

**Elaboración de manual y herramienta pedagógica para la práctica difusión de gases como
apoyo a la asignatura laboratorio de procesos I**

Junior Iván Lizcano Carrillo, Silvia Janeth Rangel Ávila

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Químico

Director

Crisóstomo Barajas Ferreira

Ingeniero Químico, M.Sc. Ingeniería Química

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2019

Dedicatorias

A Dios.

Por haber guiado mis pasos hasta este momento permitiendo afrontar con paciencia y serenidad las dificultades, además de disfrutar de muchos momentos alegres en el cumplimiento de mis metas. Infinitamente agradecido por todo lo que me ha dado y por las enseñanzas que me ha ofrecido.

A mi padre Iván Darío.

Por ser mi ejemplo de vida, gracias a los diferentes valores que con mucho orgullo puedo nombrar, como su: responsabilidad, honestidad, compromiso, humildad, perseverancia y muchos más. Por la oportunidad de vivir mis sueños que con tanto sacrificio ha podido ofrecerme y la paciencia en el desarrollo de este proceso.

A mi madre María Patricia.

Principalmente por su amor incondicional. Por demostrarme que todos podemos superar cualquier obstáculo y que un gran corazón siempre es recompensado. Por el apoyo en mis momentos difíciles y en los más felices como una gran amiga.

A mis hermanos Eimard Giovanni y Jessika Daniela.

Por ser mi mayor motivación para seguir luchando. Por creer en mí en cada momento y ofrecerme tantas alegrías que hicieron mí camino más fácil. Porque aún en la distancia me hicieron saber que sin importar en que circunstancia siempre estarían para mí.

A mis demás familiares y mis amigos.

Por contribuir con su apoyo, sus acciones y sus palabras de aliento, nunca olvidare cada momento ni cada oración que llenaron mi vida universitaria de grandes experiencias y anécdotas. Por el amor que rodeo mi vida gracias a ustedes.

A Jonathan y Miguel.

Por enseñarme lo bueno y lo malo del amor. Por hacerme crecer como persona y fomentar muchas de mis ideas y más grandes anhelos.

A todos los amo inmensamente y muchas gracias.

Y, por último, pero no menos importante, A MÍ.

Porque estoy orgulloso y muy feliz de mis éxitos.

Junior Ivan Lizcano Carrillo

Este trabajo es principalmente dedicado a Dios, por su bondad y fidelidad incondicional; y, por permitirme culminar esta etapa de mi vida con éxito.

A mis padres, Ilce Ávila, Edinson Rangel por el apoyo y comprensión durante todo el proceso, su amor, cariño y esfuerzo para hacer de mi alguien mejor cada día.

A Carlos Duarte, por ser un segundo padre y apoyo durante todos los proyectos de mi vida.

A Fabian Acosta por acompañarme incondicionalmente en cada paso de mi vida, por su amor y dedicación.

A mis hermanos Carlos Daniel, Juan David y la pequeña Isabela, por ser mi inspiración y mis compañeros de vida.

A toda mi familia por cada grano de arena y la motivación para seguir adelante.

A todos mis compañeros y amigos, de los cuales aprendí día a día a lo largo de este proceso y de los cuales me siento afortunada de haber conocido.

Y, por supuesto a mí, por la constante lucha, esfuerzo, perseverancia y por no decaer ante los obstáculos.

“La energía y la persistencia conquistan todas las cosas” (Benjamin Franklin)

Silvia Janeth Rangel Ávila

Agradecimientos

Los autores agradecen:

A la profesora Ximena Saavedra por la oportunidad de este proyecto y su acompañamiento durante el mismo.

Al profesor Crisóstomo Barajas, por sus enseñanzas, su dedicación y su acompañamiento en el desarrollo de este proyecto.

Al ingeniero Guillermo, por su amabilidad y sus consejos; al estar muy pendiente en todo el proceso ayudó a la realización de este proyecto.

A la Universidad Industrial de Santander, por la educación y formación integral que nos brindaron a lo largo de la carrera, además de los valores y principios inculcados por parte de los docentes.

Tabla de Contenido

	pág.
Introducción	16
1. Objetivos	18
1.1 Objetivo general.....	18
1.2 Objetivos específicos	18
2. Marco referencial	19
2.1 Difusión molecular.....	19
2.2 Difusión en gases	20
2.3 Ley de fick	21
2.4 Algunos métodos para hallar el coeficiente de difusión gaseoso	22
2.4.1 Ecuación de Fuller, Schettler y Giddings	22
2.4.2 Ecuación de Hirschfelder, Bird y Spotz.....	23
2.5 Método experimental Winkelmann.....	24
3. Metodología	26
3.1 Preliminares	27
3.1.1 Diseño y aplicación de la encuesta	27
3.1.2 Reconocimiento del equipo.....	27
3.1.3 Calibración del equipo	28
3.2 Pruebas experimentales y elaboración de manual	28
3.2.1 Realización puesta punto	28
3.2.2 Ajuste condiciones de operación	29

3.2.3 Implementación otras sustancias.....	29
3.2.4 Elaboración del manual.....	29
3.3 Herramienta pedagógica	30
4. Resultados	30
4.1 Preliminares	30
4.1.1 Análisis y resultados de la encuesta.....	30
4.1.2 Reconocimiento del equipo.....	31
4.1.3 Calibración del equipo	32
4.2 Pruebas experimentales y elaboración de manual de práctica	34
4.2.1 Puesta punto	34
4.2.2 Condiciones de operación	36
4.2.3 Pruebas experimentales con otras sustancias	39
4.2.4 Elaboración de manual.....	40
4.3 Herramienta pedagógica	40
5. Conclusiones	43
Referencias bibliográficas.....	44
Apéndices.....	45

Lista de tablas

	pág.
Tabla 1. Coeficientes de difusión binaria de mezclas diluidas de gases a 1 atm.	21
Tabla 2. Condiciones de operación puesta punto.....	28
Tabla 3. Resultados pruebas experimentales puesta punto	35
Tabla 4. Resultados pruebas experimentales a 33°C usando acetona.....	37
Tabla 5. Resultados pruebas experimentales a 35°C usando acetona.....	37
Tabla 6. Resultados pruebas experimentales a 38°C usando acetona.....	38
Tabla 7. Resultados pruebas experimentales a 40°C usando acetona.....	38
Tabla 8. Resultados pruebas experimentales usando metanol.	39
Tabla 9. Resultados pruebas experimentales usando etanol.	39

Lista de Figuras

	pág.
Figura 1. Diagrama esquemático del proceso de difusión molecular	20
Figura 2. Difusión de A en B, en estado estacionario Adaptado de (Castillo, García, Guillen & López, 2010)	25
Figura 3. Esquema metodología	27
Figura 4. Equipo CERa-Mkll: Coeficiente de difusión gaseosa, Armfield4.1.3 Calibración del equipo.....	32
Figura 5. Calibración: ajuste del eje visual del microscopio.....	33
Figura 6. Calibración: ajuste escala de medición.....	33
Figura 7. Resultados prueba 1 puesta punto, L-Lo vs $t/(L-Lo)$	34
Figura 8. Herramienta virtual: Coeficiente de difusión en gases.....	41

Lista de Apéndices

	pág.
Apéndice A. Método Winkelmann	46
Apéndice B. Encuesta de satisfacción	51
Apéndice C. Procedimiento calibración del equipo.....	56
Apéndice D. Cálculo coeficiente de difusión gaseoso teórico y experimental.....	59
Apéndice E. Pruebas experimentales con acetona.....	69
Apéndice F. Pruebas experimentales con otras sustancias	75
Apéndice G. Manual de laboratorio: Coeficiente de difusión en gases.....	79
Apéndice H. Herramienta pedagógica	102

RESUMEN

TÍTULO: ELABORACIÓN DE MANUAL Y HERRAMIENTA PEDAGÓGICA PARA LA PRÁCTICA DIFUSIÓN DE GASES COMO APOYO A LA ASIGNATURA LABORATORIO DE PROCESOS I *

AUTORES: JUNIOR IVAN LIZCANO CARRILLO, SILVIA JANETH RANGEL ÁVILA **

PALABRAS CLAVE: COEFICIENTE DE DIFUSIÓN, CELDA ARMFIELD, MÉTODO WINKELMANN, ACETONA, METANOL, ETANOL.

DESCRIPCIÓN:

La escuela de ingeniería química de la Universidad Industrial de Santander cuenta con asignaturas prácticas, como lo es laboratorio de procesos I, la cual aborda distintos temas, uno de ellos es identificar fenómenos de transporte de masa, donde se ha podido observar que la práctica realizada para determinar el coeficiente de difusión en gases arroja valores que no son reproducibles.

Este proyecto consiste en la elaboración de un manual y herramienta pedagógica, con el fin de ser un soporte a dicha práctica, permitiendo una mejor comprensión de los conceptos teóricos y lograr visualizarlos mediante la experimentación. Se trabajó con un equipo de coeficiente de difusión gaseosa Armfield, el cual emplea un controlador de temperatura PID, que mantiene el sistema entre 25 y 60°C, usando acetona, metanol y etanol como sustancias a difundir.

Los resultados de las pruebas experimentales realizadas con las diferentes sustancias, las condiciones de operación para el adecuado uso del equipo, el desarrollo del manual de operación y la herramienta pedagógica basada en las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC) donde se tuvo como producto un ambiente virtual de aprendizaje (AVA), se presentan en este trabajo.

* Trabajo de grado.

** Facultad de ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director. Crisóstomo Barajas Ferreira, Ingeniero Químico, M.Sc. Ingeniería Química.

ABSTRACT

TITLE: DEVELOPMENT OF MANUAL AND PEDAGOGICAL MATERIAL FOR GAS DIFFUSION PRACTICE AS A SUPPORT TO THE SUBJECT PROCESS LABORATORY I*

AUTHORS: JUNIOR IVAN LIZCANO CARRILLO, SILVIA JANETH RANGEL ÁVILA**

KEYWORDS: DIFFUSION COEFFICIENT, ARMFIELD CELL, WINKELMANN, METHOD, ACETONE, METHANOL, ETHANOL.

DESCRIPTION:

The school of chemical engineering of the Industrial University of Santander has practical subjects, as it is laboratory of processes I, which addresses different topics, one of them is to identify phenomena of mass transport, where it has been observed that the practice of determining the diffusion coefficient in gases yields values that are not reproducible.

This project consists in the elaboration of a manual and pedagogical tool, in order to be a support for this practice, which allows a better understanding of the theoretical concepts and to visualize them through experimentation. It is maintained with a Armfield gas diffusion coefficient equipment, which uses a PID temperature controller, which maintains the system between 25 and 60 ° C, using acetone, methanol and ethanol as substances to be diffused.

The results of the experimental tests carried out with the different substances, the operating conditions for the proper use of the equipment, the development of the operation manual and the pedagogical tool based on Information and Communication Technologies (ICT) where it was considered product a virtual learning classroom (AVA), are presented in this work.

* Degree work

** Faculty of Chemical-Physical Engineering. School of Chemical Engineering. Director. Crisóstomo Barajas Ferreira, Chemical Engineering, M.Sc. Chemical Engineering.

Introducción

A través de los años, la Universidad Industrial de Santander se ha destacado por sus altos índices de calidad, fundamentada en la experiencia, conocimiento y exigencia de sus docentes y en los espacios de investigación que brindan y permiten una formación académica integral. Para un estudiante de Ingeniería Química es relevante conocer los distintos procesos que se llevan a cabo en la industria y, en ese sentido, existe la asignatura práctica: laboratorio de procesos I como uno de los cursos más importantes, relacionando los conceptos teóricos con la parte experimental y completando el proceso educativo.

Teniendo como referencia las apreciaciones de los estudiantes que ya cursaron la asignatura y de los docentes encargados de la misma, se evidencia la necesidad de mejorar algunos aspectos metodológicos y pedagógicos durante la planeación y desarrollo de la práctica: “Determinación del coeficiente de difusión en gases”; la cual se lleva a cabo según las indicaciones presentes en el actual manual de laboratorio y manipulando la misma sustancia bajo las condiciones propuestas por el docente encargado, lo que se refleja en resultados cuyos valores no son coherentes con la teoría.

Para identificar los posibles inconvenientes y aspectos de mejora, se realizan pruebas experimentales con los parámetros utilizados normalmente. De esta manera se pueden observar las posibles causas de error, dando lugar a variaciones que permiten proponer nuevas condiciones para mejorar los resultados experimentales obtenidos en el laboratorio y lograr trabajar de manera más eficiente, generando resultados acordes a la literatura. El resultado de este proyecto es un nuevo manual de laboratorio que recopila de manera detallada y organizada, los aspectos más importantes en la implementación de la práctica, el procedimiento adecuado, las recomendaciones para el

apropiado uso del equipo y el método matemático derivado de la ley de Fick con el cual se determina el coeficiente de difusión gaseosa. Así mismo, se implementa el uso de otras sustancias, tales como: metanol y etanol, ampliando la perspectiva del comportamiento de este fenómeno de transporte y el alcance del equipo.

Por otro lado, como parte del proceso de mejora continua, la implementación de las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC) representan una estrategia de enseñanza, ya que en la actualidad las tecnologías digitales tienen un papel fundamental que permiten satisfacer diferentes necesidades de aprendizaje. Por tal motivo, se diseña e implementa un Ambiente Virtual de Aprendizaje (AVA), con los principales aspectos para tener en cuenta en la ejecución del laboratorio; y un archivo guía, donde se detalla el método analítico a usar.

La herramienta se elabora mediante el lenguaje JavaScript el cual permite crear dinámicamente contenido HTML (*HyperText Markup Languaje*), este se utiliza como lenguaje de etiquetas para fijar una estructura básica y un código para la definición de contenido de una página web; además se establecen hojas de estilos CSS (*Cascading Style Sheets*) logrando la separación de los contenidos de los documentos escritos en HTML y otorgando el estilo de la herramienta virtual.

Mediante el uso de material didáctico y la modificación del manual de la práctica, se pretende enriquecer la experiencia de laboratorio, con el fin lograr una mejor dinámica de aprendizaje en los estudiantes del curso de Laboratorio de Procesos I.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Elaborar a partir de pruebas experimentales el manual de usuario para la práctica de difusión en gases y desarrollar una herramienta pedagógica para respaldarlo.

1.2 Objetivos Específicos

- Identificar y ajustar las condiciones de trabajo que requiere el equipo para el correcto desarrollo de la práctica
- Crear un manual que permita al estudiante comprender el procedimiento a seguir para el desarrollo apropiado de la práctica
- Diseñar una herramienta pedagógica que ayude a fortalecer los conocimientos acerca de difusión de gases y reforzar el procedimiento en la práctica de laboratorio

2. Marco referencial

2.1 Difusión molecular

La difusión fue registrada por primera vez en el experimento de Robert Brown en 1827, donde se observó el desplazamiento de algunas semillas de polen sobre la superficie del agua usando un microscopio, gracias a esto se descubrió que las moléculas realizaban constantes movimientos aleatorios, esto se conoce como movimiento browniano. En 1905, Albert Einstein proporcionó una explicación matemática de este fenómeno y definió el coeficiente de difusión para una partícula esférica que se desplaza en una fase fluida, y se definió según la ecuación (1); esta ecuación es conocida como “la ecuación de Stokes- Einstein”, donde se define que, los coeficientes de difusión se relacionan con la viscosidad del fluido, la temperatura y las características geométricas de las moléculas de este. (Nagy, 2011)

$$D_{par} = \frac{k_B T}{6\pi\mu_d r_s} \quad (1)$$

Donde: k_B es la constante de Boltzmann, 1.38×10^{-23} J/K; r_s es el radio de Stokes; T es la temperatura; μ_d es la viscosidad dinámica.

La difusión molecular consiste en el desplazamiento de moléculas individuales por medio de un fluido mediante la trayectoria desordenada de cada una de ellas (Geankoplis, 2003). Este es un fenómeno de transporte de masa fundamentado por medio de un gradiente de concentración, el cual genera un recorrido de un punto de mayor concentración a uno de menor concentración como consecuencia del movimiento aleatorio que realizan las partículas. (Boschan, 2007)

El movimiento realizado por las partículas es la consecuencia de su energía térmica a través de una sustancia. Cuando una solución no es uniforme respecto a la concentración de sus componentes, está por medio del proceso de difusión llegará a la uniformidad debido a que se crea un flujo de sustancias de un punto de alta concentración a uno de baja concentración; tal como se muestra en la Figura 1 (Basmadjian, 2005). La difusividad es una propiedad de un componente y de su entorno, donde se tiene en cuenta condiciones tales como temperatura, presión, concentración, ya sea en solución líquida, gaseosa o sólida. (Treybal, 1980)

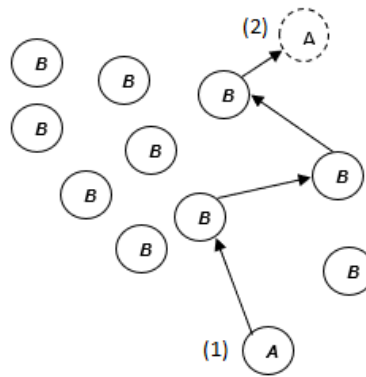


Figura 1. Diagrama esquemático del proceso de difusión molecular

Fuente: Adaptado de (Geankoplis, 2003)

2.2 Difusión en gases

La difusividad, o coeficiente de difusión, D , es una propiedad del sistema que depende de la temperatura, presión y de la naturaleza de los componentes. (Treybal, 1980). La difusión en gases es directamente proporcional con la temperatura e inversamente proporcional con la presión, también disminuye al aumentar el peso molecular. En la tabla 1, se muestran algunos valores

experimentales del coeficiente de difusión para sistemas binarios a presión atmosférica. (Roque Masciarelli, 2012)

La difusividad de masa D_{AB} para mezclas binarias de gases no polares es predecible por la teoría cinética dentro de un margen aproximado de 5%. En un gas a baja presión, la difusividad es independiente de la concentración, por lo que sí se cumple que $D_{AB} = D_{BA}$. (Bird, Stewart, & Lightfoot, 2002).

Tabla 1. Coeficientes de difusión binaria de mezclas diluidas de gases a 1 atm.

Sustancia A	Sustancia B	T, K	DAB o DBA [m ² /s]	Sustancia A	Sustancia B	T, K	DAB o DBA [m ² /s]
Aire	Acetona	273	1,10E-05	Argón, Ar	Nitrógeno, N ₂	293	1,90E-05
Aire	Amoniaco, NH ₃	298	2,60E-05	Carbono dióxido de, CO ₂	Benceno	318	7,20E-06
Aire	Benceno	298	8,80E-06	Carbono dióxido de, CO ₂	Hidrógeno, H ₂	273	5,50E-05
Aire	Carbono bióxido de	298	1,60E-05	Carbono dióxido de, CO ₂	Nitrógeno, N ₂	293	1,60E-05
Aire	Cloro	273	1,20E-05	Carbono dióxido de, CO ₂	Oxígeno, O ₂	273	1,40E-05
Aire	Alcohol etílico	298	1,20E-05	Carbono dióxido de, CO ₂	Agua, Vapor de	298	1,60E-05
Aire	Éter etílico	298	9,30E-06	Hidrógeno, H ₂	Nitrógeno, N ₂	273	6,80E-05
Aire	Helio, He	298	7,20E-05	Hidrógeno, H ₂	Oxígeno, O ₂	273	7,00E-05
Aire	Hidrógeno, H ₂	298	7,20E-05	Oxígeno, O ₂	Amoniaco	293	2,50E-05
Aire	Yodo, I ₂	298	8,30E-06	Oxígeno, O ₂	Benceno	296	3,90E-06
Aire	Metanol	298	1,60E-05	Oxígeno, O ₂	Nitrógeno, N ₂	273	1,80E-05
Aire	Mercurio	614	4,70E-05	Oxígeno, O ₂	Agua, Vapor de	298	2,50E-05
Aire	Naftaleno	300	6,20E-06	Agua, Vapor de	Argón, Ar	298	2,40E-05
Aire	Oxígeno, O ₂	298	2,10E-05	Agua, Vapor de	Helio, He	298	9,20E-05
Aire	Agua, Vapor de	298	2,50E-05	Agua, Vapor de	Nitrógeno, N ₂	298	2,50E-05

Fuente: (Cengel, 2011)

2.3 Ley de Fick

Esta ley recibe su nombre en honor a Adolf Fick, quien en el siglo XIX dio a conocer las leyes de la difusión; esta es utilizada para describir múltiples casos donde ocurre este fenómeno de transporte de masa.

El flujo molar se puede utilizar adecuadamente para describir la rapidez de transferencia debido a que el área se mide en dirección normal a la difusión. Sin embargo, aunque una solución sea no uniforme con solo dos componentes, estos deben difundirse para alcanzar la uniformidad. Es así, como el movimiento de un componente debe ser descrito por dos fluxes: N , el flux relacionado con un lugar fijo en el espacio; importante en el diseño del equipo y J , el flux de un compuesto con relación a la velocidad molar promedio; el cual es característico de la naturaleza del componente. (McCabe, 2007). De esta forma, la primera ley de Fick para la dirección z es:

$$J_A = -c D_{AB} \frac{\delta y_A}{\delta Z} \quad (2)$$

El término D_{AB} de la ley de Fick corresponde al coeficiente de difusión o difusividad de la especie A sobre la especie B (unidades de área sobre tiempo), es definida como la proporcionalidad del flux J y el gradiente de concentración de una sustancia A en solución con B y es una medida de que tan rápido puede A difundirse en B. Es pertinente aclarar que para un par de especies gaseosas A y B: $D_{AB} = D_{BA}$, y es una cantidad fuertemente dependiente de la temperatura, mientras que estos coeficientes de difusión no serán iguales si ambas especies son líquidas, así como tampoco la D_{AB} en fase líquida no será igual que la D_{AB} en fase gaseosa. (McCabe, 2007)

2.4 Algunos métodos para hallar el coeficiente de difusión gaseoso

2.4.1 Ecuación de Fuller, Schettler y Giddings. Es un método de fácil aplicación que permite predecir la difusividad binaria de mezclas en fase gaseosa, esta se basa en el estudio hecho por Arnold y Gilliland, en el cual se estimaba el coeficiente de difusión haciendo uso de los volúmenes atómicos de las sustancias.

Esta ecuación fue el resultado de un estudio realizado por Eduard Fuller, Paul Schettler y Calvin Giddings en 1966, donde se hizo una comparación detallada de la ecuación con respecto a los métodos de Arnold, Gilliland, Hirschfelder-Bird-Spotz, entre otros y se logró demostrar que la correlación es bastante precisa. La mayoría de estas correlaciones tienen origen en el modelo de la esfera dada por Chapman-Enskog. (Fuller, Schettler, & Giddings, 1966)

La ecuación de Fuller tiene como parámetro el volumen de difusión V , el cual se obtiene de la suma de los volúmenes atómicos de todos los elementos de cada molécula. Esta correlación se puede usar tanto en gases polares como no polares. (Hines & Maddox, 1985)

$$D_{AB} = \frac{1,0 * 10^{-9} * T^{1,75}}{P[(\sum v)_A^{1/3} + (\sum v)_B^{1/3}]^2} * \left(\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B} \right)^{1/2} \quad (3)$$

Dónde:

D_{AB} : Coeficiente de difusión, m^2/s

T : Temperatura, K

M_A : Peso molecular de A, kg/kmol

M_B : Peso molecular de B, kg/kmol

P_T : Presión total, atm

$\sum v$: Volumen molecular, m^3/kg átomo

2.4.2 Ecuación de Hirschfelder, Bird y Spotz. Debido a la naturaleza compleja de la difusión de masa, los coeficientes de difusión suelen determinarse en forma experimental. La teoría cinética de los gases indica que el coeficiente de difusión para los gases diluidos, a presiones ordinarias, es en esencia independiente de la composición de la mezcla y tiende a crecer con la temperatura al

mismo tiempo que a decrecer con la presión según la ecuación 4 denominada “extrapolación de Hirschfelder”. (Cengel, 2011)

$$D_{AB,T_2,P_2} = D_{AB,T_1,P_1} \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{3/2} * \left(\frac{P_1}{P_2} \right) \quad (4)$$

Teniendo como base el trabajo realizado por Chapman y Enskog donde relacionaron las propiedades de los gases con las fuerzas que actúan entre las moléculas, y el potencial de Lennard-Jones para relacionar las fuerzas atractivas y repulsivas entre los átomos, Hirschfelder desarrolló la siguiente ecuación para predecir la difusividad de los pares de gases no polares. (Hines & Maddox, 1985)

$$D_{AB} = \frac{1,858 * 10^{-27} * T^{3/2}}{P \sigma_{AB}^2 \Omega_D} * \left(\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B} \right)^{1/2} \quad (5)$$

Dónde:

D_{AB} : Coeficiente de difusión, m^2/s

T: Temperatura, K

M_A : Peso molecular de A, kg/kmol

M_B : Peso molecular de B, kg/kmol

σ_{AB} : Diámetro de colisión, m

Ω_D : Integral de colisión

2.5 Método experimental Winkelmann

El método permite de forma conveniente hallar el coeficiente de difusión de un líquido volátil en aire, en el cual hay un tubo de diámetro pequeño que contiene el líquido y se mantiene a temperatura constante; sobre la parte superior del tubo se hace circular una corriente de aire a baja velocidad, pero con la suficiente para permitir que la presión parcial del vapor permanezca allí aproximadamente igual a cero. Por medio de la difusión molecular el vapor se desplaza a la corriente de aire desde la superficie del líquido. En la Figura 2 se puede observar el sistema de difusión descrito anteriormente. (Coulson & Richardson, 1979)

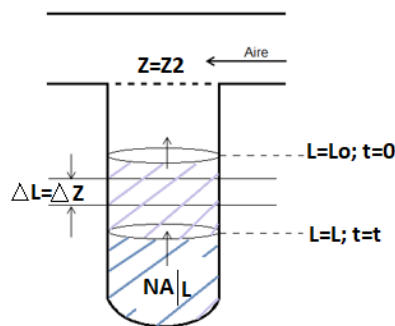


Figura 2. Difusión de A en B, en estado estacionario

Fuente: Adaptado de (Castillo, García, Guillen & López, 2010)

Para calcular el coeficiente de difusión de gases, se considera la evaporación en estado estacionario del líquido dentro del tubo capilar a través del gas estancado. Ahora, este se puede estimar experimentalmente midiendo el cambio de nivel del líquido con el tiempo, aplicando la ecuación 6. (Armfield, 2014)

$$\frac{t}{(L - L_0)} = \left(\frac{\rho_l}{2MD_{AB}} \right) \left(\frac{C_{BM}}{C_A C_T} \right) (L - L_0) + \left(\frac{\rho_L C_{BM}}{MD C_A C_T} \right) L_0 \quad (6)$$

Dónde:

t: Tiempo [s]

Lo: Posición inicial de la interfase [mm]

L: Posición en determinado tiempo [mm]

M: Peso molecular del líquido [kg/kmol]

D_{AB} : Coeficiente de difusión

ρ_l : Densidad del líquido [kg/m³]

C_{BM} : Media concentración logarítmica de vapor [kmol/m³]

C_A : Concentración de saturación en la interfase [kmol/m³]

C: Concentración molar total [kmol/m³]

De la ecuación 6 se despeja el termino D_{AB} , y se obtiene la siguiente expresión:

$$D_{AB} = \frac{(\rho_L * C_{Bm})}{2 * M * C_{A*} C * S} \quad (7)$$

Donde S es la pendiente de la regresión lineal que se hace a partir de los datos experimentales.

El desarrollo matemático y las consideraciones para llegar a la expresión anterior se presentan en el Apéndice A.

3. Metodología

En la figura 3, se plasma la metodología empleada para el desarrollo de la práctica en docencia, a través de una serie de pasos y un diagrama que especifica de forma general las etapas para el cumplimiento de los objetivos planteados.

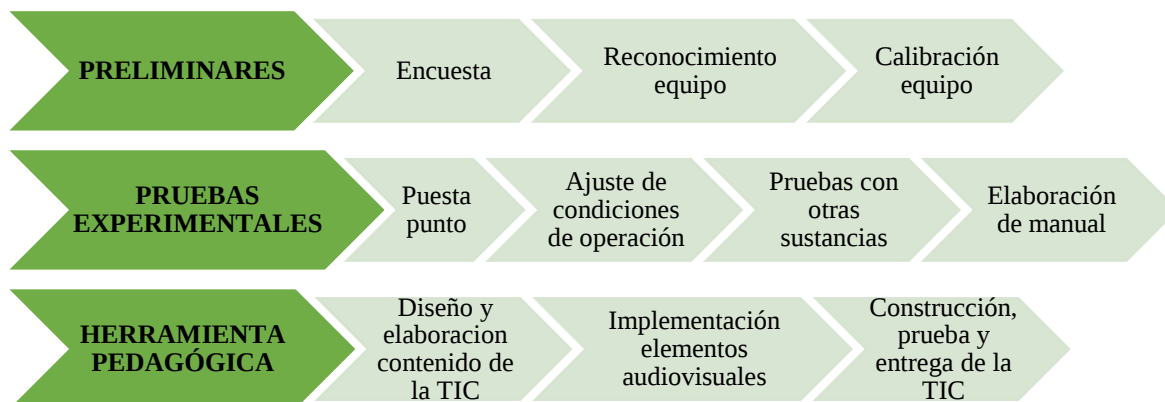


Figura 3. Esquema metodología

3.1 Preliminares

3.1.1 Diseño y aplicación de la encuesta. Por medio de una encuesta, se realizó el análisis de la necesidad de un cambio en el proceso educativo del curso “Laboratorio de Procesos I”, respecto a la práctica que tiene como fin la determinación del coeficiente de difusión gaseoso; con el objeto de tener una referencia frente a la perspectiva de los estudiantes que la han cursado y aquellos que la están cursando. Esta encuesta se diseñó y se aplicó usando la herramienta Google Drive. (ver Apéndice B).

3.1.2 Reconocimiento del equipo. Se examinó la información contenida en el manual de operación proporcionado por el proveedor; para conocer detalles del funcionamiento, calibración del equipo y sus partes, así como el procedimiento para realizar la práctica y un ejemplo donde se utilizó acetona como sustancia a difundir.

3.1.3 Calibración del equipo. Antes de poner en marcha las pruebas, fue importante realizar la calibración del equipo sugerida por los proveedores en el manual, lo que garantiza el buen funcionamiento del dispositivo y mediciones precisas en la toma de datos para así obtener coherencia en los resultados y compararlos con la teoría.

3.2 Pruebas experimentales y elaboración de manual

3.2.1 Realización puesta punto. A partir de la información recopilada sobre la práctica “difusión en gases” en el manual de operación del equipo y la otorgada por los docentes responsables de la asignatura, se llevaron a cabo pruebas experimentales utilizando acetona como sustancia a difundir bajo las condiciones normales de operación indicadas en la *Tabla 2*.

Tabla 2. Condiciones de operación puesta punto

PARÁMETRO	
Presión	1 [atm]
Temperatura	40 [°C]
Intervalo de tiempo	60 [s]
Altura capilar	3,5 [mm]

Para validar cada prueba experimental realizada fue necesario hacer el cálculo del valor experimental del coeficiente de difusión gaseoso. Este se halló por medio del método Winkelmann y se comparó con valores teóricos determinados mediante las ecuaciones de Hirschfelder y Fuller. Con esto se evaluó el error experimental porcentual para cada una.

3.2.2 Ajuste condiciones de operación. Durante el desarrollo de las pruebas en la puesta punto se dificultó hacer las mediciones, ya que el intervalo de tiempo empleado era muy pequeño y no superaba los 60 segundos. Debido a esto, la altura de la sustancia en el capilar no variaba significativamente como para notar un cambio, por tal razón se hicieron variaciones en el intervalo para la toma de las fotos realizada por el equipo y se trabajó a una temperatura de 40°C. Los intervalos manejados fueron: 1800[s], 900[s], 600[s] y 300[s]. Posteriormente, se procedió a hacer pruebas variando la temperatura de operación entre 30°C y 45°C, repitiendo cada una de ellas tres veces.

3.2.3 Implementación otras sustancias. Una vez validadas las pruebas experimentales hechas con acetona, y verificando que fueran coherentes con la literatura, se procedió a realizar nuevos ensayos usando metanol y etanol como sustancias a difundir, esto con el objetivo de ampliar la perspectiva acerca del fenómeno de difusión y el alcance del equipo. Las pruebas fueron realizadas a una temperatura de operación entre 40°C y 55°C, manejando un intervalo de tiempo de 600 segundos.

3.2.4 Elaboración del manual. Finalizada la parte experimental del proyecto, se inició la elaboración del manual. Para ello se recopiló información teórica necesaria y se tuvieron en cuenta guías prácticas existentes en la escuela de Ingeniería Química y el manual de operación del equipo, proporcionado por los proveedores. El manual se diseñó de tal manera que el estudiante comprenda de inicio a fin el desarrollo de la práctica experimental, el objetivo y el procedimiento analítico que debe realizar para hacer el cálculo del coeficiente de difusión gaseoso.

3.3 Herramienta Pedagógica

El aplicativo pedagógico se elaboró con el objetivo de implementar una herramienta basada en las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (TIC), como un complemento al proceso educativo. En este proyecto se creó un ambiente virtual de aprendizaje (AVA), organizado de tal manera que su contenido fuera atractivo a la vista y de fácil comprensión, con el fin de ser un refuerzo al reconocimiento de la práctica experimental. Para su creación se usó el lenguaje de programación JavaScript.

4. Resultados

4.1 Preliminares

4.1.1 Análisis y resultados de la encuesta. La encuesta (Apéndice B) se aplicó a 110 estudiantes de la escuela de Ingeniería Química, que cursaban entre sexto y décimo semestre, y se pudieron observar algunas dificultades que tienen al realizar las diferentes prácticas en el laboratorio.

Según los resultados el 96,4% de la población encuestada ya cursó la asignatura laboratorio de procesos I, lo cual permitió tener una buena referencia acerca de la perspectiva de los alumnos sobre la materia.

Además, siempre se ha recomendado revisar los conceptos teóricos importantes antes de realizar cualquier práctica experimental con el fin de relacionarlos con la parte práctica. Sin

embargo, de acuerdo con la indagación hecha, el 59,1% de los estudiantes manifiestan que no lo hacen. No obstante, el 80,9% aseguró que realizaron los reconocimientos respectivos.

Después de cada prueba experimental, los estudiantes deben realizar un informe, y para ello se apoyan en el manual de usuario de laboratorio. Por un lado, para un 84,4% de ellos, el manual no es una herramienta de mucha utilidad, ya que la información no es clara; en cambio un 15,6% afirma que el manual fue muy práctico en el momento que lo requirieron.

Con la intención de saber qué permitiría un manual más provechoso, se planteó la pregunta: ¿Qué mejora le haría para hacerlo más útil? Un 67,3% escogió un procedimiento matemático mejor explicado, para facilitar el análisis de los cálculos respectivos; el 15,5% sugiere que el procedimiento experimental sea más detallado y el otro 17,3% propone que el desarrollo del objetivo de la práctica se especifique mejor.

Se propuso elaborar una herramienta pedagógica con el fin de respaldar el manual de laboratorio, por esta razón fue importante conocer la opinión de los estudiantes respecto a ello. El 98,2% afirmó que la implementación de una herramienta virtual es favorable en la preparación y realización de la práctica de laboratorio.

En cuanto a la práctica “coeficiente de difusión en gases”, el 92,7% de los alumnos la realizó. De ellos, el 56,9% adjudicó el error experimental a las malas mediciones realizadas, un 32,1% lo atribuyó al equipo, un 5,5% a la temperatura y el otro 5,5% al intervalo de tiempo manejado entre la toma de fotos. Los resultados se encuentran organizados en el Apéndice B.

4.1.2 Reconocimiento del equipo. Se identificaron cada una de las partes que componen el equipo CERa- Mkll marca Armfield, asimismo, el procedimiento experimental y las especificaciones detalladas en el manual de funcionamiento de este.

El equipo (Figura 4) consta de un tubo capilar de vidrio con un diámetro interno de 2 mm, incorporado a un bloque de aluminio; un controlador proporcional, integral y derivativo (PID) que mantiene la temperatura constante con una precisión de $\pm 1^\circ$; un microscopio USB de alta definición cuya resolución es de 1600x1200, una longitud de visualización del capilar de 12 mm, conectado a un ordenador con una escala de longitud como referencia física utilizada para la calibración del software. El programa puede generar múltiples imágenes o video en un determinado tiempo. Los períodos para las secuencias automáticas pueden ir desde 5 segundos hasta días. (Armfield, 2014)



Figura 4. Equipo CERa-MkII: Coeficiente de difusión gaseosa, Armfield

4.1.3 Calibración del equipo. La calibración del equipo se realizó en dos partes. La primera (Figura 5) se basó en ajustar de forma manual el microscopio, para esto se abrió la carcasa acrílica y se acomodó la cámara de tal manera que el rango de visualización se mostrará alineado en el software. Esta calibración se realizó varias veces durante toda la parte experimental del proyecto a modo de mantenimiento, ya que el constante uso del equipo, así como las condiciones externas, afectaron el funcionamiento del dispositivo. Por ejemplo, el ventilador incorporado en él hacía que partículas de polvo ingresaran provocando posibles alteraciones significativas en su labor. Por ende, esta calibración no solo era con fines de alinear el microscopio sino también de limpieza.

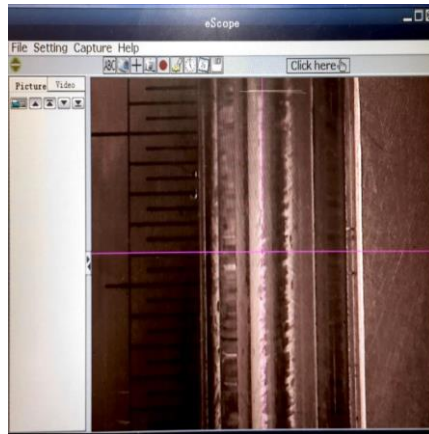


Figura 5. Calibración: ajuste del eje visual del microscopio

La segunda calibración (Figura 6) se realizó al inicio de cada prueba experimental, teniendo en cuenta que la resolución de la cámara debía estar en 640x480. Posterior a esto se tomó una foto y en ella se midió 5mm en la escala de longitud para que el programa efectuará una ampliación ajustada de esta, lo que permitió mediciones más exactas con magnitudes más pequeñas que la escala de referencia. Este valor se escribió en el recuadro de ajuste de magnitud del programa y por último se actualizó seleccionando el recuadro “click here”.

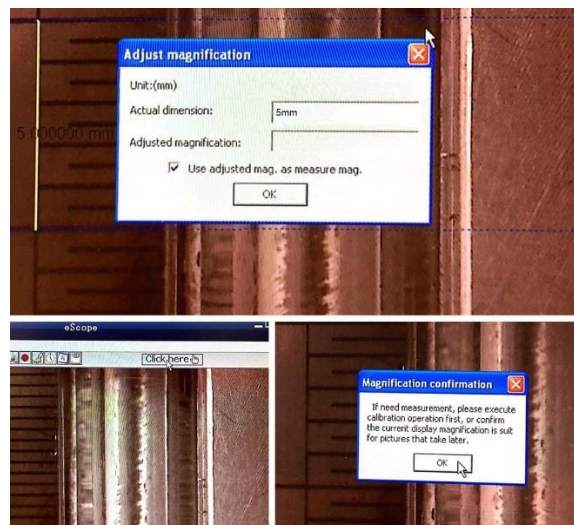


Figura 6. Calibración: ajuste escala de medición

Además, el controlador PID debe operar bajo condiciones específicas suministradas por el proveedor del equipo. Por lo tanto, se ajustó y verificó que los valores de aquellos parámetros fueran los correctos. Se encontró que el *set point* límite de temperatura no estaba en el valor indicado, el cual era 55 [°C]. Este procedimiento se presenta en el Apéndice C.

4.2 Pruebas experimentales y elaboración de manual de práctica

4.2.1 Puesta punto. La puesta punto se llevó a cabo por triplicado, según las especificaciones del manual de operación del equipo y las recomendaciones de algunos docentes. Se realizó la práctica tomando 31 mediciones y siguiendo los parámetros nombrados en la *Tabla 2*.

En la Figura 7 se muestra uno de los resultados experimentales donde se presenta la relación $L-L_o$ y $t/(L-L_o)$. Así mismo en la *Tabla 3* se presentan los resultados de las pruebas realizadas y cada error generado.

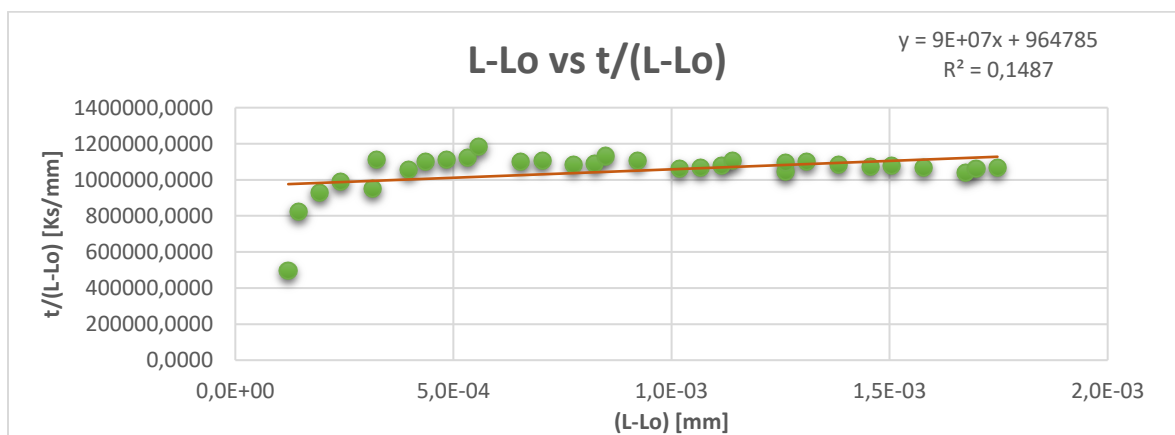


Figura 7. Resultados prueba 1 puesta punto, $L-L_o$ vs $t/(L-L_o)$

Mediante el método experimental Winkelmann, se calculó para todas las pruebas realizadas el valor del coeficiente de difusión gaseoso. Para la prueba presentada la difusividad de la acetona en el aire fue:

$$D_{AB} = 1,09 * 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

El error se calculó respecto a dos valores teóricos hallados con dos ecuaciones obtenidas de la literatura.

Error experimental porcentual respecto a la ecuación de Fuller:

$$\%error = \frac{1,083 * 10^{-5} - 1,09 * 10^{-6}}{1,083 * 10^{-5}} * 100\%$$

$$\%error = 89,84\%$$

Error experimental porcentual respecto a la ecuación de Hirschfelder:

$$\%error = \frac{1,129 * 10^{-5} - 1,09 * 10^{-6}}{1,129 * 10^{-5}} * 100\%$$

$$\%error = 90,35\%$$

Tabla 3. Resultados pruebas experimentales puesta punto

PRUEBA	D_{AB} experimental [m ² /s]	ERROR % (FULLER)	ERROR % (HIRSCHFELDER)
1	1,09E-06	89,94%	90,35%
2	5,45E-05	402,78%	382,51%
3	2,18E-05	101,11%	93,00%
D_{AB} exp. promedio [m ² /s]	2,5784E-05		
D_{AB} teórica (FULLER) [m ² /s]	1,083,E-05		
D_{AB} teórica (HIRSCHFELDER) [m ² /s]	1,129,E-05		
ERROR % promedio (FULLER)	137,98%		
ERROR % promedio (HIRSCHFELDER)	128,39%		

De la Figura 7, se puede observar que los valores no presentan una tendencia uniforme respecto a la relación entre el tiempo y la diferencia en la altura del capilar ($L-L_0$), impidiendo obtener una buena aproximación lineal con el método matemático utilizado para hallar el valor del coeficiente de difusión gaseoso. En consecuencia, se encontró un error experimental porcentual promedio del 137,98% respecto al dato teórico determinado mediante la ecuación de Fuller y un 128,39% en relación con la ecuación de Hirschfelder.

Respecto a las pruebas realizadas se evidenció, que el intervalo de tiempo utilizado en ellas es muy pequeño para observar un cambio en la altura de la sustancia dentro del capilar, haciendo que la toma de las medidas sea difícil de hacer y conllevando a posibles errores.

4.2.2 Condiciones de operación. Las pruebas experimentales realizadas con base a la puesta punto, permitieron tener una mejor idea de los parámetros o condiciones que afectaban el buen comportamiento del equipo, y fue así como se procedió a realizar variaciones sobre ellas y obtener mejores resultados. Como primera instancia se procedió a variar el intervalo de tiempo utilizado en las pruebas iniciales (60 segundos). Los tiempos manejados fueron: 1800 [s], 900 [s], 600 [s] y 300 [s].

Al realizar estas variaciones, se logró encontrar que el tiempo que mejor se acomodaba a la práctica y permitía mejores resultados de forma constante era 600 segundos; sin embargo, algunas pruebas no arrojaban los resultados esperados, y se observó que en la mayoría de ellas los valores obtenidos después de cierto tiempo presentaban una tendencia uniforme. Por esta razón luego de varios experimentos, se agregó una parte preliminar al procedimiento; que consistió en adicionar un tiempo de estabilización de 20 minutos, luego de alcanzar la temperatura de trabajo deseada.

Por otro lado, para obtener los valores suficientes que permitan conseguir resultados verificables, teniendo en cuenta el tiempo empleado en la realización de la práctica y el horario de la asignatura; el rango de temperatura en la cual la práctica funciona de forma eficiente es de 33 a 40°C. Por debajo de este rango se presentan variaciones mínimas en la altura del capilar lo cual dificulta las mediciones y por encima de 40°C la altura de la sustancia desciende con gran rapidez impidiendo que se tomen los suficientes datos para obtener resultados confiables.

En la tabla 4, tabla 5, tabla 6, y tabla 7, se presentan los resultados para la acetona, usando un intervalo de tiempo de 600 segundos, una presión de 1 atm, un tiempo de estabilización de 20 minutos, y temperaturas de: 33°C, 35°C, 38°C y 40°C, estas pruebas se realizaron por triplicado. Para los cálculos del error se usó la ecuación de Fuller y la ecuación de Hirschfelder. En el apéndice D se encuentra un ejemplo del procedimiento matemático necesario para hallar el coeficiente de difusión gaseoso teórico y experimental. Las gráficas respectivas se presentan en el apéndice E.

Tabla 4. Resultados pruebas experimentales a 33°C usando acetona

PRUEBA	D_{AB} experimental [m ² /s]	ERROR % (FULLER)	ERROR % (HIRSCHFELDER)
1	1,03E-05	1,18%	4,76%
2	1,06E-05	2,16%	1,54%
3	1,01E-05	3,39%	6,89%
D_{AB} exp. promedio [m ² /s]	1,0330E-05		
D_{AB} teórica (FULLER) [m ² /s]	1,0414E-05		
D_{AB} teórica (HIRSCHFELDER) [m ² /s]	1,0805E-05		
ERROR % promedio (FULLER)	0,81%		
ERROR % promedio (HIRSCHFELDER)	4,39%		

Tabla 5. Resultados pruebas experimentales a 35°C usando acetona

PRUEBA	D_{AB} experimental [m ² /s]	ERROR % (FULLER)	ERROR % (HIRSCHFELDER)
1	1,10E-05	4,67%	0,71%
2	1,04E-05	1,44%	5,17%
3	1,09E-05	3,07%	0,83%
D_{AB} exp. promedio [m ² /s]	1,0755E-05		
D_{AB} teórica (FULLER) [m ² /s]	1,0534E-05		
D_{AB} teórica (HIRSCHFELDER) [m ² /s]	1,0947E-05		
ERROR % promedio (FULLER)	2,10%		
ERROR % promedio (HIRSCHFELDER)	1,76%		

Tabla 6. Resultados pruebas experimentales a 38°C usando acetona

PRUEBA	D_{AB} experimental [m ² /s]	ERROR % (FULLER)	ERROR % (HIRSCHFELDER)
1	1,11E-05	3,58%	0,42%
2	1,06E-05	0,94%	4,77%
3	1,13E-05	5,51%	1,43%
D_{AB} exp. promedio [m ² /s]	1,1005E-05		
D_{AB} teórica (FULLER) [m ² /s]	1,0714E-05		
D_{AB} teórica (HIRSCHFELDER) [m ² /s]	1,1144E-05		
ERROR % promedio (FULLER)	2,72%		
ERROR % promedio (HIRSCHFELDER)	1,25%		

Tabla 7. Resultados pruebas experimentales a 40°C usando acetona

PRUEBA	D_{AB} experimental [m ² /s]	ERROR % (FULLER)	ERROR % (HIRSCHFELDER)
1	1,09E-05	1,06%	3,01%
2	1,11E-05	2,61%	1,53%
3	1,10E-05	1,57%	2,52%
D_{AB} exp. promedio [m ² /s]	1,1024E-05		
D_{AB} teórica (FULLER) [m ² /s]	1,0835E-05		
D_{AB} teórica (HIRSCHFELDER) [m ² /s]	1,1290E-05		
ERROR % promedio (FULLER)	1,75%		
ERROR % promedio (HIRSCHFELDER)	2,35%		

4.2.3 Pruebas experimentales con otras sustancias. Luego de terminadas las pruebas con acetona y observar resultados experimentales acordes con la literatura, se llevó a cabo la práctica usando dos sustancias diferentes: metanol y etanol; se escogieron estos dos alcoholes debido a su volatilidad, además de ello presentan densidad y temperatura de ebullición similares a la acetona.

Tabla 8. Resultados pruebas experimentales usando metanol.

Temperatura operación [°C]	D_{AB} experimental [m ² /s]	D_{AB} teórico (FULLER) [m ² /s]	ERROR % (FULLER)	D_{AB} teórico (HIRSCHFELDER) [m ² /s]	ERROR % (HIRSCHFELDER)
43	1,53E-05	1,598E-05	4,06%	1,71358E-05	10,52%
45	1,60E-05	1,616E-05	1,22%	1,73435E-05	7,96%
50	1,74E-05	1,661E-05	5,05%	1,78623E-05	2,34%

Tabla 9. Resultados pruebas experimentales usando etanol.

Temperatura operación [°C]	D_{AB} experimental [m ² /s]	D_{AB} teórico (FULLER) [m ² /s]	ERROR % (FULLER)	D_{AB} teórico (HIRSCHFELDER) [m ² /s]	ERROR % (HIRSCHFELDER)
48	1,47E-05	1,5192E-05	3,01%	1,3649E-05	7,95%
50	1,483E-05	1,5358E-05	3,46%	1,38023E-05	7,42%
53	1,524E-05	1,56083E-05	2,39%	1,40465E-05	8,46%
55	1,63494E-05	1,5776E-05	3,63%	1,4202E-05	15,12%

En los datos presentados en la *Tabla 8* y *Tabla 9* se pudo observar que los errores son bajos, lo cual indica que la práctica se hizo adecuadamente y sus resultados son coherentes. Con lo anterior, se puede apreciar que el diseño de la práctica funciona para otras sustancias aparte de la usualmente trabajada. Los resultados de las pruebas realizadas con estas sustancias se presentan en el Apéndice F.

4.2.4 Elaboración de manual. El nuevo manual de laboratorio se elaboró teniendo en cuenta el formato que se manejaba anteriormente, buscando facilitar la comprensión de la práctica y los conceptos que engloba. Se agregó la explicación del proceso matemático del método experimental Winkelmann paso a paso, la descripción del procedimiento de forma detallada, valores teóricos de los coeficientes de difusión para las distintas sustancias y a diferentes temperaturas, el enlace de la herramienta pedagógica de apoyo y por último una serie de recomendaciones que permiten el correcto desarrollo de la prueba y manejo del equipo. El manual se puede observar en el Apéndice G.

4.3 Herramienta pedagógica

Para el diseño de la herramienta pedagógica se tuvieron en cuenta distintos aspectos sugeridos por los estudiantes en la encuesta realizada, las diferentes características que debe tener la herramienta TIC para ser considerada beneficiosa y útil en el campo educativo, como presentar la información de forma concisa para hacer fácil su comprensión y un diseño llamativo para fomentar el interés en su contenido. (Almenara, 2007).

La página principal del programa está dividida en 4 partes principales (ver Figura 8), estas son:

- **Objetivos:** Se plasman los objetivos que se deben alcanzar al realizar la práctica
- **Generalidades:** Contiene los conceptos básicos que intervienen en este fenómeno de transporte, los cuales son: difusión molecular, difusión en gases, ley de Fick, ecuación de Fuller y ecuación de Hirschfelder. Tenerlos claros es fundamental para verificar el buen desarrollo de la práctica

- **Protocolo:** Para el adecuado funcionamiento del equipo y realización de la práctica, es necesario tener claro el procedimiento. Cuenta con la descripción del equipo, los implementos de seguridad y presenta el desarrollo de la práctica de forma audiovisual
- **Prueba experimental:** Esta parte contiene un archivo Excel que muestra un ejemplo para determinar el coeficiente de difusión gaseosa para las tres sustancias, además de recomendaciones acerca de la práctica



Figura 8. Herramienta virtual: Coeficiente de difusión en gases

La herramienta virtual se elaboró utilizando una plantilla que fue modificada para obtener el resultado deseado. Lo anterior fue posible al trabajar con: HTML 5.0, versión actualmente utilizada para otorgar una estructura base a la página, CSS para el diseño, lo que permitió que sea agradable a la vista y JavaScript como lenguaje de programación para dirigir el comportamiento

global, el movimiento de las imágenes y la adaptación de la página a diferentes dispositivos, entre otros.

- **HTML 5.0** (*HyperText Markup Language*, versión 5): Es el lenguaje de marcas de hipertexto para la creación de páginas web a cargo de la World Wide Web Consortium (W3C). Define una estructura básica y el contenido por medio de etiquetas que el navegador interpreta y representa en pantalla, lo que permite visualizar: imágenes, videos, juegos, dirigirnos a otras páginas, saltos de línea, listas, tablas, etc. (Bright, 2014)

- **CSS** (*Cascading Style Sheets*): Es el software que permite dotar de cualidades estéticas y visuales a una página web. Para tener una mayor comprensión se debe aclarar que una página web es un documento de texto escrito en código HTML donde CSS como tecnología da el color, forma, posición y muchas otras características que se presentan en la página web. Se denominan estilos en cascadas debido a que estos se aplican de arriba abajo utilizando un patrón llamado herencia. (Manz, 2007)

- **JavaScript**.: Es un lenguaje independiente de la plataforma lo que le permite ser incorporado en cualquier página web y crear contenido para ser ejecutado en cualquier ordenador del mercado: Apple, Windows, Linux, etc. Este lenguaje es usado para crear pequeños programas que pueden ser insertados en páginas web o programas más grandes, basado en acciones con pocas restricciones, centrado en describir objetos, escribir funciones que respondan a utilización de teclas, cargas de páginas, movimientos de mouse, aperturas y más. Con JavaScript se pueden crear diferentes efectos e interactuar con los usuarios. (Valdéz, 2007)

En el siguiente enlace se puede visualizar el ambiente virtual (AVA), producto de este trabajo:

<https://difusion-en-gases.firebaseio.com/>

5. Conclusiones

- Se pudo observar que es necesario un tiempo de estabilización de 20 minutos una vez alcanzada la temperatura de trabajo, con el fin de tener el sistema bajo las condiciones necesarias para iniciar la experiencia. Así mismo, se requiere un intervalo de tiempo entre fotos de 600 segundos para garantizar un comportamiento constante en distintas pruebas.
- Se identificó que, para la acetona el rango de temperatura entre 33 y 40°C permite obtener valores de difusividad gaseosa acordes a la literatura. Del mismo modo, usando metanol y etanol como sustancias a difundir, se establecieron rangos comprendidos entre 43-50°C y 48-55°C respectivamente; ampliando el alcance del equipo.
- Los errores obtenidos experimentalmente con el método Winkelmann y con dos aproximaciones teóricas, “ecuación de Fuller” y “ecuación de Hirschfelder”, fueron bajos, lo cual indica que los ajustes realizados fueron correctos.
- Se elaboró el manual de operación de la práctica, planteando de manera más detallada y concisa el procedimiento experimental y matemático a realizar. Se incluyó una serie de recomendaciones que permiten un mejor funcionamiento y desarrollo de la prueba experimental.
- Se realizó el diseño de la herramienta pedagógica, teniendo como producto un Ambiente Virtual de Aprendizaje (AVA) como ayuda en el desarrollo y comprensión de la práctica de laboratorio. En ella se agregaron conceptos básicos importantes para analizar el comportamiento del fenómeno de transporte involucrado en la experimentación; además se incluye un documento guía del método experimental utilizado.

Referencias Bibliográficas

- Almenara, J. C. (2007). Las necesidades de las TIC en el ambito educativo: oportunidades, riesgos y necesidades. *Tecnologia y comunicacion educativas ano 21, No45*, julio-diciembre.
- Armfield. (2014). *Manual del Equipo Armfields CERA-Diffusion of a gas apparatus*. Inglaterra: Armfield Limited.
- Basmadjian, D. (2005). *Mass transfer principals and aplications*. Londres: CRC PRES.
- Betancourt, R. (1998). *Determinación de difusividades gaseosas usando el tubo de Stefan*. Manizales, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Bird, B., Stewart, W., & Lightfoot, E. (2002). *Fenómenos de transporte*. Madison, Wisconsin: Limusa Wiley.
- Boschan, A. (2007). *Estudio del transporte y la difusión en medios fracturados*. Francia: Universidad Pierre y Marie Curie.
- Bright, P. (28 de 10 de 2014). *arsTECGNICA*. Recuperado el 12 de abril de 2019, de <https://arstechnica.com/information-technology/2014/10/html5-specification-finalized-squabbling-over-who-writes-the-specs-continues/>
- Castillo, D., Garcia, E., Guillen, J., & Lopez, O. (2010). *Difusión*. Lima, Perú: Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Fscultad de Química, Ingeniería Química.
- Cengel, Y. A. (2011). *Transferencia de calor y masa*. México D.F.: McGraw Hill.
- Coulson, J., & Richardson, J. (1979). *Ingeniería Química Tomo I*. España: Editorial Reverté S.A.
- Fuller, E., Schettler, P., & Giddings, C. (1966). A new method for prediction of binary gas- phase diffusion coefficients. *Industrial & Engineering Chemistry*, 18-27.

- .Geankoplis, C. (2003). *Geankoplis, C.J.,Transport Process and Separation Process Principles* .
New Jersey: Prentice Hall.
- Hines, A. L., & Maddox, R. N. (1985). *Mass transfer fundamentals and applications*. Estados Unidos: Pearson Education.
- Hirschfelder, J., Bird, B., & Spotz, E. (1949). *The transport properties of gases and gaseous mixtures. II*. Madison, Wisconsin: Naval research laboratory, University of Wisconsin.
- Manz. (15 de septiembre de 2007). *Lenguaje CSS*. Recuperado el 14 de abril de 2019, de <https://lenguajecss.com/p/css/introduccion/que-es-css>
- McCabe, W. (2007). *Operaciones unitarias en ingeniería química*. México D.F.: McGraw-Hill.
- Nagy, E. (2011). *Basic Equations of the Mass Transport Through a Membrane Layer* . Veszprém, Hungría: Elsevier.
- Roque Masciarelli, S. S. (2012). Transferencia de materia. En *Ingeniería de las reacciones* (págs. 1-30). Santa Fe, Argentina, Argentina.
- Svehla, R. A. (1962). *Estimated viscosities and thermal conductivities of gases at high temperatures*. NASA TR R- 132.
- Treybal. (1980). *Operaciones de transferencia de masa*. Malaysia: McGrawHill Book Company.
- Valdéz, D. P. (3 de julio de 2007). *Maestrosdelweb*. Recuperado el 15 de abril de 2019, de <http://www.maestrosdelweb.com/que-es-javascript/>

Apéndices

Apéndice A. Método Winkelmann

En un sistema de dos fases es muy común encontrar un soluto A que se difunde en el seno de un gas B. Primero se debe obtener la expresión que represente la velocidad de flujo molar N_A que ocurre desde la interfaz, para eso se hacen las siguientes suposiciones:

1. Estado cuasi-estacionario
2. Sistema isotérmico y presión total constante (concentración total y D_{AB} son constantes)
3. No existe reacción química
4. Se mantiene nivel de líquido A constante $Z = Z_1$, lo cual se justifica por el hecho que la velocidad de difusión del gas A es mucho mayor que la velocidad a la cual disminuye el volumen del líquido A dentro del capilar.
5. Mezcla gaseosa ideal ($P_T = P_A + P_B$; $P_A = y_A * P_T$)
6. A se difunde en B; el gas B se mantiene estancado y no se solubiliza en el líquido A.
7. Difusión unidireccional en Z como consecuencia del pequeño radio del tubo capilar.
8. La fracción molar de la especie A en la parte superior del tubo es cero.

De la ecuación de continuidad de la especie A en coordenadas cilíndricas se obtiene la siguiente expresión:

$$\cancel{\frac{\partial C_A}{\partial t}} + \left(\cancel{\frac{1}{r} \frac{\partial r N_{Ar}}{\partial r}} + \cancel{\frac{1}{r} \frac{\partial N_{A\theta}}{\partial \theta}} + \frac{\partial N_{AZ}}{\partial z} \right) = \cancel{R_A} \quad (A1)$$

Simplificando la ecuación (G1) obtenemos:

$$\left(\frac{\partial N_{AZ}}{\partial z} \right) = 0 \quad (A2)$$

Lo que implica que $N_{AZ} = \text{Constante}$

Ahora, para una mezcla gaseosa de difusión solo en dirección z el flujo molar total de A viene dado por la siguiente expresión:

$$N_{AZ} = -CD_{AB} \frac{\partial y_A}{\partial z} + y_A(N_{Az} + N_{Bz}) \quad (A3)$$

Dónde:

N_{AZ} = Densidad de flujo molar total (por difusión y convección) de la especie A en la dirección Z

C = concentración Total

D_{AB} = Coeficiente de difusión de A en B

y_A = Fracción molar de A

N_{Bz} = Velocidad del flujo molar de B en la dirección Z

Como B no se difunde en A, se puede decir que $N_{Bz} = 0$, entonces se obtiene:

$$N_{A,Z} = \frac{-CD_{AB}}{1 - y_A} \frac{\partial y_A}{\partial z} \quad (A4)$$

Definimos la fracción molar de en términos de concentración y reemplazamos en la ecuación.

(A4):

$$y_A = \frac{C_A}{C} \quad (A5)$$

La ecuación. (A4) se puede integrar teniendo en cuenta que $N_{A,Z}$ es constante:

$$\int_{z_1}^{z_2} N_{A,Z} \partial z = \int_{y_{A1}}^{y_{A2}} \frac{-CD_{AB}}{C - C_A} \partial C_A$$

Resolviendo las integrales:

$$N_{A,Z} = \frac{CD_{AB}}{z_2 - z_1} \ln \left(\frac{C - C_{A2}}{C - C_{A1}} \right) \quad (A6)$$

Si definimos la concentración logarítmica media de la componente B como:

$$C_{Bm} = \frac{C_{B2} - C_{B1}}{\ln \left(\frac{C_{B2}}{C_{B1}} \right)} = \frac{C_{A1} - C_{A2}}{\ln \left(\frac{C - C_{A2}}{C - C_{A1}} \right)} \quad (A7)$$

C_{B1} , C_{B2} y C_{Bm} , representan las concentraciones molares para la especie B

Reorganizando términos y reemplazando (A7) en (A6) se obtiene:

$$N_{A,Z} = \frac{CD_{AB}}{z_2 - z_1} \frac{C_{A1} - C_{A2}}{C_{Bm}} \quad (A8)$$

La ecuación (A8) muestra la relación que existe entre la velocidad de transferencia de materia con una fuerza motriz característica de concentración $C_{A1} - C_{A2}$. Se reorganiza la ecuación (A8), se aplican los siguientes cambios:

$\Delta C = C_{A1} - C_{A2} \approx C_{A1}$ y es la concentración en la interfase.

$z_2 - z_1 = L$, es la distancia efectiva de transferencia de masa

$$N_{A,Z} = D_{AB} \left(\frac{C_A}{L} \right) \left(\frac{C}{C_{Bm}} \right) \quad (A9)$$

Se ha demostrado experimentalmente en la teoría de gases ideales que 1 kmol de cualquier gas a condiciones normales de 1 atm de presión y 0°C de temperatura ocupa un volumen de 22,414 m³. Lo anterior nos permite realizar el siguiente procedimiento para hallar la C :

1. Se define concentración a condiciones normales como $C_0 = \frac{n}{v} = \frac{1}{22,414}$
2. Luego dividimos la ecuación de gases ideales para un gas a condiciones normales sobre una a condiciones de operación:

$$\frac{C_0}{C} = \frac{\frac{P}{RT_0}}{\frac{P}{RT}}$$

Ya que se trabaja a la misma presión y la constante de los gases R , es la misma se obtiene la siguiente expresión:

$$C = C_0 * \frac{T_0}{T} = \left(\frac{1}{22,414} \right) * \frac{T_0}{T} \quad (A10)$$

Además:

Concentración media logarítmica del vapor de la sustancia A esta definida como:

$$C_{Bm} = \left(\frac{C_{B1} - C_{B2}}{\ln \left(\frac{C_{B1}}{C_{B2}} \right)} \right) \quad (A11)$$

Concentración molar de aire en la corriente de aire: $C_{B1} = C$,

Concentración molar del aire en la superficie del líquido:

$$C_{B2} = \left(\frac{P_a - P_v}{P_a} \right) C \quad (A12)$$

Concentración de saturación de la sustancia A en la interfase:

$$C_A = \frac{P_v}{P_a} C \quad (A13)$$

Donde P_a = Presión atmosférica y P_v = Presión de vapor de la sustancia A

Además, es necesaria una ecuación que permita relacionar la velocidad a la cual desciende la interfase líquido-gas con el tiempo, para poder determinar el coeficiente de difusión. Esta es posible gracias al considerar el método de estado cuasi-estacionario de equilibrio.

$$\frac{1}{M} \frac{\partial m_A}{\partial t} = \frac{\rho_L a}{M} \frac{\partial L}{\partial t} = a N_{A,z} \quad (A14)$$

Siendo M el peso molecular del líquido que se evapora y a el área de la interfase.

Se pueden igualar aproximadamente las ecuaciones (A14) y (A9) que describen la velocidad de forma estacionaria y cuasi estacionaria respectivamente:

$$\frac{\rho_L}{M} \frac{\partial L}{\partial t} = D_{AB} \left(\frac{C_A}{L} \right) \left(\frac{C}{C_{Bm}} \right) \quad (A15)$$

Separando variables e integrando:

$$\int_{L_0}^L L dL = \left(\frac{M D_{AB}}{\rho_L} \right) \left(\frac{C_A C}{C_{Bm}} \right) \int_0^t t dt \quad (A16)$$

Se obtiene como resultado:

$$L^2 - L_o^2 = \left(\frac{2MD_{AB}}{\rho_L} \right) \left(\frac{C_A C}{C_{Bm}} \right) t \quad (A17)$$

Se descompone el término $L^2 - L_o^2$ para facilitar la linealización:

$$\bullet \quad L^2 - L_o^2 = (L + L_o)(L - L_o) = (L - L_o + 2L_o)(L - L_o)$$

$$(L - L_o + 2L_o)(L - L_o) = \left(\frac{2MD_{AB}}{\rho_L} \right) \left(\frac{C_A C}{C_{Bm}} \right) t \quad (A18)$$

Linealizando la expresión se obtiene:

$$\frac{t}{(L - L_o)} = \left(\frac{\rho_L}{2MD_{AB}} \right) \left(\frac{C_{Bm}}{C_A C} \right) (L - L_o) + \left(\frac{\rho_L C_{Bm}}{MD_{AB} C_A C} \right) L_o \quad (A19)$$

Donde la pendiente que se establece al graficar $\frac{t}{(L - L_o)}$ vs $(L - L_o)$ es:

$$S = \left(\frac{\rho_L C_{Bm}}{2MD_{AB} C_A C} \right) \quad (A20)$$

Despejando la difusividad de A en B de la ecuación (15) se obtiene:

$$D_{AB} = \left(\frac{\rho_L C_{Bm}}{2MC_A C} \right) \left(\frac{1}{S} \right) \quad (A21)$$

Apéndice B. Encuesta de satisfacción**LABORATORIO DE PROCESOS I**

1. Actualmente, ¿Está cursando laboratorio de procesos I?

___ Si

___ No. No la he cursado

___ No. Ya la cursé

2. Antes de las prácticas del laboratorio, ¿Revisa los conceptos básicos relacionados con el tema de la prueba que va a realizar?

___ Si

___ No

3. ¿Realiza el reconocimiento respectivo antes de la práctica experimental?

___ Si

___ No

4. ¿Le fue útil la información contenida en el manual de laboratorio, para el desarrollo de la prueba y el informe? Argumente

5. Respecto al manual de laboratorio para cada práctica, ¿Que mejora le haría, para hacerlo más útil?

- Procedimiento matemático mejor explicado

- Procedimiento experimental más detallado
- Especificación del desarrollo del objetivo de la práctica

6. ¿Cree usted que sería favorable una herramienta virtual con la información necesaria para preparar y realizar la práctica de laboratorio?

___ Si

___ No

7. ¿Realizó la práctica "Determinación del coeficiente de difusión en gases"?

___ Si

___ No

8. En caso de resultados erróneos, ¿A que le atribuye el error?

- Temperatura
- Intervalo de tiempo entre la toma de fotos
- Equipo
- Malas mediciones

Resultados de la Encuesta

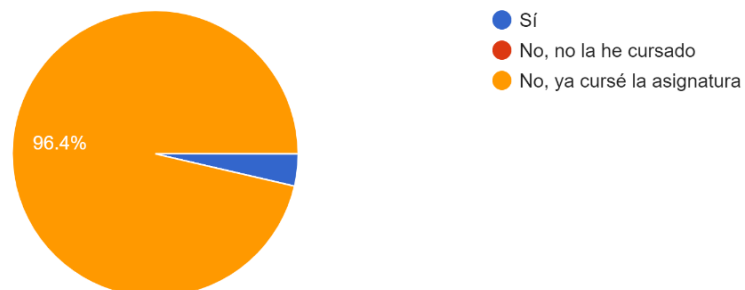


Figura 1. ¿Actualmente está cursando Laboratorio de Procesos I?

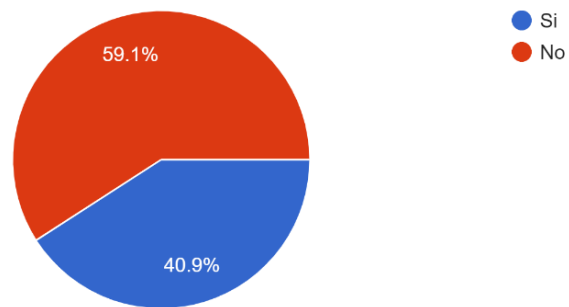


Figura 2. ¿Revisa los conceptos básicos relacionados con el tema de la prueba a realizar?

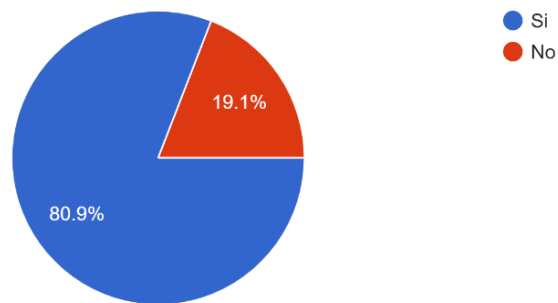


Figura 3. ¿Realiza el reconocimiento respectivo antes de la práctica experimental?

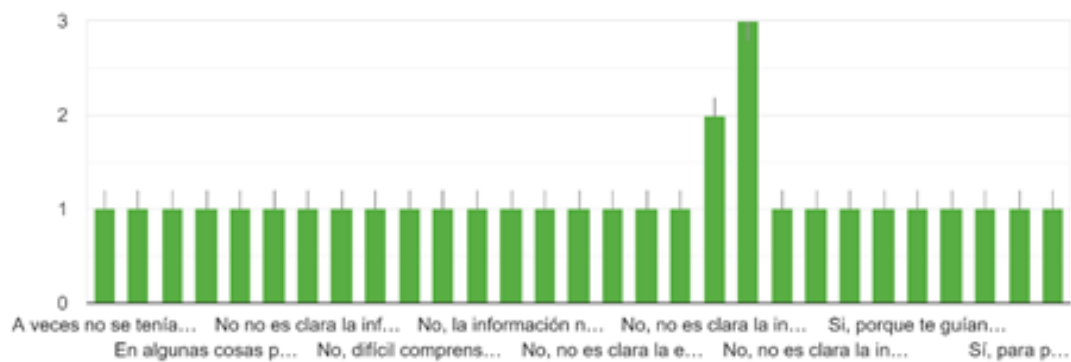


Figura 4. ¿Le fue útil la información contenida en el manual de laboratorio, para el desarrollo de la prueba y el informe?

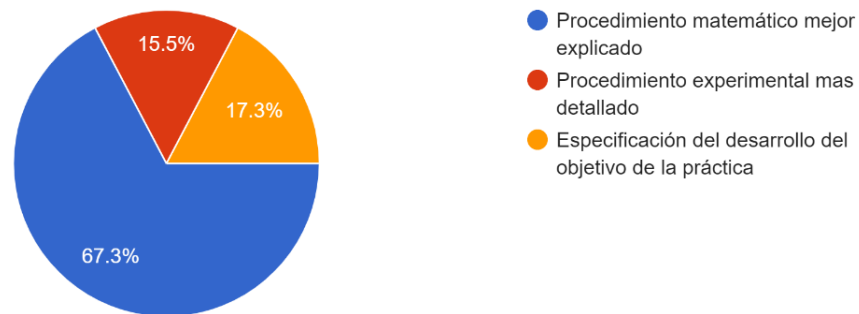


Figura 5. ¿Qué mejora le haría para hacer más útil el laboratorio en cada práctica?

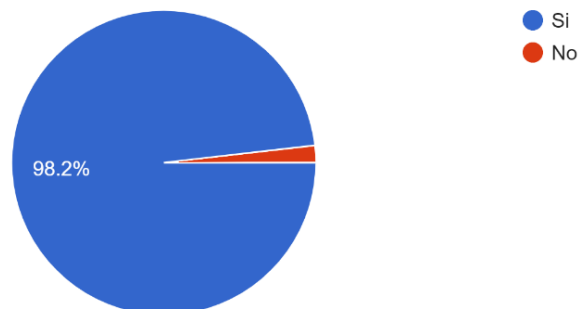


Figura 6. ¿Cree usted que sería favorable una herramienta virtual con la información necesaria para preparar y realizar la práctica de laboratorio?

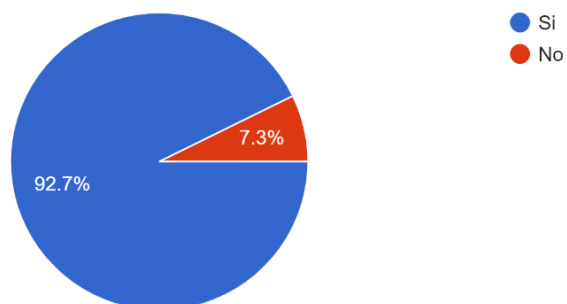


Figura 7. ¿Realizó la práctica “Determinación del coeficiente de difusión en gases”?

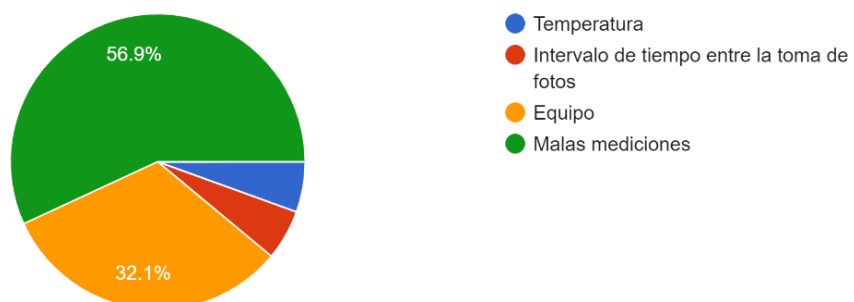


Figura 8. ¿A qué le atribuye el error en los resultados?

Apéndice C. Procedimiento calibración del equipo

Para la calibración del equipo es necesario abrir el programa “eScope” en el ordenador y seguir las indicaciones del siguiente procedimiento:

1. Verifique que la resolución (localizada en la barra de menú) sea 640x480 y confirme que la imagen del tubo capilar este centrada verticalmente en la pantalla, con la escala de longitud visible de lado izquierdo.

2. Seleccione el icono “*capture picture*” en la parte superior



Figura 1. Botón “*Capture Picture*”

3. En la parte izquierda de la pantalla debe aparecer la imagen tomada, selecciónela dando doble clic en ella, esta se abrirá en “eScopeImgEdt”.



Figura 2. Cuadro de edición “eScopeImgEdt”

4. En los iconos de la parte superior seleccione la imagen de una regla de medición, ahí se despliega una serie de opciones, seleccione la primera que dice “*calibration*”.



Figura 3. Menú calibración

5. Con el cursor, realice una medición de 5 mm, que vaya de línea a línea en la escala de longitud de la imagen, debe ser una línea totalmente recta y vertical, cuando tenga lista esa medida exacta de doble clic, inmediatamente le debe aparecer un recuadro, en él debe digitar el número 5 en el espacio “*actual dimension*”.

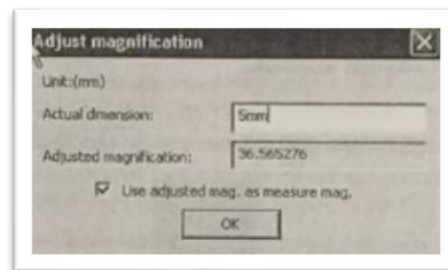


Figura 4. Ajuste dimensión actual

6. Se debe ajustar la magnificación hecha, para esto debe dar clic en el icono que dice “*click here*” ubicado en la parte superior derecha del “eScope”, seguido de esto aparecerá un recuadro, de clic en OK.

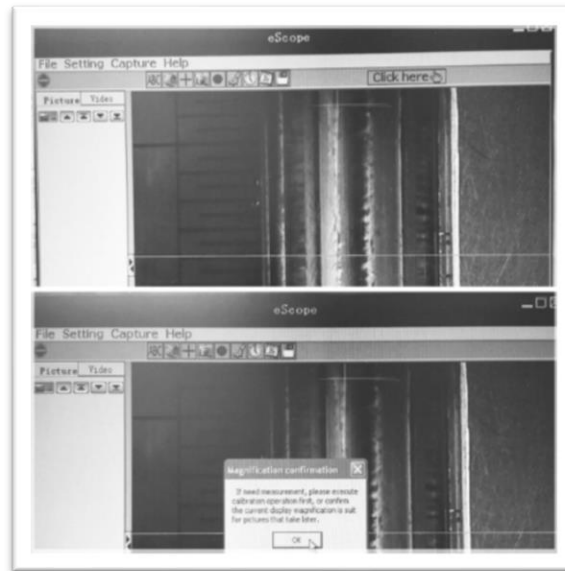


Figura 5. eScope

Es indispensable revisar la configuración de los parámetros del controlador, donde el único que puede ser modificado es el *set point* (SP) que es la temperatura de operación del equipo; en la Tabla 1, se presenta el valor en el cual debe estar cada parámetro.

Tabla 1. Configuración del controlador PID

Parámetros del set point (presione el botón F)	SP	040
	SL	055
Parámetros de operación (presione el botón F por 4 segundos)	Pb	002
	dt	05.0
	lt	005
	Ct	001
	CF	C
	HC	H
	LI	008
Configuración parámetros(presione el botón F por 8 segundos)	Lo	000
	Hi	060
	OF	000
	hL	000
	IN	002
	dL	000
	dH	999
	dP	001
	AS	010

Apéndice D. Cálculo coeficiente de difusión gaseoso teórico y experimental

En este apéndice se presenta un ejemplo del procedimiento matemático utilizado en cada una de las pruebas experimentales realizadas, con el fin de encontrar el error en cada una de ellas.

Sustancia: acetona

Intervalo de tiempo: 600 segundos

Cálculo coeficiente difusión gaseoso teórico usando la ecuación de Fuller.

$$D_{AB} = \frac{1,0 * 10^{-9} * T^{1,75}}{P[(\sum v)_A^{1/3} + (\sum v)_B^{1/3}]^2} * \left(\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B} \right)^{1/2} \quad (D1)$$

Dónde:

D_{AB} : Difusividad [m^2/s]

T: Temperatura [K]

M_A : Peso molecular de A Kg/kmol

M_B : Peso molecular de B Kg/Kmol

Pt: Presión total, atm

$\sum V$: Volumen molecular m^3/ Kg átomo

Es necesario tener los parámetros descritos anteriormente para calcular el valor teórico de D_{AB} para acetona-aire.

El volumen molecular se halló utilizando los valores de los volúmenes atómicos y moleculares en el punto de ebullición normal, estos datos se encontraron en la Tabla 2.

T [K]: 313

M_A [Kg/Kmol]: 58,08

MB [Kg/Kmol]: 29

PT [atm]: 1

ΣVB [m³/Kg átomo]: 2,01E-02

ΣVA [m³/Kg átomo]: 7,760E-02

Tabla 1. Volúmenes atómicos y moleculares en el punto de ebullición normal (Treybal, 1980)

Atomic Volume x 1,E+03 [m3/Kgatom]		Molecular Volume x 1,E+03 [m3/Kg mol]	
Bromine	27	Air	29,9
Carbon	14,8	Br2	53,2
Chlorine	24,6	Cl2	48,4
Hydrogen	3,7	CO	30,7
Iodine	37	CO2	34
Nitrogen	15,6	COS	51,5
Nitrogen in primary amines	10,5	H2	14,3
Nitrogen in secondary amines	12	H2O	18,9
Oxygen	7,4	H2S	32,9
Oxygen in methyl esters	9,1	I2	71,5
Oxygen in higher esters	11	N2	31,2
Oxygen in acids	12	NH3	25,8
Oxygen in methyl ethers	9,9	NO	23,6
Oxygen in higher ethers	11	N2O	36,4
Sulfur	25,6	O2	25,6
Benzene ring	-15	SO2	44,8
Naphthalene ring	-30		

Se reemplazó cada uno de los parámetros de la ecuación D (1) y se obtuvo el siguiente resultado:

$$D_{AB} = \frac{1,0 * 10^{-9} * (313)^{1,75}}{P[(7,760 * 10^{-2})^{1/3} + (2,01 * 10^{-2})^{1/3}]^2} * \left(\frac{1}{58,08} + \frac{1}{29} \right)^{1/2}$$

$$D_{AB} = 1,083 * 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

Cálculo coeficiente difusión gaseoso teórico usando la ecuación de Hirschfelder.

$$D_{AB} = \frac{1,858 * 10^{-27} * T^{3/2}}{P \sigma_{AB}^2 \Omega_D} * \left(\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B} \right)^{1/2} \quad (D2)$$

Dónde:

D_{AB} : Difusividad [m^2/s]

T: Temperatura [K]

MA: Peso molecular de A Kg/kmol

MB: Peso molecular de B Kg/Kmol

P: Presión total, atm

σ_{AB} : Diámetro de colisión

Ω_D : Integral de colisión

Para hallar el valor del diámetro de colisión σ_{AB} se utiliza la tabla 2.

Tabla 2. *Diámetros de colisión y parámetros energéticos para la ecuación de Lennard-Jones*
(Svehla, 1962)

Molecule	Compound	σ E10 (m)	ϵ/k (K)
Ar	Argon	3,542	93,3
He	Helium	2,551	10,22
Kr	Krypton	3,655	178,9
Ne	Neon	2,82	32,8
Xe	Xenon	4,047	1
Air	Air	3,711	78,6
AsH ₃	Arsine	4,145	259,8
BCl ₃	Boron Chloride	5,127	337,7
BF ₃	Boron flouride	4,198	186,3
B(OCH ₃) ₃	Methyl borate	5,503	396,7
Br ₂	Bromine	4,296	507,9
CCl ₄	Carbon tetrachloride	5,947	322,7
CF ₄	Carbon tetrafluoride	4,662	134
CHCl ₃	Chloroform	5,539	340,2
CH ₂ Cl ₂	Methylene chloride	4,898	356,3
CH ₃ Br	Methyl bromide	4,118	449,2
CH ₃ Cl	Methyl Chloride	4,182	350
CH ₃ OH	Methanol	3,626	481,8
CH ₄	Methane	3,758	148,6
CO	Carbon monoxide	3,69	91,7
COS	Carbonyl sulfide	4,13	336
CO ₂	Carbon dioxide	3,941	195,2
CS ₂	Carbon disulfide	4,483	467
C ₂ H ₂	Acetylene	4,033	231,8
C ₂ H ₄	Ethylene	4,163	224,7
C ₂ H ₆	Ethane	4,443	215,7
C ₂ H ₅ Cl	Ethyl chloride	4,898	300

Se hizo la lectura en la tabla 2, y se obtuvo los siguientes valores de diámetro de colisión para el aire y la acetona:

$$\sigma_A = 4,6 * 10^{-10} [m] \quad \epsilon/K = 560,2 [K] \text{ Para la acetona}$$

$$\sigma_B = 3,711 * 10^{-10} [m] \quad \epsilon/K = 78,6 [K] \text{ Para el aire}$$

Los parámetros σ_{AB} y ϵ_{AB}/K se calcularon para el sistema acetona-aire, fueron hallados mediante las siguientes ecuaciones:

$$\sigma_{AB} = \frac{\sigma_A + \sigma_B}{2} \quad (D3)$$

$$\epsilon_{AB}/K = \left(\frac{\epsilon_A}{K} * \frac{\epsilon_B}{K} \right)^{1/2} \quad (D4)$$

Reemplazando en las ecuaciones D (3) y D(4) se obtiene:

$$\sigma_{AB} = \frac{4,6*10^{-10} + 3,711*10^{-10}}{2}$$

$$\sigma_{AB} = 4,1555 * 10^{-10}$$

$$\epsilon_{AB}/K = (560,2 + 78,6)^{1/2}$$

$$\epsilon_{AB}/K = 209,837$$

Con los datos anteriormente calculados, se lee el valor de la integral de colisión, este parámetro se encuentra en la Tabla 3.

$$\frac{KT}{\epsilon_{AB}} = \frac{313}{209,837}$$

$$\frac{KT}{\epsilon_{AB}} = 1,4916$$

Como el valor 1,4916 no se encontraba en la Tabla 3, se hizo una interpolación entre los valores 1,45 y 1,50 para el parámetro $\frac{KT}{\epsilon_{AB}}$, y se obtuvo el siguiente resultado para la integral de colisión.

$$\Omega_D = 1,2$$

Se reemplazó cada uno de los parámetros de la ecuación D (2) y se obtuvo el siguiente resultado:

$$D_{AB} = \frac{1,858 * 10^{-27} * (313)^{3/2}}{1 * (4,1555 * 10^{-10})^2 * 1,2} * \left(\frac{1}{58,08} + \frac{1}{29} \right)^{1/2}$$

$$D_{AB} = 1,129 * 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

Tabla 3. Valores de integral de colisión basados en el potencial de Lennard-Jones (Hirschfelder, Bird, & Spotz, 1949)

kT/ϵ	Ω_D	kT/ϵ	Ω_D	kT/ϵ	Ω_D
0,3	2,662	1,65	1,153	4	0,8836
0,35	2,476	1,7	1,14	4,1	0,8788
0,4	2,318	1,75	1,128	4,2	0,874
0,45	2,184	1,8	1,116	4,3	0,8694
0,5	2,066	1,85	1,105	4,4	0,8652
0,55	1,966	1,9	1,094	4,5	0,861
0,6	1,877	1,95	1,84	4,6	0,8568
0,65	1,798	2	1,075	4,7	0,853
0,7	1,729	2,1	1,057	4,8	0,8492
0,75	1,667	2,2	1,041	4,9	0,8456
0,8	1,612	2,3	1,026	5	0,8422
0,85	1,562	2,4	1,012	6	0,8124
0,9	1,527	2,5	0,9996	7	0,7896
0,95	1,476	2,6	0,9878	8	0,7712
1	1,439	2,7	0,977	9	0,7556
1,05	1,406	2,8	0,9672	10	0,7424
1,1	1,375	2,9	0,9576	20	0,664
1,15	1,346	3	0,949	30	0,6232
1,2	1,32	3,1	0,9406	40	0,596
1,25	1,296	3,2	0,9328	50	0,5756
1,3	1,273	3,3	0,9256	60	0,5596
1,35	1,253	3,4	0,9186	70	0,5464
1,4	1,233	3,5	0,912	80	0,5352
1,45	1,215	3,6	0,9058	90	0,5256
1,5	1,198	3,7	0,8998	100	0,513
1,55	1,182	3,8	0,8942	200	0,4644
1,6	1,167	3,9	0,8888	400	0,417

Cálculo coeficiente difusión gaseoso experimental usando el método Winkelmann. Para el cálculo experimental se utilizó el método Winkelmann, del cual se tiene la siguiente ecuación linealizada; teniendo datos experimentales se realizó una gráfica (L-Lo) respecto a $t/(L-L_0)$ y se le halló una regresión lineal de la cual se toma el valor de la pendiente para hallar el valor de D_{AB} .

$$\frac{t}{(L - L_0)} = \left(\frac{\rho_L}{2PM D_{AB}} \right) \left(\frac{C_{Bm}}{C_A * C_T} \right) (L - L_0) + \left(\frac{\rho_L * C_{Bm}}{PM * D_{AB} * C_A * C_T} \right) * L_0 \quad (D5)$$

$$D_{AB} = \frac{(\rho_L * C_{Bm})}{2 * PM * C_A * C_T * S} \quad (D6)$$

Dónde:

t: Tiempo

L: Altura

Lo: Altura inicial

ρ_L : Densidad liquido

PM: Peso molecular liquido

D_{AB} : Difusividad de A en B

C_{Bm} : Concentración molar de vapor

C_A : Concentración de saturación en la interfase

C_T : Concentración molar total

S: Pendiente de la gráfica hecha a partir de datos experimentales

Fue necesario calcular todos los parámetros incluidos en la ecuación #, para calcular el coeficiente de difusión.

$$C_T = \left(\frac{1}{Kmol\ Vol} \right) \left(\frac{T_{abs}}{T_a} \right) \quad (D7)$$

$$C_T = \frac{1}{22,414\ m^3/Kmol} * \frac{273\ K}{313\ K}$$

$$C_T = 0,0389\ Kmol/m^3$$

$$C_T = C_{B1}$$

$$C_{B2} = \left(\frac{P_a - P_v}{P_a} \right) * C_T \quad (D8)$$

Dónde:

Pa: Presión total [Kpa]

Pv: Presión de vapor acetona [Kpa]

$$P_a = 101,325\ Kpa$$

$$P_v = 55,892$$

La presión de vapor se halló usando las constantes de Antoine.

$$C_{B2} = \left(\frac{101,325 - 55,892}{101,325} \right) * 0,0389$$

$$C_{B2} = 0,0174\ Kmol/m^3$$

$$C_{Bm} = \frac{C_{B1} - C_{B2}}{\ln \left(\frac{C_{B1}}{C_{B2}} \right)} \quad (D9)$$

$$C_{Bm} = \frac{0,0389 - 0,0174}{\ln \left(\frac{0,0389}{0,0174} \right)}$$

$$C_{Bm} = 0,0268 \text{ Kmol}/m^3$$

$$C_A = \left(\frac{P_V}{P_a} \right) * C_T \quad (D10)$$

$$C_A = \left(\frac{101,325}{55,892} \right) * 0,0389$$

$$C_A = 0,0215 \text{ Kmol}/m^3$$

Se tuvo en cuenta la densidad y el peso molecular de la acetona:

$$\rho_L = 790 \text{ Kg}/m^3$$

$$PM = 58,08 \text{ Kg}/\text{Kmol}$$

Tabla 4. *Datos experimentales prueba con acetona a 40°C*

t [ks]	L[mm]	(L-Lo) [mm]	t/(L-Lo)
0	0,4125780	0,0000000	
0,6	1,2377330	0,8251550	0,727136114
1,2	1,9658110	1,5532330	0,772582092
1,8	2,7181580	2,3055800	0,780714614
2,4	3,4219670	3,0093890	0,797504078
3	4,1257760	3,7131980	0,807928907
3,6	4,7810460	4,3684680	0,824087529
4,2	5,4848550	5,0722770	0,828030488
4,8	6,0673180	5,6547400	0,848845393
5,4	6,7181580	6,3055800	0,856384345
6	7,4021280	6,9895500	0,858424362

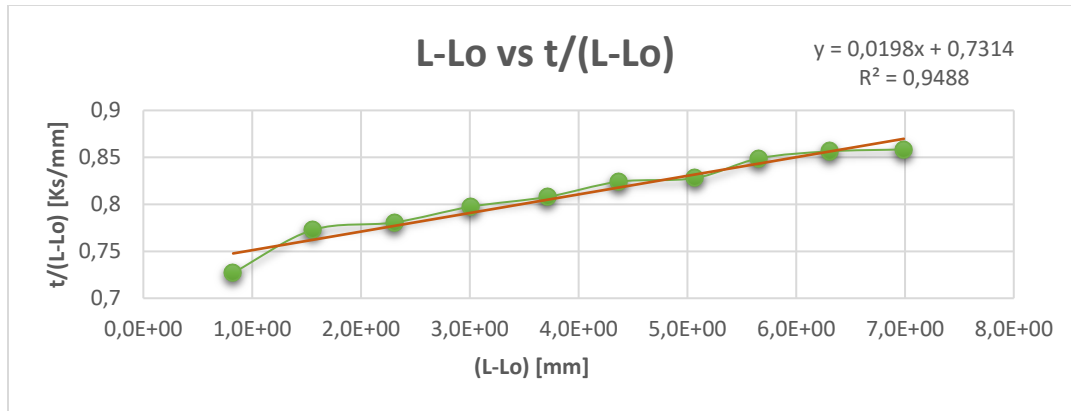


Figura 1. Resultados acetona a 40°C, L-Lo vs t/(L-Lo)

Para obtener una pendiente con más cifras significativas, la gráfica se hizo en unidades de Ks para el tiempo y mm para la diferencia en la altura del capilar. Por este motivo se hizo una conversión de unidades para poder usar el valor en la ecuación D (6).

$$S = 0,0198 \left[\frac{Ks}{mm^2} \right] * \left[\frac{1000 s}{1 Ks} \right] * \left[\frac{1000 mm}{1 m} \right]^2$$

$$S = 1,98 * 10^7$$

Se reemplazaron los datos calculados en la ecuación D (6) y se obtuvo:

$$D_{AB} = \frac{(790 * 0,0268)}{2 * 58,08 * 0,0215 * 0,0389 * 1,98 * 10^7}$$

$$D_{AB} = 1,101 * 10^{-5} m^2/s$$

- Para el cálculo del error se tuvo en cuenta dos datos teóricos para verificar que los datos experimentales si se ajustaron a la literatura.

El error experimental respecto a la ecuación de Fuller:

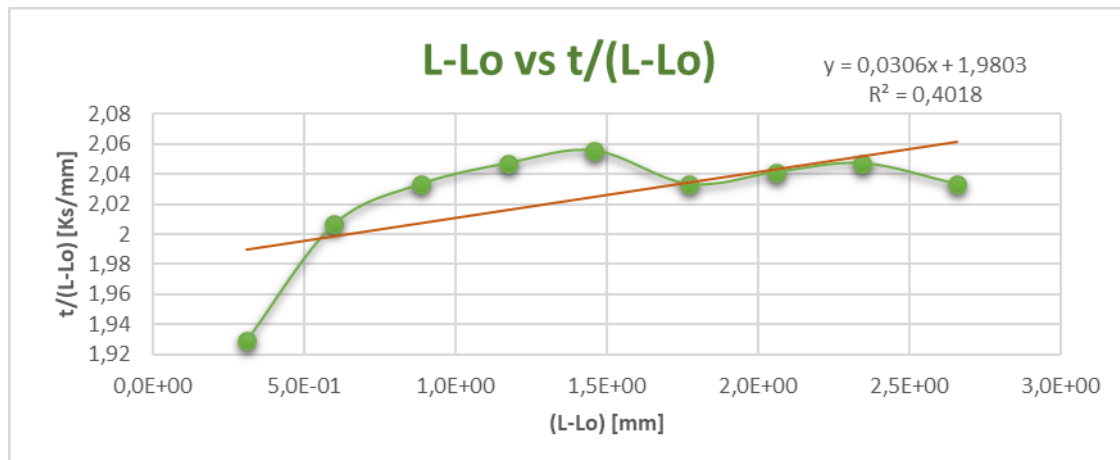
$$\%error = \frac{1,083 * 10^{-5} - 1,101 * 10^{-5}}{1,083 * 10^{-5}} * 100\%$$

$$\%error = 1,57\%$$

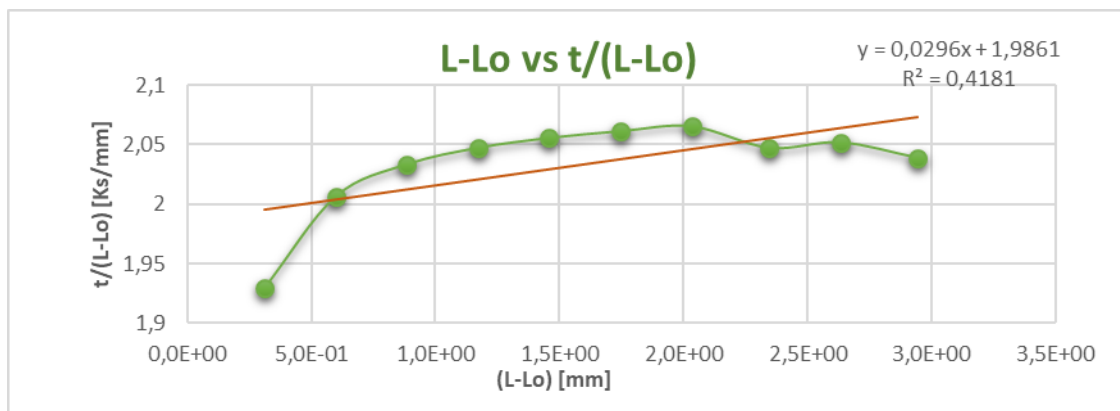
El error experimental respecto a la ecuación de Hirschfelder:

$$\%error = \frac{1,129 * 10^{-5} - 1,101 * 10^{-5}}{1,129 * 10^{-5}} * 100\%$$

$$\%error = 2,52\%$$

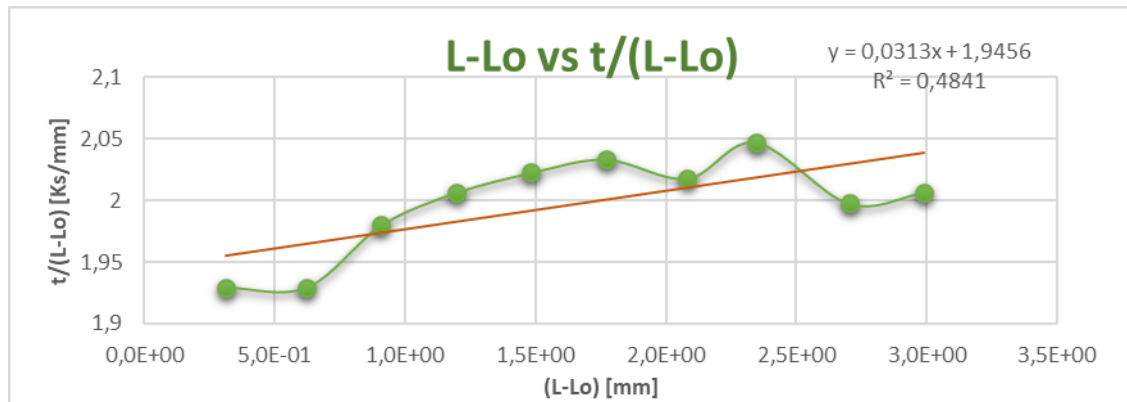
Apéndice E. Pruebas experimentales con acetona

ERROR % (FULLER)	1,18%	ERROR % (HIRSCHFELDER)	4,76%
---------------------	-------	---------------------------	-------

Figura 1. Resultados prueba 1: L-Lo vs $t/(L-Lo)$, a 33°C

ERROR % (FULLER)	2,16%	ERROR % (HIRSCHFELDER)	1,54%
---------------------	-------	---------------------------	-------

Figura 2. Resultados prueba 2: L-Lo vs $t/(L-Lo)$, a 33°C

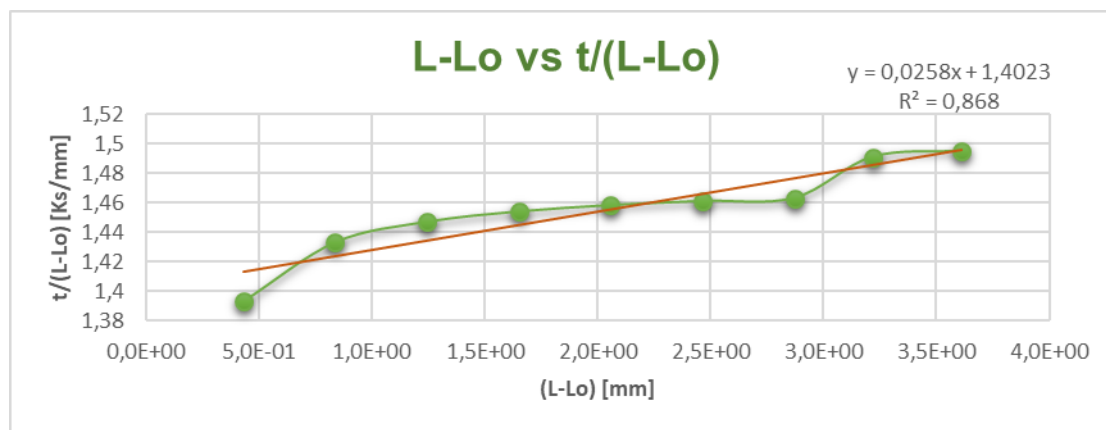


ERROR % (FULLER)

3,39%

ERROR %
(HIRSCHFELDER)

6,89%

Figura 3. Resultados prueba 3: L-Lo vs $t/(L-Lo)$, a 33°C

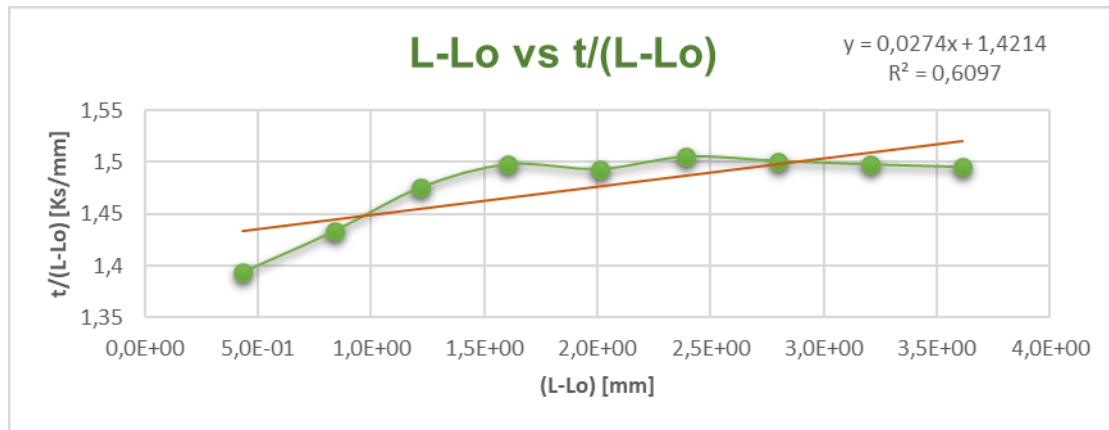
ERROR % (FULLER)

4,67%

ERROR %
(HIRSCHFELDER)

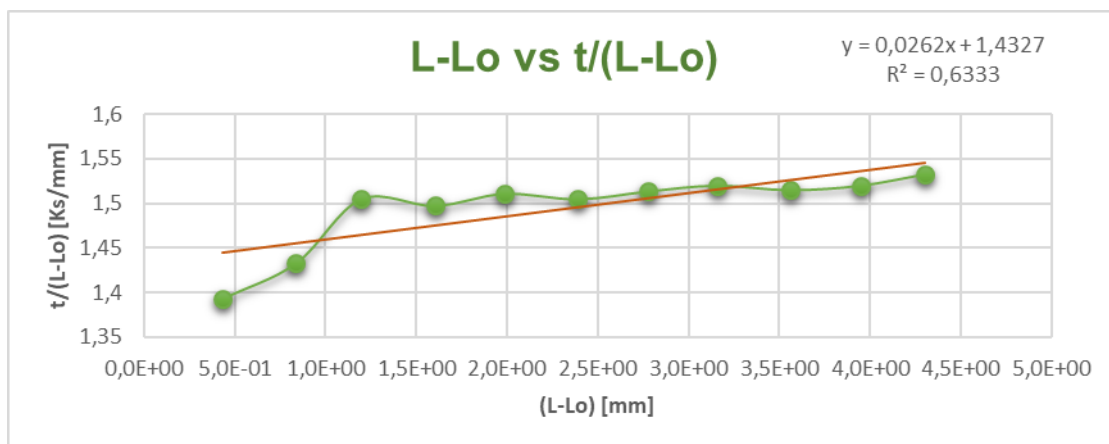
0,71%

Figura 4. Resultados prueba 1: L-Lo vs $t/(L-Lo)$, a 35°C



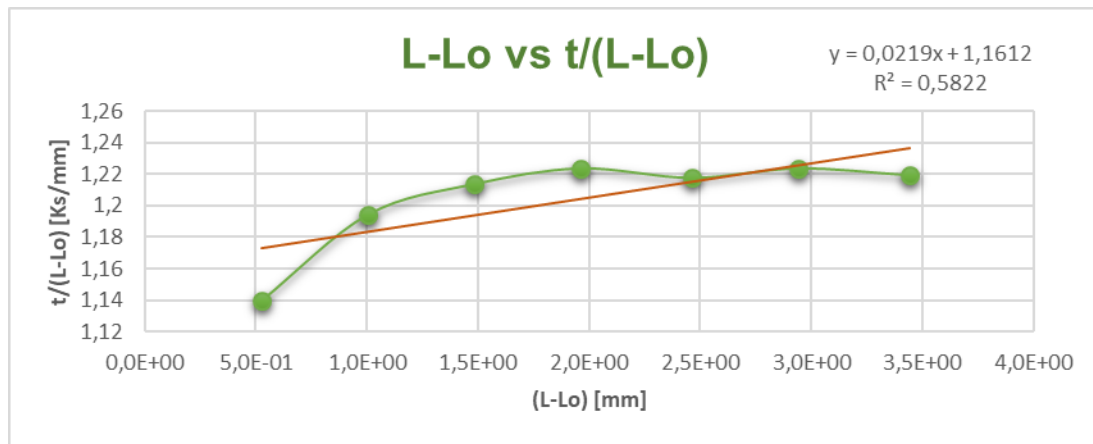
ERROR % (FULLER)	1,44%	ERROR % (HIRSCHFELDER)	5,17%
---------------------	-------	---------------------------	-------

Figura 5. Resultados prueba 2: L-Lo vs $t/(L-Lo)$, a 35°C



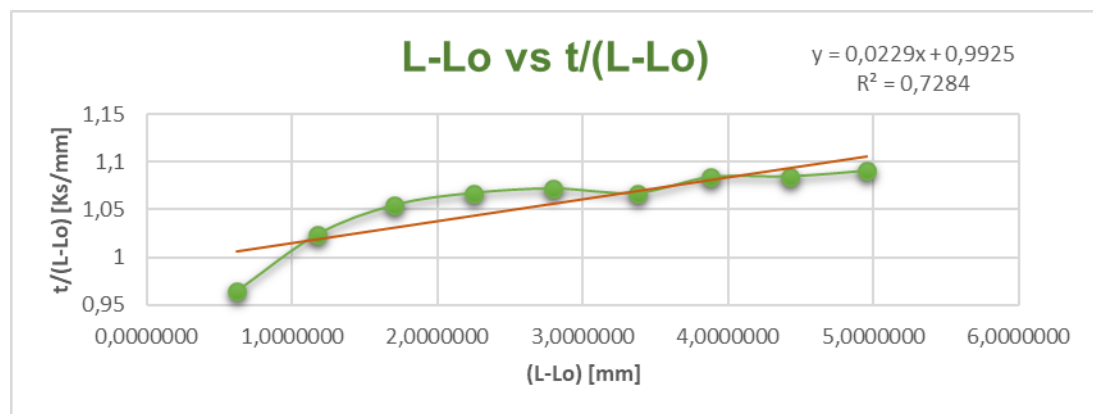
ERROR % (FULLER)	3,07%	ERROR % (HIRSCHFELDER)	0,83%
------------------	-------	---------------------------	-------

Figura 6. Resultados prueba 3: L-Lo vs $t/(L-Lo)$, a 35°C



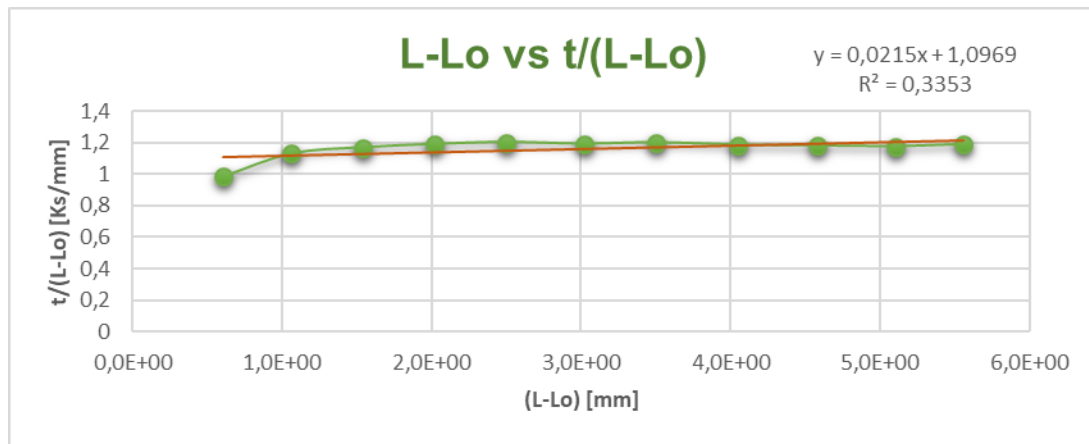
ERROR % (FULLER)	3,58%	ERROR % (HIRSCHFELDER)	0,42%
------------------	-------	------------------------	-------

Figura 7. Resultados prueba 1: L-Lo vs $t/(L-Lo)$, a 38°C



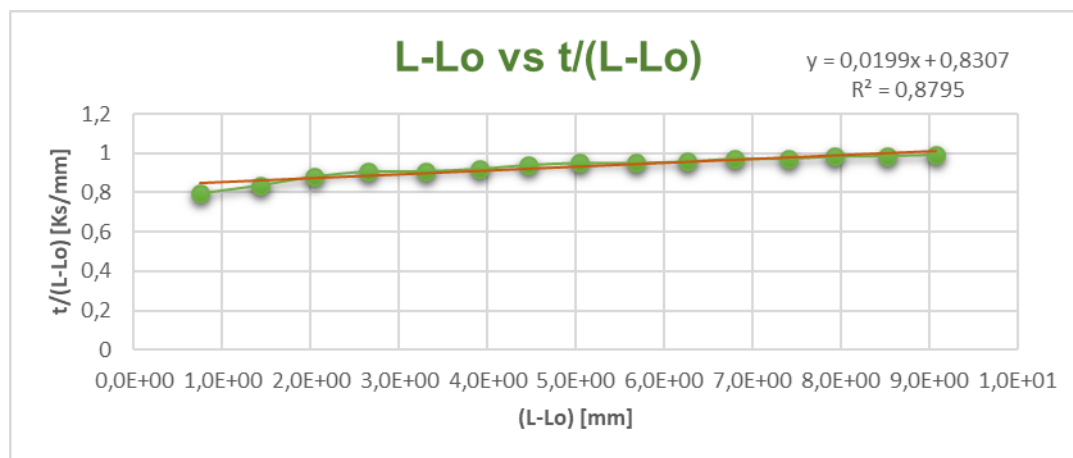
ERROR % (FULLER)	0,94%	ERROR % (HIRSCHFELDER)	4,77%
------------------	-------	------------------------	-------

Figura 8. Resultados prueba 2: L-Lo vs $t/(L-Lo)$, a 38°C



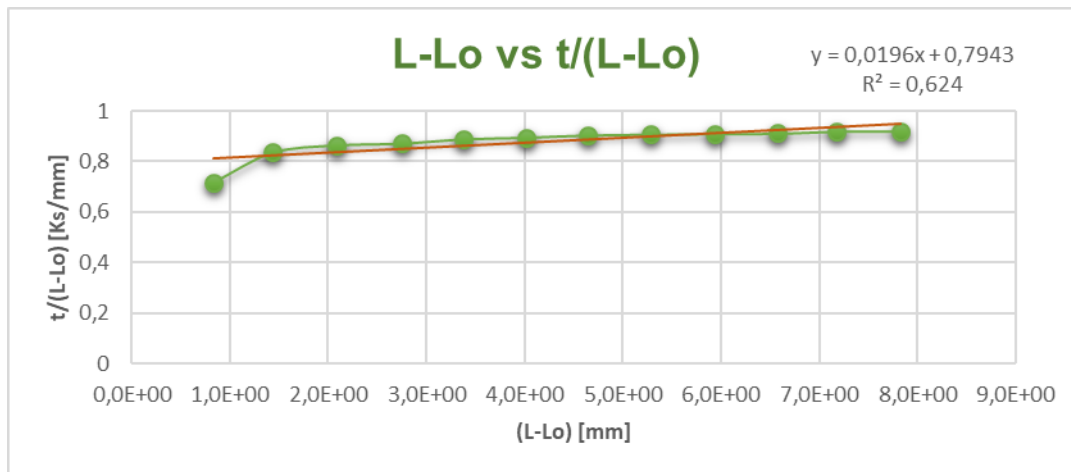
ERROR % (FULLER)	5,51%	ERROR % (HIRSCHFELDER)	1,43%
------------------	-------	------------------------	-------

Figura 9. Resultados prueba 3: L-Lo vs $t/(L-Lo)$, a 38°C



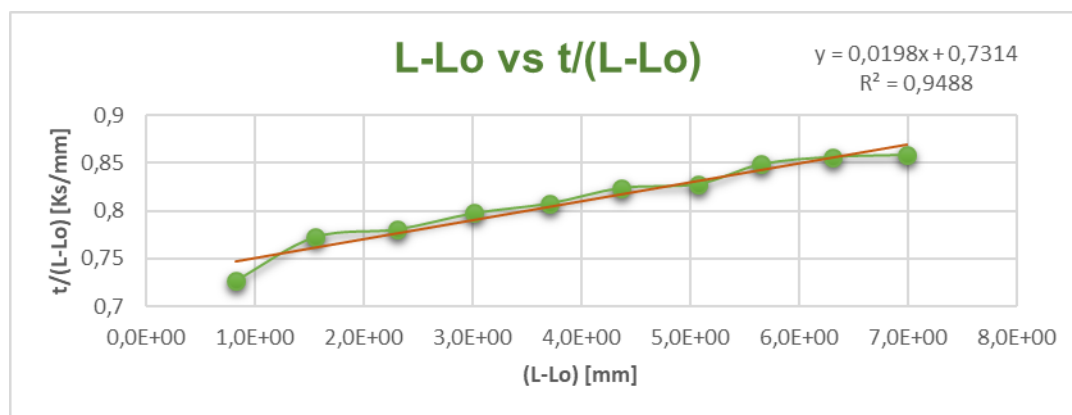
ERROR % (FULLER)	1,06%	ERROR % (HIRSCHFELDER)	3,01%
------------------	-------	------------------------	-------

Figura 10. Resultados prueba 1: L-Lo vs $t/(L-Lo)$, a 40°C



ERROR % (FULLER)	2,61%	ERROR % (HIRSCHFELDER)	1,53%
---------------------	-------	---------------------------	-------

Figura 11. Resultados prueba 2: L-Lo vs $t/(L-Lo)$, a 40°C

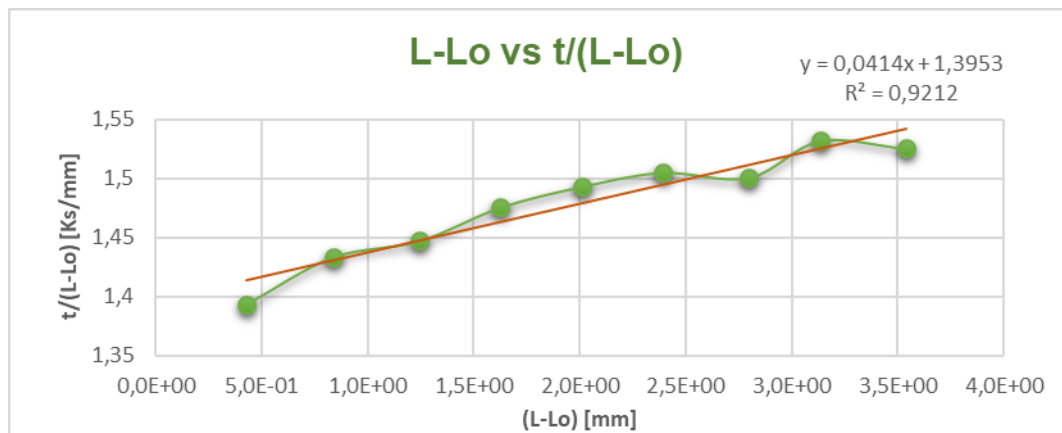


ERROR % (FULLER)	1,57%	ERROR % (HIRSCHFELDER)	2,52%
---------------------	-------	---------------------------	-------

Figura 12. Resultados prueba 3: L-Lo vs $t/(L-Lo)$, a 40°C

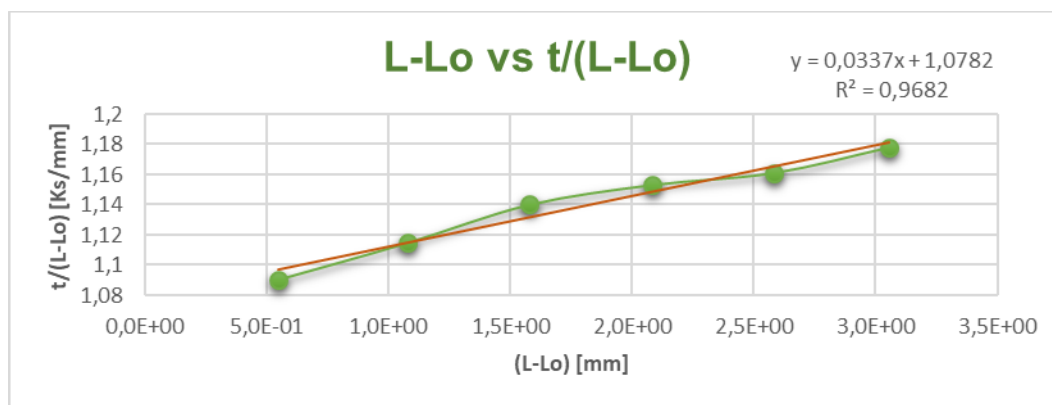
Apéndice F. Pruebas experimentales con otras sustancias

Las siguientes gráficas presentan los datos teóricos de las pruebas experimentales realizadas para metanol.



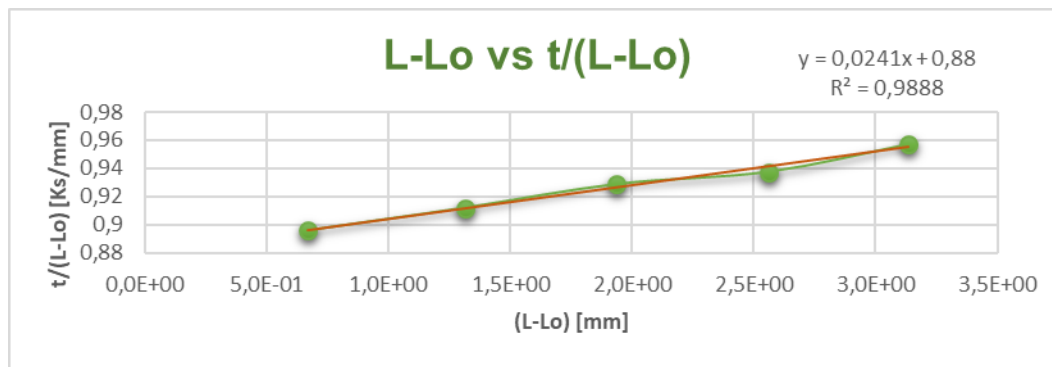
ERROR % (FULLER)	4,06%	ERROR % (HIRSCHFELDER)	10,52%
---------------------	-------	---------------------------	--------

Figura 1. Resultados prueba metanol: L-Lo vs $t/(L-Lo)$, a 43°C



ERROR % (FULLER)	4,06%	ERROR % (HIRSCHFELDER)	3,05%
---------------------	-------	---------------------------	-------

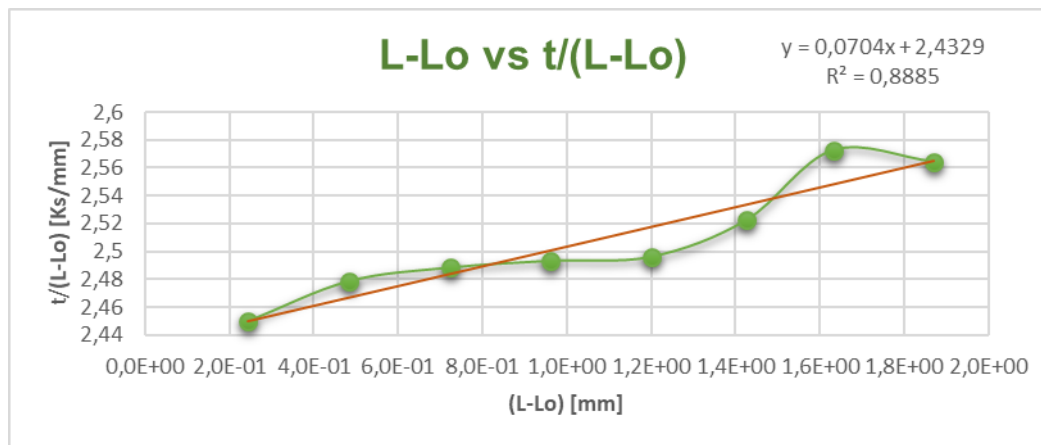
Figura 2. Resultados prueba metanol: L-Lo vs $t/(L-Lo)$, a 45°C



ERROR % (FULLER)	5,05%	ERROR % (HIRSCHFELDER)	2,34%
---------------------	-------	---------------------------	-------

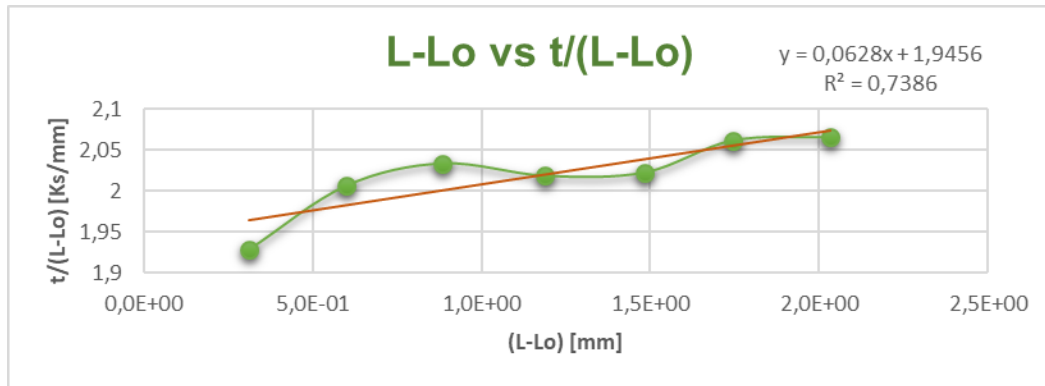
Figura 3. Resultados prueba metanol: L-Lo vs $t/(L-Lo)$, a 50°C

Las siguientes gráficas presentan los datos teóricos de las pruebas experimentales realizadas para etanol.



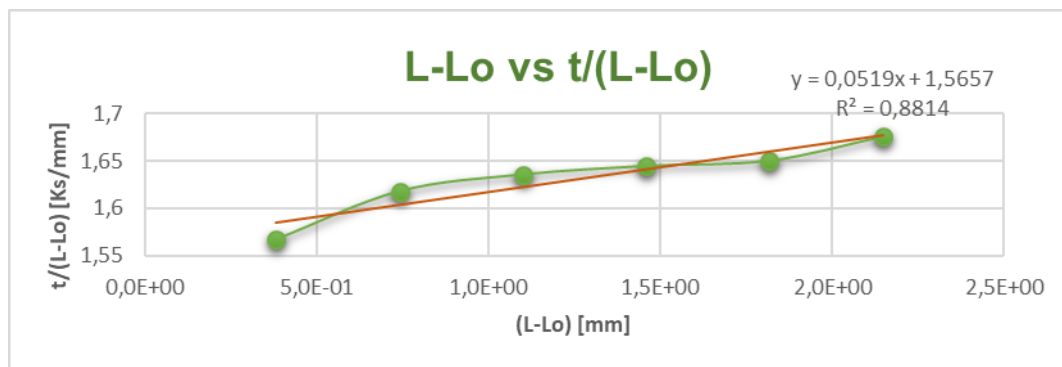
ERROR % (FULLER)	3,01%	ERROR % (HIRSCHFELDER)	7,95%
---------------------	-------	---------------------------	-------

Figura 4. Resultados prueba etanol: L-Lo vs $t/(L-Lo)$, a 48°C



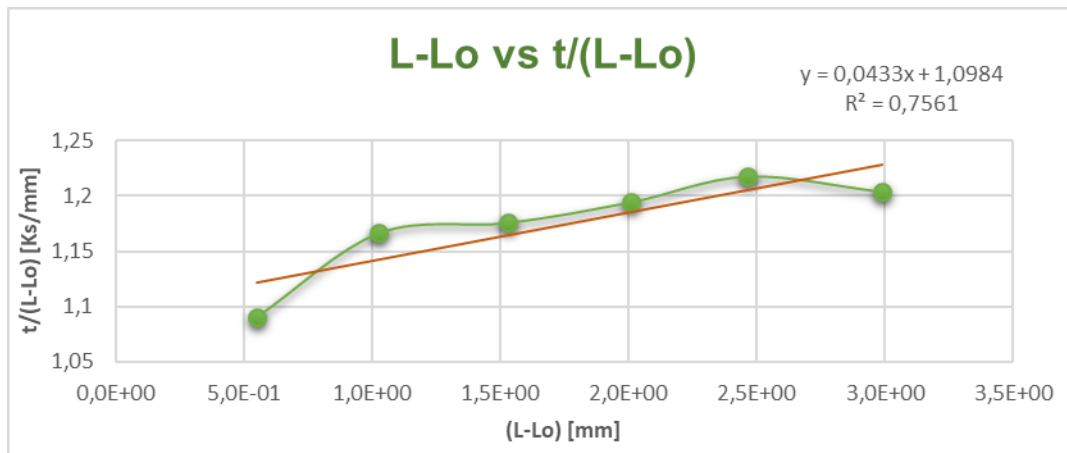
ERROR % (FULLER)	3,46%	ERROR % (HIRSCHFELDER)	7,42%
---------------------	-------	---------------------------	-------

Figura 5. Resultados prueba etanol: L-Lo vs $t/(L-Lo)$, a 50°C



ERROR % (FULLER)	2,39%	ERROR % (HIRSCHFELDER)	8,46%
---------------------	-------	---------------------------	-------

Figura 6. Resultados prueba etanol: L-Lo vs $t/(L-Lo)$, a 53°C



ERROR % (FULLER)	3,63%	ERROR % (HIRSCHFELDER)	15,12%
---------------------	-------	---------------------------	--------

Figura 7. Resultados prueba etanol: L-Lo vs $t/(L-Lo)$, a 55°C

Apéndice G. Manual de laboratorio: Coeficiente de difusión en gases

1. Objetivos

Objetivo general

Determinar el coeficiente de difusión de un vapor (A) en una fase gaseosa (B) estancada, usando conceptos básicos en fenómenos de transporte de masa y datos experimentales obtenidos con ayuda del equipo “CERa MkII Armfield”, basado en el experimento del tubo de Stefan.

Objetivos específicos

- Estudiar los conceptos teóricos básicos sobre difusión en gases y mediante el método experimental Winkelmann, y hallar el coeficiente de difusión para la mezcla binaria seleccionada.
- Comparar el valor obtenido experimentalmente para el coeficiente de difusión gaseoso, con los datos teóricos derivados de las correlaciones de Fuller y Hirschfelder.

2. Marco Teórico

La difusión molecular consiste en el desplazamiento de moléculas individuales a través de un fluido mediante la trayectoria individual y desordenada de cada una de ellas. (Geankoplis, 2003). Este es un fenómeno de transporte de especies químicas fundamentado el gradiente de concentración, el cual genera un recorrido de un punto de mayor concentración a uno de menor concentración como consecuencia del movimiento aleatorio que realizan las partículas. (Boschan, 2007). Además, del gradiente de concentración, la facilidad con que una especie química se

difunde a través de otra depende de variables como la afinidad química entre ellas, la temperatura y la presión del sistema; estas variables son cuantificadas en una propiedad del sistema llamada difusividad o coeficiente de difusión D_{AB} . (Treybal, 1980).

Para obtener una estimación del coeficiente de difusión en gases, se considera la difusión de un gas (A), a través de otro gas B estancado; el gas A se obtiene de la evaporación de un líquido A confinado dentro de un tubo. Este se puede estimar experimentalmente midiendo el cambio de nivel del líquido con el tiempo, aplicando el método experimental Winkelmann que se deriva de la ley de Fick. (Armfield, 2014).

En un sistema de dos fases es muy común encontrar un soluto A que se difunde en el seno de un gas B. Primero se debe obtener la expresión que represente la velocidad de flujo molar N_A que ocurre desde la interfaz, para eso se hacen las siguientes suposiciones:

1. Estado cuasi-estacionario
2. Sistema isotérmico y presión total constante (concentración total y D_{AB} son constantes)
3. No existe reacción química
4. Se mantiene nivel de líquido A constante $Z = Z_1$, lo cual se justifica por el hecho que la velocidad de difusión del gas A es mucho mayor que la velocidad a la cual disminuye el volumen del líquido A dentro del capilar.
5. Mezcla gaseosa ideal ($P_T = P_A + P_B$; $P_A = y_A * P_T$)
6. A se difunde en B; el gas B se mantiene estancado y no se solubiliza en el líquido A.
7. Difusión unidireccional en Z como consecuencia del pequeño radio del tubo capilar.
8. La fracción molar de la especie A en la parte superior del tubo es cero.

De la ecuación de continuidad de la especie A en coordenadas cilíndricas se obtiene la siguiente expresión:

$$\cancel{\frac{\partial C_A}{\partial t}} + \left(\cancel{\frac{1}{r} \frac{\partial r N_{Ar}}{\partial r}} + \cancel{\frac{1}{r} \frac{\partial N_{A\theta}}{\partial \theta}} + \frac{\partial N_{AZ}}{\partial z} \right) = \cancel{R_A} \quad (G8)$$

Simplificando la ecuación (G1) obtenemos:

$$\left(\frac{\partial N_{AZ}}{\partial z} \right) = 0 \quad (G2)$$

Lo que implica que $N_{AZ} = \text{Constante}$

Ahora, para una mezcla gaseosa de difusión solo en dirección z el flujo molar total de A viene dado por la siguiente expresión:

$$N_{AZ} = -CD_{AB} \frac{\partial y_A}{\partial z} + y_A(N_{AZ} + N_{Bz}) \quad (G3)$$

Dónde:

N_{AZ} = Densidad de flujo molar total (por difusión y convección) de la especie A en la dirección Z

C = concentración Total

D_{AB} = Coeficiente de difusión de A en B

y_A = Fracción molar de A

N_{Bz} = Velocidad del flujo molar de B en la dirección Z

Como B no se difunde en A, se puede decir que $N_{Bz} = 0$, entonces se obtiene:

$$N_{A,Z} = \frac{-CD_{AB} \frac{\partial y_A}{\partial z}}{1 - y_A} \quad (G4)$$

Definimos la fracción molar de en términos de concentración y reemplazamos en la ecuación (G4):

$$y_A = \frac{C_A}{C} \quad (G5)$$

La ecuación (G4) se puede integrar teniendo en cuenta que $N_{A,Z}$ es constante:

$$\int_{z_1}^{z_2} N_{A,Z} dz = \int_{y_{A1}}^{y_{A2}} \frac{-CD_{AB}}{C-C_A} dC_A$$

Resolviendo las integrales:

$$N_{A,Z} = \frac{CD_{AB}}{z_2 - z_1} \ln \left(\frac{C - C_{A2}}{C - C_{A1}} \right) \quad (G6)$$

Si definimos la concentración logarítmica media de la componente B como:

$$C_{Bm} = \frac{C_{B2} - C_{B1}}{\ln \left(\frac{C_{B2}}{C_{B1}} \right)} = \frac{C_{A1} - C_{A2}}{\ln \left(\frac{C - C_{A2}}{C - C_{A1}} \right)} \quad (G7)$$

C_{B1} , C_{B2} y C_{Bm} , representan las concentraciones molares para la especie B

Reorganizando términos y reemplazando (G7) en (G6) se obtiene:

$$N_{A,Z} = \frac{CD_{AB}}{z_2 - z_1} \frac{C_{A1} - C_{A2}}{C_{Bm}} \quad (G8)$$

La ecuación (G8) muestra la relación que existe entre la velocidad de transferencia de materia con una fuerza motriz característica de concentración $C_{A1} - C_{A2}$. Se reorganiza la ecuación (G8), se aplican los siguientes cambios:

$\Delta C = C_{A1} - C_{A2} \approx C_{A1}$ y es la concentración en la interfase

$z_2 - z_1 = L$, es la distancia efectiva de transferencia de masa

$$N_{A,Z} = D_{AB} \left(\frac{C_A}{L} \right) \left(\frac{C}{C_{Bm}} \right) \quad (G9)$$

Se ha demostrado experimentalmente en la teoría de gases ideales que 1 kmol de cualquier gas a condiciones normales de 1 atm de presión y 0°C de temperatura ocupa un volumen de $22,414 \text{ m}^3$. Lo anterior nos permite realizar el siguiente procedimiento para hallar la C :

1. Se define concentración a condiciones normales como $C_0 = \frac{n}{v} = \frac{1}{22,414}$
2. Luego dividimos la ecuación de gases ideales para un gas a condiciones normales sobre una a condiciones de operación:

$$\frac{C_0}{C} = \frac{\frac{P}{RT_0}}{\frac{P}{RT}}$$

Ya que se trabaja a la misma presión y la constante de los gases R , es la misma se obtiene la siguiente expresión:

$$C = C_0 * \frac{T_0}{T} = \left(\frac{1}{22,414} \right) * \frac{T_0}{T} \quad (\text{G10})$$

Además:

Concentración media logarítmica del vapor de la sustancia A esta definida como:

$$C_{Bm} = \left(\frac{C_{B1} - C_{B2}}{\ln \left(\frac{C_{B1}}{C_{B2}} \right)} \right) \quad (\text{G11})$$

Concentración molar de aire en la corriente de aire: $C_{B1} = C$,

Concentración molar del aire en la superficie del líquido:

$$C_{B2} = \left(\frac{P_a - P_v}{P_a} \right) C \quad (\text{G12})$$

Concentración de saturación de la sustancia A en la interfase:

$$C_A = \frac{P_v}{P_a} C \quad (\text{G13})$$

Donde P_a = Presión atmosférica y P_v = Presión de vapor de la sustancia A

Además, es necesaria una ecuación que permita relacionar la velocidad a la cual desciende la interfase líquido-gas con el tiempo, para poder determinar el coeficiente de difusión. Esta es posible gracias al considerar el método de estado cuasi-estacionario de equilibrio.

$$\frac{1}{M} \frac{\partial m_A}{\partial t} = \frac{\rho_L a}{M} \frac{\partial L}{\partial t} = a N_{A,z} \quad (\text{G14})$$

Siendo M el peso molecular del líquido que se evapora y a el área de la interfase.

Se pueden igualar aproximadamente las ecuaciones (G14) y (G9) que describen la velocidad de forma estacionaria y cuasi estacionaria respectivamente:

$$\frac{\rho_L}{M} \frac{\partial L}{\partial t} = D_{AB} \left(\frac{C_A}{L} \right) \left(\frac{C}{C_{Bm}} \right) \quad (\text{G15})$$

Separando variables e integrando:

$$\int_{L_o}^L L dL = \left(\frac{M D_{AB}}{\rho_L} \right) \left(\frac{C_A C}{C_{Bm}} \right) \int_0^t t dt \quad (\text{G16})$$

Se obtiene como resultado:

$$L^2 - L_o^2 = \left(\frac{2 M D_{AB}}{\rho_L} \right) \left(\frac{C_A C}{C_{Bm}} \right) t \quad (\text{G17})$$

Se descompone el término $L^2 - L_o^2$ para facilitar la linealización:

$$\bullet \quad L^2 - L_o^2 = (L + L_o)(L - L_o) = (L - L_o + 2L_o)(L - L_o)$$

$$(L - L_o + 2L_o)(L - L_o) = \left(\frac{2 M D_{AB}}{\rho_L} \right) \left(\frac{C_A C}{C_{Bm}} \right) t \quad (\text{G18})$$

Linealizando la expresión se obtiene:

$$\frac{t}{(L - L_o)} = \left(\frac{\rho_L}{2MD_{AB}} \right) \left(\frac{C_{Bm}}{C_A C} \right) (L - L_o) + \left(\frac{\rho_L C_{Bm}}{MD_{AB} C_A C} \right) L_o \quad (G19)$$

Donde la pendiente que se establece al graficar $\frac{t}{(L - L_o)}$ vs $(L - L_o)$ es:

$$m = \left(\frac{\rho_L C_{Bm}}{2MD_{AB} C_A C} \right) \quad (G20)$$

Despejando la difusividad de A en B de la ecuación (15) se obtiene:

$$D_{AB} = \left(\frac{\rho_L C_{Bm}}{2M C_A C} \right) \left(\frac{1}{S} \right) \quad (G21)$$

Con el fin de comparar los datos experimentales con la literatura, se sugieren dos correlaciones.

I. Ecuación de Fuller

Esta ecuación fue el resultado de un estudio realizado por Eduard Fuller, Paul Schettler y Calvin Giddings en 1966, donde se hizo una comparación detallada de la ecuación con respecto a los métodos de Arnold, Gilliland, Hirschfelder-Bird-Spotz, entre otros, y se logró demostrar que la correlación es bastante precisa. La mayoría de estas correlaciones tienen origen en el modelo de la esfera dada por Chapman-Enskog. (Fuller, Schettler, & Giddings, 1966)

La ecuación de Fuller tiene como parámetro el volumen de difusión V, el cual se obtiene de la suma de los volúmenes atómicos de todos los elementos de cada molécula. Esta correlación se puede usar tanto en gases polares como no polares. (Hines & Maddox, 1985)

$$D_{AB} = \frac{1,0 * 10^{-9} * T^{1,75}}{P[(\sum v)_A^{1/3} + (\sum v)_B^{1/3}]^2} * \left(\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B} \right)^{1/2} \quad (G22)$$

Dónde:

D_{AB} : Coeficiente de difusión

T : Temperatura [K]

M_A : Peso molecular de A $\left[\frac{kg}{kmol} \right]$

M_B : Peso molecular de B $\left[\frac{kg}{kmol} \right]$

P_T : Presión total [atm]

Σv : Volumen molecular $\left[\frac{m^3}{kg \text{ átomo}} \right]$

A continuación, se presentan algunos valores, hallados mediante esta correlación para las sustancias: acetona, metanol y etanol.

II. Ecuación de Hirschfelder

Teniendo como base el trabajo realizado por Chapman y Enskog donde relacionaron las propiedades de los gases con las fuerzas que actúan entre las moléculas, y el potencial de Lennard-Jones para relacionar las fuerzas atractivas y repulsivas entre los átomos, Hirschfelder desarrolló la siguiente ecuación para predecir la difusividad de los pares de gases no polares. (Hines & Maddox, 1985)

$$D_{AB} = \frac{1,858 * 10^{-27} * T^{3/2}}{P \sigma_{AB}^2 \Omega_D} * \left(\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B} \right)^{1/2} \quad (G23)$$

Dónde:

D_{AB} : Difusividad, m^2/s

T : Temperatura absoluta, K

M : Peso molecular, $kg/kgmol$

σ_{AB} : Diametro de colisión, m

Ω_D : Integral de colisión

A continuación, se presentan algunos valores, hallados mediante estas correlaciones para las sustancias: acetona, metanol y etanol.

Tabla 1. Datos teóricos del coeficiente de difusión gaseoso de acetona en aire

$D_{\text{Aire-Acetona}} \text{ o } D_{\text{Acetona-Aire}} \times 10^5$ a 1 atm, en m^2/s		
T, K	ECUACIÓN DE FULLER	ECUACIÓN DE HIRSCHFELDER
273	0,853	0,867
278	0,88	0,898
283	0,908	0,929
288	0,937	0,961
293	0,965	0,994
298	0,994	1,027
303	1,024	1,060
308	1,053	1,095
313	1,083	1,129

Tabla 2. Datos teóricos del coeficiente de difusión gaseoso de metanol en aire

$D_{\text{Aire-Metanol}} \text{ o } D_{\text{Metanol-Aire}} \times 10^5$ a 1 atm, en m^2/s		
T, K	ECUACIÓN DE FULLER	ECUACIÓN DE HIRSCHFELDER
273	1,237	1,296
278	1,277	1,341
283	1,318	1,389
288	1,359	1,435
293	1,400	1,484
298	1,442	1,532
303	1,485	1,583
308	1,528	1,632
313	1,572	1,683
318	1,616	1,734
323	1,661	1,786

Tabla 3. Datos teóricos del coeficiente de difusión gaseoso de etanol en aire

$D_{\text{Aire-Etanol}} \text{ o } D_{\text{Etanol-Aire}} \times 10^5$ a 1 atm, en m^2/s		
T, K	ECUACIÓN DE FULLER	ECUACIÓN DE HIRSCHFELDER
273	1,144	1,007
278	1,181	1,042
283	1,219	1,078
288	1,256	1,114
293	1,295	1,150
298	1,334	1,187
303	1,373	1,225
308	1,413	1,263
313	1,454	1,301
318	1,494	1,341
323	1,536	1,380
328	1,578	1,418

3. Descripción del Equipo

El equipo consta de un tubo capilar de vidrio con un diámetro interno de 2 mm, incorporado a un bloque de aluminio, un controlador PID de temperatura que la mantiene constante con una precisión de $\pm 1^\circ$, un microscopio USB de alta definición, cuya resolución es de 1600x1200, con una longitud de visualización del capilar de 12 mm, el cual está conectado a un ordenador, con una escala de longitud como referencia física utilizada para la calibración del software. El programa, puede generar múltiples imágenes o video secuencial en un determinado tiempo. Los periodos para las secuencias automáticas pueden ir desde 5 segundos hasta días.

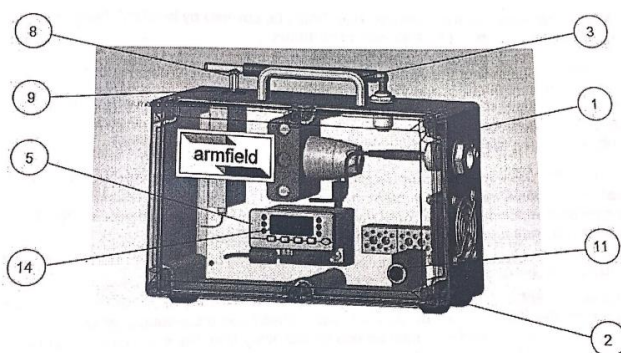


Figura 1. Equipo totalmente ensamblado (Armfield, 2014)

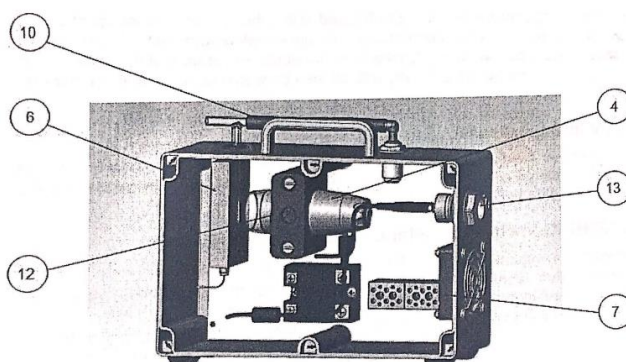


Figura 2. Equipo con la carcasa removida. (Armfield, 2014)

Partes que componen el equipo:

1. Panel frontal
2. Bases de goma
3. Asa de transporte
4. Cuerpo microscopio digital
5. Controlador PID de temperatura
6. Bloque de calentamiento
7. Ventilador de aire
8. Tubo capilar
9. Glándula de goma
10. Tubo flexible
11. Interruptor principal
12. Estructura que sujeta el microscopio
13. Puerto USB
14. Pantalla del controlador



Figura 3. Controlador PID de temperatura

1. Botón F
2. Botón R
3. Mover arriba
4. Mover abajo

Es importante verificar que los parámetros del controlador se encuentren en los valores requeridos, en la tabla 18 se encuentra la configuración de este, el *set point* (SP), es el valor de la temperatura de trabajo, y se puede variar dependiendo de las condiciones que se desean para llevar a cabo la prueba experimental.

Tabla 4. Configuración del controlador PID

Parámetros del set point (presione el botón F)	SP	040
	SL	055
Parámetros de operación (presione el botón F por 4 segundos)	Pb	002
	dt	05.0
	It	005
	Ct	001
	CF	C
	HC	H
	LI	008
	Lo	000
Configuración parámetros (presione el botón F por 8 segundos)	Hi	060
	OF	000
	hL	000
	IN	002
	dL	000
	dH	999
	dP	001
	AS	010

4. Procedimiento Experimental

Para iniciar la prueba experimental, es importante tener claro las condiciones de operación a las cuales se va a realizar la práctica.

Inicialmente, encienda el computador que está conectado al equipo y abra el programa “eScope”

Se debe llenar el tubo capilar antes de encender el equipo; para esto llene la jeringa hipodérmica con la sustancia a difundir y compruebe que no quede aire dentro de ella. Seguido de esto, inserte la aguja de la jeringa por el orificio pequeño que tiene el tubo capilar en la parte superior y ubíquela de tal manera que la sustancia descienda por gravedad como se muestra en la siguiente figura. Use una regla y verifique que la altura de la sustancia dentro del capilar sea 3,5 mm.

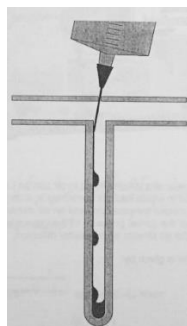


Figura 4. Llenado del tubo capilar (Armfield, 2014)

Introduzca el tubo capilar dentro del orificio, confirme que este quede bien sujeto a la glándula de goma, y que sea visible en el ordenador.

Ahora, encienda el equipo mediante el interruptor principal ubicado en la parte inferior derecha del equipo (11); luego con el botón F del controlador, ajuste la temperatura de operación a la cual se va a trabajar. Cuando la temperatura deseada se marque en la pantalla del controlador, deje

estabilizar el equipo durante 20 minutos, cuando esto suceda ponga en marcha la toma de fotos por medio del “*eScope*”.

Antes de iniciar con la toma de fotos es importante realizar la calibración del software para eso debe seguir las indicaciones del siguiente procedimiento:

1. Verifique que la resolución (localizada en la barra de menú) sea 640x480 y confirme que la imagen del tubo capilar este centrada verticalmente en la pantalla, con la escala de longitud visible de lado izquierdo.
2. Seleccione el icono “*capture picture*” en la parte superior en la barra de iconos.



Figura 5. Icono Capture Picture

3. En la parte izquierda de la pantalla debe aparecer la imagen tomada, selecciónela dando doble clic, esta se abrirá en “*eScopeImgEdt*”.



Figura 6. *eScopeImgEdt*

4. Cuando esté abierta la imagen, en los iconos de la parte superior seleccione el cuadro de “*measure*”, ahí se despliega una serie de opciones, seleccione la primera que dice calibración.



Figura 7. Menú calibración

5. Con el cursor, realice una medición de 5 mm que vaya de línea a línea en la escala de longitud de la imagen, debe ser totalmente recta y vertical, cuando tenga lista esa medida exacta de doble clic, inmediatamente le debe aparecer un recuadro, en el espacio “*actual dimension*” digite el número 5 y seleccione OK.

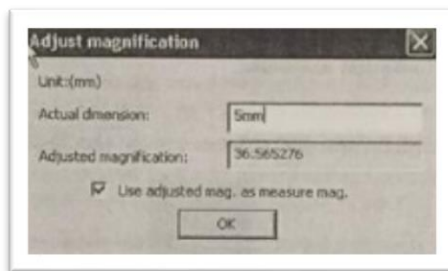
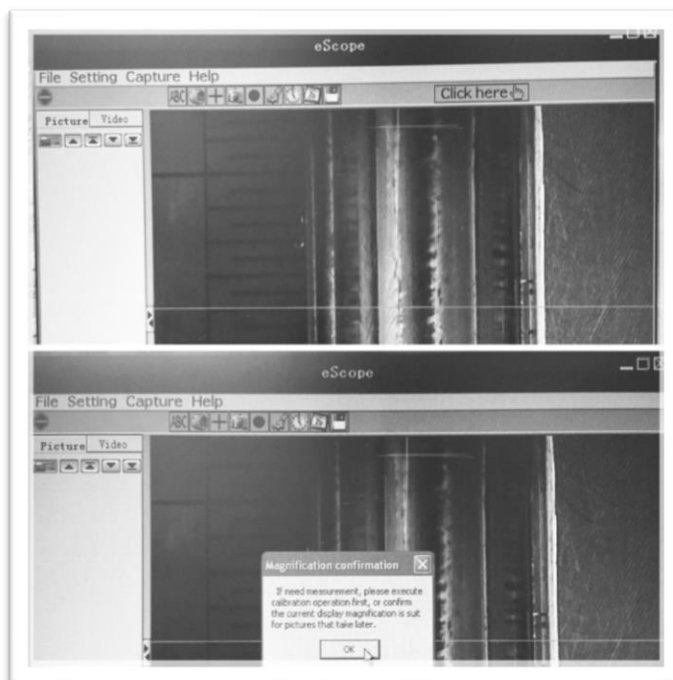


Figura 8. Opción dimensión actual

6. Se debe ajustar la magnificación hecha, para esto debe dar clic en el icono que dice “click here” ubicado en la parte superior derecha del “eScope”, seguido de esto aparecerá un recuadro, de clic en OK.



Después de realizar la calibración, se procede a programar el software para que inicie la toma de fotos, con el fin de medir el descenso de la interfase liquido-vapor a través del tiempo se realiza de la siguiente manera:

1. Se hace clic izquierdo en el icono del reloj en el menú superior.



Figura 9. Opción Time-lapsed photo/video

2. El intervalo (Interval (sec)) para las capturas recomendado es de 600 segundos y el número de imágenes (total number) va en un rango de 10 mínimo a un máximo de 16. Y luego clic en “start”.



Figura 10. Configuración de tiempo del video o foto

Las imágenes capturadas se almacenan al lado izquierdo de la ventana del programa.

1. Si se desea detener las capturas se debe presionar “stop”.
2. Se selecciona la imagen almacenada dando doble clic sobre la miniatura y esta se abrirá en “eScopeImgEdt”.



Figura 11. eScopeImgEdt

3. Se hace clic en el icono de medida del menú superior y selecciona la opción “Straight Angle Line”

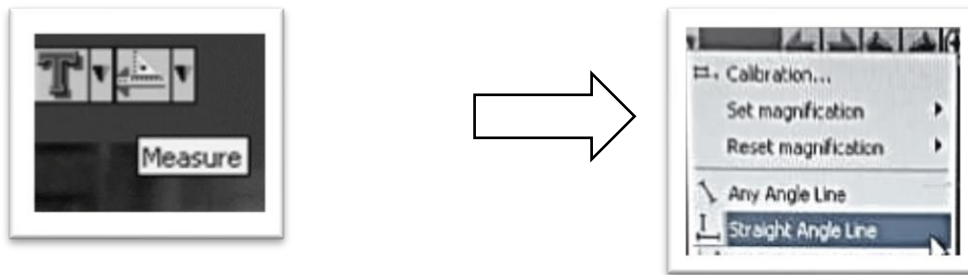


Figura 12. Opción *Stright Angle Line*

4. Se ubica el cursor en la parte central del menisco y de clic, a continuación, saldrá una línea recta siguiendo el cursor. Ubíquese en la parte superior de la imagen utilizando el mismo punto siempre como referencia y vuelva a dar clic.

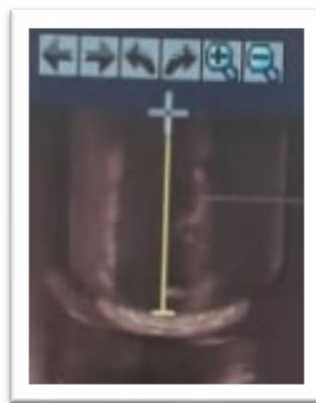


Figura 13. Trazo de ángulo

5. Saldrá el valor la medida tomada con el cursor, así que ubíquelo de la mejor manera para que esta pueda ser observada y de clic.

6. Para guardar las imágenes tomadas, se debe dar clic en el icono del disco flexible de la parte superior de la imagen. Se selecciona la ubicación adecuada para el archivo y se nombra.

5. Desarrollo de los objetivos de la práctica

Con el fin de cumplir con los objetivos planteados en este manual, se presenta de manera específica el desarrollo de las actividades que debe realizar.

1. Seleccionar la mezcla binaria deseada para trabajar: Acetona-Aire, Metanol-Aire o Etanol-Aire, y la temperatura de trabajo.
2. Aplicando el protocolo descrito anteriormente para tomar las medidas del nivel del menisco en el capilar, llenar la tabla 19.
3. Graficar $(L-L_0)$ [Kilosegundos] vs $t/(L-L_0)$ [Kilosegundo/ milímetro] y mediante el método de Winkelmann hallar el valor del coeficiente de difusión para la mezcla de gases escogida.
4. Hallar el error experimental porcentual utilizando como dato teórico las correlaciones de Fuller y Hirschfelder, mediante la ecuación (G24).
5. Comparar los errores obtenidos con las dos correlaciones.

Tabla 5. *Datos experimentales*

Medida	Tiempo [Ks]	L [mm]	L-L₀ [mm]	t/(L-L₀) [Ks/mm]
1	0	L₀	0	-
2	0,6			
3	1,2			
4	1,8			
5	2,4			
6	3			
7	3,6			
8	4,2			
9	4,8			
10	5,4			
11	6			
12	6,6			
13	7,2			
14	7,8			

$$\% \text{ Error} = \frac{\text{Valor Teórico} - \text{Valor experimental}}{\text{Valor Teórico}} * 100 \quad (\text{G24})$$

Se aconseja realizar los cálculos matemáticos utilizando la herramienta Excel para mayor facilidad.

6. Recomendaciones

- A fin de que el equipo funcione de la mejor manera posible, se recomienda que el lugar de trabajo donde se ubique el aparato este totalmente libre, y lejos de objetos electrónicos.
- Es importante trabajar sobre una superficie plana y totalmente nivelada.
- Se aconseja hacerle un mantenimiento al equipo cada dos meses aproximadamente donde se verifique que el microscopio este bien alineado; así mismo hacer una limpieza dentro del aparato ya que el ventilador hace que se acumulen partículas de polvo.
- Al momento de realizar el llenado del tubo capilar con la jeringa hipodérmica, se aconseja que la aguja este totalmente pegada a la pared interior del tubo y el líquido pueda caer por gravedad.
- Al realizar las mediciones en cada fotografía, es importante que esta se haga hasta el mismo punto en el menisco del capilar para evitar errores a la hora de hacer los cálculos, ya que estos dependen de dichas medidas.
- Si la sustancia de trabajo es metanol, es necesario usar guantes y tapabocas como medida de protección, por su toxicidad e irritación causada al estar en contacto con la piel.

En el siguiente enlace, se puede encontrar de manera resumida la información necesaria para llevar a cabo la práctica, así como un video explicativo de la misma y un archivo Excel con

ejemplos del procedimiento matemático a realizar con los datos experimentales, para hallar el coeficiente de difusión gaseosa, junto con las correlaciones teóricas para encontrar el error experimental.

<https://difusion-en-gases.firebaseio.com/>

Bibliografía

Armfield. (2014). Manual del Equipo Armfields CERA-Diffusion of a gas apparatus. Inglaterra: Armfield Limited.

Basadjian, D. (2005). Mass transfer principals and aplicaciones. Londres: CRC PRES.

Boschan, A. (2007). Estudio del transporte y la difusión en medios fracturados. Francia: Universidad Pierre y Marie Curie.

Geankoplis, C. (2003). Geankoplis, C.J., Transport Process and Separation Process Principles . New Jersey: Prentice Hall.

Treybal. (1980). Operaciones de transferencia de masa. Malaysia: McGrawHill Book Company.

Apéndice H. Herramienta pedagógica

En este apéndice se puede observar los aspectos más relevantes que se encuentran en el sitio web, creado con el fin de ser un apoyo en la realización de la prueba experimental que tiene como objetivo determinar el coeficiente de difusión gaseoso. En la figura 1 se puede ver las cuatro secciones principales que componen el aula virtual.



Figura 1. Secciones principales del aula virtual

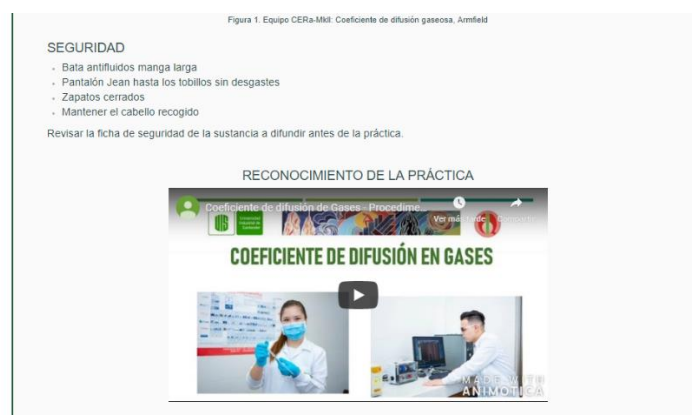


Figura 2. Protocolo

En la figura anterior se puede observar la sección de protocolo, la cual cuenta con un video que fue elaborado con el fin de hacer más fácil la comprensión del procedimiento experimental.



Figura 3. Pruebas experimentales

En la figura anterior, se muestran algunas recomendaciones que se dan para realizar la práctica de forma correcta y un archivo en Excel donde se encuentra el método matemático experimental utilizado, y un ejemplo para cada una de las sustancias que se sugieren en este trabajo.

CRÉDITOS

	Universidad Industrial de Santander	Universidad Industrial de Santander
		Escuela de Ingeniería Química
Laboratorio de Procesos I		
Coeficiente de difusión en Gases		
Autores del Proyecto	Junior Iván Lizcano Carrillo Silvia Janeth Rangel Avila	
Director del Proyecto	Crisóstomo Barajas Ferreira	

Figura 4. Créditos