

Evaluación de propiedades termofísicas de mezclas binarias formadas por solventes orgánicos con dibenzotiofeno, de uso común en la hidrosulfuración

Nathalia Moreno Berrocal y María Camila Cáceres Guevara

Trabajo de Grado para optar por el título de Ingeniero Químico

Modalidad Trabajo de Investigación

Directora

Luz Marina Ballesteros Rueda

Ingeniera Química, MSc, *Ph.D*

Codirectores

Dayra Lisseth Riaño Núñez; y Carlos Enrique Lafuente Dios

Ingeniera Química; y Doctor en Química

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2023

Dedicatoria

A mi mamá y mi papá por todo su amor, paciencia y esfuerzo, gracias por haber sido mi apoyo a lo largo de toda mi carrera universitaria y a lo largo de mi vida.

A mi familia y amigos que me brindaron consejos y palabras de aliento que me ayudaron a cumplir este objetivo.

A Camila, por su amistad, paciencia y dedicación, sin el equipo que formamos, no habiéramos logrado esta meta.

- Nathalia Moreno

A mi mamá, quien con su amor incondicional me ha motivado y apoyado a seguir mis sueños.

A mi papá por su apoyo constante en esta etapa de mi vida.

A mi tía Sandra, por siempre estar dispuesta a escuchar y ayudarme en cualquier momento.

A mis nonos por todo su amor y sus sabios consejos.

A toda mi familia que me apoyaron y aconsejaron en cada una de mis decisiones para cumplir esta meta.

A Sebastián, por su compañía, apoyo, amor y por ser mi más linda casualidad de la universidad.

A Nathalia, por compartir todos estos años juntas y vivir momentos que no olvidaré.

- María Camila

Agradecimientos

A la UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER especialmente a la ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA, a todos los profesores y administrativos que hicieron parte de nuestra formación personal y profesional a lo largo de la carrera.

A la UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA, especialmente al grupo de investigación PLATÓN, por acogernos en su laboratorio y brindarnos las herramientas y servicios requeridos para la realización de este proyecto.

A los profesores HERNANDO GUERRERO y LUZ MARINA BALLESTEROS por confiar en nosotras para comenzar esta línea de investigación. Por su constante apoyo, dedicación y orientación.

A la ingeniera DAYRA RIAÑO por guiarnos y enfocarnos, compartir de su tiempo y conocimiento.

Al doctor CARLOS LAFUENTE gracias por dedicarnos su tiempo, compartir su lugar de trabajo, ser nuestro guía en el laboratorio e instruirnos en el uso de los equipos, y brindarnos su amistad.

A los profesores de UNIZAR, HECTOR, SANTI y NACHO quienes estuvieron atentos de hacer más amena nuestras horas en el laboratorio, y de presentarnos un poco de su cultura.

A SEBASTIAN y DANIEL por compartir con nosotras esta experiencia y vivir grandes momentos que no se olvidarán.

A LAURA, LEIDY, SANDRA, XIOMARA, RONALD y DANIEL por su amistad y apoyo que hizo la experiencia de la universidad más llevadera.

Tabla de contenido

	Pág.
Introducción	13
1. Objetivos	15
1.1 Objetivo General	15
1.2 Objetivos Específicos	15
2. Estado del arte	16
3. Metodología	18
3.1 Validación de las mediciones experimentales de los solventes puros	18
3.1.1 Medición de las propiedades termofísicas de los solventes puros	18
3.1.2 Comparación de los datos con la literatura	25
3.2 Estimación de propiedades termofísicas de las disoluciones	25
3.2.1 Preparación de las disoluciones.....	25
3.2.2 Medición de propiedades termofísicas de las disoluciones.....	25
3.3 Ajuste de datos experimentales con correlaciones de la literatura.....	27
3.3.1 Revisión bibliográfica de correlaciones	27
4. Resultados y Discusión	28
5. Conclusiones	45
6. Recomendaciones	46
Referencias Bibliográficas	47
Apéndices	54

Lista de Tablas

*Tabla 1. Parámetros de ajuste con la desviación relativa medias absolutas para las propiedades medidas.....*29

Lista de Figuras

Figura 1. Esquema metodológico para la consecución de los objetivos	18
Figura 2. Fórmula Estructural de los compuestos químicos usados (a) Benceno; (b) Ciclohexano; (c) Tolueno; (d) Octano; (e) Dibenzotiofeno	19
Figura 3. Fotografía del Equipo Anton Paar DSA 5000 M.....	21
Figura 4. Fotografía del Refractómetro automático de alta precisión Abbemat	22
Figura 5. Fotografía del Viscosímetro capilar de flujo Ubbelohde Schott Gerate.....	23
Figura 6. Fotografía del Equipo con unidad de medida, un baño termostatzado y viscosímetro	24
Figura 7. Comparativas de los datos experimentales con la literatura de la densidad (ρ), viscosidad (η), velocidad del sonido (u) e índice de refracción (n_D) en función de la temperatura a presión atmosférica para los disolventes puros: CH lit (\blacktriangledown), B lit (\bullet), T lit (\blacktriangleright), O lit (\circ), CH exp (\blacksquare), B exp (\blacksquare), T exp (\blacksquare), O exp (\blacksquare).	28
Figura 8. Densidad (ρ) en función de la temperatura para los sistemas: CH (\bullet), DBT+CH (0,1503) (\blacklozenge), DBT+CH (0,2277) (\blacktriangledown), DBT+CH (0,3044) (\blacktriangle), B (\bullet), DBT+B (0,1620) (\blacklozenge), DBT+B (0,2452) (\blacktriangledown), DBT+B (0,3284) (\blacktriangle), T (\bullet), DBT+T (0,1373) (\blacklozenge), DBT+T (0,2080) (\blacktriangledown), DBT+T (0,2785) (\blacktriangle), O (\bullet), DBT+O (0,1108) (\blacklozenge), DBT+O (0,1678) (\blacktriangledown), DBT+T (0,2247) (\blacktriangle).....	32
Figura 9. Desviaciones de las densidades de las mezclas con respecto a los solventes puros DBT+CH (0,1503) (\blacklozenge), DBT+CH (0,2277) (\blacktriangledown), DBT+CH (0,3044) (\blacktriangle), DBT+B (0,1620) (\blacklozenge), DBT+B (0,2452) (\blacktriangledown), DBT+B (0,3284) (\blacktriangle), DBT+T (0,1373) (\blacklozenge), DBT+T (0,2080) (\blacktriangledown), DBT+T (0,2785) (\blacktriangle), DBT+O (0,1108) (\blacklozenge), DBT+O (0,1678) (\blacktriangledown), DBT+T (0,2247) (\blacktriangle).....	34

Figura 10. Viscosidad (η) en función de la temperatura para los sistemas: CH (●), DBT+CH (0,1503) (◆), DBT+CH (0,2277) (▼), DBT+CH (0,3044) (▲), B (●), DBT+B (0,1620) (◆), DBT+B (0,2452) (▼), DBT+B (0,3284) (▲), T (●), DBT+T (0,1373) (◆), DBT+T (0,2080) (▼), DBT+T (0,2785) (▲), O (●), DBT+O (0,1108) (◆), DBT+O (0,1678) (▼), DBT+T (0,2247) (▲) 35

Figura 11. Desviaciones de las viscosidades de las mezclas con respecto a los solventes puros de DBT+CH (0,1503) (◆), DBT+CH (0,2277) (▼), DBT+CH (0,3044) (▲), DBT+B (0,1620) (◆), DBT+B (0,2452) (▼), DBT+B (0,3284) (▲), DBT+T (0,1373) (◆), DBT+T (0,2080) (▼), DBT+T (0,2785) (▲), DBT+O (0,1108) (◆), DBT+O (0,1678) (▼), DBT+T (0,2247) (▲)..... 36

Figura 12. Velocidad del sonido (u) en función de la temperatura para los sistemas: CH (●), DBT+CH (0,1503) (◆), DBT+CH (0,2277) (▼), DBT+CH (0,3044) (▲), B (●), DBT+B (0,1620) (◆), DBT+B (0,2452) (▼), DBT+B (0,3284) (▲), T (●), DBT+T (0,1373) (◆), DBT+T (0,2080) (▼), DBT+T (0,2785) (▲), O (●), DBT+O (0,1108) (◆), DBT+O (0,1678) (▼), DBT+T (0,2247) (▲) 37

Figura 13. Desviaciones de las velocidades del sonido de las mezclas con respecto a los solventes puros de DBT+CH (0,1503) (◆), DBT+CH (0,2277) (▼), DBT+CH (0,3044) (▲), DBT+B (0,1620) (◆), DBT+B (0,2452) (▼), DBT+B (0,3284) (▲), DBT+T (0,1373) (◆), DBT+T (0,2080) (▼), DBT+T (0,2785) (▲), DBT+O (0,1108) (◆), DBT+O (0,1678) (▼), DBT+T (0,2247) (▲)..... 38

Figura 14. Índice de refracción (n_D) en función de la temperatura para los sistemas: CH (●), DBT+CH (0,1503) (◆), DBT+CH (0,2277) (▼), DBT+CH (0,3044) (▲), B (●), DBT+B (0,1620)

(◆), DBT+B (0,2452) (▼), DBT+B (0,3284) (▲), T (●), DBT+T (0,1373) (◆), DBT+T (0,2080) (▼), DBT+T (0,2785) (▲), O (●), DBT+O (0,1108) (◆), DBT+O (0,1678) (▼), DBT+T (0,2247) (▲) 39

Figura 15. Desviaciones de los índices de refracción de las mezclas con respecto a los solventes

puros de DBT+CH (0,1503) (◆), DBT+CH (0,2277) (▼), DBT+CH (0,3044) (▲), DBT+B (0,1620) (◆), DBT+B (0,2452) (▼), DBT+B (0,3284) (▲), DBT+T (0,1373) (◆), DBT+T (0,2080) (▼), DBT+T (0,2785) (▲), DBT+O (0,1108) (◆), DBT+O (0,1678) (▼), DBT+T (0,2247) (▲)..... 40

Figura 16. Volumen molar (V_m) en función de la temperatura para los sistemas: CH (●), DBT+CH

(0,1503) (◆), DBT+CH (0,2277) (▼), DBT+CH (0,3044) (▲), B(●), DBT+B (0,1620) (◆), DBT+B (0,2452) (▼), DBT+B (0,3284) (▲), T (●), DBT+T (0,1373) (◆), DBT+T (0,2080) (▼), DBT+T (0,2785) (▲), O (●), DBT+O (0,1108) (◆), DBT+O (0,1678) (▼), DBT+T (0,2247) (▲) 41

Figura 17. Compresibilidad isoentrópica (κ_s) en función de la temperatura para los sistemas: CH

(●), DBT+CH (0,1503) (◆), DBT+CH (0,2277) (▼), DBT+CH (0,3044) (▲), B(●), DBT+B (0,1620) (◆), DBT+B (0,2452) (▼), DBT+B (0,3284) (▲), T (●), DBT+T (0,1373) (◆), DBT+T (0,2080) (▼), DBT+T (0,2785) (▲), O (●), DBT+O (0,1108) (◆), DBT+O (0,1678) (▼), DBT+T (0,2247) (▲)..... 42

Figura 18. Compresibilidad isoentrópica molar ($k_{s,m}$) en función de la temperatura para los

sistemas: CH (●), DBT+CH (0,1503) (◆), DBT+CH (0,2277) (▼), DBT+CH (0,3044) (▲), B(●), DBT+B (0,1620) (◆), DBT+B (0,2452) (▼), DBT+B (0,3284) (▲), T (●), DBT+T (0,1373) (◆),

DBT+T (0,2080) (▼), DBT+T (0,2785) (▲), O (●), DBT+O (0,1108) (◆), DBT+O (0,1678) (▼),
 DBT+T (0,2247) (▲)..... 43

Figura 19. Refracción molar (R_m) en función de la temperatura para los sistemas: CH (●),
 DBT+CH (0,1503) (◆), DBT+CH (0,2277) (▼), DBT+CH (0,3044) (▲), B(●), DBT+B (0,1620)
 (◆), DBT+B (0,2452) (▼), DBT+B (0,3284) (▲), T (●), DBT+T (0,1373) (◆), DBT+T (0,2080)
 (▼), DBT+T (0,2785) (▲), O (●), DBT+O (0,1108) (◆), DBT+O (0,1678) (▼), DBT+T (0,2247)
 (▲) 44

Lista de Apéndices

Apéndice A. Reactivos y proveedores.....	54
Apéndice B. Tabla comparación entre datos experimentales y literatura	54
Apéndice C. Datos obtenidos experimentalmente	57

Resumen

Título: Evaluación de propiedades termofísicas de mezclas binarias formadas por solventes orgánicos con dibenzotiofeno, de uso común en la hidrodesulfuración. *

Autor: Nathalia Moreno Berrocal, María Camila Caceres Guevara **

Palabras Clave: Dibenzotiofeno, Propiedades termofísicas, Hidrocarburos, Interacción molecular, Efectos estructurales

Descripción: La eliminación del azufre mediante la hidrodesulfuración es uno de los procesos más importantes en el refinado del petróleo para producir combustibles más limpios. Es por esto que el dibenzotiofeno se utiliza ampliamente como compuesto modelo para representar el azufre orgánico, ya que es el heterociclo que contiene mayor cantidad de azufre encontrado en el petróleo. El presente trabajo busca conocer los efectos de la temperatura y la composición en la densidad, velocidad de propagación del sonido, índice de refracción y la viscosidad dinámica de la mezcla binaria compuesta por dibenzotiofeno y solventes orgánicos como ciclohexano, benceno, tolueno y octano. Estas mezclas fueron medidas a 17 temperaturas equiespaciadas en 2,5 K en el rango de 298,15-338,15 K y a presión atmosférica. Las correlaciones de la densidad, velocidad del sonido y el índice de refracción se calculan con la ecuación lineal y la de la viscosidad, con la de Vogel-Fulcher-Tammann y se comprueba su eficacia con la desviación absoluta relativa promedio (AARD).

Los resultados obtenidos son utilizados para calcular el volumen molar, compresibilidad isoentrópica y compresibilidad isoentrópica molar. Estas mediciones han servido para completar la información sobre la influencia de la temperatura y la composición en las propiedades termofísicas de los hidrocarburos seleccionados con dibenzotiofeno. Los resultados experimentales y los calculados son discutidos desde el punto de vista de la interacción molecular entre los componentes de la mezcla y sus efectos estructurales.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Directora: Luz Marina Ballesteros Rueda, Ingeniera Química, MSc, Ph.D. Codirectores: Carlos Lafuente, PhD; Dayra Lisseth Riaño Núñez, Ingeniera Química.

Abstract

Title: Evaluation of thermophysical properties of binary mixtures formed by organic solvents with dibenzothiophene, commonly used in hydrodesulfurization*

Author: Nathalia Moreno Berrocal, María Camila Cáceres Guevara **

Key Words: Dibenzothiophene, Thermophysical properties, Hydrocarbons, Molecular Interaction, Structural effects

Description: Sulfur removal by hydrodesulfurization is one of the most important processes in petroleum refining to produce cleaner fuels. For this reason, dibenzothiophene is widely used as a model compound to represent organic sulfur since the heterocycle contains the highest amount of sulfur found in crude oil. The present work seeks to study the effects of temperature and composition on the density, sound propagation velocity, refractive index and dynamic viscosity of the binary mixture composed of dibenzothiophene and organic solvents such as cyclohexane, benzene, toluene, and octane. For the latter, 17 temperatures are reported with intervals of 2.5 K in the range of 298.15-338.15 K at atmospheric pressure. The correlations of density, speed of sound and refractive index were calculated using a linear equation. Also, viscosity was correlated using Vogel-Fulcher-Tammann equation and their adjustment was checked by average absolute relative deviation (AARD) measurements.

The obtained results were used to calculate the molar volume, isentropic compressibility and molar isentropic compressibility. These measurements are used to complete the information on the influence of temperature and composition on the thermophysical properties of selected hydrocarbons with dibenzothiophene. The experimental and calculated results are discussed from the point of view of the molecular interaction between the components of the mixture and their structural effects.

* Final Degree Work

** Faculty of Physicochemical Engineering. School of Chemical Engineering. Director: PhD. Luz Marina Ballesteros Rueda; Codirector: PhD. Carlos Lafuente, Chemical Engineer Dayra Lisseth Riaño Núñez,

Introducción

El reto de producir el suficiente combustible para satisfacer las crecientes necesidades de transporte y energía del mundo se ve acentuado por la exigencia de que estos combustibles sean limpios y menos contaminantes de modo que los compuestos de azufre en los combustibles son indeseables, ya que liberan oxiácidos de azufre durante la combustión y causan problemas medioambientales como la lluvia ácida y la emisión de partículas de azufre que pone en peligro la salud pública (Ukkirapandian et al., 2008). Por consiguiente, uno de los principales procesos para producir combustibles más limpios es el refinado del petróleo en donde se remueve el azufre por medio de la hidrodesulfuración (Morales-Valencia et al., 2021). Este proceso aplica en el dibenzotiofeno, dado que representa el azufre orgánico en el carbón y el petróleo (Clark & Pazdernik, 2016), debido a que es el heterociclo que contiene mayor cantidad de azufre encontrado en el petróleo crudo (Adak & Begley, 2019). Sin embargo, una revisión de la literatura abierta ha mostrado que las mediciones experimentales de propiedades termofísicas de las mezclas de dibenzotiofeno y ciertos solventes orgánicos son escasas.

Las propiedades termofísicas son importantes para obtener los datos fundamentales de diversas mezclas de líquidos moleculares de diferentes clases de compuestos y también para comprender el comportamiento de las interacciones que se producen entre los componentes de estas mezclas. Estos datos son útiles en ingeniería química y petroquímica con diversas aplicaciones como: procesos de separación de fase y reciclaje de desechos, operaciones de producción de instalaciones de superficie y sistemas de tuberías de superficie, así como en la teoría de soluciones y la termodinámica molecular para la confirmación y el desarrollo de modelos teóricos y modelos empíricos de fluidos puros y mezclas (Sirbu et al., 2019). Además, estas

propiedades son necesarias para el desarrollo de modelos termodinámicos, necesarios en procesos de adecuación y optimización en la industria química, petroquímica, farmacéutica y otras. De igual forma, una amplia información sobre los fenómenos estructurales de las mezclas es de vital importancia en el desarrollo de teorías del estado líquido y los métodos de predicción. (Vasundhara et al., 2015)

Asimismo, el estudio de las propiedades termodinámicas de las mezclas líquidas es esencial para comprender mejor el comportamiento no lineal de los sistemas complejos debido a los efectos físicos y químicos que son causados por las diferentes interacciones moleculares (Vasundhara et al., 2015). El conocimiento de la estructura y las interacciones moleculares de las mezclas líquidas es muy importante desde el punto de vista fundamental y de las aplicaciones en ingeniería de procesos, debido a que la orientación molecular, el tamaño y la polaridad de los disolventes afectan en gran medida a la magnitud y la naturaleza de las propiedades termofísicas de las mezclas binarias derivadas de ellos (Sharma et al., 2022).

El presente trabajo representa el inicio de una línea de investigación sobre el estudio de propiedades termofísicas de sistemas binarios de dibenzotiofeno con diferentes hidrocarburos conocidos. Es por ello que se inicia con cuatro disoluciones, siendo estas: dibenzotiofeno + ciclohexano, dibenzotiofeno + benceno, dibenzotiofeno + tolueno y dibenzotiofeno + octano. Por lo tanto, es necesario establecer como objeto de estudio ¿cuál es el comportamiento de las propiedades termofísicas a distintas condiciones de temperatura en disoluciones binarias de dibenzotiofeno con diferentes solventes orgánicos que son usados en el proceso de hidrodesulfuración?

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Estudiar las propiedades termofísicas de mezclas binarias de dibenzotiofeno con diferentes hidrocarburos a distintas condiciones de temperatura

1.2 Objetivos Específicos

- Validar las mediciones experimentales de las propiedades termofísicas de los solventes puros
- Estimar las propiedades termofísicas de las disoluciones a partir de medidas experimentales
- Ajustar los datos experimentales con correlaciones de la literatura

2. Estado del arte

Yang et al. (2004) estudiaron las propiedades termodinámicas de la mezcla binaria de p-xileno con los alcanos ciclohexano, heptano, octano y N-methyl-2-pyrrolidone en el rango de temperaturas de 298,15-353,15 K a presión atmosférica. Posteriormente con los datos hallados se calcula el volumen molar en exceso y la desviación de la viscosidad.

Nain et al. (2006) estudiaron la densidad y las propiedades volumétricas de la mezcla binaria de tetrahidrofurano con algunos hidrocarburos aromáticos como benceno, tolueno, o-xileno, m-xileno, p-xileno y mesitileno en un rango de temperaturas de 278,15-318,15 K a presión atmosférica, además del volumen molar en exceso, volumen molar parcial y volumen molar parcial en exceso. Se observa una dependencia del volumen molar en exceso con el número y la posición del grupo metilo en estos hidrocarburos aromáticos.

Domańska et al. (2014) estudiaron el efecto de la temperatura y la composición en la densidad y la viscosidad de benzotiofeno puro y líquidos iónicos, con el fin de completar la información de la influencia de la temperatura y la composición de las propiedades fisicoquímicas para los líquidos iónicos, el cual fue elegido como un posible nuevo arrastrador en la separación de compuestos de azufre de los combustibles.

Vasundhara et al. (2015) estudiaron las propiedades termodinámicas de la mezcla binaria de anilina con hidrocarburos aromáticos como clorobenceno, bromobenceno, 1,2-diclorobenceno y 1,3-diclorobenceno y 1,2,4-triclorobenceno en el rango de temperaturas de 303,15–313,15 K a presión atmosférica. También calcularon los volúmenes en exceso, compresibilidad isoentrópica y compresibilidad isoentrópica en exceso. Los resultados obtenidos se discutieron en términos de la interacción molecular entre las moléculas.

Sirbu et al. (2019) estudiaron las propiedades termofísicas de la mezcla binaria de n-hexadecano y dos hidrocarburos aromáticos (n-propilbenceno y sec-butilbenceno), en un rango de temperaturas de 298,15-318,15 K a presión atmosférica, para luego calcular el volumen molar en exceso, velocidad del sonido en exceso, compresibilidad isoentrópica en exceso, la desviación de la viscosidad, la desviación de los índices de refracción y la refracción de exceso molar. Los resultados son discutidos desde el punto de vista de las interacciones moleculares y sus efectos estructurales.

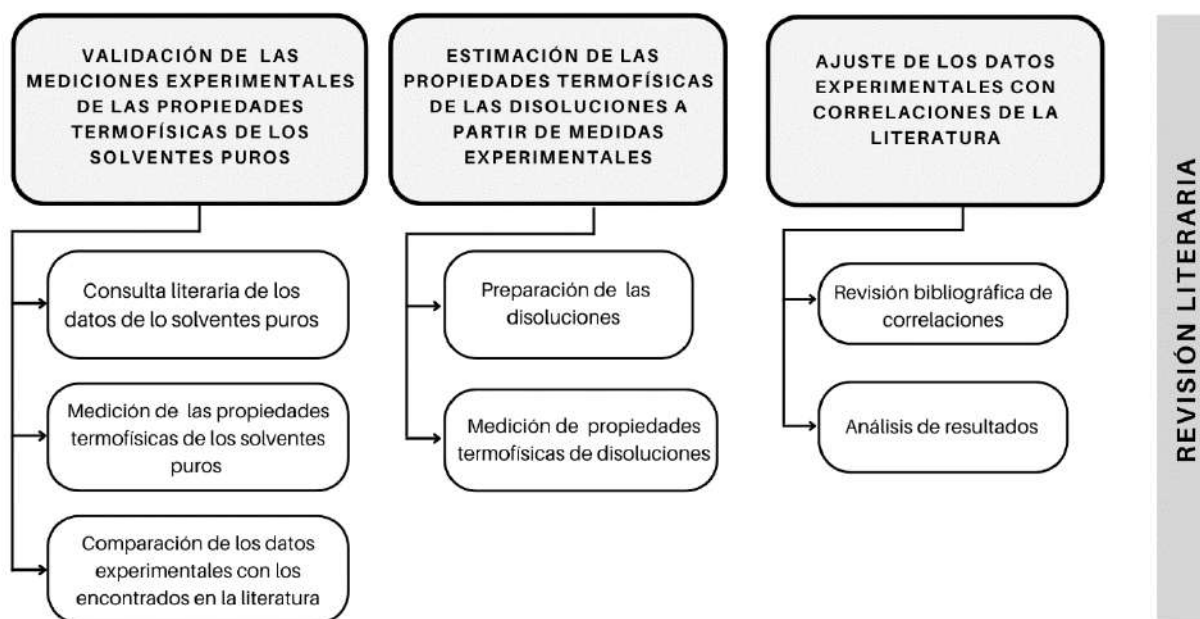
Dragoescu et al., (2019) investigaron en su artículo las propiedades termofísicas de mezclas binarias de 1-clorohexano con dos hidrocarburos (tolueno y tetradecano), con los cuales se hallan sus propiedades en exceso y sus desviaciones, para luego ser analizadas desde el punto de vista molecular y estructural.

3. Metodología

En la **Figura 1** se muestra la metodología que se lleva a cabo para cumplir con los objetivos planteados.

Figura 1.

Esquema metodológico para la consecución de los objetivos



3.1 Validación de las mediciones experimentales de los solventes puros

Se realiza una revisión bibliográfica relacionada a estudios de propiedades termofísicas de hidrocarburos con el fin de encontrar datos experimentales en la literatura de los disolventes puros.

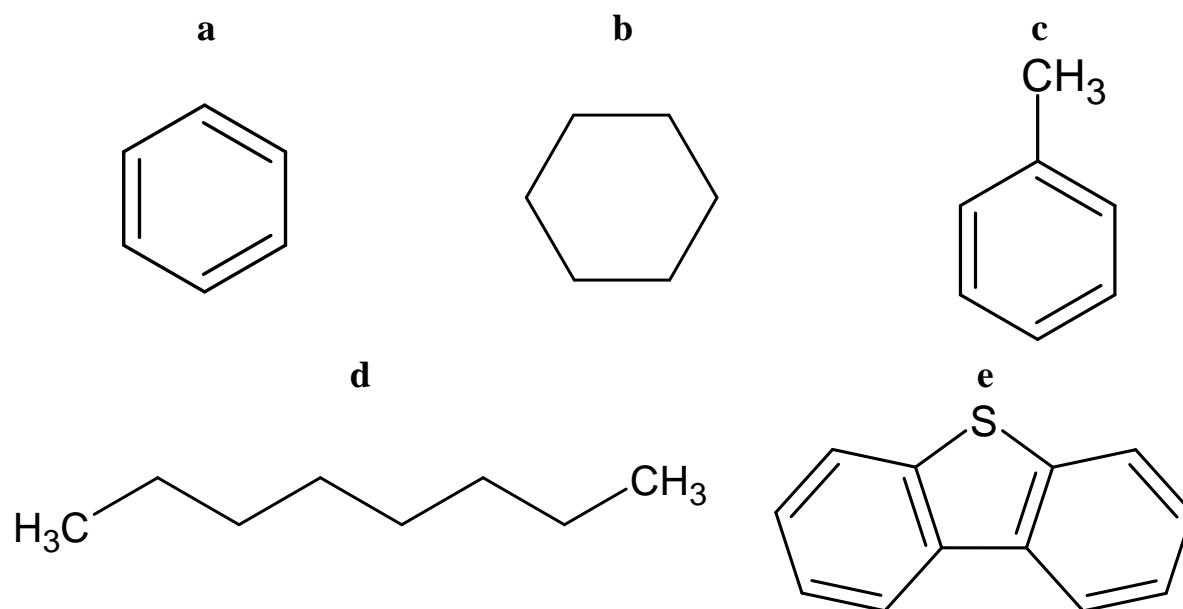
3.1.1 Medición de las propiedades termofísicas de los solventes puros

Las mediciones de la densidad, velocidad de propagación del sonido, índice de refracción y la viscosidad dinámica se realizó a 17 niveles equiespaciados de temperatura de 2,5 K en un

rango de 298,15-338,15 K y una presión de 1 KPa para los hidrocarburos: ciclohexano, benceno, tolueno y octano. La descripción de los reactivos se encuentra en la **Tabla A1** y la fórmula estructural de cada compuesto se presenta en la **Figura 2**.

Figura 2.

Fórmula estructural de los compuestos químicos usados (a) Benceno; (b) Ciclohexano; (c) Tolueno; (d) Octano; (e) Dibenzotiofeno



El instrumento utilizado que combina la medición de la densidad y la velocidad del sonido en la misma configuración es el Anton Paar DSA 5000 M como se muestra en la (**Figura 3**). Este presenta un rango de medición de temperatura de 0°C-70°C, además de una incertidumbre en la medida de densidad de 0,000001 g/cm³ y de velocidad de sonido de 0,1 m/s. (Anton Paar, 2011)

Para la densidad, se introduce por la boquilla de entrada del tubo en U ubicado en el lateral del equipo, una muestra de 1,7 ml usando cuidadosamente una jeringa para evitar la entrada de burbujas de aire, las cuales impiden la estabilización. Luego, el fluido se hace oscilar en el interior del tubo mediante un dispositivo controlado electrónicamente y de esta forma se determina que la frecuencia natural cambia dependiendo de la sustancia estudiada. Asimismo, el equipo, con la frecuencia natural y una conversión matemática (**Ec. 1**), calcula la densidad de la muestra. (Anton Paar, 2011)

$$\rho = A \cdot Q^2 \cdot f_1 - B + f_2 \quad (\text{Ec. 1})$$

En donde A y B son constantes del equipo; Q es el cociente del periodo de oscilación del tubo U y el periodo de oscilación del oscilador de referencia; f_1 y f_2 son términos de corrección de la temperatura, viscosidad y la no linealidad.

Para la velocidad de propagación del sonido, la muestra de 1,7 ml se introduce en la celda de medición del equipo, la cual está rodeada en un lado por un transmisor de ultrasonidos y por el otro un receptor. El transmisor envía ondas sonoras de un periodo conocido a través de la muestra. La velocidad del sonido puede calcularse determinando el periodo de las ondas sonoras recibidas y considerando la distancia entre el transmisor y el receptor (**Ec. 2**). (Anton Paar, 2011)

$$u = \frac{L \cdot (1 + 1,6E^{-5} \cdot \Delta T)}{\frac{P_s}{512} - C \cdot f_3} \quad (\text{Ec. 2})$$

En donde, L es la longitud de la celda medida (predeterminado de fábrica, 5000 μm); ΔT es la desviación de la temperatura a 293,15 K; P_s es el periodo de oscilación de las ondas de sonido

recibidas; C es la constante del equipo para la velocidad del sonido y f_3 es el término de corrección para la temperatura.

Debido a la dependencia de las altas temperaturas de los valores de densidad y velocidad del sonido, las celdas de medición deben ser termorreguladas con precisión.

Figura 3.

Fotografía del Equipo Anton Paar DSA 5000 M.



El índice de refracción se calculó usando el refractómetro automático de alta precisión Abbemat (**Figura 4**). Este presenta una resolución de 1×10^{-6} y precisión de 2×10^{-5} n_D del índice de refracción. (Anton Paar, 2015)

Este equipo consta de una unidad principal, el cual dispone de un prisma de zafiro sintético en cuya superficie se sitúa una cantidad de muestra de 2 ml. Internamente, un rayo cónico de luz amarilla de longitud de onda $589,3 \pm 0,1$ nm, sodio D, ilumina la muestra desde la parte inferior del prisma bajo diferentes ángulos de reflexión. Para la determinación del índice de refracción, esta unidad principal está conectada a un ordenador cuyo software permite la entrada de información del exterior al equipo. (Montaño, 2011)

Figura 4.

Fotografía del Refractómetro automático de alta precisión Abbemat



La viscosidad dinámica se denota por η y está relacionada con la viscosidad cinemática (ν) y la densidad (ρ) mediante la siguiente expresión **(Ec. 3)**:

$$\eta = \nu \cdot \rho \quad (\text{Ec. 3})$$

Esta propiedad se obtiene a partir de medidas experimentales de densidad y viscosidad cinemática. La medida de esta última se realiza con un equipo formado por una unidad automática de medida AVS-440 Schott Geräte, un baño termostatzado y un viscosímetro capilar de flujo Ubbelohde Schott Geräte con una constante $k=0,009483$ **(Figura 5 y Figura 6)**. (Montaño, 2011)

Mediante estos equipos se obtiene el tiempo de caída por gravedad de la muestra a través del capilar del viscosímetro, el cual tiene una incertidumbre en la medida de flujo de 0,01 s y una incertidumbre en la viscosidad cinemática de $1 \times 10^{-4} \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. (Montaño, 2011)

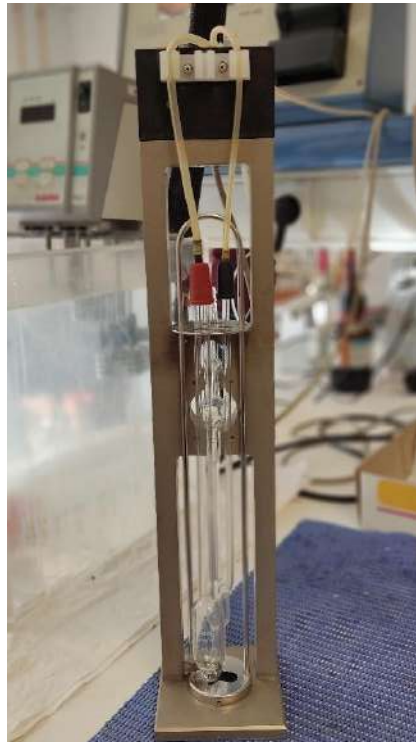
Posteriormente, el tiempo promedio de la muestra por el capilar tiene que ser modificado haciendo uso de la corrección de Hagenbach (Ec. 4):

$$\nu = k \left(\bar{t} - \frac{100}{\bar{t}} \right) \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde \bar{t} es el tiempo promedio.

Figura 5.

Fotografía del Viscosímetro capilar de flujo Ubbelohde Schott Gerate



El viscosímetro consiste en un tubo en U de tres ramas. Por una de ellas se introduce la muestra; por la segunda, la muestra asciende por succión y desciende por gravedad a través de un capilar que posee dos marcas definidas; la tercera actúa como elemento de seguridad. (Montaño, 2011)

Para determinar la viscosidad cinemática, se introduce 17 ml por cada muestra de solvente en el capilar; este se sitúa en un soporte metálico que a su vez se conecta a la unidad de medida. El conjunto se introduce en el baño termostatzado y se deja en reposo por 20 minutos para asegurar el equilibrio térmico. Seguidamente se pone en marcha la unidad de medida automática, en donde la muestra es succionada a través del viscosímetro mediante una bomba en el que el líquido asciende a una altura mayor que la de la marca superior y una vez alcanzado este límite, la bomba deja de succionar y el líquido desciende por gravedad.(Montaño, 2011)

El cronómetro se pone en marcha automáticamente justo cuando el menisco del líquido atraviesa la barrera de luz en sentido descendiente, midiendo así el tiempo de caída. Para asegurar la validez de los tiempos obtenidos, se deben obtener tres tiempos de flujo que no difieran entre sí más de un porcentaje de 5×10^{-2} del tiempo promedio.(Montaño, 2011)

Figura 6.

Fotografía del Equipo con unidad automática de medida, un baño termostatzado y viscosímetro



3.1.2 Comparación de los datos con la literatura

Se comparan los datos encontrados en la literatura con los datos experimentales obtenidos de cada uno de los disolventes puros para comprobar la pureza del compuesto; además, al ser solventes orgánicos ampliamente estudiados en la literatura, se permite comprobar la calibración y la exactitud de las medidas del equipo.

3.2 Estimación de propiedades termofísicas de las disoluciones

3.2.1 Preparación de las disoluciones

Para determinar las composiciones de las disoluciones se toma como punto de referencia los datos de solubilidad presentados en la IUPAC-NIST para el DBT con solventes orgánicos (Acree, 2013) para así observar el comportamiento termofísico de cada mezcla binaria. De este modo se seleccionan tres fracciones molares diferentes de DBT: 0,0188, 0,0125 y 0,025 que posteriormente serán reportadas en molalidad.

Para medir la densidad, velocidad del sonido, viscosidad y el índice de refracción se requiere 20,7 ml; no obstante, se preparó 42 ml para cada disolución debido a que cada propiedad se midió por duplicado para comprobar los datos obtenidos.

Para lograr una buena exactitud en la composición de las mezclas a preparar, se utiliza una balanza Sartorius modelo CP225D de precisión $\pm 10^{-5}$ g. Seguidamente la mezcla es sometida a agitación continua durante varios minutos para asegurar su homogeneidad. (Montaño, 2011)

3.2.2 Medición de propiedades termofísicas de las disoluciones

La densidad, velocidad del sonido, viscosidad y el índice de refracción se midieron a una presión de 1 KPa, en las temperaturas establecidas en la fase 1 y en 3 niveles de composición para cada disolución. De esta manera se realizaron 408 mediciones para cada mezcla, las cuales

corresponden a datos de la combinación de los niveles de temperatura y composición, debido a que se hicieron por duplicado.

A partir de las mediciones obtenidas se estimó para cada mezcla: volumen molar, compresibilidad isoentrópica, refracción molar y compresibilidad isoentrópica molar.

El volumen molar se calculó de la siguiente manera (**Ec. 5**):

$$V_m = \frac{(1000 + m \cdot M_{\text{soluta}}) \cdot (M_{\text{disolvente}} + m)}{\rho \cdot 1000} \quad (\text{Ec. 5})$$

En donde M_{soluta} es la masa molar del soluto; $M_{\text{disolvente}}$ es la masa molar del disolvente; m es la molalidad y ρ es la densidad del disolvente.

La compresibilidad isoentrópica se calcula con los datos experimentales de densidad y velocidad de propagación del sonido siguiendo la ecuación de Newton-Laplace (**Ec. 6**):

$$k_s = \frac{1}{\rho \cdot u^2} \quad (\text{Ec. 6})$$

Con la información del volumen molar y la compresibilidad isoentrópica se puede calcular el valor de la compresibilidad isoentrópica molar de la siguiente manera (**Ec. 7**):

$$k_{s,m} = k_s \cdot V_m \quad (\text{Ec. 7})$$

La refracción molar se calcula con la relación de Lorentz-Lorenz usando el volumen molar y el índice de refracción (**Ec. 8**).

$$R_m = V_m \frac{n_D^2 - 1}{n_D^2 + 2} \quad (\text{Ec. 8})$$

3.3 Ajuste de datos experimentales con correlaciones de la literatura

3.3.1 Revisión bibliográfica de correlaciones

En la mayoría de las propiedades existe una dependencia lineal con la temperatura que puede ser descrita de la siguiente manera (**Ec. 9**):

$$Y = AT + B \quad (\text{Ec. 9})$$

Donde Y corresponde a la propiedad y A y B son parámetros de ajuste.

Para las propiedades de transporte como la viscosidad dinámica, se observa un comportamiento no lineal respecto a la temperatura, y puede ser descrito con la ecuación de Vogel-Fulcher-Tammann (**Ec. 10**) (Reinado et al., 2022):

$$Y = Y_o \cdot \exp\left[\frac{B}{(T - T_o)}\right] \quad (\text{Ec. 10})$$

Donde Y es η y Y_o , B y T_o son parámetros de ajuste.

Para comprobar la eficacia del ajuste se utiliza la desviación absoluta relativa promedio AARD (**Ec. 11**):

$$AARD\% = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|Y_{i,exp} - Y_{i,corr}|}{Y_{i,exp}} \quad (\text{Ec. 11})$$

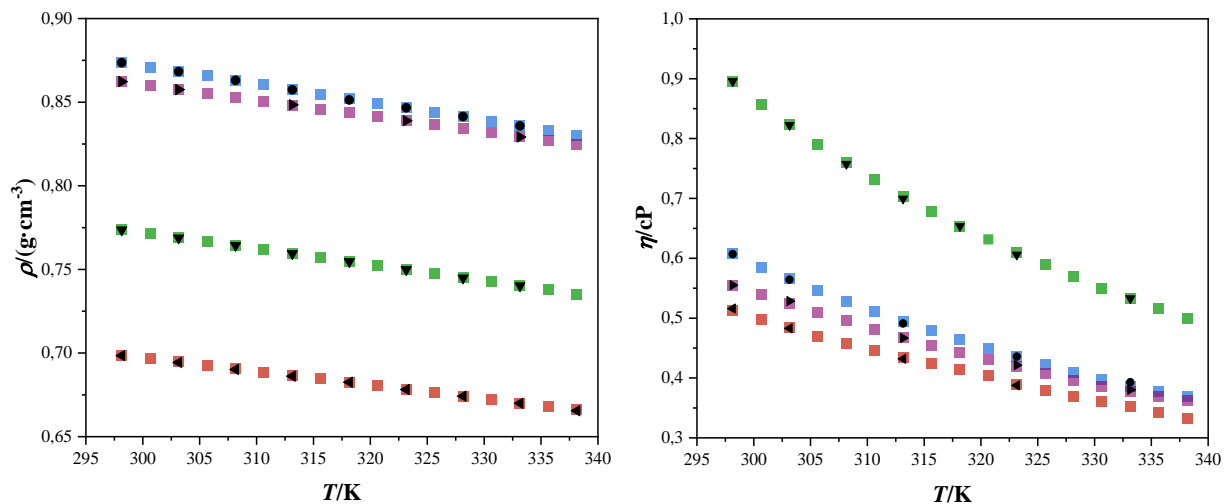
La estimación de AARD se realizó con el análisis de mínimos cuadrados.

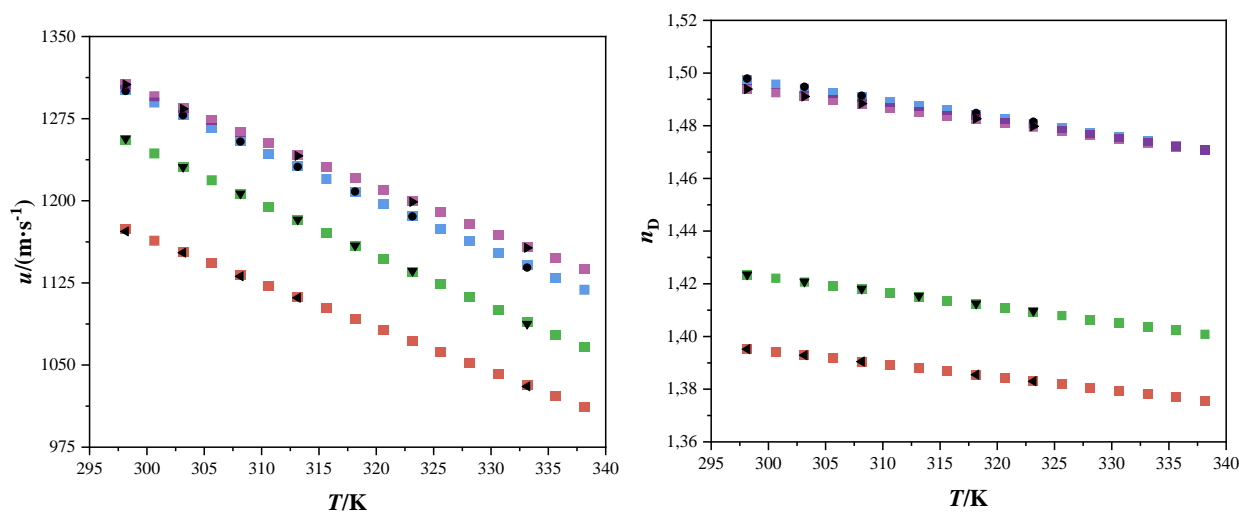
4. Resultados y Discusión

Los datos reportados en la literatura y los obtenidos experimentalmente de los disolventes puros para la densidad, viscosidad, velocidad del sonido y el índice de refracción se encuentran recopilados en la **Tabla B1**. Además, al comparar estos datos (**Figura 7**) se encontró que los valores experimentales presentan reproducibilidad cuando se comparan con la literatura (desviaciones relativas medias absolutas (AARD) menor a 0,5%).

Figura 7.

Comparativas de los datos experimentales con la literatura de la densidad (ρ), viscosidad (η), velocidad del sonido (u) e índice de refracción (n_D) en función de la temperatura a presión atmosférica para los disolventes puros: CH lit (\blacktriangledown), B lit (\bullet), T lit (\blacktriangleright), O lit (\blacktriangleleft), CH exp (\blacksquare), B exp (\blacksquare), T exp (\blacksquare), O exp (\blacksquare).





Los resultados experimentales de la densidad, viscosidad, velocidad del sonido e índice de refracción para la mezcla binaria de dibenzotiofeno con los disolventes orgánicos obtenidos en el rango de temperaturas se encuentran en las **Tabla C1**, **Tabla C2**, **Tabla C3** y **Tabla C4**.

Los parámetros de ajuste de todos los datos obtenidos experimentalmente, junto con las correspondientes AARD se encuentran en la **Tabla 1**.

Tabla 1.

Parámetros de ajuste con la desviación relativa media absoluta para las propiedades medidas

Propiedad	A	B	C	AARD%
	Ciclohexano			
$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	1,06243	-0,000967		0,01
η/Cp	0,01587	956,556	60,87	0,06
$u/(m \cdot s^{-1})$	2662,50	-4,7239		0,06
n_D	1,59291	-0,000568		0,00
	Ciclohexano + Dibenzotiofeno (0,1503 m)			
$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	1,06891	-0,000963		0,01
η/Cp	0,01547	986,789	56,59	0,08
$u/(m \cdot s^{-1})$	2653,2792	-4,6802		0,06
n_D	1,59795	-0,000568		0,00

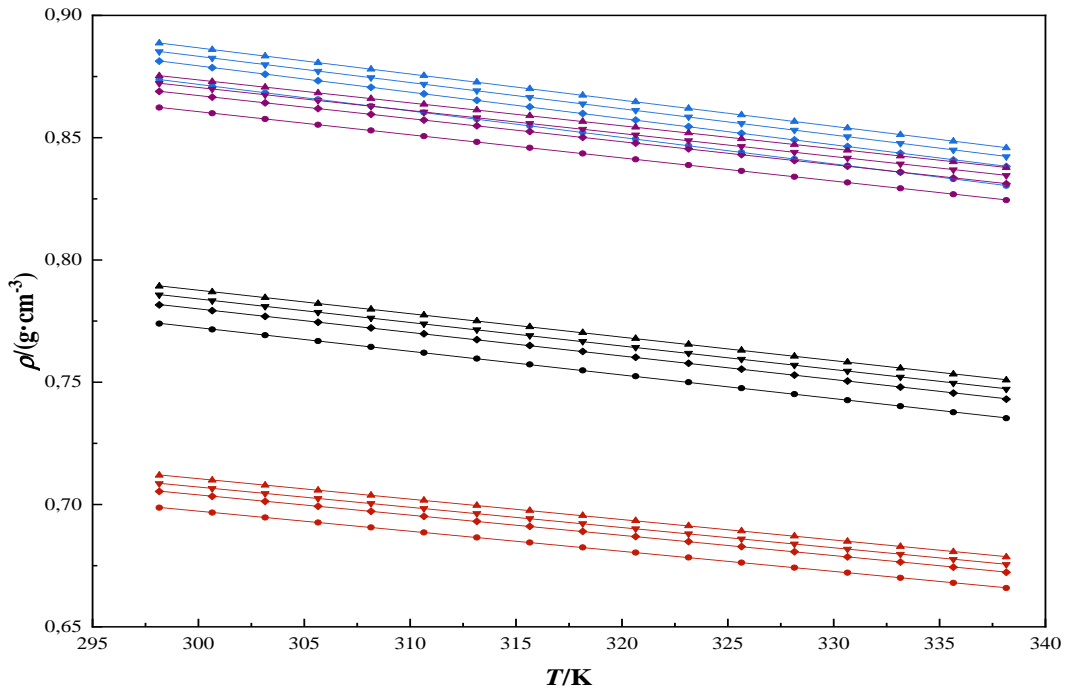
Propiedad	A	B	C	AARD%
Ciclohexano + Dibenzotiofeno (0,2277 m)				
$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	1,07280	-0,000962		0,01
η/Cp	0,01440	1026,8517	51,82	0,11
$u/(m \cdot s^{-1})$	2647,53	-4,6547		0,06
n_D	1,59856	-0,000562		0,00
Ciclohexano + Dibenzotiofeno (0,3044 m)				
$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	1,07557	-0,000960		0,01
η/Cp	0,01547	995,261	55,86	0,06
$u/(m \cdot s^{-1})$	2642,12	-4,6301		0,06
n_D	1,60027	-0,000561		0,00
Benceno				
$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	1,19698	-0,001080		0,01
η/Cp	0,01269	1028,898	32,14	0,15
$u/(m \cdot s^{-1})$	2661,26	-4,5645		0,04
n_D	1,69753	-0,000671		0,00
Benceno + Dibenzotiofeno (0,1620 m)				
$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	1,20407	-0,001080		0,01
η/Cp	0,00397	1821,243	-60,77	0,22
$u/(m \cdot s^{-1})$	2648,22	-4,5043		0,04
n_D	1,69337	-0,000639		0,01
Benceno + Dibenzotiofeno (0,2452 m)				
$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	1,20513	-0,001070		0,00
η/Cp	0,00731	1391,519	-12,31	0,09
$u/(m \cdot s^{-1})$	2642,51	-4,4782		0,04
n_D	1,70016	-0,000655		0,00
Benceno + Dibenzotiofeno (0,3284 m)				
$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	1,20765	-0,001070		0,00
η/Cp	0,00465	1729,593	-50,95	0,20
$u/(m \cdot s^{-1})$	2640,37	-4,4630		0,04
n_D	1,70315	-0,000657		0,01
Tolueno				
$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	1,14433	-0,000946		0,02
η/Cp	0,01269	1159,465	-8,46	0,17
$u/(m \cdot s^{-1})$	2561,9331	-4,2142		0,08
n_D	1,66804	-0,000584		0,00

Propiedad	A	B	C	AARD%
Tolueno + Dibenzotiofeno (0,1373 m)				
$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	1,15034	-0,000944		0,00
η/Cp	0,00853	1467,701	-49,88	0,17
$u/(m \cdot s^{-1})$	2559,0784	-4,1893		0,03
n_D	1,66896	-0,000573		0,00
Tolueno + Dibenzotiofeno (0,2080 m)				
$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	1,15296	-0,000941		0,00
η/Cp	0,00840	1465,028	-46,83	0,09
$u/(m \cdot s^{-1})$	2557,9171	-4,1776		0,03
n_D	1,67192	-0,000578		0,00
Tolueno + Dibenzotiofeno (0,2785 m)				
$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	1,15505	-0,000938		0,00
η/Cp	0,00791	1520,040	-52,86	0,09
$u/(m \cdot s^{-1})$	2556,3813	-4,1660		0,03
n_D	1,67281	-0,000573		0,00
Octano				
$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	0,94362	-0,000821		0,01
η/Cp	0,00326	2194,882	-135,79	0,31
$u/(m \cdot s^{-1})$	2380,341	-4,0486		0,03
n_D	1,54215	-0,000492		0,00
Octano + Dibenzotiofeno (0,1108 m)				
$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	0,95214	-0,000827		0,01
η/Cp	0,00700	1557,762	-62,50	0,13
$u/(m \cdot s^{-1})$	2378,227	-4,0281		0,03
n_D	1,54596	-0,000493		0,01
Octano + Dibenzotiofeno (0,1678 m)				
$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	0,95544	-0,000828		0,01
η/Cp	0,00716	1543,611	-60,16	0,09
$u/(m \cdot s^{-1})$	2377,1665	-4,0178		0,03
n_D	1,55289	-0,000508		0,00
Octano + Dibenzotiofeno (0,2247 m)				
$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	0,96119	-0,000835		0,01
η/Cp	0,00828	1449,08	-49,06	0,10
$u/(m \cdot s^{-1})$	2376,00	-4,0063		0,03
n_D	1,54964	-0,000492		0,00

En la **Figura 8** se presentan las diferencias en las densidades (ρ) para dibenzotiofeno con los diferentes disolventes orgánicos a diferentes molalidades.

Figura 8.

Densidad (ρ) en función de la temperatura para los sistemas: CH (\bullet), DBT+CH(0,1503) (\blacklozenge), DBT+CH (0,2277) (\blacktriangledown), DBT+CH (0,3044) (\blacktriangle), B(\bullet), DBT+B (0,1620) (\blacklozenge), DBT+B (0,2452) (\blacktriangledown), DBT+B (0,3284) (\blacktriangle), T (\bullet), DBT+T (0,1373) (\blacklozenge), DBT+T (0,2080) (\blacktriangledown), DBT+T (0,2785) (\blacktriangle), O (\bullet), DBT+O (0,1108) (\blacklozenge), DBT+O (0,1678) (\blacktriangledown), DBT+T (0,2247) (\blacktriangle)



Se puede observar en la **Figura 8** que, para las disoluciones estudiadas, la densidad disminuye su valor a medida que aumenta la temperatura en todo el rango de medición, siguiendo el orden de $[B] [DBT] > [T] [DBT] > [CH] [DBT] > [O] [DBT]$.

Los alcanos solo contienen enlaces sencillos entre el carbono y el hidrógeno, y estos no tienen una diferencia significativa de electronegatividad; como consecuencia produce una baja polaridad de enlace (Loudon, 2009). Las únicas fuerzas intermoleculares que actúan entre las moléculas de alcanos son las fuerzas de London o fuerzas de dispersión. Sin embargo, aunque los alcanos son similares a los cicloalcanos, estos últimos tienen mayores fuerzas de dispersión de London debido a que la forma del anillo permite una mayor área de contacto, por lo cual presentan mayores puntos de ebullición y de fusión, y así mismo, densidades más altas (Peiris, 2022). Debido a esto las densidades de las mezclas con ciclohexano son mayores que las del octano.

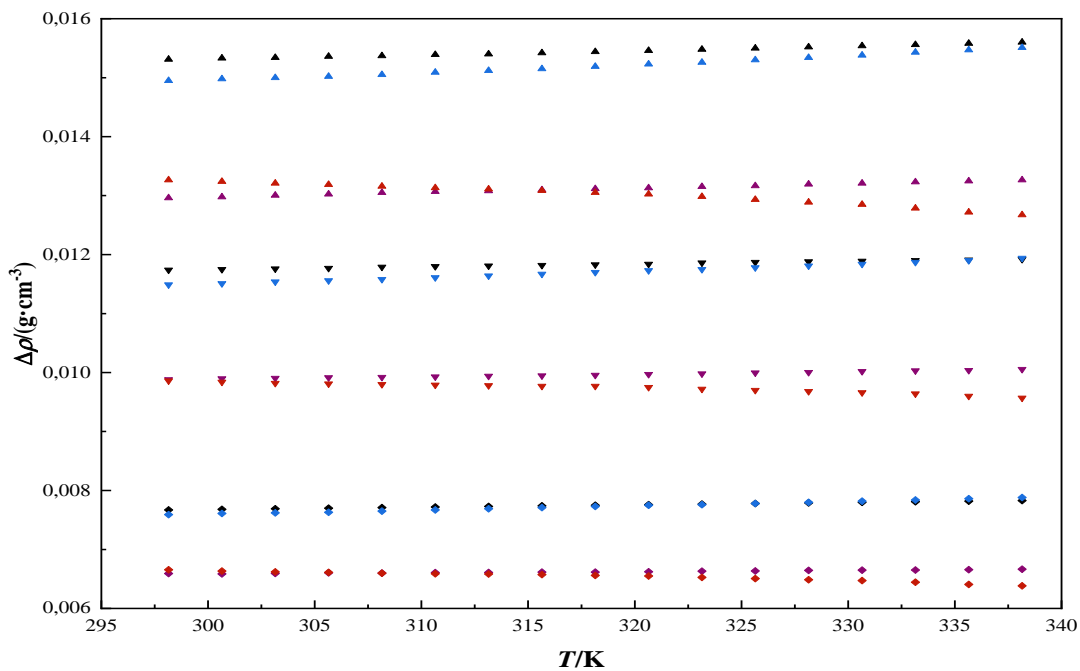
Por otro lado, al igual que los alcanos, los hidrocarburos aromáticos son no polares. Debido a la forma de anillo y sus dobles enlaces hace que las mezclas con benceno y tolueno tengan mayores densidades que las mezclas con alcanos. El grupo metilo ($-\text{CH}_3$) al ser un grupo liberador de electrones, aumenta la densidad de electrones del anillo bencénico de las moléculas aromáticas; sin embargo, la tendencia a aceptar electrones del anillo aromático disminuirá, ya que se genera una disminución de la interacción donante-aceptante entre moléculas distintas con un aumento del número del grupo metilo en la molécula del hidrocarburo aromático, provocando una expansión del volumen de la mezcla (Nain, 2006). Por lo que la mezcla con tolueno tendrá mayor volumen que la de benceno y explicaría porque el benceno y sus mezclas presentan mayor densidad.

Además, se puede observar que a mayor molalidad se obtienen densidades mayores para todas las mezclas.

En la **Figura 9** se aprecia que los compuestos totalmente cíclicos y sin ramificación, es decir las mezclas de ciclohexano y benceno, presentan la mayor desviación respecto a los solventes puros en comparación del tolueno que presenta una ramificación y el octano que tiene forma lineal.

Figura 9.

Desviaciones de las densidades de las mezclas con respecto a los solventes puros de DBT+CH (0,1503) (◆), DBT+CH (0,2277) (▼), DBT+CH (0,3044) (▲), DBT+B (0,1620) (◇), DBT+B (0,2452) (▽), DBT+B (0,3284) (▲), DBT+T (0,1373) (◆), DBT+T (0,2080) (▼), DBT+T (0,2785) (▲), DBT+O (0,1108) (◇), DBT+O (0,1678) (▼), DBT+T (0,2247) (▲)



La viscosidad dinámica en la **Figura 10** decrece exponencialmente con la temperatura en todo el rango de medición, siguiendo la secuencia [CH][DB] > [B][DB] > [T] [DBT] > [O] [DBT].

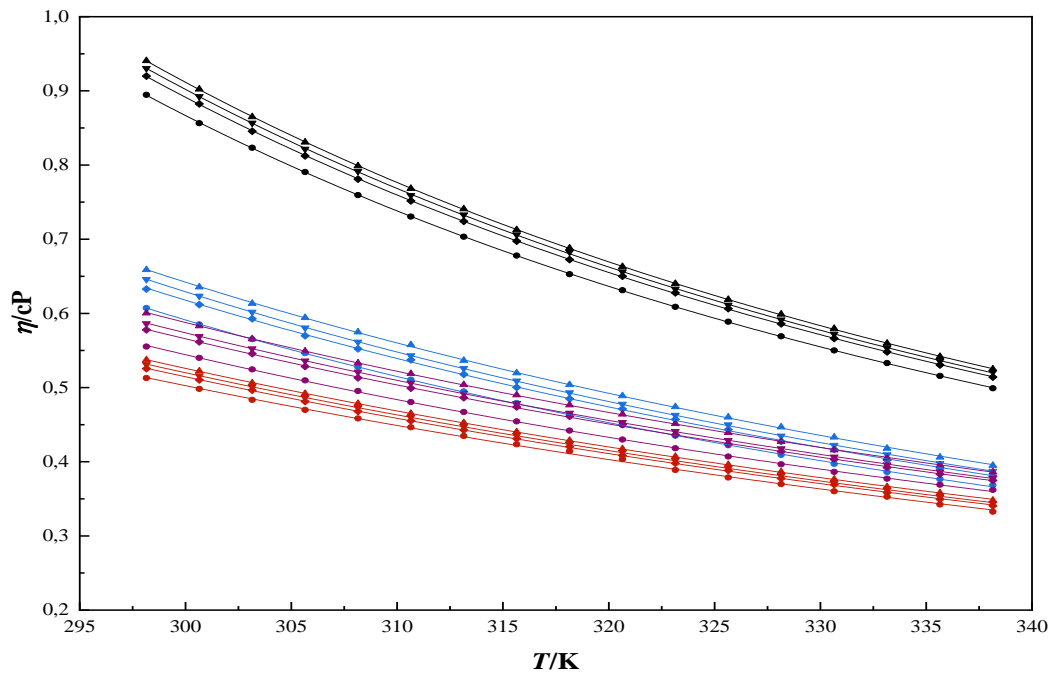
Cuando las moléculas son cíclicas y sin ramificaciones presentan mayores viscosidades, dado que estas cuentan con mayores fuerzas de dispersión; es por esto que el octano presenta una baja viscosidad en comparación de las otras mezclas.

El ciclohexano al presentar una forma cíclica con enlaces simples y con una masa molar de 84,16 g/mol se aprecia viscosidades mayores a las del tolueno y el benceno que cuentan en su estructura con dobles enlaces.

Adicionalmente, se contempla que con mayores molalidades se obtienen viscosidades numéricamente más grandes.

Figura 10.

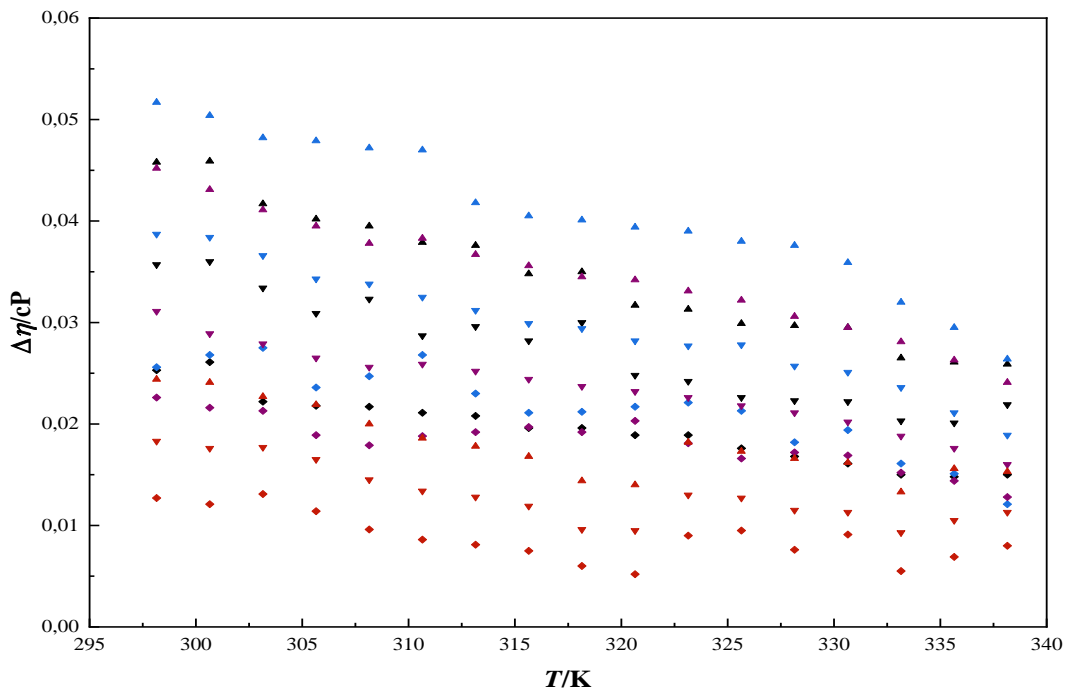
Viscosidad (η) en función de la temperatura para los sistemas: CH (●), DBT+CH (0,1503) (◆), DBT+CH (0,2277) (▼), DBT+CH (0,3044) (▲), B(●), DBT+B (0,1620) (◆), DBT+B (0,2452) (▼), DBT+B (0,3284) (▲), T (●), DBT+T (0,1373) (◆), DBT+T (0,2080) (▼), DBT+T (0,2785) (▲), O (●), DBT+O (0,1108) (◆), DBT+O (0,1678) (▼), DBT+T (0,2247) (▲)



En la **Figura 11** se percibe en los compuestos cíclicos y sin ramificaciones, mezcla de benceno y ciclohexano, las mayores desviaciones de viscosidad respecto a los solventes puros y las mezclas de octano presentan las menores desviaciones debido a su estructura lineal.

Figura 11.

Desviaciones de las viscosidades de las mezclas con respecto a los solventes puros de DBT+CH (0,1503) (◆), DBT+CH (0,2277) (▼), DBT+CH (0,3044) (▲), DBT+B (0,1620) (◇), DBT+B (0,2452) (▽), DBT+B (0,3284) (▲), DBT+T (0,1373) (◆), DBT+T (0,2080) (▼), DBT+T (0,2785) (▲), DBT+O (0,1108) (◇), DBT+O (0,1678) (▼), DBT+T (0,2247) (▲)

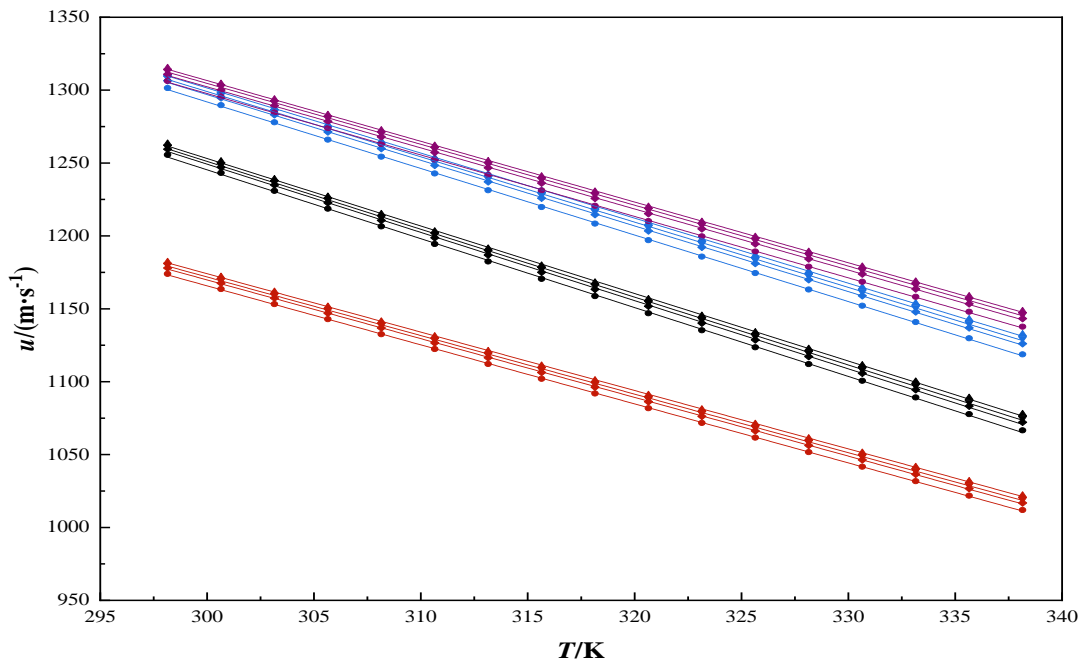


En la **Figura 12** se observa que la velocidad del sonido decrece linealmente con la temperatura en todo el rango de medición, siguiendo la secuencia [T] [DBT] > [B][DB] > [CH][DB] > [O] [DBT].

Las velocidades del sonido que se reportan para cada sistema del mismo compuesto son numéricamente cercanas a pesar de tener composiciones distintas. Se aprecia una cercanía entre datos ya que tienen una diferencia aproximadamente de $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ para la misma condición de temperatura en diferente concentración. Adicionalmente, se distingue a los alquenos como los sistemas con mayor valor de esta propiedad y además exhiben valores parecidos para las bajas temperaturas (298,15-303,15K).

Figura 12.

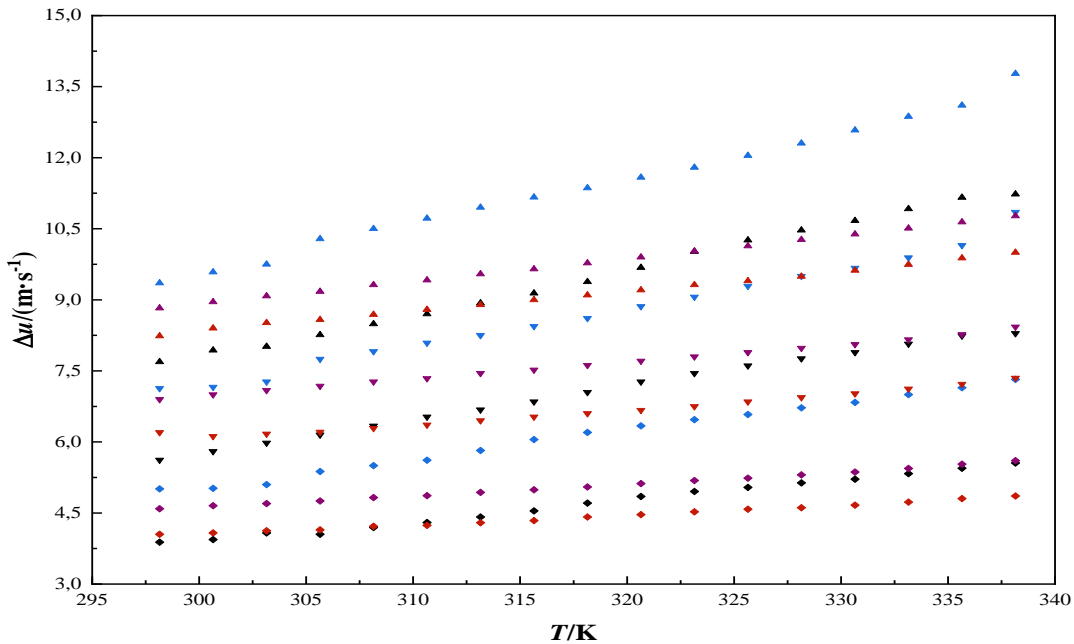
Velocidad del sonido (u) en función de la temperatura para los sistemas: CH (●), DBT+CH (0,1503) (◆), DBT+CH (0,2277) (▼), DBT+CH (0,3044) (▲), B(●), DBT+B (0,1620) (◆), DBT+B (0,2452) (▼), DBT+B (0,3284) (▲), T (●), DBT+T (0,1373) (◆), DBT+T (0,2080) (▼), DBT+T (0,2785) (▲), O (●), DBT+O (0,1108) (◆), DBT+O (0,1678) (▼), DBT+O (0,2247) (▲)



En la **Figura 13** los compuestos que tienen doble enlace, los sistemas benceno y tolueno presentan la mayor desviación de la velocidad del sonido respecto a los solventes puros y las mezclas de ciclohexano presentan las menores desviaciones hasta la temperatura de 310 K, luego de esta temperatura las mezclas de octano presentan menores desviaciones.

Figura 13.

Desviaciones de las velocidades del sonido de las mezclas con respecto a los solventes puros de $DBT+CH$ (0,1503) (\blacklozenge), $DBT+CH$ (0,2277) (\blacktriangledown), $DBT+CH$ (0,3044) (\blacktriangle), $DBT+B$ (0,1620) (\blacklozenge), $DBT+B$ (0,2452) (\blacktriangledown), $DBT+B$ (0,3284) (\blacktriangle), $DBT+T$ (0,1373) (\blacklozenge), $DBT+T$ (0,2080) (\blacktriangledown), $DBT+T$ (0,2785) (\blacktriangle), $DBT+O$ (0,1108) (\blacklozenge), $DBT+O$ (0,1678) (\blacktriangledown), $DBT+T$ (0,2247) (\blacktriangle)

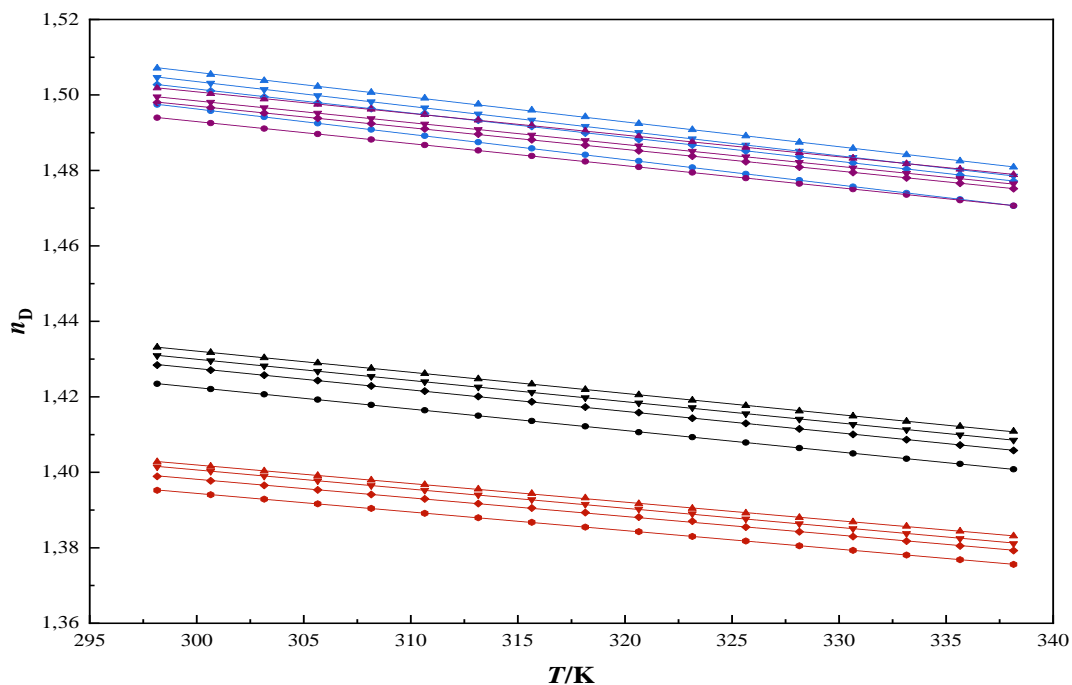


En la **Figura 14** el índice de refracción decrece linealmente con la temperatura en todo el rango de medición. Los valores de n_D decrecen siguiendo la siguiente secuencia [B] [DBT] > [T][DB] > [CH][DB] > [O] [DBT].

Las mezclas con moléculas cíclicas de doble enlace presentan mayores índices de refracción; además, el tolueno y el benceno tienen valores similares ya que comparten el rango de medida (1,470-1,500 n_D), por lo cual se puede afirmar que el grupo metilo no afecta en gran medida esta propiedad.

Figura 14.

Índice de refracción (n_D) en función de la temperatura para los sistemas: CH (●), DBT+CH (0,1503) (◆), DBT+CH (0,2277) (▼), DBT+CH (0,3044) (▲), B(●), DBT+B (0,1620) (◆), DBT+B (0,2452) (▼), DBT+B (0,3284) (▲), T (●), DBT+T (0,1373) (◆), DBT+T (0,2080) (▼), DBT+T (0,2785) (▲), O (●), DBT+O (0,1108) (◆), DBT+O (0,1678) (▼), DBT+O (0,2247) (▲)

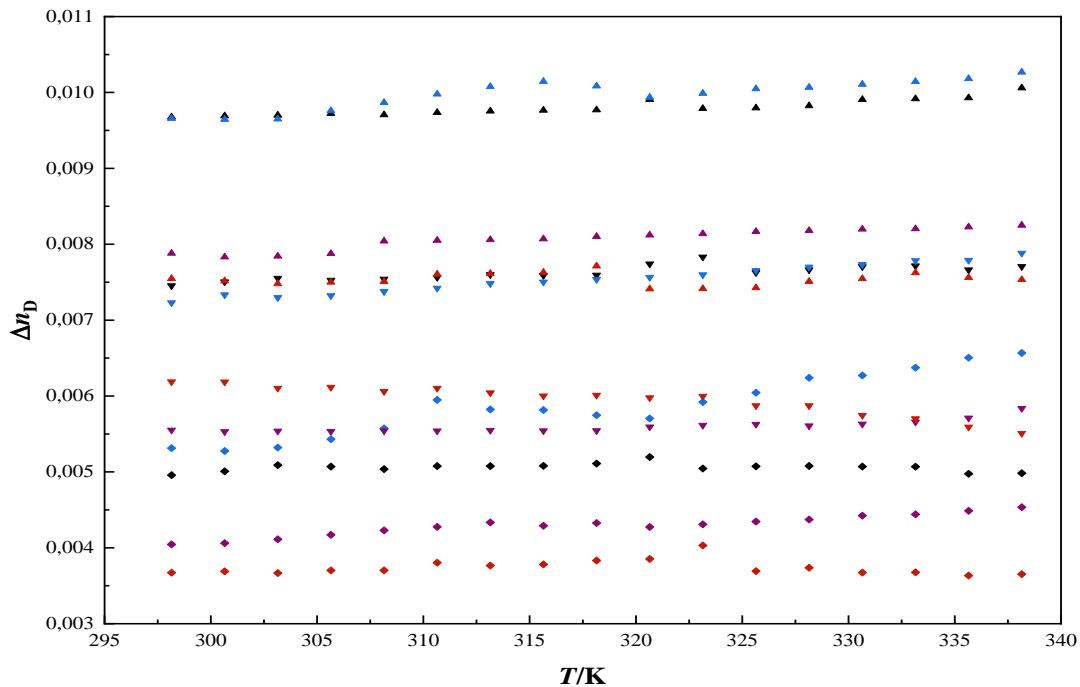


Se percibe en la **Figura 15** que los compuestos cíclicos y sin ramificaciones, sistemas benceno y ciclohexano presentan la mayor desviación respecto a los solventes puros para el índice

de refracción. Las mezclas de octano presentan las menores desviaciones, excepto para la mezcla con molalidad de 0,1678, donde la mezcla de tolueno tiene una menor desviación comparado con los datos de las otras mezclas para esta molalidad.

Figura 15.

Desviaciones de los índices de refracción de las mezclas con respecto a los solventes puros de DBT+CH (0,1503) (◆), DBT+CH (0,2277) (▼), DBT+CH (0,3044) (▲), DBT+B (0,1620) (◆), DBT+B (0,2452) (▼), DBT+B (0,3284) (▲), DBT+T (0,1373) (◆), DBT+T (0,2080) (▼), DBT+T (0,2785) (▲), DBT+O (0,1108) (◆), DBT+O (0,1678) (▼), DBT+T (0,2247) (▲)



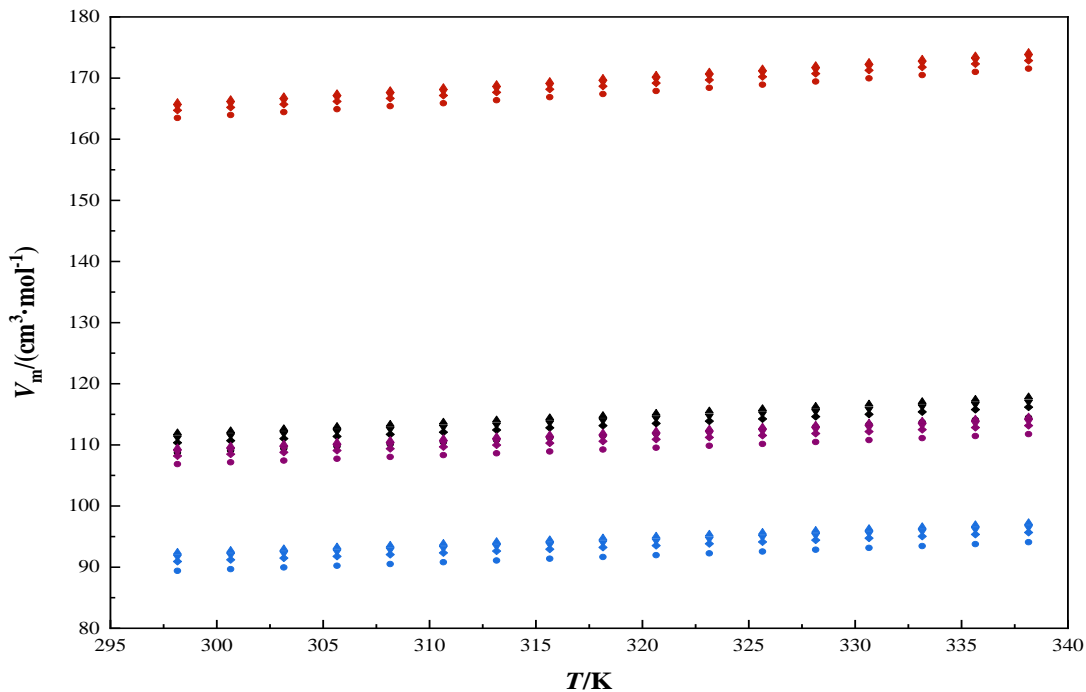
En la **Figura 16** el volumen molar es inversamente proporcional a la densidad; por esta razón el octano y el benceno presentan un mayor y menor V_m , respectivamente. Además, debido

a la masa molecular del tolueno (92,14 g/mol) y del ciclohexano (84,16 g/mol), sus volúmenes molares se acercan en el rango de $108,00\text{-}117,00\text{ cm}^3\cdot\text{mol}^{-1}$.

Asimismo, se observa que a mayores molalidades se obtiene un mayor volumen molar. De la misma forma, a medida que aumenta la temperatura, los valores aumentan de forma lineal.

Figura 16.

Volumen molar (V_m) en función de la temperatura para los sistemas: CH (●), DBT+CH (0,1503) (◆), DBT+CH (0,2277) (▼), DBT+CH (0,3044) (▲), B(●), DBT+B (0,1620) (◆), DBT+B (0,2452) (▼), DBT+B (0,3284) (▲), T (●), DBT+T (0,1373) (◆), DBT+T (0,2080) (▼), DBT+T (0,2785) (▲), O (●), DBT+O (0,1108) (◆), DBT+O (0,1678) (▼), DBT+O (0,2247) (▲)



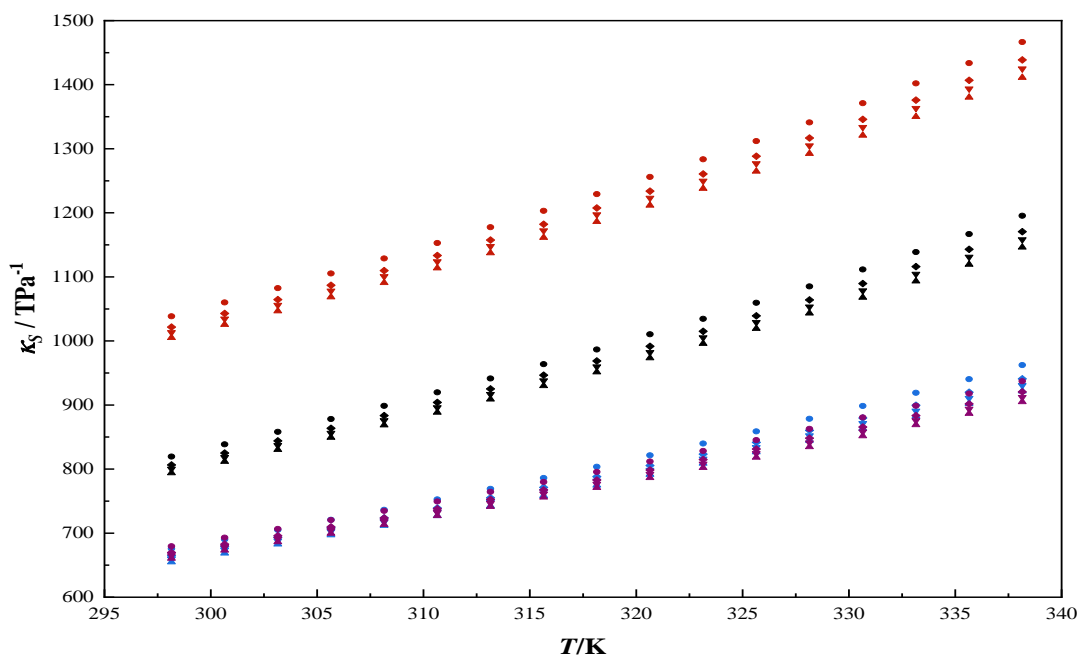
La compresibilidad isoentrópica en la **Figura 17** aumenta linealmente con la temperatura en todo el rango de medición y se observa que es mayor para la mezcla de octano; así mismo, se

puede apreciar que las mezclas con moléculas cíclicas con doble enlace tienen valores muy similares.

Adicionalmente, la molalidad es inversamente proporcional a la compresibilidad isoentrópica.

Figura 17.

Compresibilidad isoentrópica (κ_s) en función de la temperatura para los sistemas: CH (●), DBT+CH (0,1503) (◆), DBT+CH (0,2277) (▼), DBT+CH (0,3044) (▲), B(●), DBT+B (0,1620) (◆), DBT+B (0,2452) (▼), DBT+B (0,3284) (▲), T (●), DBT+T (0,1373) (◆), DBT+T (0,2080) (▼), DBT+T (0,2785) (▲), O (●), DBT+O (0,1108) (◆), DBT+O (0,1678) (▼), DBT+T (0,2247) (▲)

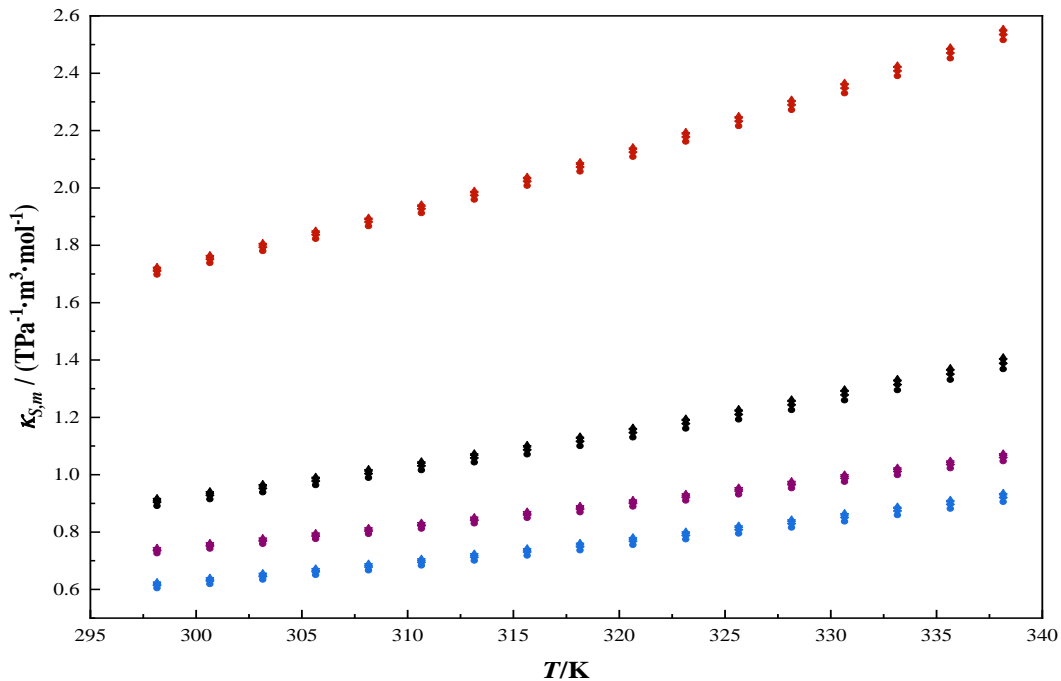


En la **Figura 18** la compresibilidad isoentrópica molar aumenta linealmente con la temperatura en todo el rango de medición, siguiendo la secuencia: [O] [DBT] > [CH][DB] > [T][DB] > [B] [DBT].

Adicionalmente, la molalidad es directamente proporcional a la compresibilidad isoentrópica molar.

Figura 18.

Compresibilidad isoentrópica molar ($\kappa_{s,m}$) en función de la temperatura para los sistemas: CH (●), DBT+CH (0,1503) (◆), DBT+CH (0,2277) (▼), DBT+CH (0,3044) (▲), B(●), DBT+B (0,1620) (◆), DBT+B (0,2452) (▼), DBT+B (0,3284) (▲), T (●), DBT+T (0,1373) (◆), DBT+T (0,2080) (▼), DBT+T (0,2785) (▲), O (●), DBT+O (0,1108) (◆), DBT+O (0,1678) (▼), DBT+O (0,2247) (▲)

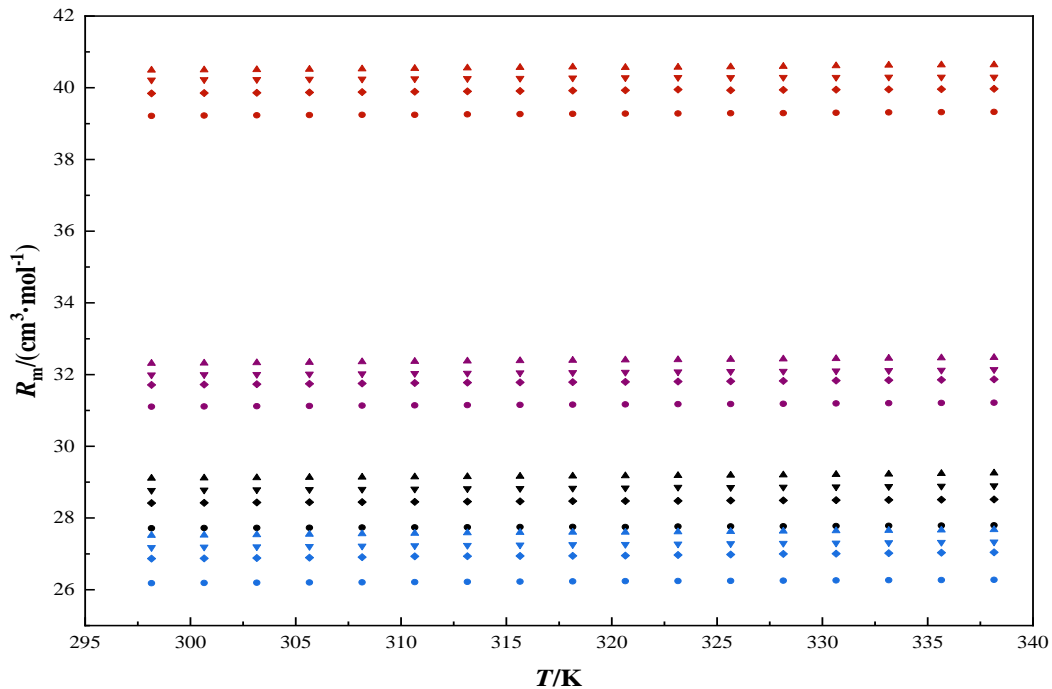


La refracción molar en la **Figura 19** es aproximadamente constante con la temperatura en cada sistema en todo el rango de medición. Los valores de R_m decrecen siguiendo la siguiente secuencia [O] [DBT] > [T][DB] > [CH][DB] > [B] [DBT].

Además, la molalidad es directamente proporcional a la refracción molar

Figura 19.

Refracción molar (R_m) en función de la temperatura para los sistemas: CH (●), DBT+CH (0,1503) (◆), DBT+CH (0,2277) (▼), DBT+CH (0,3044) (▲), B(●), DBT+B (0,1620) (◆), DBT+B (0,2452) (▼), DBT+B (0,3284) (▲), T (●), DBT+T (0,1373) (◆), DBT+T (0,2080) (▼), DBT+T (0,2785) (▲), O (●), DBT+O (0,1108) (◆), DBT+O (0,1678) (▼), DBT+T (0,2247) (▲)



5. Conclusiones

Los datos obtenidos para las mediciones experimentales de las propiedades termofísicas: densidad, viscosidad dinámica, velocidad de propagación del sonido e índice de refracción de los solventes puros son válidas debido a que corresponden y se aproximan a los encontrados en la literatura.

Por medio de la densidad, viscosidad, velocidad de propagación del sonido e índice de refracción se determinó que, a mayor cantidad de dibenzotiofeno agregado, es decir a mayor molalidad, se obtienen mayores valores de cada propiedad. Igualmente, a medida que se aumenta la temperatura estos van disminuyendo; en los casos de la densidad, velocidad del sonido y del índice de refracción, lo hace de forma lineal y en el caso de la viscosidad, de forma exponencial. También se evidencia la importancia de la estructura de las moléculas ya que se pudo observar que se presentan mayor magnitud de las propiedades termofísicas cuando la molécula es cíclica.

Las propiedades calculadas: volumen molar, compresibilidad isoentrópica, compresibilidad isoentrópica molar y refracción molar son mayores para el octano, contrario al comportamiento presentado en las otras propiedades. Asimismo, se evidenció que los datos son directamente proporcionales con la temperatura.

Las propiedades termofísicas medidas fueron correlacionadas con la ecuación lineal y la ecuación de Vogel-Fulcher-Tammann con gran precisión y exactitud, presentando AARD menores a 0,5%

6. Recomendaciones

Para futuras experimentaciones se recomienda el uso de otras moléculas sulfuradas o distintos solventes orgánicos con una estructura química diferente para analizar si tienen el mismo comportamiento presente en este trabajo.

Evaluar la influencia de la presión sobre las mezclas binarias a temperatura constante, para ampliar el conocimiento sobre las propiedades termofísicas con dibenzotiofeno.

Referencias Bibliográficas

- Acree, W. E. (2013). IUPAC-NIST Solubility Data Series. 98. Solubility of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Pure and Organic Solvent Mixtures—Revised and Updated. Part 3. Neat Organic Solvents. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 42(1), 013105. <https://doi.org/10.1063/1.4775402>
- Adak, S., & Begley, T. P. (2019). *Flavin-N5-oxide intermediates in dibenzothiophene, uracil, and hexachlorobenzene catabolism* (pp. 455–468). <https://doi.org/10.1016/bs.mie.2019.03.020>
- Anton Paar. (2011). *Instruction Manual DSA 5000 M*.
- Anton Paar. (2015). *Abbe refractometers automatic high performance*.
- Assael, M. J., Dalaouti, N. K., & Dymond, J. H. (2000). The Viscosity of Toluene in the Temperature Range 210 to 370 K. *International Journal of Thermophysics*, 21(2), 291–299. <https://doi.org/10.1023/A:1006628008963>
- Banipal, T. S., Garg, S. K., & Ahluwalia, J. C. (1991). Heat capacities and densities of liquid n-octane, n-nonane, n-decane, and n-hexadecane at temperatures from 318.15 K to 373.15 K and at pressures up to 10 MPa. *The Journal of Chemical Thermodynamics*, 23(10), 923–931. [https://doi.org/10.1016/S0021-9614\(05\)80173-9](https://doi.org/10.1016/S0021-9614(05)80173-9)
- Beg, S. A., Tukur, N. M., Al-Harbi, D. K., & Hamad, E. Z. (1993). Saturated liquid densities of benzene, cyclohexane, and hexane from 298.15 to 473.15 K. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 38(3), 461–464. <https://doi.org/10.1021/je00011a035>

- Chappelow, C. C., Snyder, P. S., & Winnick, Jack. (1971). Density of liquid n-octane. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 16(4), 440–442. <https://doi.org/10.1021/je60051a036>
- Clark, D. P., & Pazdernik, N. J. (2016). Synthetic Biology. In *Biotechnology* (pp. 419–445). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385015-7.00013-2>
- Cominges, B. E. de, Piñeiro, M. M., Mosteiro, E., Mascato, E., Mato, M. M., Iglesias, T. P., & Legido, J. L. (2002). Temperature dependence of thermophysical properties of octane+1-butanol system. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 70(1), 217–227. <https://doi.org/10.1023/A:1020626205538>
- Domańska, U., Królikowska, M., & Walczak, K. (2014). Density, Viscosity and Surface Tension of Binary Mixtures of 1-Butyl-1-Methylpyrrolidinium Tricyanomethanide with Benzothiophene. *Journal of Solution Chemistry*, 43(11), 1929–1946. <https://doi.org/10.1007/s10953-014-0257-1>
- Dragoescu, D., Sirbu, F., & Shchamialiou, A. (2019). Thermodynamic properties for binary mixtures of 1-chlorohexane + some hydrocarbons at different temperatures and atmospheric pressure. *Journal of Molecular Liquids*, 294, 111510. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.111510>
- Gómez-Díaz, D., Mejuto, J. C., & Navaza, J. M. (2001). Physicochemical Properties of Liquid Mixtures. 1. Viscosity, Density, Surface Tension and Refractive Index of Cyclohexane + 2,2,4-Trimethylpentane Binary Liquid Systems from 25 °C to 50 °C. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 46(3), 720–724. <https://doi.org/10.1021/je000310x>

- Goncalves, F. A., Hamano, K., Sengers, J. v., & Kestin, J. (1987). Viscosity of liquid toluene in the temperature range 25-75°C. *International Journal of Thermophysics*, 8(6), 641–647. <https://doi.org/10.1007/BF00500784>
- Guseinov, S. O., Naziev, Ya. M., & Akhmedov, A. K. (1973). Viskosität von Cyclohexan bei hohen Drücken. *Izv.Vyssh.Uchebn.Zaved.Neft Gaz*, 65–67.
- Hales, J. L., & Townsend, R. (1972). Liquid densities from 293 to 490 K of nine aromatic hydrocarbons. *The Journal of Chemical Thermodynamics*, 4(5), 763–772. [https://doi.org/10.1016/0021-9614\(72\)90050-X](https://doi.org/10.1016/0021-9614(72)90050-X)
- Harris, K. R., Malhotra, R., & Woolf, L. A. (1997). Temperature and Density Dependence of the Viscosity of Octane and Toluene. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 42(6), 1254–1260. <https://doi.org/10.1021/je970105q>
- Kashiwagi, H., Hashimoto, T., Tanaka, Y., Kubota, H., & Makita, T. (1982). Thermal conductivity and density of toluene in the temperature range 273–373 K at pressures up to 250 MPa. *International Journal of Thermophysics*, 3(3), 201–215. <https://doi.org/10.1007/BF00503316>
- Kerscher, M., Fröba, A. P., & Koller, T. M. (2021). Viscosity and Surface Tension of Benzene at Saturation Conditions from Surface Light Scattering. *International Journal of Thermophysics*, 42(11), 159. <https://doi.org/10.1007/s10765-021-02909-7>
- Khasanshin, T. S., & Shchemelev, A. P. (2001). Sound Velocity in Liquid n-Alkanes. High Temperature. *High Temperature*, 39(1), 60–67. <https://doi.org/10.1023/A:1004170530517>
- Klein, T., Yan, S., Cui, J., Magee, J. W., Kroenlein, K., Rausch, M. H., Koller, T. M., & Fröba, A. P. (2019). Liquid Viscosity and Surface Tension of n -Hexane, n -Octane, n -Decane, and n -

- Hexadecane up to 573 K by Surface Light Scattering. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 64(9), 4116–4131. <https://doi.org/10.1021/acs.jced.9b00525>
- Loudon, M. (2009). *Organic Chemistry*. Roberts and Company Publishers.
- Mamedov, A. M., Akhundov, T. S., Ismail-Zade, Sh. M., & Tairov, A. D. (1971). Viskosität von Benzen. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Neft Gaz*, 74–76.
- Mariano, A., Postigo, M., González-Salgado, D., & Romaní, L. (2007). Densities, speeds of sound, and refractive indices of the ternary mixtures (toluene+methyl acetate+butyl acetate) and (toluene+methyl acetate+methyl heptanoate) at 298.15K. *The Journal of Chemical Thermodynamics*, 39(2), 218–224. <https://doi.org/10.1016/j.jct.2006.07.013>
- McLinden, M. O., & Splett, J. D. (2008). A liquid density standard over wide ranges of temperature and pressure based on toluene. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 113(1), 29. <https://doi.org/10.6028/jres.113.005>
- Montaño, D. (2011). *Propiedades termofísicas de sistemas cloroalcano-éter estudio experimental y mediante métodos de contribución de grupos*.
- Morales-Valencia, E. M., Vargas-Montañez, O. J., Monroy-García, P. A., Avendaño-Barón, L. G., Quintero-Quintero, E. A., Elder-Bueno, C., Santiago-Guerrero, A. Y., & Baldovino-Medrano, V. G. (2021). Conditions for increasing the hydrodesulfurization of dibenzothiophene when co-feeding naphthalene, quinoline, and indole. *Journal of Catalysis*, 404, 204–209. <https://doi.org/10.1016/j.jcat.2021.09.021>

- Nain, A. K. (2006). Densities and Volumetric Properties of Binary Mixtures of Tetrahydrofuran with Some Aromatic Hydrocarbons at Temperatures from 278.15 to 318.15 K. *Journal of Solution Chemistry*, 35(10), 1417–1439. <https://doi.org/10.1007/s10953-006-9071-8>
- Neruchev, Yu. A., Bolotnikov, M. F., & Zotov, V. v. (2005). Investigation of ultrasonic velocity in organic liquids on the saturation curve. *High Temperature*, 43(2), 266–309. <https://doi.org/10.1007/s10740-005-0067-7>
- Ortega, J., & Matos, J. S. (1986). Estimation of the isobaric expansivities from several equations of molar refraction for some pure organic compounds. *Materials Chemistry and Physics*, 15(5), 415–425. [https://doi.org/10.1016/0254-0584\(86\)90025-8](https://doi.org/10.1016/0254-0584(86)90025-8)
- Peiris, N. (2022). Physical Properties of Cycloalkanes. *LibreTexts Chemistry*.
- Reinado, C., Pelegrina, A., Sánchez-Rubio, M., Artigas, H., & Lafuente, C. (2022). Thermophysical Study of Pyridinium-Based Ionic Liquids Sharing Ions. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 67(3), 636–643. <https://doi.org/10.1021/acs.jced.1c00925>
- Rubio, J. E. F., Arsuaga, J. M., Taravillo, M., Baonza, V. G., & Cáceres, M. (2004). Refractive index of benzene and methyl derivatives: temperature and wavelength dependencies. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 28(8), 887–891. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2004.01.008>
- Sharma, C., Bakshi, A., Kumar, A., & Bamezai, R. K. (2022). Densities, viscosities, speeds of sound and refractive indices for binary mixtures of N-Vinyl-2-pyrrolidinone with n-Alcohols (C₄-C₇) at 293.15 to 313.15 K. *Physics and Chemistry of Liquids*, 60(3), 409–426. <https://doi.org/10.1080/00319104.2021.1986820>

- Sirbu, F., Dragoescu, D., Shchamialiou, A., & Khasanshin, T. (2019). Densities, speeds of sound, refractive indices, viscosities and their related thermodynamic properties for n-hexadecane + two aromatic hydrocarbons binary mixtures at temperatures from 298.15 K to 318.15 K. *The Journal of Chemical Thermodynamics*, 128, 383–393. <https://doi.org/10.1016/j.jct.2018.08.036>
- Sun, T. F., Kortbeek, P. J., Trappeniers, N. J., & Biswas, S. N. (1987). Acoustic and Thermodynamic Properties of Benzene and Cyclohexane as a Function of Pressure and Temperature. *Physics and Chemistry of Liquids*, 16(3), 163–178. <https://doi.org/10.1080/00319108708078516>
- Sun, T. F., Schouten, J. A., Trappeniers, N. J., & Biswas, S. N. (1988). Measurements of the densities of liquid benzene, cyclohexane, methanol, and ethanol as functions of temperature at 0.1 MPa. *The Journal of Chemical Thermodynamics*, 20(9), 1089–1096. [https://doi.org/10.1016/0021-9614\(88\)90115-2](https://doi.org/10.1016/0021-9614(88)90115-2)
- TRC. (1998). Databases for Chemistry and Engineering-SOURCE Database Version 1998-2. *Thermodynamics Research Center, Texas A&M University System, College Station, TX.*
- Ukkirapandian, V., Sadasivam, V., & Sivasankar, B. (2008). Oxidation of Dibenzothiophene and Desulphurization of Diesel. *Petroleum Science and Technology*, 26(4), 423–435. <https://doi.org/10.1080/10916460600809626>
- Vasundhara, P., Narasimha Rao, C., Venkatramana, L., Sivakumar, K., Venkateswarlu, P., & Gardas, R. L. (2015). Thermodynamic properties of binary mixtures of aniline with halogenated aromatic hydrocarbons: Measurements and correlations. *Journal of Molecular Liquids*, 202, 158–164. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2014.12.024>

- Vieira dos Santos, F. J., & de Castro, C. A. N. (1997). Viscosity of toluene and benzene under high pressur. *International Journal of Thermophysics*, 18(2), 367–378.
<https://doi.org/10.1007/BF02575167>
- Yang, C., Xu, W., & Ma, P. (2004). Thermodynamic Properties of Binary Mixtures of *p*-Xylene with Cyclohexane, Heptane, Octane, and *N*-Methyl-2-pyrrolidone at Several Temperatures. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 49(6), 1794–1801.
<https://doi.org/10.1021/je049776w>
- Zakurenov, V. M., Konyakhin, V. P., & Nozdrev, V. F. (1975). The Viscosities of Ethanol - Cyclohexane Mixtures. *Russ. J. Phys. Chem.* 49: 320–21.

Apéndices

Apéndice A. Reactivos y proveedores

Tabla A1.

Descripción de los reactivos

Compuestos	CASRN	Proveedor	Pureza
Ciclohexano	110-82-7	Sigma-Aldrich	99,5%
Benceno	71-43-2	Farmitalia Carlo Erba Laboratorio S.A.	99,5%
Tolueno	108-88-3	Labkem	99,9%
Octano	111-65-9	Sigma-Aldrich	≥99%
Dibenzotiofeno	132-65-0	Acros Organics	99,9%

Apéndice B. Tabla comparación entre datos experimentales y literatura

Tabla B1.

Comparación entre los valores medidos experimentalmente y los reportados en la literatura de la densidad, viscosidad, velocidad del sonido e índice de refracción del ciclohexano, benceno, tolueno y octano puros a diferentes temperaturas y a presión atmosférica.

T/K	$\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$		η / cP		$u / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$		n_D	
	Exp	Lit	Exp	Lit	Exp	Lit	Exp	Lit
Ciclohexano								
298,15	0,77397	0,77362 ^[a]	0,8949	0,8958 ^[c]	1255,60	1256,70 ^[f]	1,4235	1,4235 ^[g]
300,65	0,77160		0,8566		1243,20		1,4221	
303,15	0,76923	0,76879 ^[a]	0,8235	0,8224 ^[c]	1230,89	1230,80 ^[f]	1,4207	1,4208 ^[g]
305,65	0,76685		0,7908		1218,65		1,4193	
308,15	0,76447	0,76434 ^[b]	0,7595	0,7575 ^[c]	1206,50	1206,50 ^[f]	1,4179	1,4181 ^[g]
310,65	0,76207		0,7307		1194,43		1,4164	

T/K	$\rho/(g \cdot cm^{-3})$		η/cP		$u/(m \cdot s^{-1})$		n_D	
	Exp	Lit	Exp	Lit	Exp	Lit	Exp	Lit
313,15	0,75968	0,75946 ^[a]	0,7035	0,6995 ^[c]	1182,45	1182,70 ^[f]	1,4150	1,4154 ^[h]
315,65	0,75727		0,6780		1170,54		1,4136	
318,15	0,75486	0,75467 ^[b]	0,6530	0,6536 ^[c]	1158,70	1159,10 ^[f]	1,4122	1,4125 ^[g]
320,65	0,75244		0,6314		1146,92		1,4106	
323,15	0,75001	0,74994 ^[b]	0,6089	0,6060 ^[d]	1135,23	1135,80 ^[f]	1,4093	1,4097 ^[g]
325,65	0,74758		0,5889		1123,62		1,4079	
328,15	0,74513	0,74491 ^[b]	0,5692		1112,08		1,4064	
330,65	0,74268		0,5502		1100,61		1,4050	
333,15	0,74022	0,74025 ^[a]	0,5332	0,5330 ^[e]	1089,17		1,4036	
335,65	0,73775		0,5158		1077,78		1,4022	
338,15	0,73528		0,4992		1066,63		1,4008	
Benceno								
298,15	0,87370	0,87360 ^[i]	0,6072	0,6070 ^[j]	1301,46	1300,2 ^[m]	1,4974	1,4979 ^[p]
300,65	0,87102		0,5851		1289,67		1,4958	
303,15	0,86834	0,86829 ^[i]	0,5652	0,5644 ^[k]	1277,98	1278,1 ^[n]	1,4942	1,4948 ^[p]
305,65	0,86566		0,5463		1265,99		1,4925	
308,15	0,86297	0,86304 ^[b]	0,5276		1254,38	1254,0 ^[n]	1,4908	1,4914 ^[p]
310,65	0,86027		0,5106		1242,81		1,4892	
313,15	0,85758	0,85737 ^[b]	0,4947	0,4910 ^[l]	1231,29	1231,0 ^[n]	1,4875	
315,65	0,85488		0,4792		1219,83		1,4858	
318,15	0,85217	0,85130 ^[b]	0,4637		1208,44	1208,4 ^[n]	1,4842	1,4848 ^[f]
320,65	0,84946		0,4495		1197,07		1,4825	
323,15	0,84675	0,84666 ^[b]	0,4351	0,4358 ^[l]	1185,76	1185,7 ^[n]	1,4808	1,4815 ^[f]
325,65	0,84403		0,4221		1174,49		1,4791	
328,15	0,84130	0,84140 ^[b]	0,4092		1163,26		1,4774	
330,65	0,83857		0,3972		1152,08		1,4757	
333,15	0,83582	0,83581 ^[b]	0,3860	0,3930 ^[l]	1140,92	1139,0 ^[o]	1,4740	
335,65	0,83307		0,3766		1129,82		1,4723	
338,15	0,83033		0,3685		1118,75		1,4706	
Tolueno								
298,15	0,86231	0,86230 ^[q]	0,5552	0,5549 ^[i]	1306,34	1306,3 ^[u]	1,4940	1,4939 ^[u]
300,65	0,85997		0,5400		1295,46		1,4925	
303,15	0,85764	0,85754 ^[r]	0,5245	0,5285 ^[s]	1284,63	1284,0 ^[o]	1,4911	1,4911 ^[g]
305,65	0,85530		0,5096		1273,86		1,4896	
308,15	0,85295		0,4953		1263,12		1,4882	1,4884 ^[p]
310,65	0,85060		0,4804		1252,45		1,4867	
313,15	0,84825	0,84840 ^[q]	0,4671	0,4669 ^[t]	1241,80	1241,0 ^[o]	1,4853	

T/K	$\rho/(g \cdot cm^{-3})$		η/cP		$u/(m \cdot s^{-1})$		n_D	
	Exp	Lit	Exp	Lit	Exp	Lit	Exp	Lit
315,65	0,84589		0,4543		1231,22		1,4838	
318,15	0,84353		0,4420		1220,67		1,4824	1,4827 ^[gl]
320,65	0,84117		0,4299		1210,16		1,4809	
323,15	0,83880	0,83890 ^[ql]	0,4182	0,4215 ^[jl]	1199,69	1199,0 ^[ol]	1,4795	1,4798 ^[gl]
325,65	0,83642		0,4071		1189,27		1,4780	
328,15	0,83405		0,3965		1178,88		1,4765	
330,65	0,83166		0,3863		1168,54		1,4750	
333,15	0,82927	0,82919 ^[rl]	0,3771	0,3803 ^[tl]	1158,22	1157,0 ^[ol]	1,4736	
335,65	0,82687		0,3690		1147,94		1,4721	
338,15	0,82447		0,3620		1137,71		1,4706	
Octano								
298,15	0,69872	0,69849 ^[vl]	0,5129	0,5160 ^[xl]	1173,93	1172,0 ^[ml]	1,3953	1,3952 ^[ul]
300,65	0,69671		0,4982		1163,55		1,3941	
303,15	0,69469	0,69435 ^[wl]	0,4834	0,4828 ^[yl]	1153,19	1152,6 ^[nl]	1,3929	1,3929 ^[gl]
305,65	0,69266		0,4699		1142,89		1,3916	
308,15	0,69063	0,690164 ^[wl]	0,4583		1132,60	1131,0 ^[ml]	1,3904	1,3905 ^[gl]
310,65	0,68859		0,4465		1122,37		1,3891	
313,15	0,68654	0,686141 ^[wl]	0,4347	0,4320 ^[yl]	1112,16	1111,4 ^[ol]	1,3880	
315,65	0,68449		0,4235		1102,00		1,3868	
318,15	0,68244	0,682585 ^[wl]	0,4142		1091,87		1,3855	1,3855 ^[gl]
320,65	0,68038		0,4033		1081,76		1,3843	
323,15	0,67833	0,678145 ^[wl]	0,3889	0,3875 ^[xl]	1071,68		1,3830	1,3830 ^[gl]
325,65	0,67627		0,3788		1061,65		1,3818	
328,15	0,67420	0,674170 ^[wl]	0,3698		1051,66		1,3805	
330,65	0,67212		0,3601		1041,70		1,3793	
333,15	0,67005	0,669939 ^[wl]	0,3529		1031,76	1030,5 ^[ol]	1,3781	
335,65	0,66798		0,3424		1021,83		1,3769	
338,15	0,66589	0,665496 ^[wl]	0,3326		1011,94		1,3756	

Nota: ^[a] (Beg et al., 1993), ^[b] (Sun et al., 1988), ^[c] (Gómez-Díaz et al., 2001), ^[d] (Guseinov et al., 1973), ^[e] (Zakurenov et al., 1975), ^[f] (Sun et al., 1987), ^[g] (Ortega & Matos, 1986), ^[h] (TRC, 1998), ^[i] (Hales & Townsend, 1972), ^[j] (Vieira dos Santos & de Castro, 1997), ^[k] (Kerscher et al., 2021), ^[l] (Mamedov et al., 1971), ^[m] (Cominges et al., 2002), ^[n] (Khasanshin & Shchemelev, 2001), ^[o] (Neruchev et al., 2005), ^[p] (Rubio et al., 2004), ^[q] (Kashiwagi et al., 1982), ^[r] (McLinden & Splett, 2008), ^[s] (Goncalves et al., 1987), ^[t] (Assael et al., 2000), ^[u] (Mariano et al., 2007), ^[v] (Banipal et al., 1991), ^[w] (Chappelow et al., 1971), ^[x] (Harris et al., 1997), ^[y] (Klein et al., 2019)

Apéndice C. Datos obtenidos experimentalmente

Tabla C1.

Densidad, velocidad del sonido, compresibilidad isoentrópica, índice de refracción, viscosidad, volumen molar y compresibilidad isoentrópica molar para la mezcla binaria de ciclohexano + dibenzotiofeno a temperaturas de 298,15 a 338,15 K y a presión atmosférica a diferentes molalidades.

T/K	$\rho/$ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	$u/$ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	$\kappa_s/$ (TPa^{-1})	n_D	$R_m /$ ($\text{cm}^3\cdot\text{mol}^{-1}$)	$\eta/$ cP	$V_m /$ ($\text{cm}^3\cdot\text{mol}^{-1}$)	$K_{S,m} /$ ($\text{TPa}^{-1}\cdot\text{m}^3\cdot\text{mol}^{-1}$)
Ciclohexano								
298,15	0,77397	1255,60	819,546	1,42347	27,716	0,8947	108,74	0,89115
300,65	0,77160	1243,20	838,544	1,42207	27,721	0,8564	109,07	0,91461
303,15	0,76923	1230,89	858,036	1,42066	27,725	0,8233	109,41	0,93875
305,65	0,76685	1218,65	878,075	1,41925	27,729	0,7906	109,75	0,96366
308,15	0,76447	1206,50	898,638	1,41786	27,735	0,7594	110,09	0,98930
310,65	0,76207	1194,43	919,780	1,41644	27,739	0,7305	110,44	1,01576
313,15	0,75968	1182,45	941,464	1,41502	27,743	0,7033	110,78	1,04298
315,65	0,75727	1170,54	963,777	1,41362	27,749	0,6779	111,14	1,07110
318,15	0,75486	1158,70	986,715	1,41218	27,752	0,6529	111,49	1,10009
320,65	0,75244	1146,92	1010,327	1,41063	27,750	0,6313	111,85	1,13004
323,15	0,75001	1135,23	1034,583	1,40931	27,762	0,6088	112,21	1,16092
325,65	0,74758	1123,62	1059,506	1,40790	27,766	0,5888	112,58	1,19275
328,15	0,74513	1112,08	1085,165	1,40643	27,769	0,5691	112,95	1,22565
330,65	0,74268	1100,61	1111,556	1,40499	27,775	0,5501	113,32	1,25960
333,15	0,74022	1089,17	1138,801	1,40359	27,781	0,5331	113,70	1,29476
335,65	0,73775	1077,78	1166,892	1,40225	27,788	0,5157	114,08	1,33114
338,15	0,73528	1066,63	1195,418	1,40080	27,797	0,4991	114,46	1,36826
Ciclohexano + Dibenzotiofeno (0,1503 m)								
298,15	0,78164	1259,49	806,505	1,42842	28,416	0,9200	110,35	0,90439
300,65	0,77928	1247,14	825,042	1,42708	28,425	0,8825	110,69	0,92820
303,15	0,77692	1234,97	843,939	1,42575	28,434	0,8455	111,03	0,95270
305,65	0,77455	1222,70	863,596	1,42432	28,439	0,8124	111,38	0,97797
308,15	0,77218	1210,70	883,511	1,42290	28,444	0,7811	111,72	1,00399
310,65	0,76979	1198,73	904,034	1,42151	28,452	0,7516	112,08	1,03085

T/K	$\rho /$ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	$u /$ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	$\kappa_s /$ (TPa^{-1})	n_D	$R_m /$ ($\text{cm}^3\cdot\text{mol}^{-1}$)	$\eta /$ cP	$V_m /$ ($\text{cm}^3\cdot\text{mol}^{-1}$)	$K_{S,m} /$ ($\text{TPa}^{-1}\cdot\text{m}^3\cdot\text{mol}^{-1}$)
313,15	0,76741	1186,87	925,060	1,42009	28,457	0,7241	112,43	1,05847
315,65	0,76501	1175,09	946,661	1,41870	28,464	0,6975	112,79	1,08701
318,15	0,76261	1163,41	968,795	1,41729	28,471	0,6725	113,15	1,11643
320,65	0,7602	1151,77	991,609	1,41582	28,474	0,6502	113,51	1,14682
323,15	0,75778	1140,19	1015,094	1,41435	28,478	0,6277	113,88	1,17816
325,65	0,75536	1128,66	1039,249	1,41297	28,487	0,6064	114,25	1,21046
328,15	0,75292	1117,22	1064,088	1,41151	28,492	0,5859	114,62	1,24385
330,65	0,75048	1105,83	1089,653	1,41006	28,497	0,5662	115,00	1,27831
333,15	0,74803	1094,50	1115,962	1,40866	28,505	0,5481	115,38	1,31399
335,65	0,74557	1083,23	1143,074	1,40722	28,512	0,5305	115,77	1,35091
338,15	0,74311	1072,19	1170,597	1,40579	28,519	0,5141	116,16	1,38859
Ciclohexano + Dibenzotiofeno (0,2277 m)								
298,15	0,78571	1261,22	800,122	1,43092	28,771	0,9304	111,17	0,91108
300,65	0,78335	1249,00	818,313	1,42957	28,781	0,8924	111,51	0,93506
303,15	0,78099	1236,87	836,963	1,42821	28,790	0,8567	111,85	0,95975
305,65	0,77862	1224,80	856,139	1,42678	28,795	0,8215	112,20	0,98521
308,15	0,77626	1212,84	875,769	1,42541	28,803	0,7917	112,55	1,01142
310,65	0,77387	1200,96	895,939	1,42400	28,810	0,7592	112,90	1,03848
313,15	0,77149	1189,13	916,666	1,42261	28,818	0,7329	113,26	1,06630
315,65	0,76909	1177,39	937,955	1,42120	28,825	0,7061	113,62	1,09505
318,15	0,76669	1165,75	959,783	1,41977	28,831	0,6829	113,98	1,12469
320,65	0,76428	1154,19	982,184	1,41837	28,839	0,6561	114,35	1,15531
323,15	0,76187	1142,68	1005,249	1,41714	28,858	0,6330	114,72	1,18688
325,65	0,75945	1131,23	1028,961	1,41552	28,853	0,6114	115,09	1,21942
328,15	0,75701	1119,84	1053,393	1,41410	28,861	0,5914	115,47	1,25306
330,65	0,75457	1108,50	1078,522	1,41270	28,870	0,5723	115,85	1,28777
333,15	0,75212	1097,24	1104,367	1,41130	28,880	0,5534	116,24	1,32372
335,65	0,74966	1086,02	1130,993	1,40991	28,890	0,5358	116,63	1,36091
338,15	0,74720	1074,92	1158,284	1,40851	28,900	0,5210	117,02	1,39886
Ciclohexano + Dibenzotiofeno (0,3044 m)								
298,15	0,78928	1263,29	793,894	1,43314	29,108	0,9405	111,17	0,91762
300,65	0,78693	1251,14	811,806	1,43176	29,116	0,9023	111,51	0,94178
303,15	0,78457	1238,91	830,403	1,43036	29,123	0,8650	111,85	0,96664
305,65	0,78221	1226,91	849,281	1,42897	29,132	0,8308	112,20	0,99229
308,15	0,77984	1214,99	868,659	1,42757	29,139	0,7989	112,55	1,01869
310,65	0,77746	1203,13	888,581	1,42617	29,147	0,7684	112,90	1,04593

T/K	$\rho /$ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	$u /$ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	$\kappa_s /$ (TPa^{-1})	n_D	$R_m /$ ($\text{cm}^3\cdot\text{mol}^{-1}$)	$\eta /$ cP	$V_m /$ ($\text{cm}^3\cdot\text{mol}^{-1}$)	$K_{S,m} /$ ($\text{TPa}^{-1}\cdot\text{m}^3\cdot\text{mol}^{-1}$)
313,15	0,77508	1191,38	908,977	1,42477	29,155	0,7409	113,26	1,07396
315,65	0,77269	1179,68	929,964	1,42338	29,164	0,7127	113,62	1,10291
318,15	0,77030	1168,08	951,470	1,42195	29,170	0,6879	113,98	1,13277
320,65	0,76790	1156,60	973,484	1,42053	29,178	0,6630	114,35	1,16361
323,15	0,76549	1145,25	996,001	1,41910	29,185	0,6401	114,72	1,19540
325,65	0,76308	1133,88	1019,285	1,41769	29,193	0,6187	115,09	1,22818
328,15	0,76065	1122,55	1043,287	1,41626	29,201	0,5988	115,47	1,26206
330,65	0,75822	1111,28	1067,967	1,41490	29,214	0,5796	115,85	1,29702
333,15	0,75578	1100,09	1093,322	1,41350	29,224	0,5596	116,24	1,33322
335,65	0,75333	1088,94	1119,456	1,41218	29,239	0,5418	116,63	1,37068
338,15	0,75088	1077,86	1146,317	1,41086	29,253	0,5250	117,02	1,40891

Tabla C2.

Densidad, velocidad del sonido, compresibilidad isoentrópica, índice de refracción, viscosidad, volumen molar y compresibilidad isoentrópica molar para la mezcla binaria de benceno + dibenzotiofeno a temperaturas de 298,15 a 338,15 K y a presión atmosférica a diferentes molalidades.

T/K	$\rho /$ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	$u /$ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	$\kappa_s /$ (TPa^{-1})	n_D	$R_m /$ ($\text{cm}^3\cdot\text{mol}^{-1}$)	$\eta /$ cP	$V_m /$ ($\text{cm}^3\cdot\text{mol}^{-1}$)	$K_{S,m} /$ ($\text{TPa}^{-1}\cdot\text{m}^3\cdot\text{mol}^{-1}$)
Benceno								
298,15	0,87370	1301,46	675,734	1,49743	26,181	0,6072	89,40	0,60413
300,65	0,87102	1289,67	690,263	1,49579	26,188	0,5851	89,68	0,61902
303,15	0,86834	1277,98	705,118	1,49416	26,195	0,5652	89,96	0,63429
305,65	0,86566	1265,99	720,762	1,49250	26,201	0,5463	90,23	0,65037
308,15	0,86297	1254,38	736,455	1,49082	26,207	0,5276	90,52	0,66660
310,65	0,86027	1242,81	752,585	1,48917	26,214	0,5106	90,80	0,68334
313,15	0,85758	1231,29	769,139	1,48748	26,218	0,4947	91,08	0,70056
315,65	0,85488	1219,83	786,133	1,48583	26,225	0,4792	91,37	0,71830
318,15	0,85217	1208,44	803,570	1,48415	26,231	0,4637	91,66	0,73657

T/K	$\rho/$ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	$u/$ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	$\kappa_s/$ (TPa^{-1})	n_D	$R_m /$ ($\text{cm}^3\cdot\text{mol}^{-1}$)	$\eta/$ cP	$V_m /$ ($\text{cm}^3\cdot\text{mol}^{-1}$)	$K_{S,m} /$ ($\text{TPa}^{-1}\cdot\text{m}^3\cdot\text{mol}^{-1}$)
320,65	0,84946	1197,07	821,520	1,48249	26,238	0,4495	91,95	0,75543
323,15	0,84675	1185,76	839,946	1,48079	26,243	0,4351	92,25	0,77484
325,65	0,84403	1174,49	858,902	1,47908	26,247	0,4221	92,55	0,79488
328,15	0,84130	1163,26	878,406	1,47741	26,254	0,4092	92,85	0,81557
330,65	0,83857	1152,08	898,453	1,47572	26,259	0,3972	93,15	0,83690
333,15	0,83582	1140,92	919,130	1,47401	26,265	0,3860	93,46	0,85898
335,65	0,83307	1129,82	940,373	1,47232	26,271	0,3766	93,76	0,88173
338,15	0,83033	1118,75	962,239	1,47061	26,276	0,3685	94,07	0,90521
Benceno + Dibenzotiofeno (0,1620 m)								
298,15	0,88129	1306,47	664,787	1,50275	26,866	0,6328	90,92	0,61439
300,65	0,87863	1294,69	678,988	1,50106	26,872	0,6119	91,20	0,62953
303,15	0,87596	1283,08	693,439	1,49948	26,883	0,5927	91,48	0,64506
305,65	0,87329	1271,37	708,437	1,49793	26,895	0,5699	91,77	0,66142
308,15	0,87062	1259,88	723,624	1,49640	26,909	0,5523	92,05	0,67792
310,65	0,86794	1248,43	739,240	1,49512	26,932	0,5374	92,34	0,69495
313,15	0,86527	1237,11	755,147	1,49330	26,934	0,5177	92,63	0,71246
315,65	0,86259	1225,88	771,436	1,49164	26,942	0,5003	92,92	0,73050
318,15	0,85990	1214,64	788,237	1,48990	26,946	0,4849	93,22	0,74908
320,65	0,85721	1203,41	805,537	1,48819	26,952	0,4712	93,52	0,76825
323,15	0,85451	1192,23	823,309	1,48671	26,969	0,4572	93,82	0,78800
325,65	0,85181	1181,07	841,601	1,48513	26,980	0,4434	94,12	0,80838
328,15	0,84910	1169,98	860,368	1,48365	26,997	0,4274	94,42	0,82942
330,65	0,84639	1158,92	879,683	1,48199	27,006	0,4166	94,73	0,85111
333,15	0,84366	1147,92	899,517	1,48039	27,018	0,4021	95,04	0,87356
335,65	0,84093	1136,97	919,911	1,47883	27,032	0,3917	95,36	0,89670
338,15	0,83821	1126,07	940,841	1,47717	27,041	0,3806	95,67	0,92058
Benceno + Dibenzotiofeno (0,2452 m)								
298,15	0,88519	1308,59	659,715	1,50466	27,179	0,6459	91,69	0,61956
300,65	0,88253	1296,83	673,756	1,50312	27,192	0,6235	91,97	0,63482
303,15	0,87988	1285,25	688,024	1,50145	27,200	0,6018	92,25	0,65049
305,65	0,87722	1273,74	702,638	1,49982	27,209	0,5806	92,54	0,66698
308,15	0,87455	1262,29	717,621	1,49820	27,219	0,5614	92,83	0,68362
310,65	0,87188	1250,90	732,990	1,49659	27,229	0,5431	93,12	0,70079
313,15	0,86922	1239,54	748,773	1,49496	27,238	0,5259	93,41	0,71845
315,65	0,86655	1228,27	764,928	1,49333	27,248	0,5091	93,70	0,73665
318,15	0,86387	1217,05	781,512	1,49169	27,257	0,4931	94,00	0,75538
320,65	0,86119	1205,93	798,471	1,49005	27,267	0,4777	94,30	0,77472

T/K	$\rho/$ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	$u/$ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	$\kappa_s/$ (TPa^{-1})	n_D	$R_m /$ ($\text{cm}^3\cdot\text{mol}^{-1}$)	$\eta/$ cP	$V_m /$ ($\text{cm}^3\cdot\text{mol}^{-1}$)	$K_{S,m} /$ ($\text{TPa}^{-1}\cdot\text{m}^3\cdot\text{mol}^{-1}$)
323,15	0,85850	1194,82	815,934	1,48839	27,275	0,4628	94,60	0,79463
325,65	0,85581	1183,78	833,838	1,48674	27,284	0,4499	94,91	0,81518
328,15	0,85311	1172,76	852,267	1,48511	27,295	0,4349	95,22	0,83640
330,65	0,85041	1161,75	871,259	1,48345	27,304	0,4223	95,53	0,85827
333,15	0,84769	1150,81	890,750	1,48180	27,314	0,4096	95,84	0,88091
335,65	0,84497	1139,97	910,693	1,48011	27,322	0,3977	96,16	0,90424
338,15	0,84227	1129,60	930,468	1,47849	27,333	0,3874	96,48	0,92832
Benceno + Dibenzotiofeno (0,3284 m)								
298,15	0,88865	1310,82	654,917	1,50709	27,514	0,6589	92,44	0,62466
300,65	0,88600	1299,26	668,617	1,50543	27,523	0,6355	92,73	0,64005
303,15	0,88334	1287,73	682,688	1,50381	27,533	0,6134	93,01	0,65585
305,65	0,88068	1276,28	697,097	1,50226	27,546	0,5942	93,30	0,67247
308,15	0,87802	1264,88	711,864	1,50069	27,559	0,5748	93,59	0,68926
310,65	0,87536	1253,53	727,016	1,49915	27,573	0,5576	93,88	0,70656
313,15	0,87270	1242,24	742,547	1,49755	27,585	0,5365	94,18	0,72437
315,65	0,87003	1231,00	758,496	1,49597	27,597	0,5197	94,48	0,74271
318,15	0,86736	1219,80	774,860	1,49424	27,603	0,5038	94,78	0,76160
320,65	0,86469	1208,66	791,653	1,49242	27,605	0,4889	95,08	0,78110
323,15	0,86201	1197,56	808,904	1,49078	27,614	0,4741	95,38	0,80117
325,65	0,85933	1186,54	826,569	1,48913	27,624	0,4601	95,69	0,82189
328,15	0,85664	1175,57	844,711	1,48747	27,634	0,4468	96,00	0,84329
330,65	0,85395	1164,66	863,315	1,48582	27,644	0,4331	96,31	0,86534
333,15	0,85125	1153,79	882,448	1,48416	27,654	0,4180	96,63	0,88817
335,65	0,84854	1142,93	902,178	1,48251	27,664	0,4061	96,95	0,91169
338,15	0,84584	1132,53	921,756	1,48088	27,675	0,3949	97,27	0,93597

Tabla C3.

Densidad, velocidad del sonido, compresibilidad isoentrópica, índice de refracción, viscosidad, volumen molar y compresibilidad isoentrópica molar para la mezcla binaria de tolueno + dibenzotiofeno a temperaturas de 298,15 a 338,15 K y a presión atmosférica a diferentes molalidades.

T/K	$\rho /$ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	$u /$ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	$\kappa_s /$ (TPa^{-1})	n_D	$R_m /$ ($\text{cm}^3\cdot\text{mol}^{-1}$)	$\eta /$ cP	$V_m /$ ($\text{cm}^3\cdot\text{mol}^{-1}$)	$K_{S,m} /$ ($\text{TPa}^{-1}\cdot\text{m}^3\cdot\text{mol}^{-1}$)
Tolueno								
298,15	0,86231	1306,34	679,554	1,49396	31,104	0,5552	106,851	0,726
300,65	0,85997	1295,46	692,897	1,49254	31,113	0,5400	107,141	0,742
303,15	0,85764	1284,63	706,543	1,49109	31,119	0,5245	107,432	0,759
305,65	0,85530	1273,86	720,507	1,48965	31,126	0,5096	107,726	0,776
308,15	0,85295	1263,12	734,831	1,48819	31,133	0,4953	108,023	0,794
310,65	0,85060	1252,45	749,469	1,48674	31,140	0,4804	108,322	0,812
313,15	0,84825	1241,80	764,492	1,48529	31,147	0,4671	108,622	0,830
315,65	0,84589	1231,22	779,857	1,48384	31,154	0,4543	108,925	0,849
318,15	0,84353	1220,67	795,615	1,48238	31,161	0,4420	109,230	0,869
320,65	0,84117	1210,16	811,766	1,48092	31,168	0,4299	109,536	0,889
323,15	0,83880	1199,69	828,330	1,47945	31,174	0,4182	109,845	0,910
325,65	0,83642	1189,27	845,307	1,47797	31,180	0,4071	110,158	0,931
328,15	0,83405	1178,88	862,718	1,47650	31,187	0,3965	110,471	0,953
330,65	0,83166	1168,54	880,576	1,47504	31,194	0,3863	110,789	0,976
333,15	0,82927	1158,22	898,922	1,47358	31,202	0,3771	111,108	0,999
335,65	0,82687	1147,94	917,750	1,47211	31,209	0,3690	111,430	1,023
338,15	0,82447	1137,71	937,048	1,47064	31,216	0,3620	111,755	1,047
Tolueno + Dibenzotiofeno (0,1373 m)								
298,15	0,86890	1310,93	669,686	1,49801	31,712	0,5778	108,185	0,735
300,65	0,86656	1300,12	682,712	1,49660	31,722	0,5616	108,479	0,752
303,15	0,86423	1289,33	696,053	1,49520	31,732	0,5458	108,774	0,769
305,65	0,86190	1278,62	709,682	1,49382	31,743	0,5285	109,072	0,786
308,15	0,85955	1267,95	723,649	1,49242	31,754	0,5132	109,372	0,804
310,65	0,85721	1257,32	737,946	1,49102	31,765	0,4992	109,674	0,822
313,15	0,85486	1246,74	752,587	1,48963	31,776	0,4863	109,978	0,841
315,65	0,85251	1236,21	767,567	1,48813	31,782	0,4740	110,285	0,860
318,15	0,85015	1225,72	782,928	1,48671	31,791	0,4612	110,593	0,880
320,65	0,84779	1215,28	798,655	1,48519	31,796	0,4502	110,904	0,900
323,15	0,84543	1204,88	814,776	1,48376	31,806	0,4363	111,217	0,921
325,65	0,84306	1194,51	831,313	1,48232	31,815	0,4237	111,534	0,943
328,15	0,84069	1184,19	848,252	1,48088	31,824	0,4137	111,850	0,965
330,65	0,83831	1173,91	865,624	1,47946	31,835	0,4032	112,172	0,988
333,15	0,83592	1163,66	883,452	1,47802	31,845	0,3923	112,495	1,011
335,65	0,83353	1153,47	901,708	1,47659	31,856	0,3834	112,822	1,035
338,15	0,83114	1143,32	920,437	1,47517	31,867	0,3748	113,150	1,060

T/K	$\rho/$ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	$u/$ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	$\kappa_s/$ (TPa^{-1})	n_D	$R_m /$ ($\text{cm}^3\cdot\text{mol}^{-1}$)	$\eta/$ cP	$V_m /$ ($\text{cm}^3\cdot\text{mol}^{-1}$)	$K_{S,m} /$ ($\text{TPa}^{-1}\cdot\text{m}^3\cdot\text{mol}^{-1}$)
Tolueno + Dibenzotiofeno (0,2080 m)								
298,15	0,87219	1313,24	664,813	1,49951	31,991	0,5863	108,859	0,740
300,65	0,86987	1302,46	677,670	1,49807	31,999	0,5689	109,155	0,756
303,15	0,86754	1291,72	690,836	1,49662	32,007	0,5524	109,452	0,773
305,65	0,86521	1281,04	704,295	1,49518	32,016	0,5361	109,751	0,791
308,15	0,86287	1270,39	718,093	1,49373	32,024	0,5209	110,054	0,809
310,65	0,86053	1259,79	732,212	1,49228	32,032	0,5063	110,358	0,827
313,15	0,85819	1249,25	746,653	1,49084	32,041	0,4923	110,664	0,846
315,65	0,85584	1238,74	761,458	1,48938	32,049	0,4787	110,972	0,865
318,15	0,85349	1228,29	776,603	1,48792	32,057	0,4657	111,283	0,885
320,65	0,85114	1217,87	792,135	1,48651	32,068	0,4531	111,595	0,906
323,15	0,84878	1207,49	808,052	1,48507	32,078	0,4408	111,910	0,927
325,65	0,84642	1197,16	824,350	1,48360	32,086	0,4289	112,229	0,949
328,15	0,84405	1186,86	841,074	1,48211	32,092	0,4176	112,548	0,971
330,65	0,84168	1176,60	858,219	1,48067	32,102	0,4065	112,871	0,994
333,15	0,83930	1166,38	875,799	1,47924	32,113	0,3959	113,196	1,018
335,65	0,83691	1156,21	893,813	1,47782	32,125	0,3866	113,525	1,042
338,15	0,83453	1146,14	912,185	1,47647	32,140	0,3780	113,855	1,067
Tolueno + Dibenzotiofeno (0,2785 m)								
298,15	0,87527	1315,17	660,537	1,50184	32,313	0,6004	109,523	0,744
300,65	0,87295	1304,42	673,254	1,50037	32,321	0,5831	109,821	0,761
303,15	0,87064	1293,71	686,258	1,49893	32,329	0,5656	110,119	0,778
305,65	0,86832	1283,04	699,589	1,49752	32,340	0,5491	110,421	0,796
308,15	0,86600	1272,44	713,199	1,49623	32,358	0,5331	110,725	0,814
310,65	0,86367	1261,87	727,154	1,49479	32,367	0,5187	111,031	0,832
313,15	0,86133	1251,35	741,440	1,49335	32,377	0,5038	111,338	0,851
315,65	0,85899	1240,87	756,065	1,49191	32,387	0,4899	111,649	0,871
318,15	0,85665	1230,45	771,032	1,49048	32,397	0,4765	111,961	0,891
320,65	0,85430	1220,06	786,371	1,48904	32,407	0,4641	112,275	0,911
323,15	0,85195	1209,72	802,084	1,48759	32,416	0,4513	112,593	0,933
325,65	0,84959	1199,41	818,199	1,48614	32,426	0,4393	112,913	0,954
328,15	0,84724	1189,15	834,681	1,48468	32,435	0,4271	113,234	0,977
330,65	0,84487	1178,93	851,604	1,48324	32,445	0,4158	113,559	1,000
333,15	0,84250	1168,73	868,964	1,48179	32,455	0,4052	113,887	1,024
335,65	0,84012	1158,58	886,761	1,48034	32,466	0,3953	114,217	1,048
338,15	0,83774	1148,48	904,990	1,47889	32,476	0,3861	114,550	1,073

Tabla C4.

Densidad, velocidad del sonido, compresibilidad isoentrópica, índice de refracción, viscosidad, volumen molar y compresibilidad isoentrópica molar para la mezcla binaria de octano + dibenzotiofeno a temperaturas de 298,15 a 338,15 K y a presión atmosférica a diferentes molalidades.

T/K	$\rho /$ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	$u /$ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	$\kappa_S /$ (TPa^{-1})	n_D	$R_m /$ ($\text{cm}^3\cdot\text{mol}^{-1}$)	$\eta /$ cP	$V_m /$ ($\text{cm}^3\cdot\text{mol}^{-1}$)	$K_{S,m} /$ ($\text{TPa}^{-1}\cdot\text{m}^3\cdot\text{mol}^{-1}$)
Octano								
298,15	0,69872	1173,93	1038,514	1,39526	39,216	0,5129	163,48	1,69779
300,65	0,69671	1163,55	1060,176	1,39408	39,225	0,4982	163,95	1,73820
303,15	0,69469	1153,19	1082,448	1,39288	39,233	0,4834	164,43	1,77988
305,65	0,69266	1142,89	1105,277	1,39164	39,238	0,4699	164,91	1,82274
308,15	0,69063	1132,60	1128,760	1,39043	39,245	0,4583	165,40	1,86694
310,65	0,68859	1122,37	1152,835	1,38914	39,246	0,4465	165,89	1,91241
313,15	0,68654	1112,16	1177,605	1,38796	39,258	0,4347	166,38	1,95933
315,65	0,68449	1102,00	1203,011	1,38675	39,266	0,4235	166,88	2,00760
318,15	0,68244	1091,87	1229,118	1,38550	39,271	0,4142	167,38	2,05733
320,65	0,68038	1081,76	1255,991	1,38428	39,279	0,4033	167,89	2,10867
323,15	0,67833	1071,68	1283,597	1,38302	39,283	0,3889	168,40	2,16153
325,65	0,67627	1061,65	1311,950	1,38179	39,290	0,3788	168,91	2,21601
328,15	0,67420	1051,66	1341,098	1,38052	39,293	0,3698	169,43	2,27220
330,65	0,67212	1041,70	1371,096	1,37932	39,304	0,3601	169,95	2,33021
333,15	0,67005	1031,76	1401,959	1,37808	39,311	0,3529	170,48	2,39003
335,65	0,66798	1021,83	1433,769	1,37685	39,318	0,3424	171,01	2,45183
338,15	0,66589	1011,94	1466,520	1,37560	39,325	0,3326	171,54	2,51571
Octano + Dibenzotiofeno (0,1108 m)								
298,15	0,70537	1177,98	1021,662	1,39893	39,841	0,5256	164,73	1,71080
300,65	0,70334	1167,63	1042,856	1,39777	39,853	0,5103	165,21	1,75152
303,15	0,70131	1157,32	1064,601	1,39654	39,860	0,4965	165,69	1,79351
305,65	0,69927	1147,04	1086,930	1,39535	39,870	0,4813	166,18	1,83671
308,15	0,69723	1136,82	1109,789	1,39413	39,878	0,4679	166,66	1,88124
310,65	0,69518	1126,61	1133,328	1,39294	39,889	0,4551	167,16	1,92706
313,15	0,69312	1116,46	1157,468	1,39173	39,899	0,4428	167,66	1,97434

T/K	$\rho /$ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	$u /$ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	$\kappa_s /$ (TPa^{-1})	n_D	$R_m /$ ($\text{cm}^3\cdot\text{mol}^{-1}$)	$\eta /$ cP	$V_m /$ ($\text{cm}^3\cdot\text{mol}^{-1}$)	$K_{S,m} /$ ($\text{TPa}^{-1}\cdot\text{m}^3\cdot\text{mol}^{-1}$)
315,65	0,69106	1106,34	1182,244	1,39053	39,910	0,4310	168,16	2,02298
318,15	0,68900	1096,29	1207,630	1,38933	39,920	0,4202	168,66	2,07309
320,65	0,68693	1086,23	1233,809	1,38813	39,931	0,4085	169,18	2,12483
323,15	0,68486	1076,21	1260,690	1,38705	39,951	0,3979	169,69	2,17809
325,65	0,68278	1066,23	1288,301	1,38548	39,931	0,3883	170,20	2,23298
328,15	0,68069	1056,27	1316,742	1,38425	39,940	0,3774	170,73	2,28960
330,65	0,67859	1046,37	1345,941	1,38299	39,947	0,3692	171,25	2,34806
333,15	0,67649	1036,49	1375,968	1,38176	39,955	0,3584	171,78	2,40834
335,65	0,67439	1026,64	1406,879	1,38049	39,960	0,3493	172,32	2,47061
338,15	0,67227	1016,80	1438,750	1,37925	39,970	0,3406	172,86	2,53498
Octano + Dibenzotiofeno (0,1678 m)								
298,15	0,70858	1180,13	1013,331	1,40144	40,217	0,5312	165,37	1,71737
300,65	0,70655	1169,67	1034,505	1,40026	40,228	0,5158	165,84	1,75824
303,15	0,70451	1159,36	1056,028	1,39898	40,231	0,5011	166,33	1,80040
305,65	0,70247	1149,10	1078,091	1,39776	40,240	0,4864	166,81	1,84376
308,15	0,70043	1138,89	1100,712	1,39649	40,244	0,4728	167,30	1,88847
310,65	0,69838	1128,73	1123,904	1,39524	40,250	0,4599	167,80	1,93446
313,15	0,69632	1118,61	1147,709	1,39400	40,258	0,4475	168,30	1,98192
315,65	0,69426	1108,53	1172,144	1,39275	40,265	0,4354	168,81	2,03075
318,15	0,69221	1098,47	1197,261	1,39151	40,273	0,4238	169,31	2,08105
320,65	0,69013	1088,43	1223,122	1,39026	40,281	0,4128	169,83	2,13299
323,15	0,68805	1078,43	1249,668	1,38902	40,287	0,4019	170,34	2,18646
325,65	0,68597	1068,50	1276,864	1,38766	40,286	0,3915	170,86	2,24156
328,15	0,68388	1058,60	1304,829	1,38639	40,292	0,3813	171,38	2,29840
330,65	0,68178	1048,72	1333,634	1,38506	40,293	0,3714	171,91	2,35708
333,15	0,67969	1038,88	1363,196	1,38378	40,298	0,3622	172,44	2,41758
335,65	0,67758	1029,05	1393,688	1,38244	40,297	0,3529	172,98	2,48010
338,15	0,67546	1019,29	1424,967	1,38111	40,298	0,3439	173,52	2,54471
Octano + Dibenzotiofeno (0,2247 m)								
298,15	0,71199	1182,17	1005,009	1,40280	40,489	0,5373	165,99	1,72383
300,65	0,70995	1171,95	1025,543	1,40159	40,498	0,5223	166,47	1,76487
303,15	0,70790	1161,71	1046,734	1,40035	40,505	0,5061	166,95	1,80718
305,65	0,70585	1151,47	1068,519	1,39914	40,515	0,4918	167,44	1,85071
308,15	0,70379	1141,29	1090,850	1,39794	40,526	0,4783	167,93	1,89558
310,65	0,70172	1131,17	1113,741	1,39674	40,538	0,4651	168,43	1,94175
313,15	0,69965	1121,06	1137,275	1,39557	40,553	0,4525	168,94	1,98939

T/K	$\rho /$ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	$u /$ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	$\kappa_S /$ (TPa^{-1})	n_D	$R_m /$ ($\text{cm}^3\cdot\text{mol}^{-1}$)	$\eta /$ cP	$V_m /$ ($\text{cm}^3\cdot\text{mol}^{-1}$)	$K_{S,m} /$ ($\text{TPa}^{-1}\cdot\text{m}^3\cdot\text{mol}^{-1}$)
315,65	0,69758	1111,00	1161,389	1,39438	40,565	0,4403	169,44	2,03840
318,15	0,69549	1100,97	1186,201	1,39321	40,579	0,4286	169,95	2,08889
320,65	0,69340	1090,97	1211,698	1,39169	40,566	0,4173	170,46	2,14102
323,15	0,69131	1081,00	1237,884	1,39043	40,571	0,4071	170,98	2,19469
325,65	0,68920	1071,05	1264,839	1,38922	40,583	0,3961	171,50	2,25000
328,15	0,68709	1061,16	1292,495	1,38802	40,595	0,3864	172,03	2,30706
330,65	0,68497	1051,32	1320,865	1,38686	40,613	0,3763	172,56	2,36596
333,15	0,68284	1041,51	1350,076	1,38570	40,630	0,3662	173,09	2,42669
335,65	0,68070	1031,71	1380,159	1,38441	40,634	0,3580	173,63	2,48944
338,15	0,67856	1021,94	1411,110	1,38313	40,641	0,3479	174,17	2,55430