Donde:

R = Constante Universal de los gases

V_s = Velocidad del sonido en el líquido

s = Distancia promedio de separación entre los centros de las moléculas, considerando un arreglo cúbico.

k = Conductividad térmica.

La cantidad s está definida por $s = (m/d)^{1/3}$ donde m es la masa absoluta de una molécula del líquido en gramos y d es la densidad del líquido. Combinando con la ecuación anterior tenemos:

$$k = 2RV_s (d/m)^{0.667}$$

Bridgmann comparo los valores calculados con la ecuación anterior, con los obtenidos experimentalmente, encontrando una desviación de -13 a +38% en 11 líquidos que incluyó en su estudio.

Teoría de Kardos (2, 28)

Kardos propuso una ecuación teórica para calcular la conductividad térmica de un líquido. El obtuvo su ecuación al utilizar la teoría de Debye para la conducción del calor en sólidos no metálicos. La teoría de Debye propone una similitud entre el mecanismo de conducción del calor en sólidos aislantes y gases.

En la derivación de esta ecuación Kardos considera que -
la caída de temperatura en el líquido cambia exponencialmente y -
que la caída de energía ocurre en los espacios intermoleculares.

La ecuación de Kardos es similar a la de Bridgmann ya -
que también supone que el calor se transfiere a la velocidad del -
sonido.

Como resultado de sus consideraciones Kardos obtuvo la -
siguiente ecuación para la conductividad térmica de líquidos:

$$k = d c_p V_s / d_m$$

donde:

d = Diámetro molecular

S = Distancia promedio entre los centros de las moléculas.

V_s = Velocidad del sonido en el líquido

C_p = Capacidad calorífica a presión constante

d = Densidad del líquido

k = Conductividad térmica.

La distancia promedio entre los centros de las moléculas
en la ecuación anterior era considerada igual para todos los liqui-
dos y con valor de 0.95×10^{-8} . Posteriormente Kardos consideró -
un arreglo cúbico de las moléculas y cálculo un valor individual -
de d_m para cada uno de los líquidos.

Vargaftik (19) verificó esta ecuación comparando los va-
lores calculados con los valores de la conductividad térmica deter-
minada experimentalmente, la comparación la hizo para 11 líquidos.
Obteniendo los siguientes resultados: para valores iguales de S la
diferencia promedio entre los valores calculados y los experimen-
tales, era del 41% y cuando S era calculada para cada uno de los -
líquidos el rango de diferencia promedio era de 5.9% a una máxima
diferencia de +17.9%.

Teoría de Oshida (19, 28)

Esta teoría relaciona la conductividad térmica de un lí-
quido con su punto de ebullición y volumen molecular.

En la derivación de su ecuación él supone que las oscila-
ciones de las partículas líquidas son similares a las oscilaciones
de las partículas sólidas, proponiendo además que las partículas -

líquidos vibran ceca de su posición promedio y que el cambio de energía tiene lugar cuando dos moléculas se aproximan entre sí. La energía promedio de las moléculas era considerada igual a $3kT$. Denotando por f la frecuencia de vibración de las moléculas alrededor de su posición promedio y calculando el cambio de energía entre las moléculas dentro de un volumen dado, Oshida obtuvo la siguiente ecuación:

$$k = 4 Kf / d_m$$

Donde:

k = Conductividad térmica

K = Constante de Boltzmann

f = Frecuencia de vibración

d_m = Diámetro molecular

La frecuencia de vibración era determinada por Oshida a partir de la ecuación de Lindman.

$$f = \frac{T^{1/2}}{M^{1/2} V_m^{2/3}}$$

La ecuación obtenida finalmente por Oshida es:

$$k = \frac{B T^{1/2}}{M^{1/2} V_m^{2/3}}$$

Donde:

V_m = Volumen molecular

M = Peso molecular

T = Punto de ebullición en grados Kelvin

$B = 3.1 \times 10^{-3}$

k = Conductividad térmica.

Vargaftik comparó los valores obtenidos con la ecuación de Oshida en 12 líquidos con los valores experimentales y mostró que los valores calculados eran más bajos que los experimentales, por un promedio de 23% y un máximo de 53%.

Ecuación de Eyring (2, 16)

Eyring y sus colaboradores proponen la siguiente ecuación para calcular la conductividad térmica:

$$k = n^{2/3} K (8 v_a / c_1)^{1/2}$$

Donde;

n = número de moléculas por unidad de volumen

K = Constante de Boltzmann

v_a = Velocidad acústica en el líquido

c_1 = Relación de calores específicos de líquidos

k = Conductividad térmica

La derivación de ésta ecuación está basada fundamentalmente en dos argumentos; el primero de ellos consiste en una ampliación que se hace de la teoría cinética de los gases para aplicarla a los líquidos obteniendo inicialmente:

$$k = n^{2/3} K (8KT / m)^{1/2} (V/V_f)^{1/3}$$

El segundo argumento supone que cuando dos moléculas chocan la energía es transferida inicialmente desde el centro de una molécula al centro de la otra con la velocidad del sonido. En base a esto la velocidad del sonido en el líquido es :

$$c_1 = (V/V_f)^{1/3} c_g$$

donde:

c_1 = Velocidad del sonido en el líquido

c_g = Velocidad del sonido en el gas

V = Volumen por molécula

V_f = Volumen libre

La ecuación anterior es aplicable solamente para líquidos con moléculas monoatómicas. Al aplicar la ecuación anterior a líquidos con moléculas poliatómicas es necesario utilizar la corrección de Lucken $(9D - 5) / (15D - 1)$ la cual considera los grados de

de libertad internos de las moléculas. Eyring supone que solamente la energía rotacional y vibracional de las moléculas es la que se transfiere, dándole a D un valor de $4/3$.

Para líquidos poliatómicos la ecuación de la conductividad térmica resultante es :

$$k = 2.80 K n^{2/3} A^{1/2} C_1$$

La nomenclatura es la misma que en la ecuación anterior.

La ecuación anterior es aplicable a muchos líquidos dando una desviación promedio del 10% aunque se encuentran errores - hasta del 26% en algunos casos. Para presiones atmosféricas distintas de la normal, las desviaciones resultan ser mayores.

Teoría de Rao (21)

Rao, publicó una teoría para la conductividad térmica de líquidos basada en la consideración de que el estado líquido se aproxima más al estado sólido que al estado gaseoso y obtuvo una ecuación para la conductividad térmica de un líquido en su punto de ebullición normal:

$$k = 2.096 \times 10^5 T_{mp}^{1/2} / M V_{mp}^{4/5}$$

donde:

T_{mp} = Temperatura absoluta de ebullición

M = Peso molecular

V_{mp} = Volumen molecular en el punto de ebullición

k = Conductividad térmica

Dick y Cready (29) encontraron que los valores calculados de la conductividad térmica al utilizar la ecuación anterior, son dos o más veces más altos que los datos experimentales.

Esta teoría no es recomendable para calcular la conductividad térmica.

Método de Sakiades y Coates

Sakiades y Coates (25) propusieron un método para calcular la conductividad térmica basado en un modelo del estado líquido en el cual las moléculas están enlazadas en cadenas isotérmicas y donde la transferencia de energía se lleva a cabo al interactuar con otras cadenas de distinta energía. La propagación de la energía tiene lugar por medio de un mecanismo similar a la propagación del sonido.

El razonamiento ocupado por Sakiades y Coates es similar al de Kardos, pero la distancia intermolecular L es interpretada de una manera diferente. Mientras que Kardos considera a L ser constante Sakiades y Coates consideran que varía con la naturaleza del líquido y con la temperatura. La ecuación obtenida es:

$$k = C_p d U_s L$$

Donde:

C_p = Calor específico a presión constante

d = Densidad

U_s = Velocidad del sonido en el líquido

L = Distancia entre las superficies moleculares

k = Conductividad térmica.

La velocidad acústica U_s es obtenida por el método de

Rao:

$$U_s = (B d/M)^3$$

Donde:

d = Densidad

B = Constante que depende de la estructura molecular y cuyos valores se calculan con la tabla 1.

El valor de L es obtenido por medio de la siguiente ecuación:

$$L = q \left[1 - (d_1 - d_1 T_1 / d_2 - 2 T_1)^{1/2} \right]$$

Donde:

L = Distancia de separación entre las superficies moleculares

d_1 = Densidad reducida

d_2 = Densidad reducida de congelación

T_1 = Temperatura reducida de congelación

q = Separación molecular (tabla 11)

Uno de los problemas de esta ecuación es el cálculo de la relación $d_2 = d_f/d_c$ donde, d_f es la densidad en el punto de congelación, y d_c es la densidad crítica. Los datos de d_f son escasos y esto limita la utilidad de esta ecuación. Cuando d_f no es conocida Sakiades y Coates recomiendan que se puede calcular por medio de la siguiente ecuación:

$$d_f = d (1.0 - 0.48 T_{fr} / 1.0 - 0.48 Tr)$$

Donde:

d_f = Densidad en el punto de congelación

d = Densidad del líquido

T_{fr} = Temperatura reducida de congelación

Tr = Temperatura reducida

Cuando el método fué aplicado a 42 líquidos orgánicos se encontraron desviaciones entre el 5.6 y 6% respectivamente.

Tabla 1.

Contribuciones estructurales para
estimar B en la ecuación de U_s (método de
Sakiadis y Coates)

Estructura básica:	b
Metano	1850
Benceno	4534
Ciclohexano	5363
Naftaleno	6566
Radicales substituídos:	
$\overset{\cdot}{\text{C}}\text{-}$, $\overset{\cdot}{\text{C}}\text{H-}$, $\text{-CH}_2\text{-}$, -CH_3	872
-COO-	1220
$\overset{\text{O}}{\parallel}\text{-C-H}$	449
$\overset{\text{O}}{\parallel}\text{-C-}$	872
-NH-	638
$\text{-NH}_2\text{-}$	478
-COOH	942
-C=N	819
- O -	273
- O H	137
- Cl	610
- Br	692
- I	893
- NO_2	893

- S	550
= S	550
Doble ligaduras	-254
Triples ligaduras	-507
Contribuciones de posición	
Crto	0
Meta	59
Para	117

Tabla II.

Separación molecular η , en Angstroms,
para líquidos orgánicos puros, obtenida a partir de mediciones de difracción de rayos X.

I. Moléculas de cadena recta.

	C ₁ [*]	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆ [*]
Ácidos	4.10	4.70	5.00	5.20		
Alcoholes	4.30	4.60	5.09			
Aldehidos .....	....	4.45	5.01	5.20		
Amidas	4.13	4.80	5.10			
Aminas (mono-, di-) .....	....	....	5.03	5.20		
Esteres .....	....	....	4.91	5.03		
Eteres .....	....	....	....	5.29		
Hidrocarburos						
Halogenados .....	....	4.70*				
Hidrocarburos ...	....	....	....	....	....	5.40
Cetonas .....	....	....	5.10			
Mercaptanos .....	....	....	4.96	5.01		
Alcanos nitrados.	4.60&	5.01				
Nitrilos	4.43	4.84				

* El sub-índice indica el número de átomos de carbono en la molécula.

Teoría de Shirokov

Shirokov (16, 19) considera a la conductividad térmica como una propiedad para transferir la energía por medio de ondas. Trata el movimiento translacional y vibracional de las moléculas - como un sistema de ondas cuya energía es igual a la energía de las partículas del líquido. Basándose en estas consideraciones obtuvo la siguiente expresión para la conductividad térmica de líquidos:

$$k = \frac{1}{3} U d L C_v$$

Donde:

U = Velocidad promedio de las ondas de propagación

d = Densidad del líquido

C_v = Capacidad calorífica a volumen constante

L = Trayectoria libre media de la onda

k = Conductividad térmica.

La ecuación de Shirokov, no es útil para calcular la conductividad térmica de líquidos, porque los valores calculados difieren de los valores experimentales en un promedio del 30%.

Teoría de Predvoditelev

Predvoditelev (2, 19) basado en el concepto de que el desplazamiento de calor en un gas y un sólido es similar al desplazamiento en un líquido, obtiene la siguiente ecuación:

$$k = \frac{f}{c} n c_p (1 - b/v)$$

Donde:

c_p = Calor específico a presión constante

$$C = c_p / c_v$$

c_v = Calor específico a volumen constante

n = Viscosidad

b = Constante de Van der Waals

v = Volumen específico

Poco más tarde Predvoditelev estableció la siguiente relación: "El producto de la difusividad térmica por la raíz cúbica

del volumen molecular es una cantidad independiente de las propiedades de las sustancias y depende únicamente de su estado". Estableciendo la siguiente ecuación:

$$a^2 (M/D)^{1/3} = A (M/D)^{1/3} + J_w^{2/3} / J_v^{1/2}$$

Donde:

$$a^2 = k / C_p D = \text{Difusividad térmica}$$

D = Densidad

M = Peso molecular

$$J_w = W^3 V_m = \text{Constante}$$

$$J_v = V_m f = \text{Constante}$$

W = Velocidad de las moléculas del gas

f = Frecuencia de oscilación en un sólido

V_m = Volumen molecular del gas

Al sustituir la difusividad térmica en la ecuación anterior se llega a la siguiente expresión para la conductividad térmica:

$$k = A C_p M^{-1/3} D^{4/3}$$

Donde la nomenclatura es la misma que en la ecuación anterior.

Predvoditelev obtuvo los valores de la constante A para 48 líquidos en el intervalo de 3.40×10^{-3} a 3.86×10^{-3} a una temperatura de 30 °C. La constante A es independiente del tipo de líquido, pero es una función de la temperatura. La ecuación de Predvoditelev difiere de la ecuación empírica de Weber por el hecho de que la constante A en la ecuación de Weber es independiente de la temperatura.

Vargaftik, comparó sus datos experimentales con los obtenidos por medio de la ecuación anterior, encontrando desviaciones entre el -18 a 18.5%.

Método de Predvoditelev - Vargaftik

Vargaftik (2, 28) propuso un arreglo a la ecuación de -

Predvoditelev, obteniendo la siguiente ecuación:

$$k = A C_p D^{4/3} / M^{1/3} Z$$

Donde:

k = Conductividad térmica, cal/ (cm)(seg)(°C)

A = Constante = 4.28×10^{-3} cm³/seg(g mol^{1/3})

C_p = Capacidad calorífica a la temperatura 0.5 T_c, cal/g °C

D = Densidad a la temperatura considerada, g/cm³

Z = $ML e^{C/T} / 21 T_b$

C = Constante en grados Kelvin = T_c ln (21 T_b / ML_b)

L_b = Calor latente de evaporación en el punto normal de -
ebullición, cal/g

M = Peso molecular

T = Temperatura considerada en grados Kelvin

T_b = Temperatura normal de ebullición, grados Kelvin

T_c = Temperatura crítica en grados Kelvin.

Esta ecuación describe bien el cambio de la conductividad térmica de líquidos asociados y no asociados en una amplia gama de temperaturas y a presión atmosférica.

Con las sustancias que fué probado el método se encontró un error máximo de 31.6% y un promedio de error de 8.7%.

Tabla 3. Ecuaciones teóricas para calcular la conductividad térmica de líquidos puros.

Autor	E. teórica	Error
Enskog	$k = k_0 b / V (1/y + 1.2 + 0.7574y)$	13
Bridgmann	$k = 2 R V_s / S^2$	-13
Kardos	$k = d C_p W S / d_m$	13
Oshida	$k = 4 k_b f / d_m$	-23
Eyring	$k = 2.80 k_B n^{2/3}$	10
Rao	$k = 2.096 \times 10^5 T_{mp}^{1/2} / M V_{mp}^{4/5}$	200
Sakiades y Coates	$k = C_p d U_s L$	6
Shirokov	$k = U d C_v L / 3$	30
Predvoditelev	$k = A C_p M^{-1/3} D^{4/3}$	18.5
Predvoditelev y Vargaftik	$k = A C_p D^{4/3} / M^{1/3} Z$	8.7

ECUACIONES EMPÍRICAS PARA CALCULAR LA CONDUCTIVIDAD
DE LOS LIQUIDOS A PRESION ATMOSFERICA

Durante mucho tiempo la conductividad térmica ha sido - determinada experimentalmente o por ecuaciones empíricas, que algunas veces tenían una base ligeramente definida y la mayoría de las veces carecía de algún fundamento que explicara dicha relación.

Sin embargo actualmente los resultados obtenidos por estas ecuaciones generalmente son más satisfactorios que aquellos obtenidos por ecuaciones que tienen una base científica más firme.

La primera ecuación empírica que se conoce, relaciona propiedades comunes de los líquidos en la siguiente forma:

$$K = A d C_p$$

Donde:

K = Conductividad Térmica

d = densidad

A = Coeficiente de proporcionalidad

C_p = Calor específico a presión constante

Esta ecuación se atribuye a Weber, (2, 19) quien experimento con 17 líquidos en un rango de temperatura de 9 a 15°C.

Más tarde Weber, ampliando sus experimentos a 50 líquidos distintos, modificó la ecuación anterior a la siguiente:

$$K = A C_p d (d/M)^{1/3}$$

Donde M es el peso molecular y la notación es la misma - que en la ecuación anterior.

El factor $(d/M)^{1/3}$ introducido por Weber en esta ecuación es proporcional a la distancia promedio entre los centros de las moléculas.

Para los 50 líquidos que trató Weber, obtuvo un promedio de la constante A igual, a 3.59×10^{-3} con la conductividad térmica expresada en cal/ (seg)(cm)(°C) para líquidos distintos el valor de esta constante se encuentra entre 3.2×10^{-3} a 4.5×10^{-3} .

La ecuación anterior es aplicable a líquidos orgánicos.

En un estudio hecho en 32 líquidos dió un promedio de - de error del 13%, con desviaciones entre -49 y +46.

Es importante reconocer que muchos autores han modificado ésta ecuación, obteniendo resultados más confiables.

Método de Smith (19, 27)

Smith propuso la siguiente ecuación;

$$k = 4.30 \times 10^{-3} C_p d (d/M)^{1/3}$$

donde:

k = Conductividad térmica, cal/(g)(cm)(°C)

C_p = Capacidad calorífica a presión constante, cal/(g)(°C)

d = Densidad, g/cm³

M = Peso molecular

Esta ecuación es aplicable a líquidos orgánicos.

Los resultados obtenidos con esta ecuación son habitualmente mayores que los datos experimentales, las desviaciones son hasta del 49% y el porcentaje de error es del 18%.

Observaciones.- Esta ecuación es una modificación a la ecuación de Weber, cambiando unicamente el valor de la constante.

Método de Palmer (3,20)

La ecuación de Palmer es:

$$k = 94\,700 C_p d (d/M)^{1/3} \times 10^{-6} / S_{vb}$$

Donde:

k = Conductividad térmica, cal/(cm)(s)(°C)

C_p = Capacidad calorífica a presión constante cal/g(°C)

d = Densidad, g/cm³

M = Peso molecular

S_{vb} = Entropía de vaporización en el punto normal de ebullición, cal/ g mol °C.

Esta ecuación es aplicable a líquidos orgánicos.

Palmer realizó su estudio con 47 líquidos de varios tipos

y obtuvo un promedio de desviación de 8.8% y una desviación máxima del 27%.

Observaciones.- El método de Palmer, es una modificación al método de Weber, introduciendo en ésta ecuación la entropía de vaporización S, en el punto normal de ebullición y modificando el valor de la constante. Este método es generalmente útil y se prefiere en lugar de muchos otros. Esta ecuación da valores particularmente altos para compuestos halógenados.

Método de Smith 1936 (19, 27)

Smith propuso una ecuación empírica, que relaciona la conductividad térmica, con la capacidad calorífica, viscosidad y densidad, la ecuación es :

$$k \times 10^6 = 11 + 6450(C_p - 0.45)^3 + 1250(d/M)^{1/3} + 100(u/d)^{0.11}$$

Donde:

k = Conductividad térmica, cal/cm(s)(°C)

C_p = Capacidad calorífica, a presión constante, cal/g (°C)

d = Densidad, g/ cm³

M = Peso molecular

u = Viscosidad en centipoises

Esta ecuación es aplicable a líquidos orgánicos a 30 °C.

Confiabilidad.- Al utilizar la ecuación se encuentran valores muy elevados en comparación con los datos experimentales. Smith realizó sus estudios en 46 compuestos, con un porcentaje de error del 6.7% y con desviaciones hasta del 25%. Sin embargo, para otras sustancias se encontró un porcentaje de error del 16%, -- en promedio.

Observaciones.- Pequeños cambios en la densidad elevan los valores de ésta ecuación, dando resultados bastante variables.

Método de Mohanty (2, 18)

La ecuación de Mohanty es:

$$k_b = 26.15 u / M_b$$

Donde:

k_b = Conductividad térmica en el punto de ebullición en

Btu/ hr. ft. °F

μ = Viscosidad en centipoises

M_b = Peso molecular del vapor

Esta ecuación permite calcular la conductividad térmica de un líquido en su punto de ebullición.

Confiabilidad.- En 13 líquidos en los que se estudió se encontró una variación del 13%.

Observaciones.- Esta es la única ecuación referente a la conductividad térmica de líquidos en su punto de ebullición.

Método de Robbins y Kingrea (22, 24)

Un método bastante útil es el de Robbins y Kingrea cuya ecuación es :

$$k = (88.0 - 4.94H) \times 10^{-3} / S (0.55 / Tr)^N C_p d^{4/3}$$

Donde:

k = Conductividad térmica del líquido, cal/ cm (s) °K

T_r = Temperatura reducida

C_p = Capacidad calorífica molar del líquido, cal/ g·mol °K

d = Densidad molar del líquido, g mol/ cm³

S = Entropía de vaporización de Everett

$$S = H_v T_b + 4.56 \log (273/ T_b)$$

H_v = Calor molar de vaporización en el punto de ebullición normal, cal/ g mol

T_b = Punto de ebullición normal en °K

H = Parámetro que depende de la estructura molecular (t. IV)

N = Parámetro que depende de la densidad del líquido (t. V)

Esta ecuación es aplicable a líquidos orgánicos. No da buenos resultados en líquidos inorgánicos o compuestos que contengan azufre. Solo se aplica a temperaturas reducidas de aproximadamente 0.4 a 0.8 y presiones no mayores de 500 lb/ in².

Confiabilidad.- Los valores calculados por éste método -

generalmente no dan errores mayores del 5%. Raramente se hallan errores del 10%.

Observaciones.- Este método es una modificación al propuesto por Weber y es de los más aceptables.

El cambio brusco en el exponente N desde cero hasta la unidad para compuestos con densidades de masa mayores o menores que 1.0 g/cm^3 es difícil de aceptar en muchos casos; a menudo se obtienen resultados más confiables con $N = 1$ aún para compuestos con densidades mayores de 1 g/cm^3 .

TABLE IV Factores H y N para la ecuación de R. y C.

Grupo funcional	Número de grupos	H
Hidrocarburos no ramificados:		
Parafinos	.....	0
Olefinas	.....	0
Anillos	.....	0
Ramificaciones de CH_3 -	Uno	1
	Dos	2
	Tres	3
Ramificaciones de C_2H_5	Uno	2
Ramificaciones iso- C_3H_7	Uno	2
Ramificaciones C_4H_9	Uno	2
Sustituciones F	Uno	1
	Dos	2
Sustituciones Cl	Uno	1
	Dos	2
	Tres o cuatro	3
Sustituciones Br	Uno	4
	Dos	6
Sustituciones I	Uno	5
Sustituciones OH	Uno (iso)	1
	Uno (normal)	-1
	Dos	0
	Uno (ter-)	5
Sustituciones oxigenadas:		
- $\overset{\cdot}{\text{C}} = \text{O}$ (cetonas, aldehidos)	.....	0

Ø -		
-C = O (ácidos, ésteres)	.....	0
-O - (éteres)	.....	2
Sustituciones NH ₃	Uno	1

* Para compuestos que contienen varios grupos funcionales, las contribuciones del factor H son aditivas.

TABLA V.

Compuesto	Densidad a 68° F (lb/ft ³)	Factor N
Líquidos orgánicos	62.3	1
Líquidos orgánicos	62.3	0

Método de Sheffy y Jhonson (22, 26)

Un método sencillo de utilizar es el de Sheffy y Jhonson su ecuación es:

$$k = (4.66)(10^{-3}) \left[1 - 0.00126(T - T_m) \right] / T_m^{0.126} M^{0.3}$$

Donde:

k = Conductividad térmica, cal/cm(s)(°K)

T_m = Punto de fusión, °K

T = Temperatura, °K

M = Peso molecular

Esta ecuación da buenos resultados en hidrocarburos no ramificados. Se encontrarán resultados particularmente malos para hidrocarburos con cadena ramificada, naftenos y compuestos de alto peso molecular.

Confiabilidad.- Los valores de k, calculados con la ecuación anterior en 69 líquidos distintos con 141 puntos dato, dieron un error del 13% en promedio, aún que a menudo se observan variaciones mayores.

Observaciones.- El método no se debe emplear en compuestos muy polares, ni a temperaturas reducidas mayores de 0.7.

Los datos necesarios para utilizar este método son solo temperaturas, que facilmente se hallan en la literatura.

Método de Denbigh (7)

Denbigh propuso una relación entre el número de Prandtl de un líquido y su entropía de vaporización.

$$k = 2.42 C_p u / 10^b$$

Donde:

k = Conductividad térmica en Btu/ (hr)(ft)(°F)

C_p = Capacidad calorífica en Btu/ lb °F

u = Viscosidad en centipoises

M = Peso molecular

$$b = (M H_v / 17.87) - 1.8$$

H = Calor latente en el punto normal de ebullición en Btu/lb

T = Temperatura, °K.

Es aplicable a cualquier tipo de líquidos puros.

Confiabilidad.- La ecuación anterior da un 30% de error.

Observaciones.- Esta ecuación no es recomendable para una alta precisión.

Método de Pachaiyappan, Ibrahim y Kulor (19)

Propusieron la siguiente ecuación:

$$k V_m = C(M)^n$$

Donde:

k = Conductividad térmica

M = Peso molecular

C = Constante cuyo valor se halla en la tabla VI

n = Constante cuyo valor se halla en la tabla VI

V_m = Volumen molar, $\text{cm}^3 / \text{g mol}$

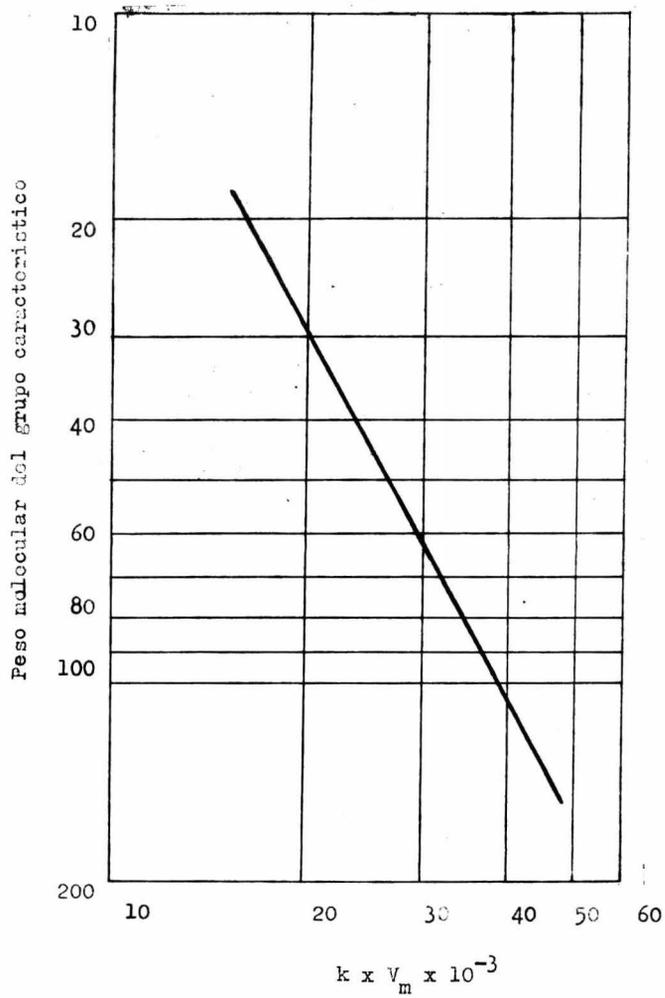
El método es útil para líquidos orgánicos. Para el caso de líquidos orgánicos sustituidos se debe emplear la gráfica anexa, en la que se utiliza el peso molecular del grupo característico (por ejemplo, C_2H_5 para cloroetano, bromoetano, o Iodoetano, C_6H_5 para todos los derivados halógenados del benceno, etc.) en lugar del peso molecular de las sustancias. En cambio V_m debe corresponder al compuesto y no al grupo característico.

Confiabilidad.- El método da un error promedio del 4% y un error máximo del 13%.

Observaciones.- La ecuación anterior permite calcular la conductividad térmica de un líquido, usando las constantes C y N de la tabla anexa, con los datos de volumen molar y peso molecular. El método resulta muy sencillo de utilizar y da errores muy grandes solo con el ácido fórmico.

TABLA VI , valores para la constante de la ecuación de Pachaiyappan, Ibrahim y Kuloor.

Grupo de compuestos	n	C x 10 ³
Alcoholes	0.986	0.575
Isalcoholes	1.053	0.385
Esteres	1.022	0.396
Cetonas	0.933	0.663
Aromáticos	1.005	0.425
Compuestos alifáticos nitrogenados.	0.741	1.373
Acidos alifáticos	0.948	0.546
Isoacidos	0.841	0.812
Hidrocarburos	1.114	0.306
Hidrocarburos Cíclicos	0.650	1.979
Eteres (ordinarios)	1.166	0.219
Eteres (sustitufdos)	1.000	0.510



Método de Tsien (28)

La ecuación de tsien es la siguiente:

$$k = 0.01768 S^{0.167} / M^{0.667} B^{0.5}$$

Donde:

k = Conductividad térmica, Btu/ hr(ft)(°F)

M = Peso molecular

S = Gravedad específica

B = Constante dada por la siguiente relación:

$$B = V_1 / R T_B (101.6 - 82.4) T / T_B$$

donde:

V₁ = Volumen molar

R = Constante universal de los gases

T_B = Temperatura absoluta en el punto normal de ebullición

T = Temperatura del líquido

Confiabilidad.- Esta ecuación se estudió en 28 líquidos dando un error promedio del 13% y la desviación máxima fué del 51%.

Observaciones.- Esta ecuación tiene el inconveniente de incluir como un paso adicional, el cálculo del valor de B, por lo que resulta más complicada que otras, no dando resultados mucho mejores.

Método de Borovik (19)

Borovik propuso una ecuación empírica para la conductividad térmica de un líquido en un amplio rango de temperaturas:

$$k = A (C_v + 2.25R) W / r^2$$

Donde:

A = Constante de proporcionalidad

C_v = Calor específico molar a volumen constante

R = Constante universal de los gases

W = Velocidad del sonido en el líquido

r = Radio de las moléculas

Se aplica a líquidos orgánicos a presión normal y a cualquier temperatura.

Confiabilidad.- Vargaftik checo la ecuación de Borevik en 6 líquidos encontrando desviaciones entre $\pm 23\%$.

Observaciones.- Esta ecuación es la menos recomendable.

Método de Ewing Et Al (2)

Este método propone la siguiente ecuación:

$$k = (2.61 \times 10^{-8})(T/r) - (2 \times 10^{-17})(T/r)^2 / C_p d + 97 C_p d^2 / MT$$

Donde:

d = Densidad, g/ cm³

C_p = Capacidad calorífica, cal/ g (°C)

T = Temperatura absoluta, °K

r = Resistividad eléctrica

M = Peso molecular o atómico (para aleaciones usese M promedio)

k = Conductividad térmica

Este método es aplicable a metales líquidos puros o aleados y sólidos.

Confiabilidad.- El error cometido al utilizar éste método está entre el 5 y 10%, para metales líquidos y para metales sólidos puros o aleados está entre 4 y 7%

Observaciones.- Este método es de los pocos que se conocen para metales líquidos.

TABLA VII

Ecuaciones empíricas para calcular la conductividad térmica de líquidos puros

Autor	E. empírica	% Error
Weber	$k = A C_p d (d/M)^{1/3}$	13
Smith	$k = 0.043 C_p d (d/M)^{1/3}$	18
Palmer	$k = 94700 C_p d (d/M)^{1/3} / 10^6 S_v$	8.8
Smith (1936)	$k \times 10^6 = 11 + 6450(C_p - 0.45)^3 + 1250(d/M)^{1/3} + 100(u/d)^{0.11}$	6.7
Kohanty	$k = 26.15 u/M_p$	13
Robbins y	$k = (68 - 4.94H) \times 10^{-3} / S (0.55/T_r)^N C_p d^{4/3}$	3.7
Kingrea		
Sheffy y	$k = (4.66)(10^{-3}) (1 - 0.00126(T - T_m) / T_m)^{0.216}$	
Jhonson	$k^{0.3}$	6
Denbigh	$k = 2.42 C_p u / 10^b$	30
Pachaiyappan,	$k V_m = C (T_r)^n$	8.5
Ibrahim y K.		
Tsien	$k = 0.017685^{0.167} / M^{0.667} B^{0.5}$	13
Borovik	$k = A (C_v + 2.25R) M / r^2$	23
Ewing Et Al	$k = (261 \times 10^{-8})(T/r) - (2 \times 10^{-17})(T/r)^2 / C_p d + 97C_p d^2 / M T$	7.5

CAPITULO VI

METODOS PARA CALCULAR LA CONDUCTIVIDAD TERMICA
DE MEZCLAS DE LIQUIDOS

Las mezclas de líquidos tienen reconocida importancia industrial, por lo que resulta valioso, obtener una ecuación para determinar su conductividad térmica. Sin embargo es poca la información que se tiene al respecto.

Anteriormente la conductividad térmica de mezclas se calculaba como un promedio aditivo de fracciones molares de las conductividades de los compuestos puros, actualmente se ha comprobado que esto es un error.

Los principales métodos de estimación para conductividad térmica, son los siguientes:

Método de Filippov y Novoselova (8,9)

Estos autores propusieron la siguiente ecuación para calcular la conductividad térmica de mezclas binarias de líquidos:

$$k_m = k_1 X_1 + k_2 X_2 - 0.72 (k_2 - k_1) X_1 X_2$$

Donde:

k_m = Conductividad térmica de la mezcla

k_1 = Conductividad térmica del componente menos conductor

k_2 = Conductividad térmica del componente más conductor

X_1 = Fracción en peso del componente menos conductor

X_2 = Fracción en peso del componente más conductor

Esta ecuación se puede utilizar para mezclas binarias de líquidos miscibles.

Filippov y Novoselova consideran que el error en el uso de esta ecuación no excede del 3.2%; sin embargo en sus nuevos estudios, proponen una modificación a la ecuación anterior, pues consideran que el valor 0.72 no es constante para todas las mezclas y consideran que varía entre 0 y 0.7, obteniendo de esta manera, resultados con errores no mayores del 3%.

Método de Barratt y Nettleton (13)

Barratt y Nettleton para mezclas binarias tienen la sigui

ente ecuación:

$$k_m \operatorname{Sen} k (100b) = k_1 \operatorname{Sen} h (W_1 b) + k_2 \operatorname{Sen} h (W_2 b)$$

Donde:

k_m = Conductividad termica de la mezcla

b = Constante específica de los constituyentes

W_1, W_2 = % en peso de los componentes

k_2, k_1 = Conductividad térmica de los componentes de la mezcla.

Esta ecuación es aplicable a mezclas binarias de líquidos miscibles.

El error promedio que se comete al utilizar esta ecuación es del 3.5%.

Observaciones.- Para poder utilizar esta ecuación es necesario conocer los valores de b , los cuales se determinan experimentalmente. Este sería inconveniente hace a esta ecuación menos útil que otras.

Método de Jordan y Coates (13)

Propone la siguiente ecuación:

$$\ln k_m = W_1 \ln k_1 + W_2 \ln k_2 + W_1 W_2 \ln J$$

Donde:

k_m = Conductividad térmica de la mezcla

W_1, W_2 = % en peso de los componentes

k_1, k_2 = Conductividad térmica de los componentes

J = Factor de Jordan Coates

$$J = \operatorname{Exp} (k_2 - k_1) - 0.5 (k_2 + k_1)$$

Esta ecuación es útil para mezclas de líquidos miscibles.

Confiabilidad.- Los errores máximos que se cometen al utilizar esta ecuación con respecto a los datos experimentales, no son mayores del 2%.

Observaciones.- Es una de las ecuaciones más útil por su facilidad de uso.

Método de Nel (11, 16)

La ecuación de Nel es la siguiente:

$$k_m = k_1 X_1 + k_2 X_2 - a(k_2 - k_1)(1 - X_2^{1/2}) X_2$$

Donde:

k_m = Conductividad térmica de la mezcla

X_1, X_2 = Fracción en peso de los componentes

a = Es un valor constante que depende del sistema investigado

Esta ecuación es útil para mezclas de líquidos de soluciones acuosas y no acuosas y da un 2.2% de error.

Observaciones.- El inconveniente de esta ecuación es que los valores de a , no se encuentran fácilmente disponibles.

Método de Crover y Knudsen (3,11)

La ecuación propuesta es:

$$k_m = k_1 k_2 (u_1 / S^{1/2}) / (u_2 / S^{1/2} + 1) / (k_2 u_1 S_2^{1/2} / u_2 S_1^{1/2}) + k_1$$

Donde:

k_m = Conductividad térmica de la mezcla

S_2, S_1 = Gravedad específica de los componentes de la mezcla

u_2, u_1 = Viscosidad de los componentes de la mezcla

k_2, k_1 = Conductividad térmica de los componentes de la mezcla

Esta ecuación es útil para mezclas binarias de líquidos inmiscibles que fluyen en forma turbulenta.

Confiabilidad.- Da resultados satisfactorios, en los pocos casos que se ha probado.

Método de Tareef

La ecuación propuesta es:

$$k_s = k_1 a / b$$

$$a = 2k_1 + k_p - 2v (k_1 - k_p)$$

$$b = 2k_1 + k_p + v(k_1 - k_p)$$

Donde:

k_s = Conductividad térmica de la suspensión

k_1 = Conductividad térmica del líquido

k_p = Conductividad térmica del sólido

v = Fracción en volumen de los sólidos en la suspensión.

Esta ecuación es útil para suspensiones de sólidos en líquidos.

Confiabilidad.- Da resultados satisfactorios en los casos que se ha probado.



METODO PARA MEZCLAS MULTICOMPONENTES

Reglas de Kern (11)

Estas reglas son útiles sólo en aquellos casos en que se desea una aproximación rápida e imprecisa de la conductividad térmica. Las reglas de Kern son las siguientes:

- 1) Soluciones de líquidos orgánicos:
Use conductividad térmica por peso
- 2) Soluciones de líquidos orgánicos y agua:
usese 0.9 veces la conductividad térmica por peso
- 3) Dispersiones coloidales:
Usese 0.9 veces la conductividad térmica del líquido dispersante
- 4) Soluciones de sales y agua circuladas a través de la coraza.
Usese 0.9 veces la conductividad del agua hasta concentraciones del 30 %
- 5) Emulsiones
Use 0.9 veces la conductividad térmica del líquido que forma el medio continuo.

Método Aditivo

La ecuación del método aditivo es la siguiente:

$$k_m = k_i X_i$$

n = Número de exponentes en la mezcla

X_i = Fracción molar o de peso del componente i en la mezcla.

k_i = Conductividad térmica del componente i

k_m = Conductividad térmica de la mezcla

Este método nos permite calcular la conductividad térmica de mezclas de hidrocarburos líquidos a cualquier temperatura y presión.

Confiabilidad.- Los resultados obtenidos al utilizar esta ecuación son hasta del 10.5% mayores que los datos experimentales.

Observaciones.- Es necesario tener valores de k de los componentes puros, bastante confiable.

C A P I T U L O V I I

DEPENDENCIA DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE LOS LÍQUIDOS
CON LA PRESIÓN Y TEMPERATURA.

Efecto de la presión.

Para muchos líquidos orgánicos simples, la conductividad térmica es de diez a cien veces mayor que la de los gases a baja - presión a la misma temperatura. Hay poca dependencia de la presión y generalmente el efecto de aumentar la temperatura es disminuir la conductividad térmica. Estas características son muy semejantes a las observadas para la viscosidad de líquidos, aunque la dependencia de la temperatura de los últimos sea casi exponencial, mientras que para la conductividad térmica es casi lineal.

Los valores de la conductividad térmica para los líquidos orgánicos más comunes varía entre 200 y 500 x 10⁻⁶ calorías/cm(s)^oK a temperaturas inferiores a las del punto de ebullición normal, pero el agua, amoníaco y otras moléculas altamente polares tienen valores de dos a tres veces mayores. La conductividad térmica de los sólidos en los puntos de fusión es de 20% a 40% mayor que la del líquido.

A presiones moderadas hasta de 30 a 40 atmósferas el efecto de la presión sobre la conductividad térmica de los líquidos se desprecia generalmente, salvo cerca del punto crítico, en donde el líquido se comporta en forma parecida al fluido denso. A temperaturas más bajas, los experimentos de Bridgmann constituyen casi todos los datos disponibles del efecto de la presión sobre la conductividad térmica. Estos datos muestran que la conductividad térmica del líquido, aumenta ligeramente con la presión y la velocidad del cambio es menor a mayores presiones. Un resultado interesante es que por encima de 3000 atmósferas la conductividad térmica disminuye frecuentemente al aumentar la temperatura, mientras que se ve que sucede lo contrario a bajas presiones.

Una forma conveniente para estimar el efecto de la presión en la conductividad térmica es por medio de la ecuación de Lenoir.

Ecuación de Lenoir (2)

$$k_2/k_1 = E_2/E_1$$

Donde:

k_2 = Conductividad térmica del líquido a t_2 y P_2

k_1 = Conductividad térmica del líquido a t_1 y P_1

E_2, E_1 = Son funciones de la temperatura y presión reducida
como se muestra en la siguiente figura.

Pasos a seguir en la utilización del método de Lenoir

- 1.- Debe tenerse disponible un dato de conductividad térmica a la temperatura considerada y a cualquier presión.
- 2.- Se calcula $T_r = T/T_0$ que es la temperatura reducida.
- 3.- Se calculan las presiones reducidas P_{r1} y P_{r2} .
- 4.- Con estos datos es posible obtener de las gráficas los valores correspondientes de E_1 y E_2 .
- 5.- En la ecuación de arriba despejamos el valor buscado de conductividad térmica.

Confiabilidad.- Esta ecuación da errores entre el 2 y 4%.

Efecto de la Temperatura

Excepto para algunas soluciones acuosas, agua y unas cuantas moléculas multihidroxiladas, la conductividad térmica en líquidos disminuye con la temperatura. Por debajo del punto normal de ebullición o cerca de él, el decremento es casi lineal y frecuentemente se representa por:

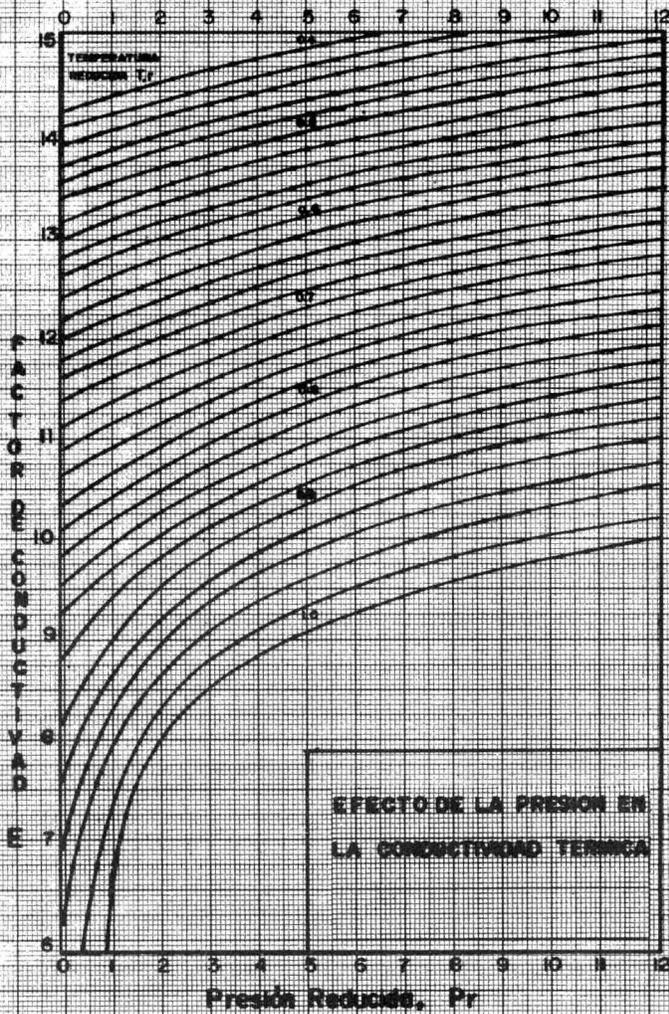
$$k = k_0 [1 + a (T - T_0)]$$

Donde:

k = Conductividad térmica del líquido a la temperatura T

k_0 = Conductividad térmica a la temperatura T_0

a = Es una constante característica de cada uno de los compuestos cuyo valor varía entre -0.0005 y -0.002 $^{\circ}\text{K}^{-1}$.



$$T = 0.8514 \quad Pr = 0.514$$

$$T = 0.8514 \quad Pr = 0.0514$$

A temperaturas cercanas al punto de fusión, la pendiente dk/dT se vuelve a menudo muy pequeña y cerca del punto crítico la pendiente aumenta.

Generalmente las siguientes relaciones nos permiten evaluar -- la conductividad térmica:

Ecuación de Filippov (8,9)

Filippov derivó la siguiente ecuación para la conductividad térmica como una función de la temperatura:

$$k = k_0 (1 - b (t-30^\circ))$$

Donde:

k_0 = Conductividad térmica del líquido a 30°C .

B = Coeficiente de temperatura, (Tabla VIII)

Filippov hace las siguientes conclusiones relativas a la conductividad térmica de líquidos y a la estructura molecular.

a) El cambio en la conductividad térmica en las series de homólogos no es regular, sin embargo frecuentemente la conductividad térmica decrece con el peso molecular.

b) La conductividad térmica de sustancias con moléculas en sus ramas, es baja, como regla general más baja que aquellos isómeros no ramificados.

c) La sustitución de átomos de hidrógeno por halógenos en una cadena de hidrocarburos, decrece la conductividad térmica. Este efecto aumenta desde el fluor hasta el iodo.

d) La presencia de grupos hidroxilos en la molécula, aumenta la conductividad térmica.

e) La introducción de grupos nitro y amino, también aumenta la conductividad térmica.

Filippov concluyó que la conductividad térmica para todas las moléculas investigadas generalmente decrece con la temperatura, con algunas excepciones como etilén glicol, glicerol, etc.,- que siguen una relación inversa a las anteriores.

Ecuación de Vargaftik (11,13)

Vargaftik propuso la siguiente ecuación:

$$k = B d^{1.33}$$

Donde:

k = Conductividad térmica

B = Constante de proporcionalidad para cada uno de los líquidos.

d = Densidad

Esta ecuación ha sido descartada actualmente.

Algunos autores han establecido que la relación de la conductividad térmica de un líquido a varias temperaturas esta dada por:

$$k/k_1 = (d/d_1)^{1.33}$$

Donde:

k, k₁ = Conductividades térmicas a T₁ y T₂

d, d₁ = Densidades a T₁ y T₂

Dick y Cready por medio de sus estudios en hidrocarburos obtuvieron los siguientes resultados:

- a) La conductividad térmica se incrementa al aumentar la longitud de la cadena. Sin embargo desviaciones de esta conclusión son posibles en presencia de ramificaciones en la cadena principal.
- b) Dick y Cready, señalan en su estudio el efecto que produce en el aumento de la conductividad térmica la presencia de los grupos siguientes:

Grupo metilo	12	x 10 ⁻⁶	cal/	cm s	°C
Grupo etilo	3	"	"	"	"
Grupo butilo	6	"	"	"	"
Grupo terbutilo	12	"	"	"	"
Grupo carbonilo	2	"	"	"	"

Tabla VIII. Coeficiente B, de temperatura de líquidos.

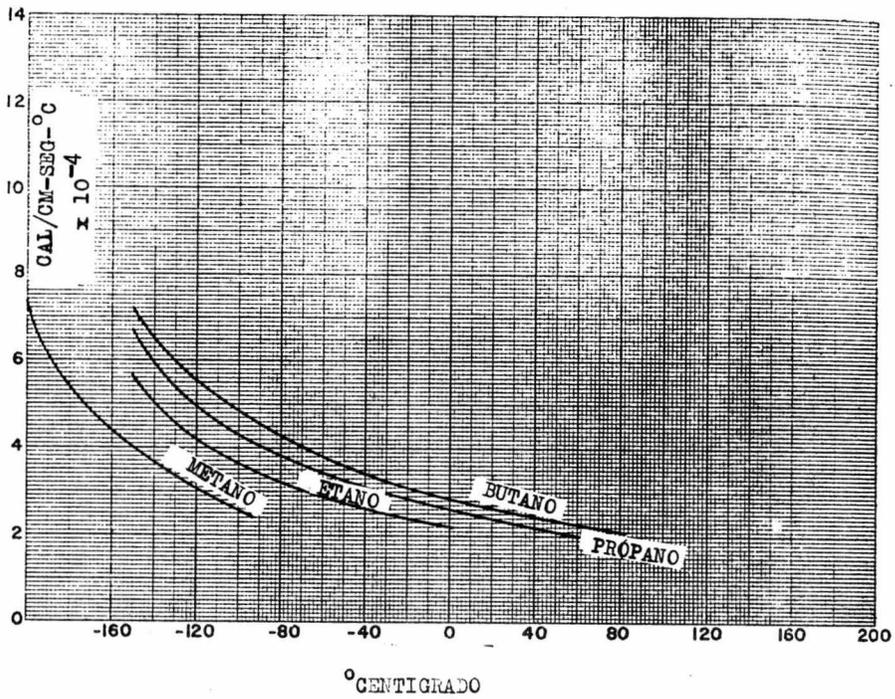
<u>Líquido</u>	<u>B x 10³</u>
Isopentano	2.0
n-hexano	2.0
n-heptano	1.8
Isooctano	1.8
Ciclohexano	1.0
Benceno	1.8
O-Xileno	1.3
Cloroformo	1.8
Tetracloruro de carbono	1.6
Fluorobenceno	1.6
Clorobenceno	1.5
Bromobenceno	1.5
Iodobenceno	0.9
a-Bromonaftaleno	0.3
Metanol	1.2
Etanol	1.4
N-propanol	1.4
Isopropanol	1.1
Butanol	1.4
Isobutanol	1.0
Pentanol	0.9
Isopentanol	0.8
Nonil alcohol	1.1
sec-Octil alcohol	1.0
Etilen glicol	-0.7
glicerol	-1.0
Acido fórmico	0.3
Acido acético	1.2
Acetaldehído	2.0
Anhídrido acético	1.5
Acetona	2.2

Cont.

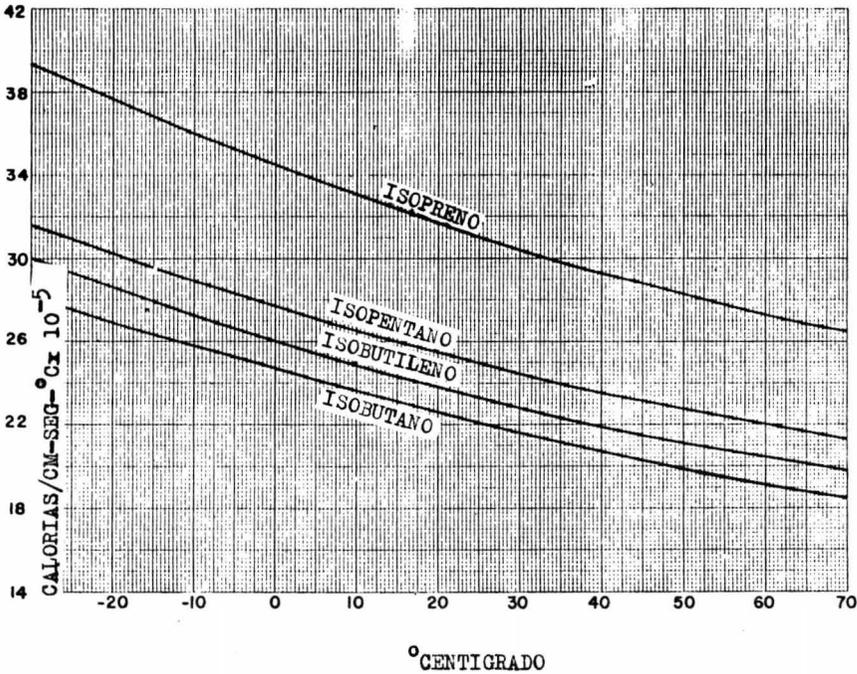
Tabla VIII. Coeficientes **B**, de temperatura de líquidos

<u>Líquido</u>	$B \times 10^3$
Eter	2.3
Metilformato	1.2
Etilformato	3.0
Propilformato	1.7
Butilformato	1.8
Etilacetato	2.1
Butilacetato	1.9
Nitrobenceno	1.0
Anilina	0.4
Dietilanilina	0.7
Quinoleína	1.9

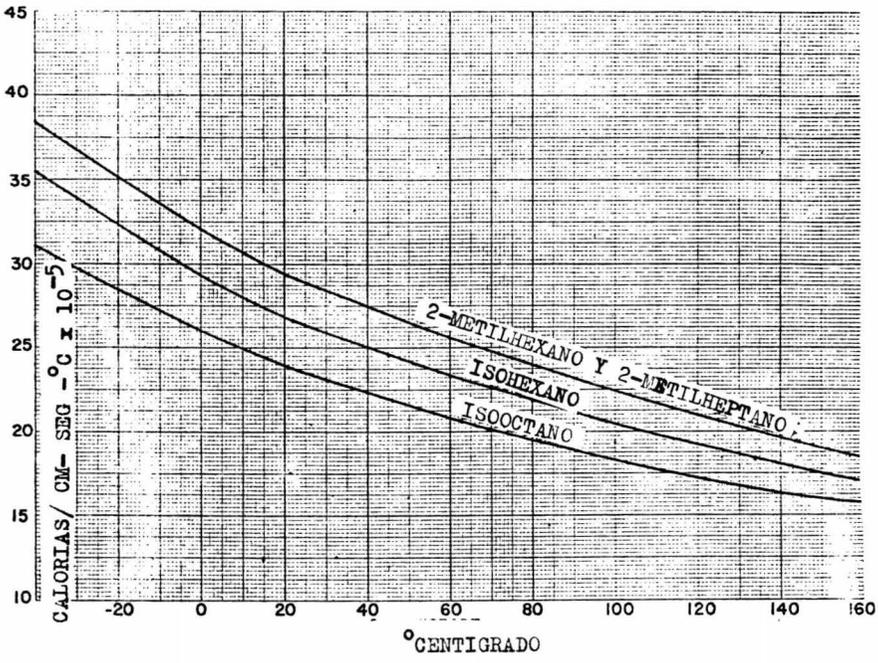
DATOS SOBRE LA INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA EN LA
CONDUCTIVIDAD TERMICA DE LIQUIDOS PUROS.



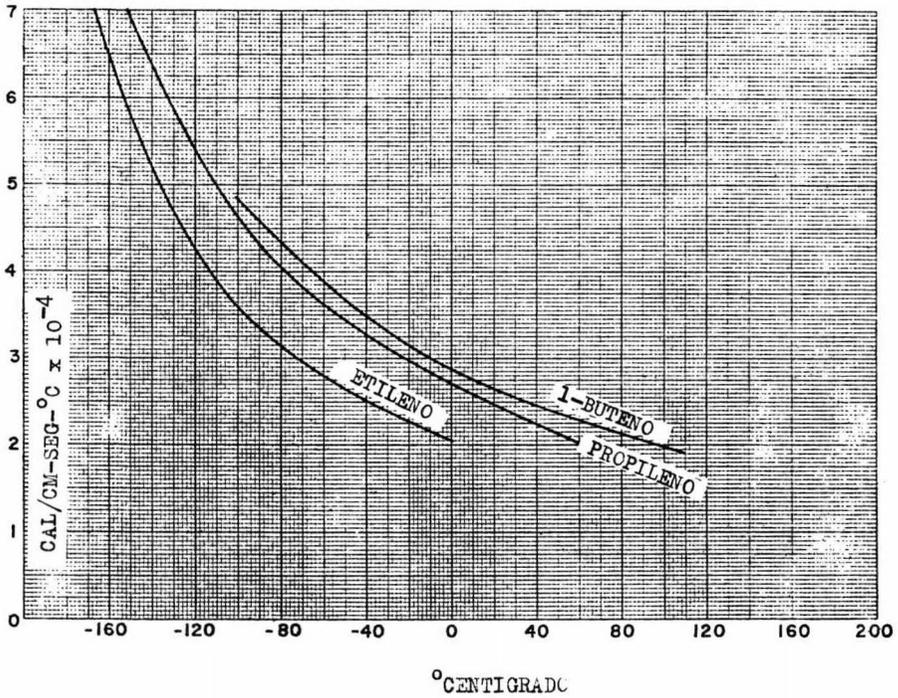
CONDUCTIVIDAD TERMICA DE ALCANOS C₁-C₄



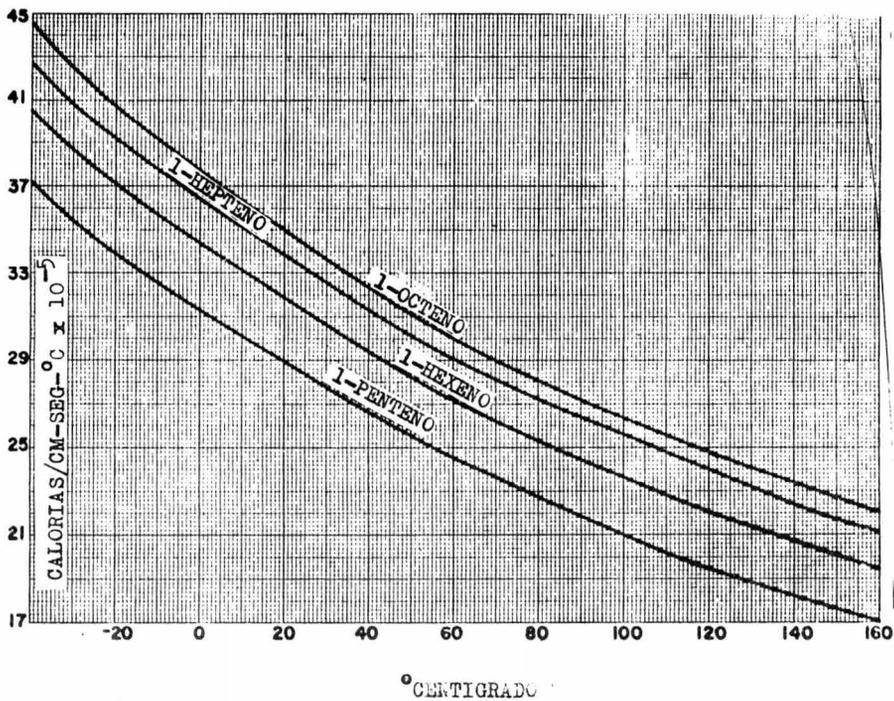
CONDUCTIVIDAD TERMICA DE HIDROCARBUROS RAMIFICADOS C₄-C₅ DESDE
-30 °C A 70 °C



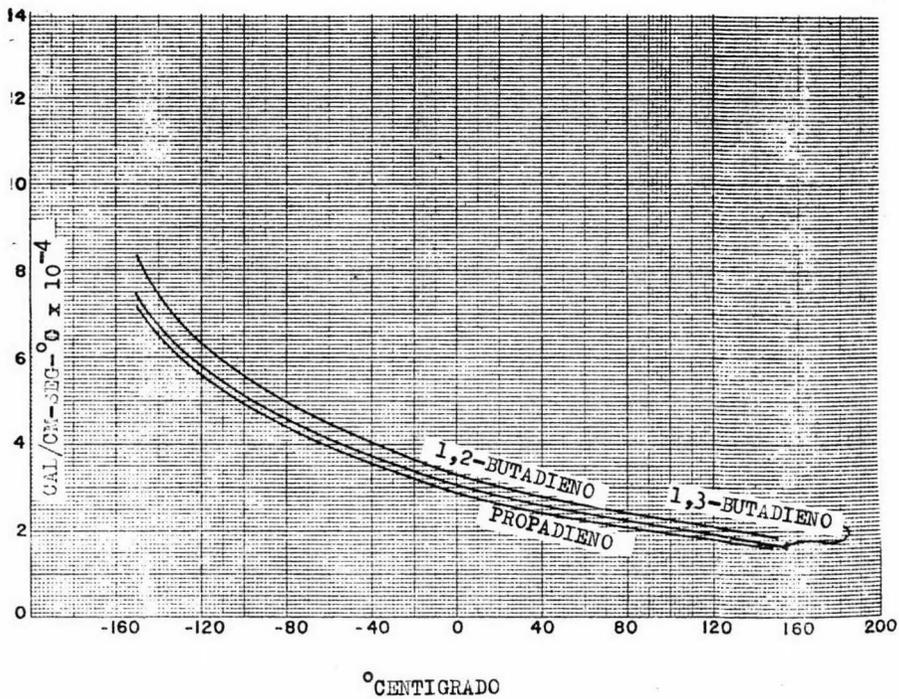
CONDUCTIVIDAD TERMICA DE HIDROCARBUROS RAMIFICADOS C₆-C₈
 DESDE -40°C a 160°C.



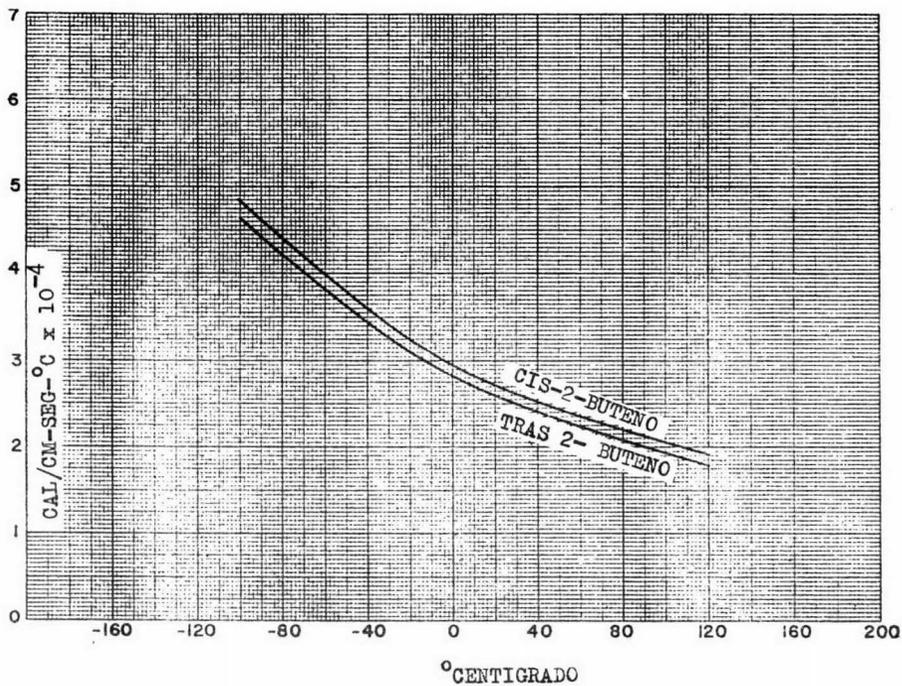
CONDUCTIVIDAD TERMICA DE OLEFINAS C_2-C_4



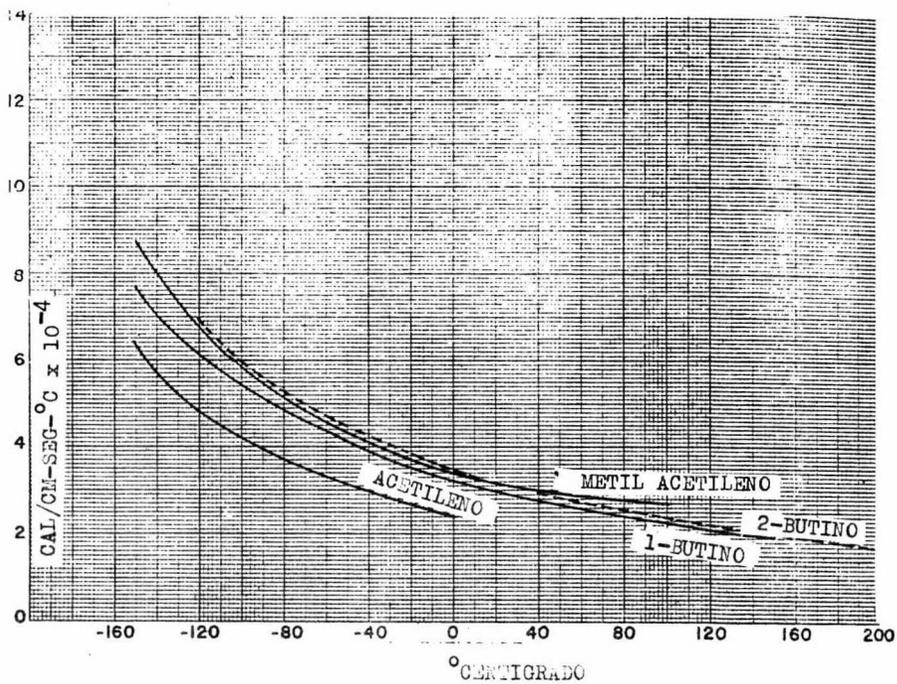
CONDUCTIVIDAD TERMICA DE ALQUENOS C_5-C_8 DESDE -40 a 160 $^{\circ}\text{C}$



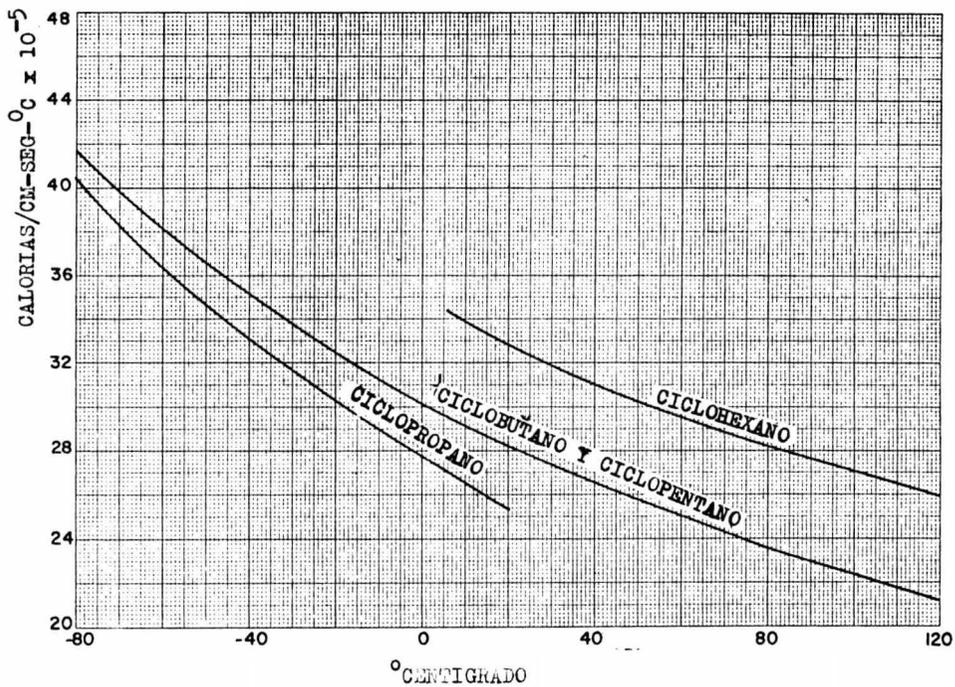
CONDUCTIVIDAD TERMICA DE PROPADIENO Y BUTADIENOS DESDE - 150 a 150°C



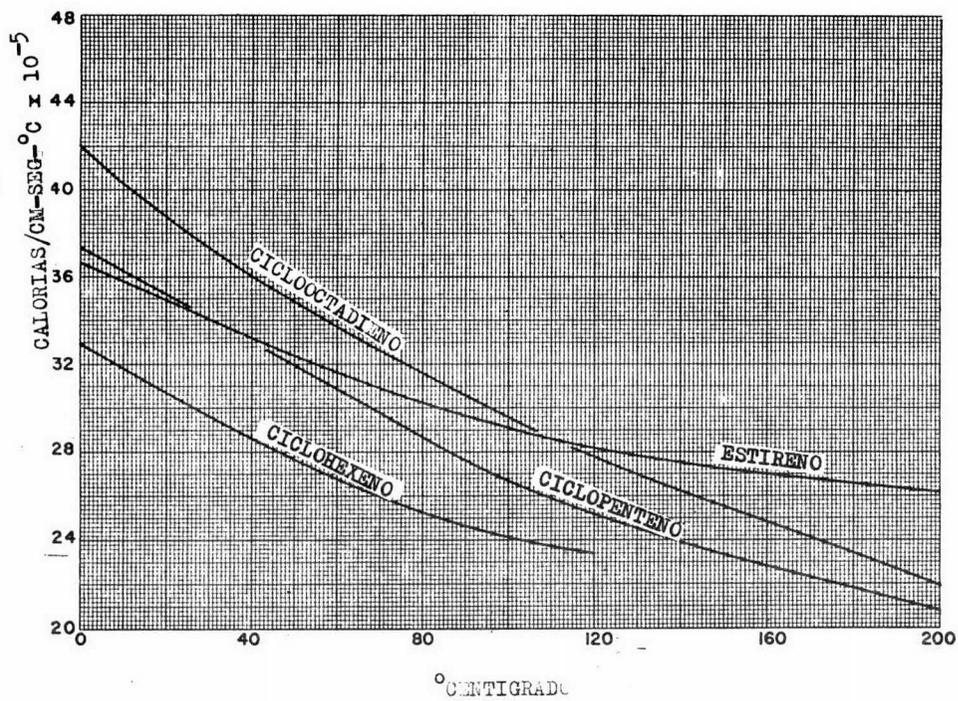
CONDUCTIVIDAD TERMICA DE 2-BUTENOS DESDE - 110 a 120 $^\circ\text{C}$



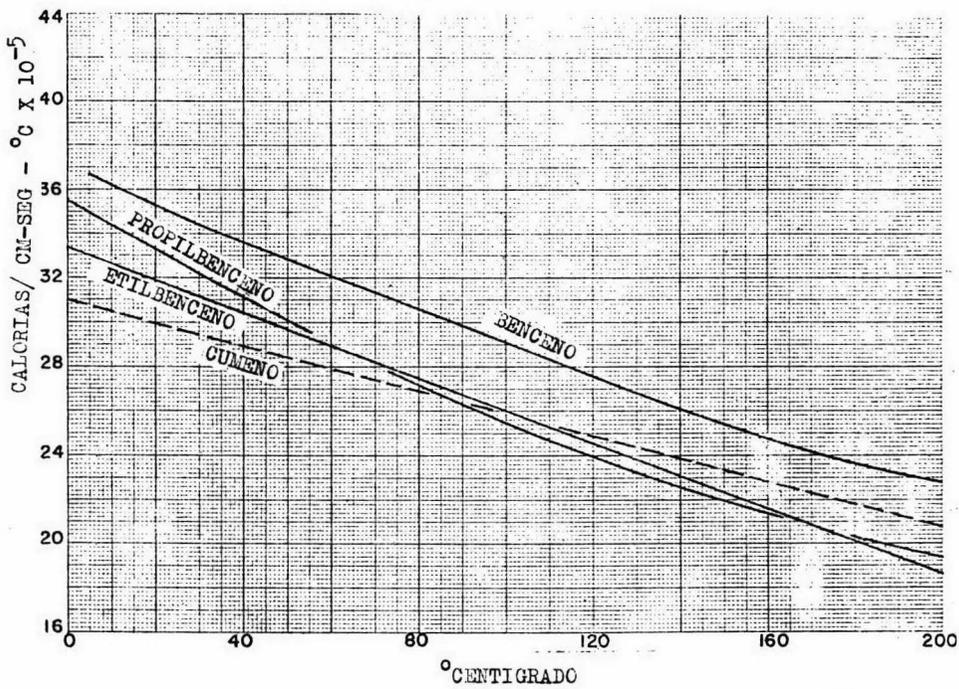
CONDUCTIVIDAD TERMICA DE ALQUINOS $\text{C}_2\text{-C}_4$



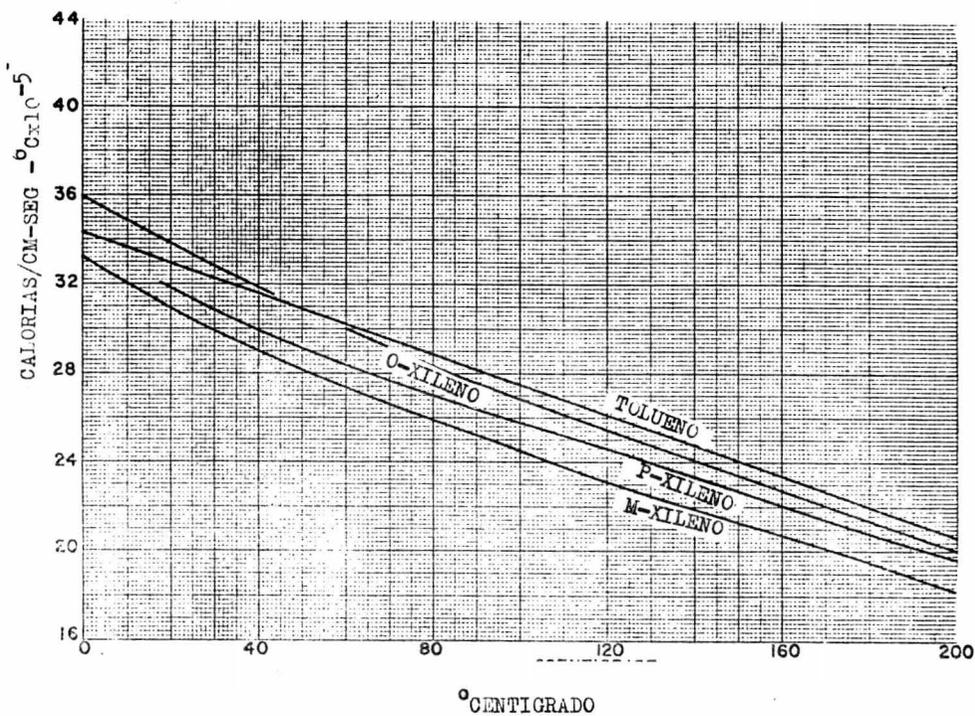
CONDUCTIVIDAD TÈRMICA DE HIDROCARBUROS CÌCLICOS DESDE -80°C A 120°C



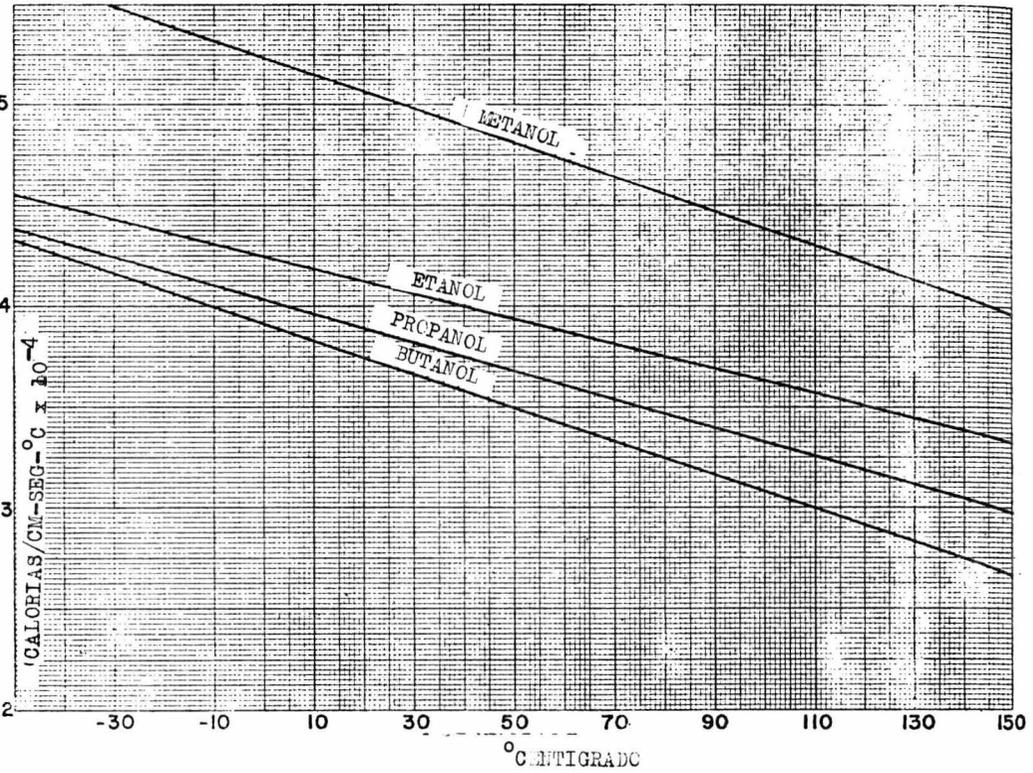
CONDUCTIVIDAD TERMICA DE COMPUESTOS CICLICOS DE 0 A 200 $^{\circ}\text{C}$



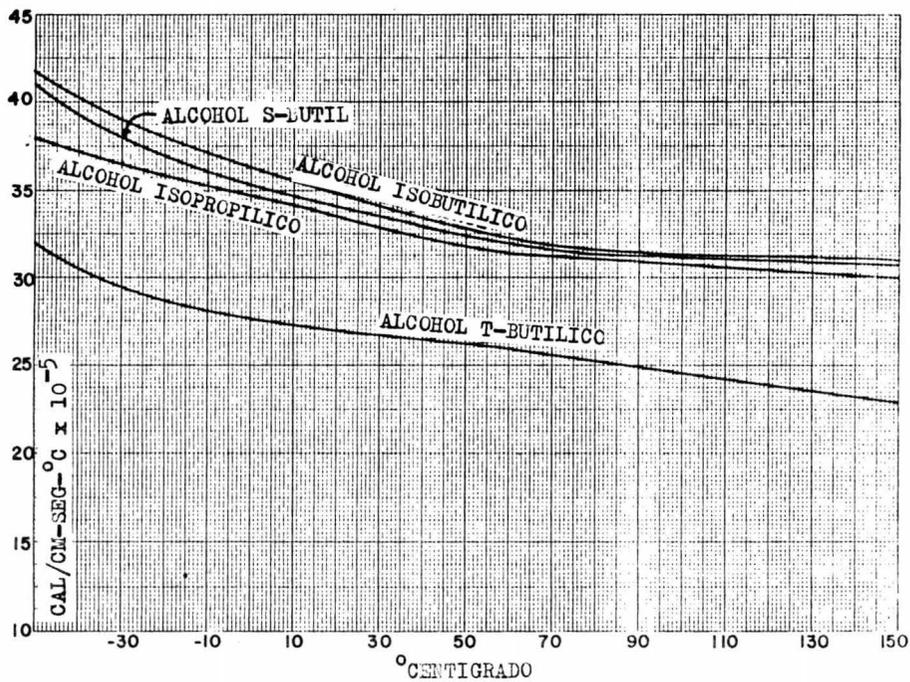
CONDUCTIVIDAD TERMICA DE COMPUESTOS DE BENCENO DESDE 0 A 200 °C



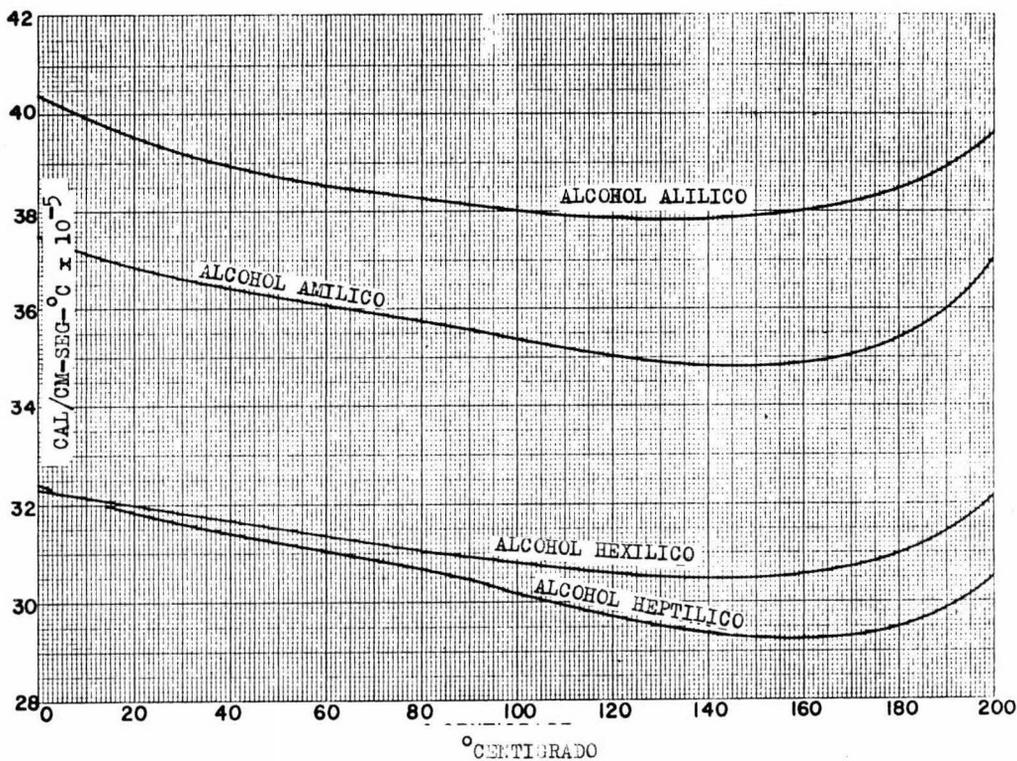
CONDUCTIVIDAD TERMICA DE TOLUENO Y XILENCS DESDE 0 A 200 $^{\circ}\text{C}$



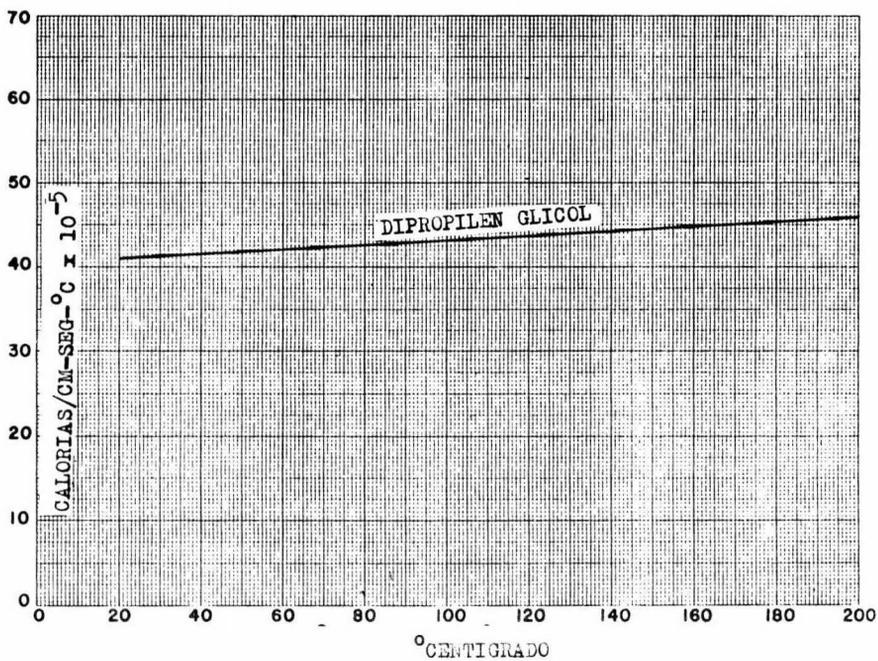
CONDUCTIVIDAD TERMICA DE ALCOHOLES DESDE -30°C a 150°C



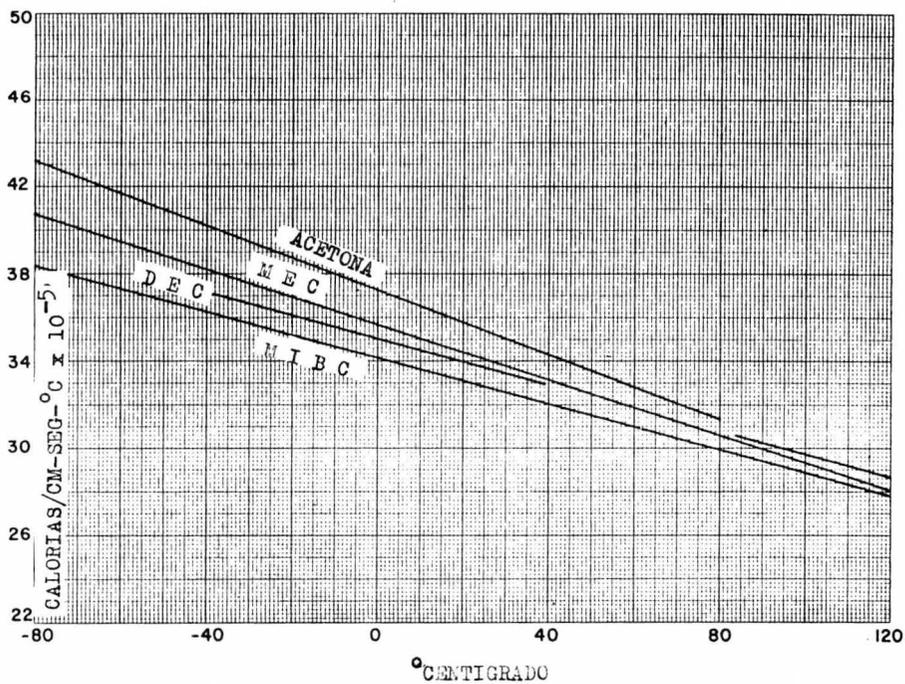
CONDUCTIVIDAD TERMICA DE ALCOHOLES DESDE -50°C A 150°C



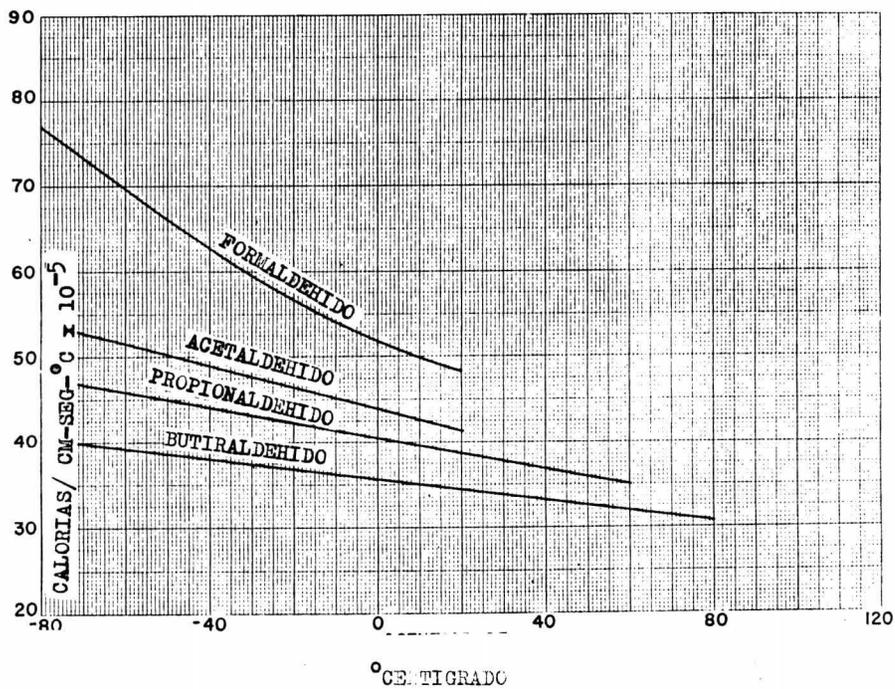
CONDUCTIVIDAD TERMICA DE VARIOS ALCOHOLES



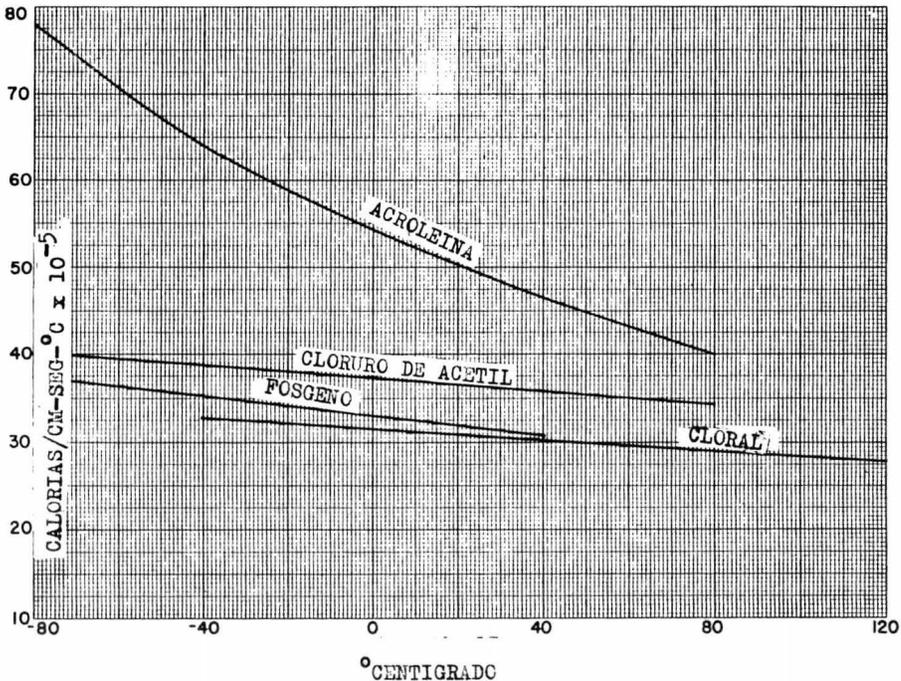
CONDUCTIVIDAD TERMICA PARA DIPROPILEN GLICOL DESDE 20 A 200 °C



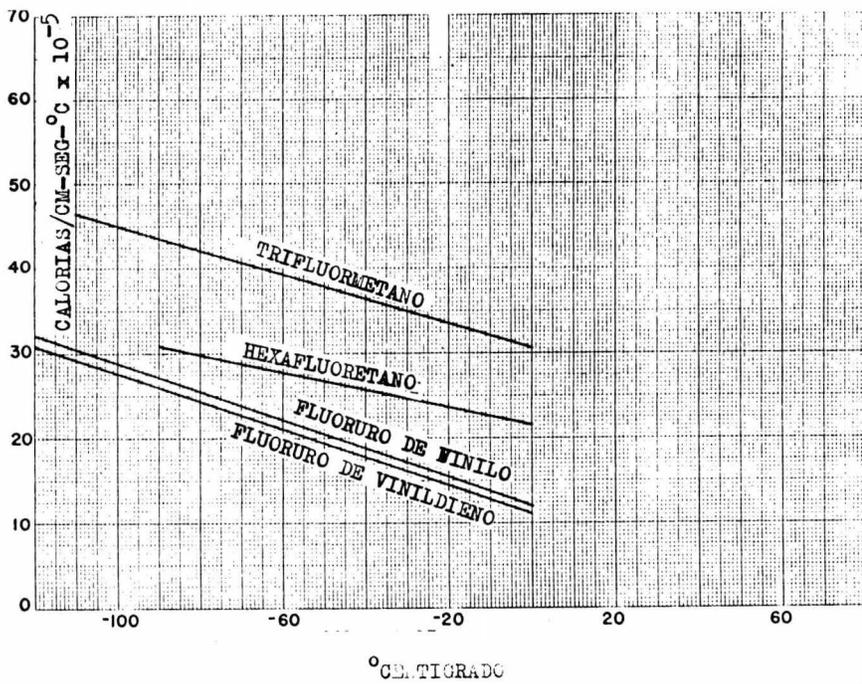
CONDUCTIVIDAD TERMICA DE CETONAS DESDE -80°C a 120°C



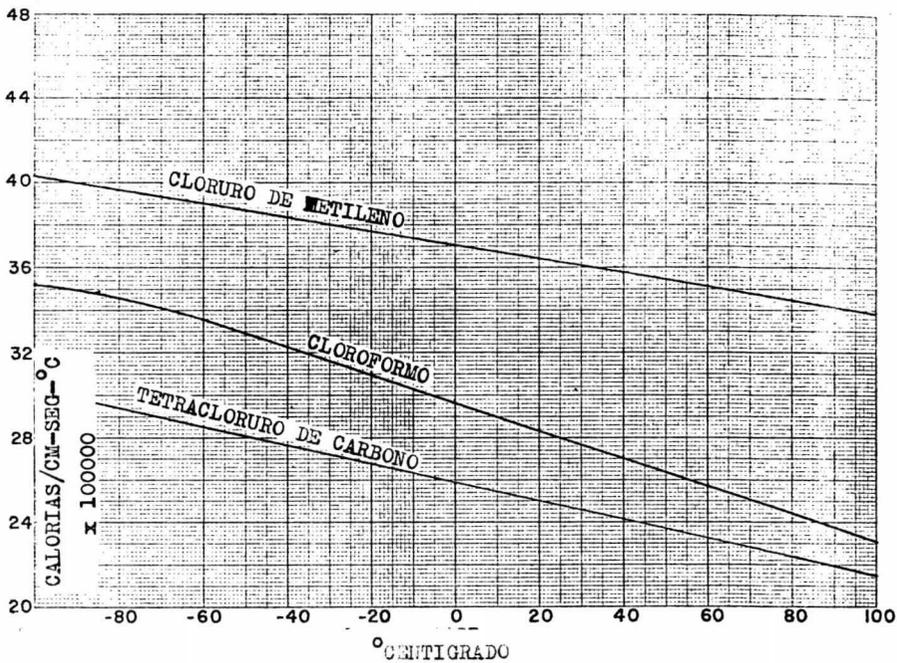
CONDUCTIVIDAD TERMICA DE ALDEHIDOS C_1-C_4 DESDE -80°C A 80°C



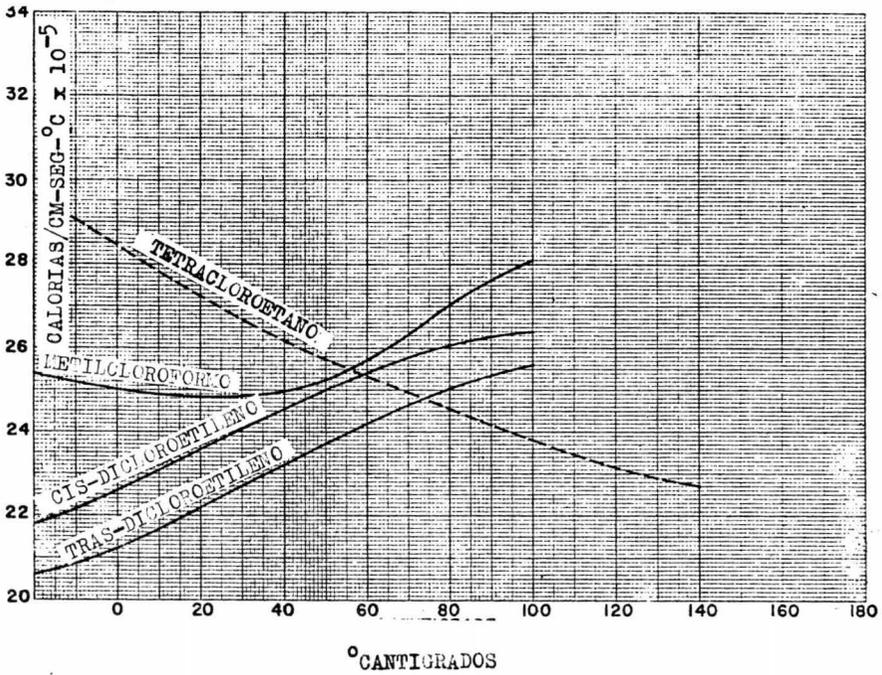
CONDUCTIVIDAD TERMICA DE ALGUNOS ALDEHIDOS DE -80 a 120 $^{\circ}\text{C}$



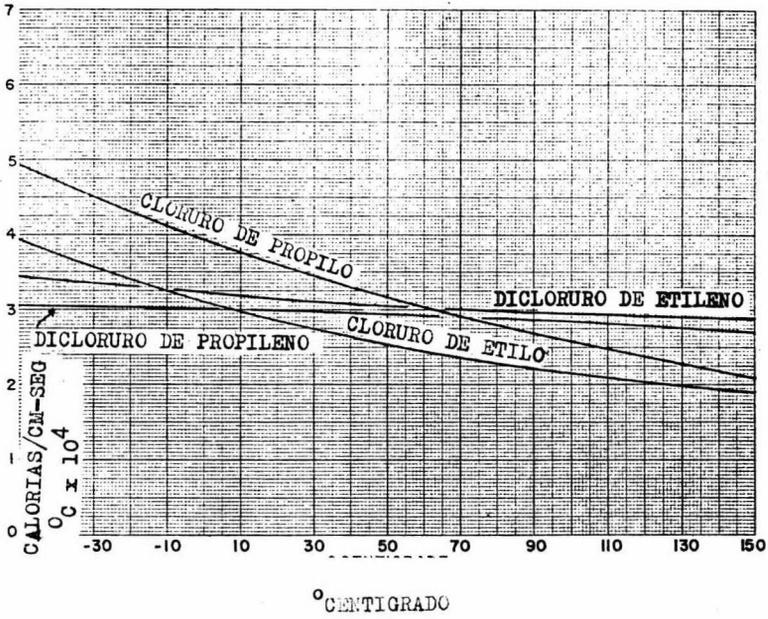
CONDUCTIVIDAD TERMICA DE HIDROCARBUROS FLUORADOS DESDE -120 A 0 $^\circ\text{C}$



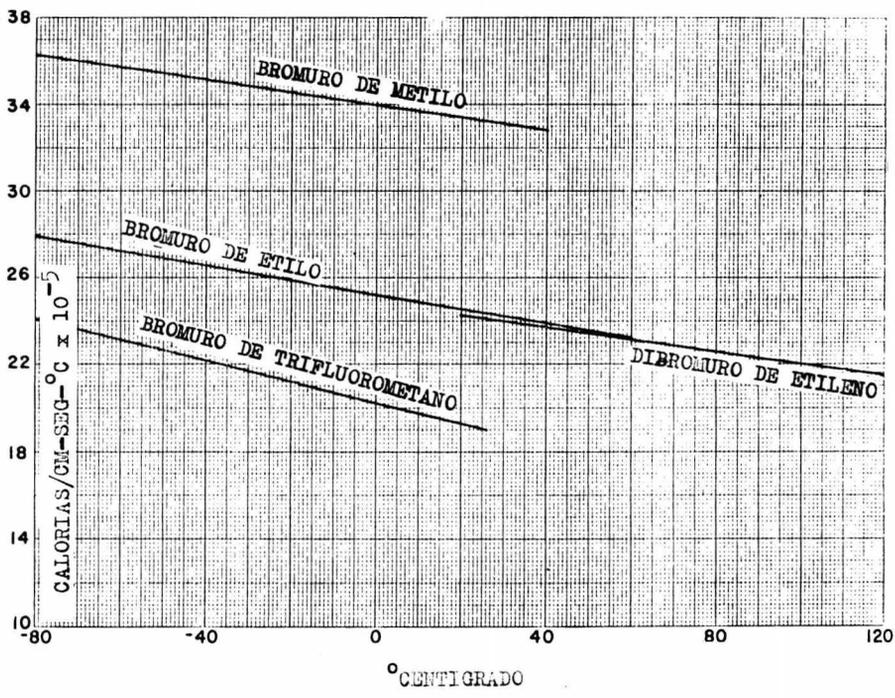
CONDUCTIVIDAD TERMICA DE COMPUESTOS CLORADOS DESDE -80 A 100 $^{\circ}\text{C}$



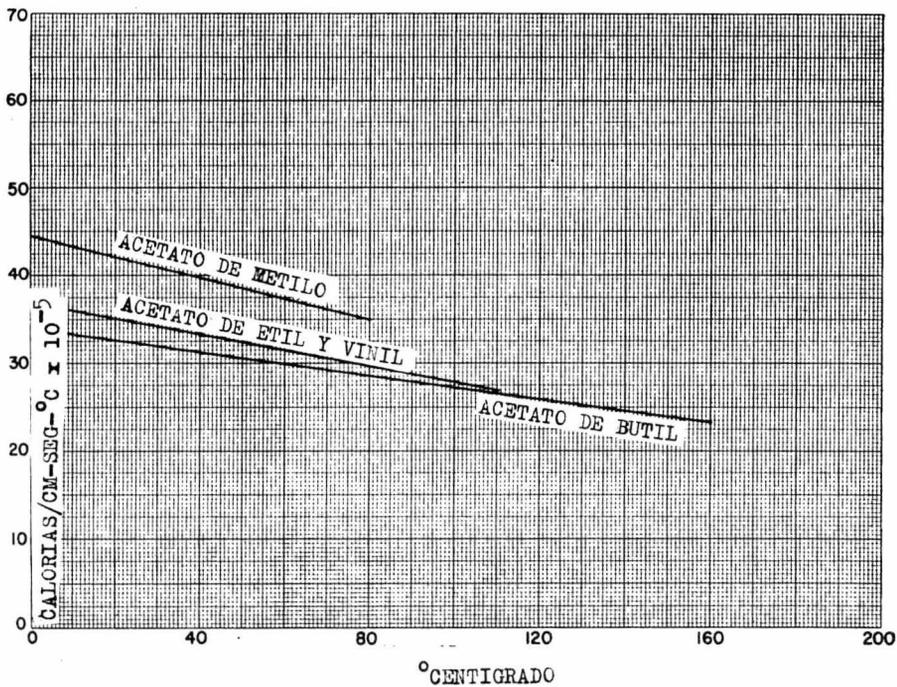
CONDUCTIVIDAD TERMICA PARA HIDROCARBUROS CLORADOS C_2
 DESDE $-20^{\circ}C$ A $100^{\circ}C$.



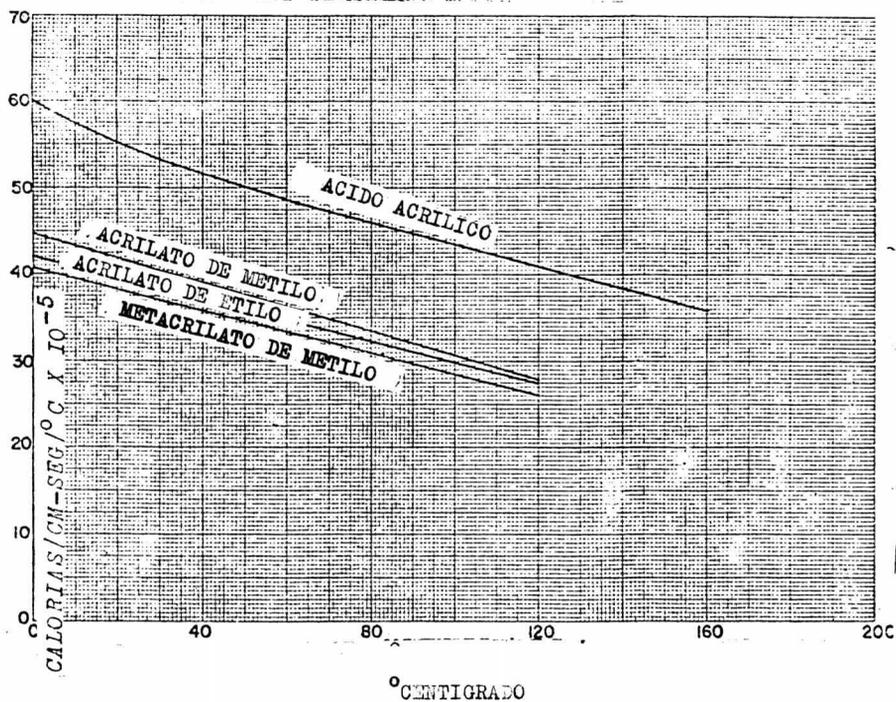
CONDUCTIVIDAD TERMICA DE -30°C A 150°C



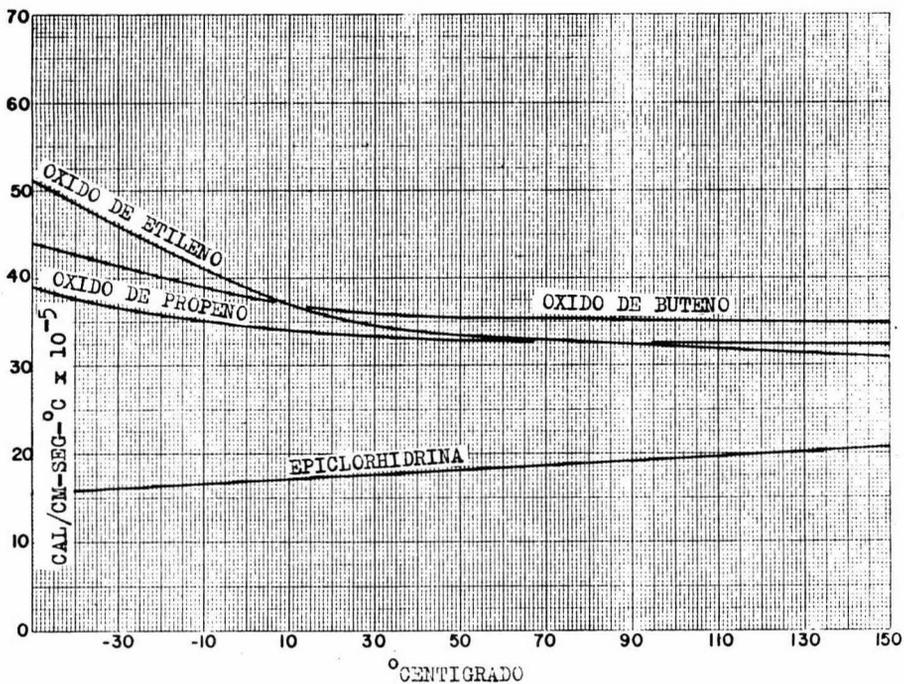
CONDUCTIVIDAD TERMICA DE HIDROCARBUROS BROMADOS DESDE -80 A 120 °C



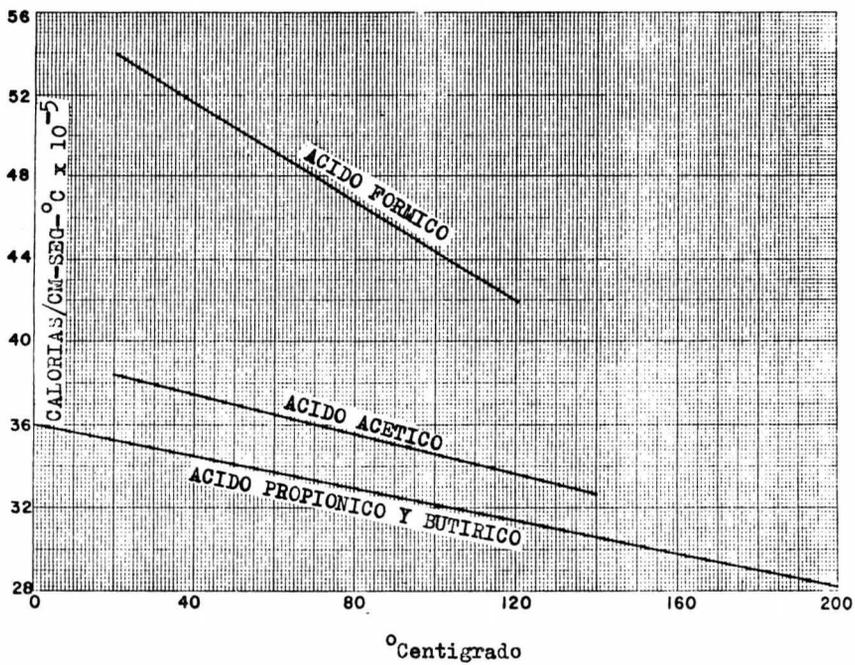
CONDUCTIVIDAD TERMICA DE ACETATOS DESDE 0 °C A 160 °C



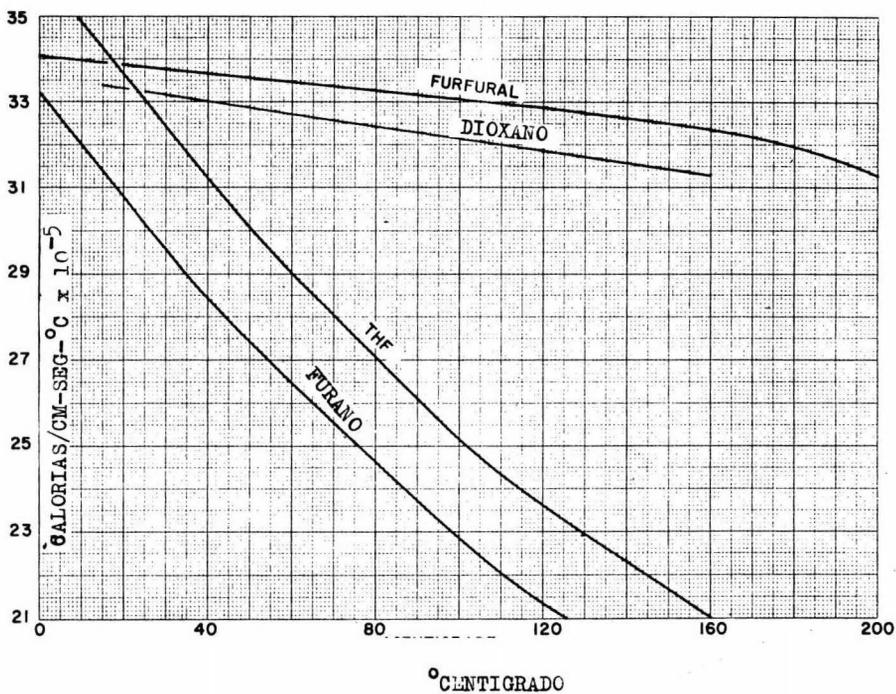
CONDUCTIVIDAD TERMICA DE ACRILATOS DESDE 0 °C A 160 °C



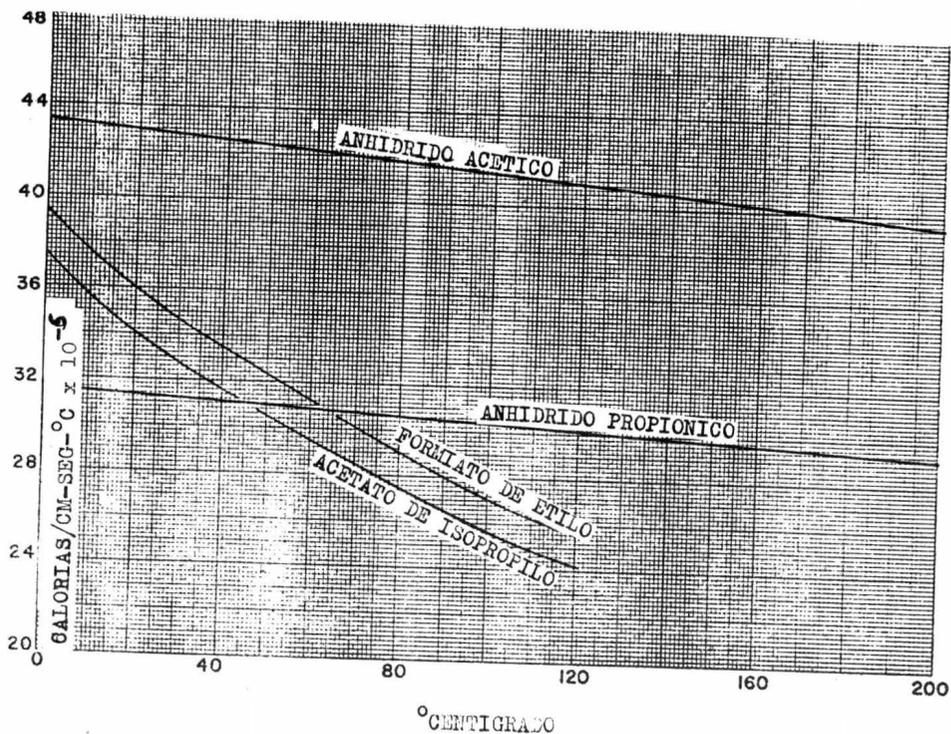
CONDUCTIVIDAD TERMICA DE OXIDOS C_2-C_4 DESDE -50°C A 150°C



CONDUCTIVIDAD TERMICA DE ACIDOS DE C₁ A C₄.



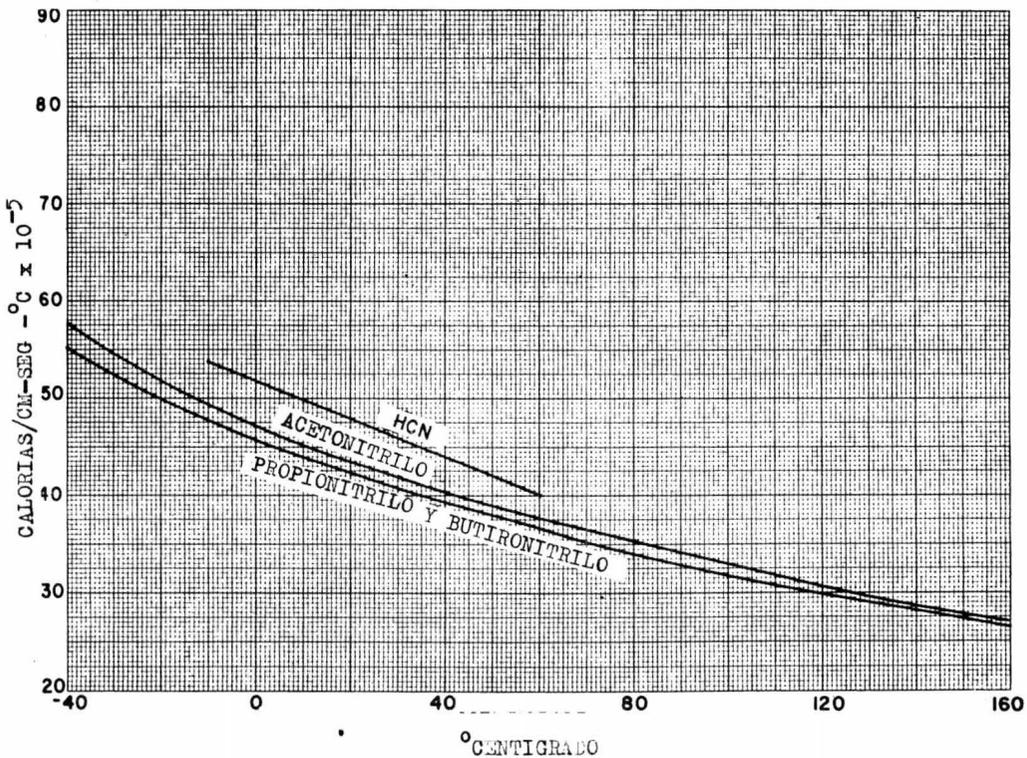
CONDUCTIVIDAD TERMICA DE ETERES CICLICOS DESDE 0 $^\circ\text{C}$ A 200 $^\circ\text{C}$



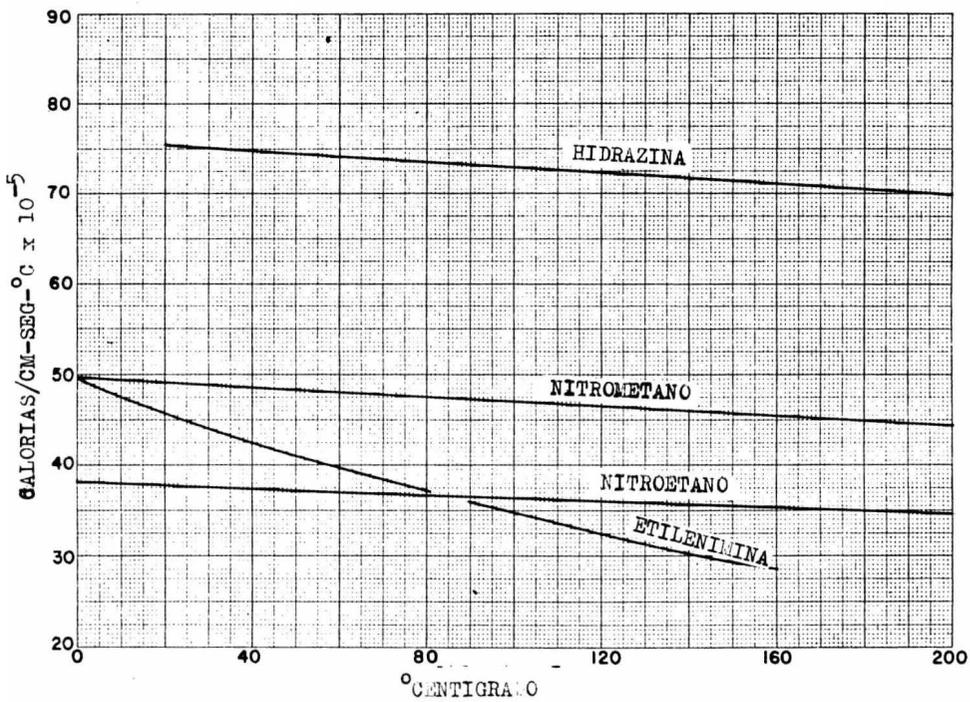
CONDUCTIVIDAD TERMICA DE ESTERES DESDE 0 °C A 200 °C



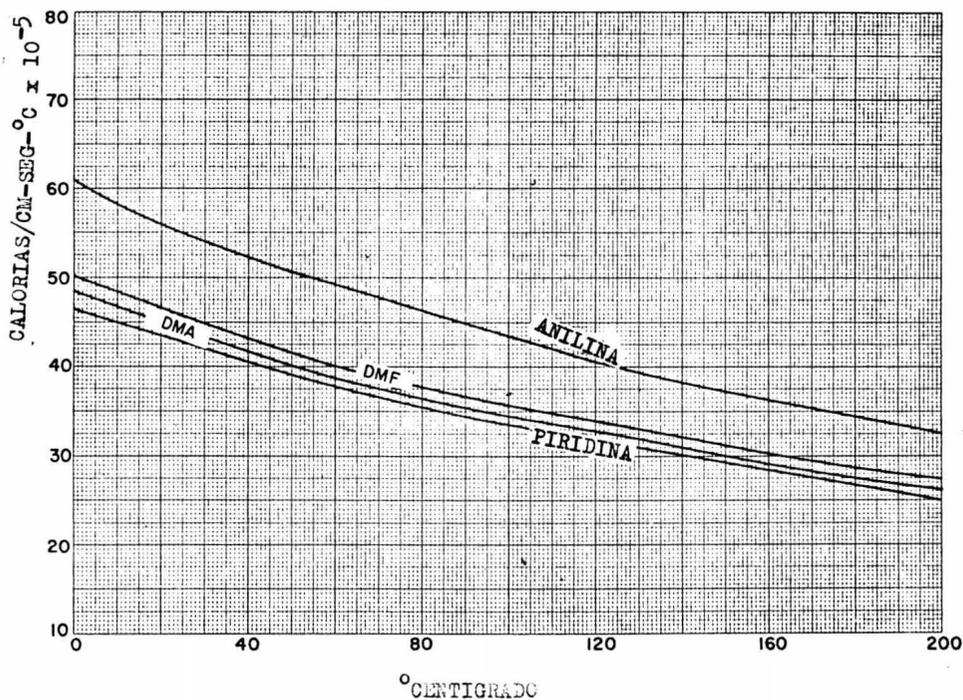
QUIMICA



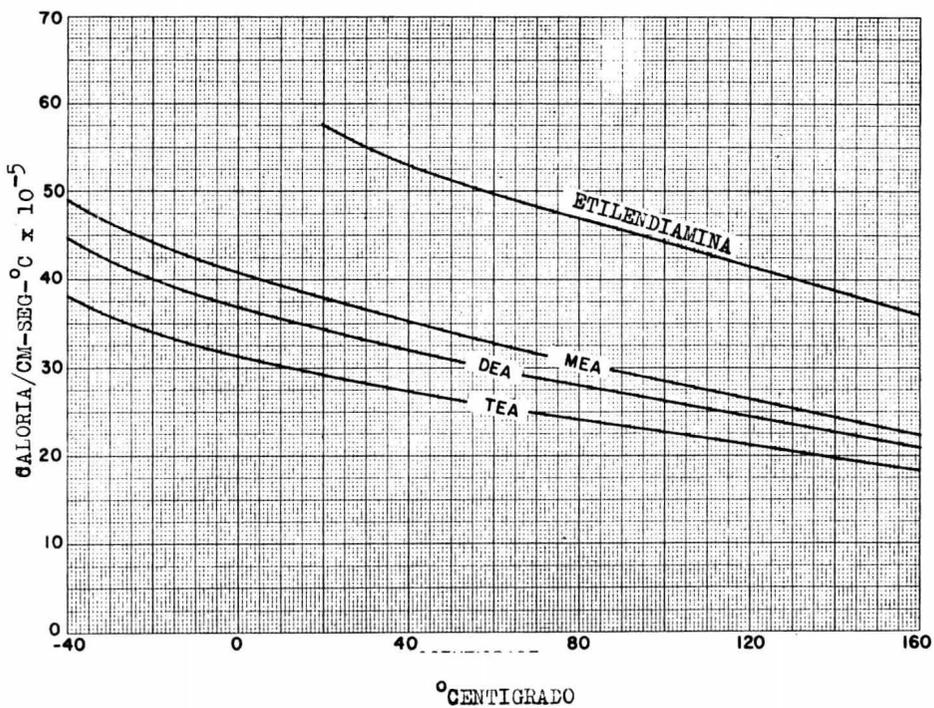
CONDUCTIVIDAD TERMICA DE NITRILOS DESDE -40°C A 160°C



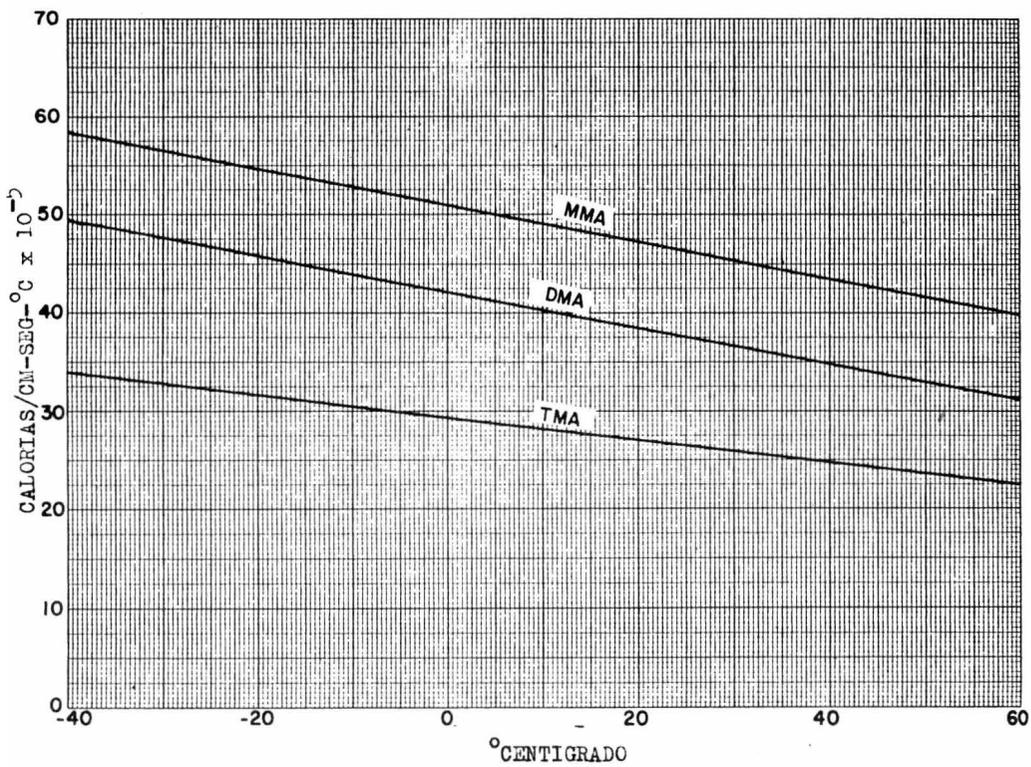
CONDUCTIVIDAD TERMICA DE COMPUESTOS QUE CONTIENEN NITROGENO



CONDUCTIVIDAD TERMICA DE ALGUNOS COMPUESTOS DE NITROGENO



CONDUCTIVIDAD TERMICA DE ETILAMINAS DESDE -40°C a 160°C



CONDUCTIVIDAD TERMICA DE METILAMINAS DESDE -40°C A 60°C

DATOS SOBRE LA INFLUENCIA DE LA CONCENTRACION EN
LA CONDUCTIVIDAD TERMICA DE MEZCLAS BINARIAS.

x	k	x	k	x	k
Acetona 1-Heptano		Acetona Tolueno		Benceno Metanol	
0	153.3	0	140.0	0	152.0*
0.25	153.8	0.25	147.6	0.20	162.7
0.50	156.7	0.50	154.5	0.25	165.5
0.75	162.0	0.75	161.6	0.40	169.6
1.0	171.1	1.0	171.1	0.50	172.2
				0.60	182.4
				0.75	197.6
				0.80	192.5
				1.0	209.6
Acetona 1-Hexanol		Anilina Metanol		Benceno Tetrabromoetano	
0	152.6	0	172.5*	0	87.7
0.25	151.7	0.10	177.5	0.25	99.6
0.50	157.3	0.25	185.8	0.50	120.5
0.75	161.1	0.50	189.8	0.75	138.8
1.0	171.1	0.75	200.1	1.0	152.0*
		1.0	209.6		
Acetona Metanol		Anilina Nitrobenceno		Benceno Tolueno	
0	171.1	0	151.0*	0	140.0
0.25	180.1	0.1	149.6	0.25	143.1
0.50	189.3	0.25	154.1	0.5	144.1
0.75	197.5	0.50	162.7	0.75	146.5
1.0	209.6	0.75	164.1	0.80	149.2
		0.90	169.6	1.0	152.0*
		1.0	172.5*		
Acetona 1-Pentanol		Benceno Diclorometano		Bromoetano Tetracloruro de C.	
0	152.9	0	152.0*	0	108.2
0.25	152.8	0.10	148.3	0.25	107.7
0.50	157.1	0.25	151.5	0.50	105.0
0.75	161.9	0.50	143.9	0.75	106.0
1.0	171.1	0.75	152.3	1.0	108.2
		1.0	152.7		
Acetona 2-Propanol					
0	139.8				
0.25	145.3				
0.5	153.4				
0.75	162.8				
1.0	171.1				

x	k	x	k	x	k
Acetaldehido Dietil Eter		Acetona Anilina		Acetona Terbutanol	
0	140.9	0	171.1	0	114.3*
0.20	146.9	0.25	173.4	0.20	121.8
0.25	146.0	0.50	175.9	0.25	125.9
0.40	155.8	0.75	170.3	0.50	143.3
0.50	154.7	1.0	172.5*	0.75	159.2
0.60	172.0			1.0	171.1
0.75	186.6				
0.80	191.2				
1.0	200.5				
Acetaldehido Tolueno		Acetona 1-Butanol		Acetona Tetracloruro de carbono	
0	140.0	0	154.5	0	108.2
0.20	147.9	0.25	157.2	0.20	113.9
0.25	149.5	0.50	161.4	0.25	118.5
0.40	162.2	0.75	164.2	0.30	120.8
0.50	164.2	1.0	171.1	0.40	129.5
0.60	168.7			0.50	131.8
0.75	172.0			0.60	140.9
0.80	188.0			0.70	156.6
1.0	200.5			0.75	154.4
				0.80	163.5
				1.0	171.1
Anhidrido Acético Acetona		Acetona Isobutanol		Acetona 1:2 Dicloroetano	
0	169.8	0	137.7	0	140.4
0.25	167.7	0.25	144.2	0.15	139.2
0.50	167.4	0.50	151.4	0.20	143.3
0.75	172.0	0.60	152.5	0.25	144.8
1.0	171.1	0.75	155.8	0.40	149.2
		0.80	161.1	0.50	154.3
		1.0	171.1	0.60	155.9
				0.75	169.6
				0.80	163.9
				0.85	163.2
				1.0	171.1
Anhidrido Acético Tetracloruro de Carbono		Acetona 2-Butanol			
0	108.2	0	139.7		
0.25	117.2	0.25	144.8		
0.50	131.7	0.50	152.8		
0.75	149.8	0.75	160.4		
1.0	169.8	1.0	171.1		

x	k	x	k	x	k
1-Butanol Tetracloruro de Carbono		Isobutanol Tetracloruro de C.		Acetato de N-Butil Tolueno	
0	108.2	0	108.2	0	140.0
0.2	110.1	0.10	106.0	0.25	139.8
0.25	110.6	0.15	105.7	0.50	141.2
0.50	123.8	0.20	105.9	0.75	145.9
0.75	138.7	0.25	106.4	1.0	142.3
0.80	142.8	0.30	106.0		
1.0	154.5	0.50	115.7	Tetracloruro de C. Eter Dibutílico	
		0.75	124.8	0	108.2
		1.0	137.7	0.15	106.5
1-Butanol Tolueno		Terbutanol Tetracloruro de C.		0.25	106.2
0	140.0	0	108.2	0.40	113.7
0.25	142.2	0.10	104.4	0.50	114.7
0.50	145.9	0.20	101.7	0.75	125.6
0.75	148.7	0.25	100.1	0.85	123.4
1.0	154.5	0.30	100.2	1.0	135.5
		0.50	101.8	Tetracloruro de C. Dicloro Metano	
		0.65	104.0	0	108.2
		0.75	106.5	0.20	112.2
		1.0	114.3*	0.25	113.4
2-Butanol Tetracloruro de C.		Terbutanol Tolueno		0.40	119.1
0	108.2	0	114.3*	0.50	122.4
0.10	105.6	0.25	116.7	0.75	136.2
0.20	105.7	0.50	125.5	1.0	152.7
0.25	108.8	0.75	134.0	Tetracloruro de C. Eter Dietílico	
0.30	110.3	1.0	140.0	0	108.2
0.40	111.7	Acetato de N-Butil Dietil Eter		0.10	106.3
0.50	114.5	0	140.9	0.20	107.5
0.75	128.5	0.25	145.8	0.25	107.7
1.0	139.7	0.50	140.9	0.35	112.3
		0.75	143.0	0.50	118.3
		1.0	142.3	0.75	130.4
2-Butanol Tolueno				1.0	140.9
0	139.7				
0.25	140.3				
0.50	142.0				
0.75	139.2				
1.0	140.0				

x	k	x	k	x	k
Eter Dietilico Nitrobenceno		1-Hexanol Tolueno		Nitrobenceno Tolueno	
0	140.9	0	140.0	0	140.0
0.25	146.0	0.25	142.8	0.25	143.6
0.50	147.5	0.50	143.6	0.50	143.8
0.75	146.8	0.75	147.7	0.75	146.5
0.90	153.5	1.0	152.6	0.90	148.7
1.0	151.0*			1.0	151.0*
Eter Dietilico Tetrabromoetano		Metanol Nitrobenceno		1-Pentanol Tolueno	
0	87.7	0	151.0*	0	140.0
0.25	95.2	0.10	154.5	0.25	141.9
0.50	111.3	0.25	164.8	0.50	146.7
0.75	130.4	0.50	178.0	0.75	148.8
1.0	140.9	0.75	195.4	1.0	152.9
		1.0	209.6		
Eter Dietilico Tolueno		Metanol Tolueno		2-Propanol Tolueno	
0	140.0	0	140.0	0	139.8
0.25	140.7	0.20	149.3	0.25	139.1
0.50	141.3	0.25	152.1	0.50	139.1
0.75	142.0	0.40	160.2	0.75	138.2
1.0	140.9	0.50	168.7	1.0	140.0
		0.60	169.4		
		0.75	186.5		
		0.80	187.5		
		1.0	209.6		
1-Heptanol Tolueno				Tetrabromoetano Tolueno	
0	140.0			0	87.7
0.25	140.8			0.25	95.9
0.50	145.0			0.50	113.5
0.75	150.4			0.75	129.0
1.0	153.3			1.0	140.0

x	k	x	k	x	k
Tetracloruro de C. 1-Heptanol		Tetracloruro de C. 2-Propanol		Eter Dibutilico Metanol	
0	108.2	0	108.2	0	135.5
0.20	110.0	0.10	106.2	0.25	145.4
0.25	109.9	0.15	106.5	0.40	156.2
0.30	114.1	0.20	106.9	0.50	161.2
0.40	119.5	0.25	108.0	0.60	170.4
0.50	124.0	0.40	111.9	0.75	180.8
0.60	128.2	0.50	117.3	1.0	209.6
0.75	139.4	0.75	128.3		
1.0	153.3	1.0	139.8		
Tetracloruro de C. 1-Hexanol		Tetracloruro de C. Tolueno		1:2 Dicloroetano Eter Dietilico	
0	108.2	0	108.2	0	140.4
0.25	110.8	0.25	110.7	0.25	138.9
0.40	117.7	0.50	120.0	0.50	135.8
0.50	122.6	0.75	129.9	0.75	138.9
0.60	128.2	1.0	140.0	1.0	140.9
0.75	139.8				
1.0	152.6				
Tetracloruro de C. Metanol		Cloroformo Eter Dibutilico		Diclorometano Eter Dietilico	
0	108.2	0	124.3	0	140.9
0.20	118.4	0.15	119.3	0.20	139.0
0.25	123.4	0.25	117.8	0.25	137.5
0.40	139.6	0.40	117.9	0.40	134.8
0.50	151.0	0.50	120.1	0.50	135.5
0.60	160.9	0.75	127.6	0.60	134.2
0.70	174.3	0.85	125.1	0.75	138.4
0.75	185.3	1.0	135.5	0.80	140.4
0.80	186.3			1.0	152.7
1.0	209.6				
Tetracloruro de C. 1-Pentanol		Cloroformo Eter Dietilico		Eter Dietilico Metanol	
0	108.2	0	124.3	0	140.9
0.25	110.3	0.25	120.9	0.20	153.7
0.40	117.7	0.35	118.8	0.25	153.9
0.50	123.4	0.50	122.0	0.40	159.9
0.75	139.4	0.75	132.9	0.50	173.0
1.0	152.9	1.0	140.9	0.60	174.0
				0.75	187.5
				0.80	196.5
				1.0	209.6

C O N C L U S I O N E S

- 1.- Los modelos teóricos que existen hasta la actualidad para calcular la conductividad térmica de líquidos puros, no dan resultados completamente satisfactorios. La mayoría de estos métodos, involucran el conocimiento de variables poco comunes, las cuales difícilmente se encuentran en la literatura. Esta dificultad limita la aplicación de estos modelos.
- 2.- Los modelos empíricos para calcular la conductividad térmica de líquidos puros, actualmente son de gran utilidad, pues los resultados obtenidos en muchos casos son algo más satisfactorios que en el caso de los modelos teóricos. En éste trabajo se presentan los modelos empíricos más útiles.
- 3.- Siguiendo el criterio de exactitud y sencillez de uso, de los modelos propuestos tanto teóricos como empíricos, los más recomendables son los modelos de Sheffy y Jhonson y el de Robbins y Kingrea.
- 4.- En el capítulo seis, se presentan los principales modelos teóricos y empíricos para calcular la conductividad térmica de mezclas binarias de líquidos. Pese a la importancia de las mezclas binarias de líquidos, son pocos estudios los que se han realizado sobre su conductividad térmica, sin embargo, los resultados obtenidos son significativamente satisfactorios.
- 5.- El método más útil para calcular la conductividad térmica de mezclas binarias es el de Jordan y Coates.
- 6.- El método más conocido que existe para mezclas multicomponentes es el llamado método aditivo, el cual da resultados poco confiables.
- 7.- La conductividad térmica de los líquidos aumenta ligeramente con la presión y éste cambio es menor a mayores presiones donde muchas veces llega a despreciarse.
- 8.- La ecuación que mejor representa el efecto de la presión sobre la conductividad térmica es la ecuación de Lenoir.
- 9.- La conductividad térmica de los líquidos generalmente decrece casi linealmente con la temperatura, salvo algunas excepciones,

como es el caso de moléculas multihidroxi y altamente polares.

- 10.- De los métodos para evaluar la influencia de la temperatura en la conductividad térmica de líquidos, es el método de Filippov el más útil.
- 11.- Se pudieron recolectar una gran cantidad de datos sobre la influencia de la temperatura en la conductividad térmica de líquidos puros
- 12.- Se logró hacer una recopilación de una gran cantidad de datos sobre la influencia de la conductividad térmica en las mezclas binarias de líquidos.
- 13.- Es necesario tener presente, que los datos experimentales son siempre preferibles a cualquiera de las técnicas de estimación tanto teóricas como empíricas presentadas en éste trabajo y que estas deben utilizarse solo en aquellos casos en que no se tengan datos experimentales o se desee un valor aproximado de la conductividad térmica.

B I B L I O G R A F I A

- 1.- A. S. Foust. Principios de operaciones unitarias. Jhon Wiley and Sons. Inc. New York. p. 141-145 (1960).
- 2.- A. Missenard. Conductivite Thermique des solides, liquides, gaz et de leur melanger. Edit. Miralles. Paris, Francia. p. 85-160. (1968).
- 3.- Bates, O.K., G. Hazzard y G. Palmer: Ind. Eng. Chem., 33:375 (1941).
- 4.- Brian, P.L.T. y R.C. Reid: Aiche J., 8:322 (1962).
- 5.- Bridgman, P.W. Proc. Am. Acad. Arts Sci., 59:154 (1923).
- 6.- Brokaw, R.S. J. Chem. Phys., 35:1569 (1961)
- 7.- Denbigh, K.G.: J. Soc. Chem. Ind. 65:61 (1946)
- 8.- Filippov, L.P., y N.S. Novoselova: Vestnik Moskov Univ., 10: 3, Ser. Fiz- Mat. i Estestven. Nauk (2): 37-40 (1965); Chem. Abstr., 49:11, 366 (1965).
- 9.- Filippov, L.P.: Vestnik Moskov. Univ., 9-12, Ser. Fiz- Mat. i Estestven Nauk (8): 45-48 (1954); Chem. Abstr., 49:15, 430, 1955).
- 10.- Furguson, R.R., y J.E. Smith: Aiche J., 8:654 (1962)
- 11.- Gallant, Robert W: Hydrocarbon Processing and Petrol Refiner, 7:95, 8:127, 9:225, 10:151 (1965).
3:161, 6:153, 7:111, 10:171, 12:113 (1966)
1:183, 2:133, 3:143, 4:183, 5:205, 6:121, 8:135, 9:135, 10:135
12:119 (1967).
1:135, 2:113, 3:89, 4:128, 5:151, 6:139, 7:141, 8:127, 9:269,
(1968).
1:153, 4:151, 5:143, 6:141, 7:135, 8:117, 9:199, 11:263, 12:113
(1969).
1:137, 2:112, 3:131, 4:132, (1970).
- 12.- Hirschfelder, J.O., C.F. Curtiss y R.B. Bird. Molecular Theory of gases and liquids. Jhon Wiley and Sons Inc. New York, p. 15 a 38, 110-128.(1958).
- 13.- Ho Taylor. Thermal Conductivity. Edit. Plenum. New York. p. 58 a 115, 215, 298, (1969).

- 14.- Jhon W. Perry. Chemical Engineers Handbook. Mc. Graw Hill. New York (1966).
- 15.- Kern, D.Q. Process Heat Transfer. Mc. Graw Hill Book Co., Inc. New York (1950).
- 16.- Mc. Laughlin, E. Chem. Revs. 64:389 (1964)
- 17.- Mistic, D., y G. Thodos: Aiche J., 7:264 (1961).
- 18.- Mohanty, Nature, p. 42, July 7, 1951.
- 19.- Tsederberg, N.V. Thermal Conductivity of gases and liquids. The M.I.T. Press. Cambridge, Mass., p. 108-205, (1965)
- 20.- Palmer G. Thermal Conductivity of liquids. Ind. Eng. Chem., 40 89-92 (1948).
- 21.- Rao, R. J. Chem.: Phys 9, p. 682 (1941)
- 22.- Reid y Sherwood. The propeties of gases and liquids. Mc. Graw Hill. New York, p. 512-580, (1958)
- 23.- R. B. Bird, W.E. Stewart, E.M. Lighfoot. Transport Phenomena Jhon Wiley and Sons, Inc. New York p. 8-3 a 8-23 (1968).
- 24.- Robbins, L.A., y C.L. Kingrea. Hydrocarbon Process and Petrol Refiner, 41(5): 135 (1962)
- 25.- Sakiades, B. C., y J. Coates. Aiche J., 3:121 (1957)
- 26.- Scheffy, W. J.: Thermal Conduction in liquids. Ind. Eng. Chem. 22:246 (1968)
- 27.- Smith, J.F.D., Ind. & Eng. Chem., 22, p. 1246 (1930); y Trans. Asme 58, p. 719-725 (1936).
- 28.- Tsien, H.S. The properties of pure liquids. J. Am. Rocket Soc. 23 p. 17-24 (1953).
- 29.- Y.S. Touloukian y C.Y. Thermal Conductivity, Nonmetallic liquids and gases. Edit. Plenum. New York, p. 82- 128 (1971).