

## **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PUESTA EN MARCHA DE EQUIPOS PARA LA DETERMINACIÓN DE DIFUSIVIDADES Y COEFICIENTES INDIVIDUALES DE TRANSFERENCIA DE MASA.**

Presentado ante la ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
Por el TSU. Torres Héctor.  
Para optar al Título de  
Ingeniero Químico

Caracas, 2007

## **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

### **DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PUESTA EN MARCHA DE EQUIPOS PARA LA DETERMINACIÓN DE DIFUSIVIDADES Y COEFICIENTES INDIVIDUALES DE TRANSFERENCIA DE MASA.**

Tutores:

Prof. Mary L. Alonso A.

Prof. José F. Fernández D

Presentado ante la ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
Por el TSU. Torres Héctor.  
Para optar al Título de  
Ingeniero Químico

Caracas, 2007

Caracas, abril de 2007

Los abajo firmantes, miembros del jurado designado por el Consejo de la escuela de ingeniería química, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el TSU Héctor Torres.

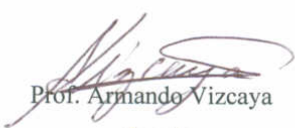
**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PUESTA EN MARCHA DE EQUIPOS  
PARA LA DETERMINACIÓN DE DIFUSIVIDADES Y COEFICIENTES  
INDIVIDUALES DE TRANSFERENCIA DE MASA.**

Considera que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudio conducente al Título de Ingeniero Químico, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por los autores, lo declaran APROBADO.



Prof. José Ángel Sorrentino

Jurado



Prof. Armando Vizcaya

Jurado



Prof. Mary Luz Alonso

Tutor

## **DEDICATORIA**

A Dios, por darme la vida y mandarme de regalo  
a mi esposa Yilda y a mis hijos Héctor y Jesús.

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Institución, representada por la Escuela de Ingeniería Química y su personal, todos colaboraron con la realización de este trabajo. Gracias.

A la profesora Mary Luz Alonso, por enseñarme con bondad y paciencia. Gracias

A José Francisco Fernández, por ser leal, buen amigo y promotor de este Trabajo de Grado.

A la profesora Vicenta Roccaro, por ser tan humanitaria y estar pendiente de mis progresos.

A Nólides Guzmán, por ayudarme sin reparos.

A José Ángel Sorrentino, por todo lo que ha hecho en pro de mi carrera; siempre exigente, este trabajo no fue la excepción. Amigo y profesor, muchas gracias.

Al profesor Armando Vizcaya, por respetarme y confiar en mí, todo el tiempo pidiéndome el tomo. Gracias.

### **AGRADECIMIENTOS PERSONALES**

A mis padres, Marcelino y Ángela, siempre apoyándome.

A mis compañeros de batalla, Armando, Nasser, mi compadre Jorge, mi compadre William, Fernando, el negro. Gracias por ayudarme.

A las chicas de la escuela, Iraida, Kisbeth, Yosmara, Leudith, auxiliándome en todo momento.

A Jesús López, por colaborar en todo desinteresadamente.

**Torres., Héctor**

**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PUESTA EN MARCHA DE EQUIPOS PARA LA DETERMINACIÓN DE DIFUSIVIDADES Y COEFICIENTES INDIVIDUALES DE TRANSFERENCIA DE MASA.**

**Tutores: Profesores. Mary L. Alonso y José F. Fernández. Tesis. Caracas, U.C.V Facultad de Ingeniería. Escuela de Química. Año 2007, 84 p.**

**Palabras claves:** Transferencia de masa, Diseño de Equipos, Difusividad.

**RESUMEN.** Como estrategia y necesidad de equipamiento del laboratorio de operaciones unitarias, se planteó como trabajo especial de grado, el diseño, construcción y puesta en marcha de equipos para la determinación de difusividades y coeficientes individuales de transferencia de masa. Tales equipos se utilizarán para la realización de prácticas docentes en el área de transferencia de masa.

El cuerpo principal del trabajo está constituido por los siguientes elementos: diseño, construcción y puesta en marcha de los equipos; realización de pruebas experimentales y elaboración de los manuales de los equipos.

Aunque para la realización de este trabajo se partió de ideas generales dadas en la bibliografía, fue necesario efectuar todo un trabajo experimental previo y posterior a la ingeniería conceptual para poder culminar lo que fue el diseño y/o especificación final de los equipos de prácticas.

Para cuantificar los fenómenos difusionales en los sistemas estudiados se desarrollaron modelos fundamentados en las ecuaciones de Fick (primera y segunda ley de Fick), los cuales se cotejaron con resultados obtenidos a través de ecuaciones teórico-empíricas.

Se construyeron dos módulos individuales para la estimación de difusividades. el equipo implementado para estimar la difusividad en gases es una celda de vidrio, donde se mide la cantidad evaporada de un líquido puro (como, acetona, etanol, n-hexano. etc) en un gas estancado (aire). para estimar la difusividad experimental en líquidos se construyó una celda en plexiglás; en esta celda se ponen en contacto dos líquidos miscibles sin promover el mezclado inicial entre ellos.

Para determinar el coeficiente de transferencia en la fase gas, se armó una torre de pared mojada y para caracterizar el sistema se planteó un balance de masa en componentes para el

sistema agua-aire; también se realizó el cálculo del coeficiente por intermedio de ecuaciones empíricas

Culminado el ensamblaje de los equipos se corrigieron fallas, se realizaron las adaptaciones y arreglos finales, posterior y finalmente se ejecutaron las pruebas experimentales respectivas. El error promedio obtenido para la difusividad en gases está alrededor del 30 %; para la difusividad en líquidos es del orden del 20 % .El error encontrado para el coeficiente de transferencia de masa es de 26 %.

Para la realización cabal y sistemática de las prácticas docentes se implementaron los manuales de procedimiento.

Como puntos finales se tiene lo siguiente: Las metas se cumplieron, diseñar, construir y poner en marcha equipos para la realización de prácticas docentes en transferencia de masa; la sencillez de los equipos construidos permite realizar cambios y adaptaciones sin muchos inconvenientes; se cuenta con una herramienta experimental muy sencilla pero efectiva para ahondar e introducir al estudiante de ingeniería química en el estudio de fenómenos de transporte.

# ÍNDICE

<b>INDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>VIII</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS.....</b>	<b>X</b>
<b>LISTA DE SIMBOLOS.....</b>	<b>XII</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>I. FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>2</b>
I.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	2
I.2. ANTECEDENTES.....	3
I.3. OBJETIVOS.....	5
<b>II. MARCOTEÓRICO.....</b>	<b>6</b>
II.1. FUNDAMENTOS DE TRANSFERENCIA DE MASA.....	6
II.2. TRANSFERENCIA DE MASA POR DIFUSIÓN.....	7
II.3. DETERMINACIÓN DE DIFUSIVIDAD.....	12
II.3.1 DETERMINACIÓN DE DIFUSIVIDAD EN GASES.....	13
II.3.1.1 ECUACIONES EMPÍRICAS.....	13
II.3.1.2 SOPORTE FÍSICO-MATEMÁTICO.....	15
II.3.2 DETERMINACIÓN DE DIFUSIVIDAD EN LÍQUIDOS.....	20
II.3.2.1 ECUACIONES EMPÍRICAS.....	20
II.3.2.2 SOPORTE FÍSICO-MATEMÁTICO.....	22
II.4. TRANSFERENCIA DE MASA POR CONVECCIÓN.....	28
II.4.1 DETERMINACIÓN DE COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA DE MASA.....	32



II.4.1.1	ECUACIONES EMPÍRICAS.....	33
II.4.1.2	BALANCE DE MASA.....	35
<b>III.</b>	<b>METODOLOGÍA.....</b>	<b>38</b>
III.1.	DISEÑO DE LOS EQUIPOS PARA EL ESTUDIO DE TRANSFERENCIA DE MASA.....	38.
III.1.1.	DETERMINACIÓN DE DIFUSIVIDAD EN MEZCLA GASEOSA.....	40
III.1.2.	DETERMINACIÓN DE DIFUSIVIDAD EN MEZCLA LÍQUIDA.....	40
III.1.3.	DETERMINACIÓN DE COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE MASA.....	41.
III.2.	CONSTRUCCIÓN Y PUESTA EN MARCHA DE LOS EQUIPOS.....	42
III.3.	REALIZACIÓN DE PRUEBAS EXPERIMENTALES.....	42
III.3.1.	DIFUSIVIDAD EN GASES.....	43
III.3.2.	DIFUSIVIDAD EN LÍQUIDOS.....	45
III.3.3.	DETERMINACION DE COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE MASA.....	50
III.6.	ELABORACIÓN DE LOS MANUALES DE OPERACIÓN DE LOS EQUIPOS.....	51
<b>IV.</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>53</b>
IV.1.	DISEÑO DE LOS EQUIPOS PARA EL ESTUDIO DE TRANSFERENCIA DE MASA.....	53
IV.1.1.	DIFUSIVIDAD EN GASES.....	53

IV.1.2.	DIFUSIVIDAD EN LÍQUIDOS.....	55
IV.1.3.	COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE MASA.....	56
IV.2.	CONSTRUCCIÓN Y PUESTA EN MARCHA DE LOS EQUIPOS.....	57
IV.2.1.	EQUIPO PARA DETERMINACIÓN DE DIFUSIVIDADES EN MEZCLA GASEOSA.....	57
IV.2.2	EQUIPO PARA DETERMINACIÓN DE DIFUSIVIDADES EN MEZCLA LÍQUIDA.....	58
IV.2.3.	EQUIPO PARA DETERMINACIÓN DE COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE MASA.....	61
IV.3.	REALIZACIÓN DE PRUEBAS EXPERIMENTALES.....	63
IV.3.1.	DIFUSIVIDAD EN GASES.....	65
IV.3.2.	DIFUSIVIDAD EN LÍQUIDOS.....	68
IV.3.3.	COEFICIENTE DE TRASFERENCIA DE MASA.....	71
IV.4.	ELABORACIÓN DEL MANUAL DE OPERACION DEL LOS EQUIPOS.....	72
<b>V.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>73</b>
<b>VI</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>74</b>
	<b>ANEXOS.</b>	

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA N° 1. Difusión en un volumen de control...	8
FIGURA N° 2. Aparato para medición de difusividad en gases.....	16
FIGURAN°3. Celda de evaporación.....	18
FIGURA N° 4. Curva de datos experimentales para determinación de difusividad.....	19
FIGURA N° 5. Difusión no estacionaria en fase líquida en un medio infinito de sección recta constante.....	23
FIGURA N°6 Distribución de concentración de A en la celda al tiempo $t=0$ .....	25
FIGURA N°7. Distribución de concentración de A en la celda para distintos tiempos.....	26
FIGURA N° 8. Celda para determinación de difusividad en líquidos.....	29
FIGURA N° 9. Distribución de concentración del soluto A en las fases.....	31
FIGURA N°10. Relación de concentración del soluto en las fases con su valor en la curva de distribución en el equilibrio.....	31
FIGURA N°11. Esquema de instalación de torre de pared mojada.....	32
FIGURA N°12. Esquema de columna de pared mojada para balance de masa .....	35
FIGURA N°13. Esquema de módulo para determinación experimental de difusividad en gases.....	54

FIGURA N°14. Esquema de celda para la determinación experimental de difusividad en líquidos.....	55
FIGURA N°15. Esquema de equipo para la determinación experimental de coeficiente de transferencia de masa lado gas.....	56
FIGURA N°16. Foto de módulo construido para determinación experimental de difusividad en gases.....	59
FIGURA N°17. Foto de equipo para la determinación experimental de difusividad en líquidos.....	62
FIGURA N°18. Foto de equipo para la determinación experimental de coeficiente de transferencia de masa lado gas.....	64
FIGURA N°19. Difusión de n-hexano en aire a tres temperaturas distintas.....	69
FIGURA N°20. Difusión de etanol, metanol y acetona en agua.....	70
FIGURA N°21. Curva de calibración sistema metanol-agua.....	71
FIGURA N° 22. Difusion de metanol en aire a tres temperaturas distintas.....	78
FIGURA N° 23. Difusion de acetona en aire a tres temperaturas distintas.....	79
FIGURA N° 24. Difusiónde etanol en agua.....	82
FIGURA N° 25. Difusión de metanol en agua.....	82
FIGURA N° 26. Difusion de sacarosa en agua.....	83

## ÍNDICE DE TABLAS.

TABLA N°1.-	Cuadro comparativo para disividades.....	10
TABLA N°2.-	Volumenes atómicos y moleculares, constantes de fuerza de gases .....	14
TABLA N°3.	Factores de asociación para algunos elementos.....	20
TABLA N°4.	Función error y funciones relacionadas.....	27
TABLA N° 5.	Control de expèrimentación en gases.....	43
TABLA N° 6.	Características técnicas del equipo para medir experimentalmente la difusividad en gases.....	55
TABLA N° 7.	Características técnicas del equipo para medir experimentalmente ladifusividad en líquidos.....	57
TABLA N° 8.	Características técnicas del equipo para medir experimentalmente el coeficiente de transfrencia de masa.....	58
TABLA N° 9.	Lista de materiales necesarios para la construcción A.....	61
TABLA N°10.	Lista de materiales necesarios para la construcción B.....	63
TABLA N°11	Lista de materiales necesarios para la construcción C.....	65
TABLA N° 12.	Resultados previos en mezcla de gases.....	67
TABLA N° 13.	Resultados experimentales finales en mezcla de gases.....	68
TABLAN°14	Resultados experimentales preliminares en mezcla de líquidos.....	68
TABLA N°15	Resultados en la experimentación con mezclas de líquidos.....	70
TABLA N°16	Resultados en lña experimentación con mezclas líquidas.....	72

TABLA N <sup>0</sup> 17	Resultados para coeficientes de transferencia de masa.....	71
TABLA N <sup>0</sup> 18	Datos producidos en la experimentación para mezclas de gases..	76
TABLAN <sup>0</sup> 19	Datos para graficas.....	78
TABLAN <sup>0</sup> 20	Datos de resultados.....	78
TABLAN <sup>0</sup> 21	Datos de experimentación.....	79
TABLA N <sup>0</sup> 22	Resultados experimentales de difusión en celdas para. mezclas líquidas.....	80
TABLA N <sup>0</sup> 23	Resultados para sacarosa.....	82
TABLA N <sup>0</sup> 24	Cálculo de difusividades teóricas.....	82

---

## SÍMBOLOS

F: fuerza impulsora	(FL/Mol)
$\Delta\mu$ : diferencia de potencial químico	(FL)
$G_i$ : energía libre de Gibbs del componente i	(FL)
$n_i$ : número de moles del componente i	(Mol)
T: temperatura	( T)
P: presión	(F/L <sup>2</sup> )
$J_i$ : flujo de difusión de la especie i	(Mol/L <sup>2</sup> $\theta$ )
$C_i$ : concentración volumétrica del compuesto i	(Mol/L <sup>3</sup> )
$V_i$ : velocidad con que se mueve la especie i	(L/ $\theta$ )
V: velocidad media molar de la mezcla	(L/ $\theta$ )
$X_i$ : fracción molar del compuesto i	(-)
N: densidad de flujo molar de mezcla	(Mol /L <sup>2</sup> $\theta$ )
$C_A$ : concentración de compuesto A	(Mol /L <sup>3</sup> )
C: concentración de mezcla	(Mol /L <sup>3</sup> )
$D_{AB}$ : difusividad del componente A en la mezcla A-B	(L <sup>2</sup> /s)
Z: dirección y camino de difusión	(L)
$P_{MS}$ : peso molecular del solvente	(M/Mol)
$\rho_s$ : densidad del solvente	(M/ $\theta^3$ )
v: elemento de volumen	(L <sup>3</sup> )
t: tiempo	( $\theta$ )

$\rho_i$ : concentración másica	(M/ L <sup>3</sup> )
$P_{Mi}$ : peso molecular de la especie i	(M/Mol)
$r_{AB}$ : separación molecular durante el choque	(L)
$f(k T/\epsilon_{AB})$ : función de choque (dada por gráfica de figura 2)	(-)
$k$ : constante de Boltzmann	(FL/ T)
$\epsilon_{AB}$ : energía de atracción molecular.	(FL)
$R$ : constante universal de los gases	(FL/ T Mol)
$a_t$ : área transversal de la celda	(L <sup>2</sup> )
$\mu_B$ : viscosidad del solvente	(M/L $\theta$ )
$v_A$ : volumen molal en el punto de ebullición normal	(L <sup>3</sup> /Mol)
$v_B$ : volumen molal el punto de ebullición normal	(L <sup>3</sup> /Mol)
$D_{AB}^o, D_{BA}^o$ : Coeficientes de difusión en soluciones diluidas.	(L <sup>2</sup> / $\theta$ )
$P_A$ : presión parcial del componente A	(F/L <sup>2</sup> )
$P_A^v$ : presión de vapor del componente A	(F/L <sup>2</sup> )
$N_A$ : cantidad de material transferido	(Mol / $\theta$ L <sup>2</sup> )
$K$ : coeficiente de transferencia de masa	(Mol/ $\theta$ L <sup>2</sup> )
$k_x$ : coeficiente individual de transferencia de masa para la fase líquida	(Mol/ s L <sup>2</sup> )
$k_Y$ : coeficiente individual de transferencia de masa para la fase gas	(Mol/ $\theta$ L <sup>2</sup> )
$Y_A$ : concentración del soluto en el gas	(-)
$X_A$ : concentración del soluto en el líquido	(-)
$Y_{Ai}$ : concentración del soluto en el gas en la interfase	(-)
$X_{Ai}$ : concentración del soluto en el líquido en la interfase	(-)



$K_Y$ : coeficiente global de transferencia de masa referido a la fase gas	( Mol/ $\theta$ L <sup>2</sup> )
$K_X$ :coeficiente global de transferencia de masa referido a la fase líquida	(Mol/ $\theta$ L <sup>2</sup> )
$Y_{AEQ}$ : concentración del soluto en el gas en el equilibrio	(-)
$X_{AEQ}$ : concentración del soluto en el líquido en el equilibrio	(-)
A: área de interfase	(L <sup>2</sup> )
D: Diámetro interno de la columna	(L)
Z: altura de transferencia	(L)
L: caudal de liquido en la columna	(Mol/s)
G: caudal de gas circulando en la columna	(Mol/ $\theta$ )
$Y_{AF}$ : fracción molar del gas en el fondo de la torre	(-)
$Y_{AT}$ : fracción molar del gas en el tope de la torre	(-)
$Y_{AMln}$ : fracción molar media logarítmica del gas en toda la torre	(-)
$Sh_G$ : número de Sherwood	(-)
$Re_G$ : número de Reynolds ( $D G' / \mu_G$ )	(-)
$Sc_G$ : número de Schmidt ( $\mu_G / D_{AB}$ )	(-)
D: diámetro interno de la columna	(L)
$\mu_G$ : viscosidad del gas	(M/ L <sup>2</sup> $\theta$ )
$\rho_G$ : densidad del gas	(M/ L <sup>3</sup> )
$G'$ : velocidad másica superficial del gas	(M/ L <sup>2</sup> $\theta$ )

## INTRODUCCION

Muchos son los esfuerzos de la humanidad por adaptar la naturaleza y el entorno para satisfacer sus necesidades o requerimientos inmediatos. Para ello ha echado mano de su ingenio y basándose en las ciencias y leyes naturales ha creado un sin fin de oportunidades para su desarrollo. Sus logros académicos han apuntalado el desarrollo de tecnologías, gracias a los conocimientos formales adquiridos en las distintas áreas del saber; los cuales se imparten en los diferentes centros de estudios como las universidades.

El tipo y estilo de enseñanza es diverso, pero en carreras como la Ingeniería, la formación profesional incluye mucho trabajo práctico y de campo.

El espíritu en la Facultad de ingeniería de la Universidad Central de Venezuela específicamente en las escuelas profesionales, es impulsar cada vez más el trabajo de laboratorio como elemento primordial en la formación del ingeniero. Así, la Escuela de Ingeniería Química en plan de seguir ampliando los conocimientos a través del entendimiento práctico de la carrera y en la búsqueda siempre de renovar o de implementar nuevas prácticas de laboratorio, se planteó la necesidad de construir algunos equipos para realizar prácticas docentes en el área de Fenómenos de transporte.

El proyecto se plasmo en este Trabajo Especial de Grado y básicamente consistió en diseñar, construir e instalar en el Laboratorio de Operaciones Unitarias, tres módulos para realizar prácticas en el área de transferencia de masa. Se concretó la idea con la construcción de celdas para determinación experimental de difusividades en gases y líquidos y el armado de una torre de pared mojada para determinación de coeficientes de transferencia de masa en fase gas.

El cuerpo principal del manuscrito lo constituye el marco teórico, la metodología, resultados y las guías de práctica.

Los equipos quedaron instalados y listos, en los resultados se presenta la evaluación y desempeño de los mismos para algunas condiciones puntuales de experimentación.

## **I. FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN.**

Las pautas para sustentar la investigación en el presente Trabajo Especial de Grado, están dictaminadas por los siguientes elementos:

### **I.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.**

Por su misma acepción, la ingeniería se fundamenta en el aprendizaje generado por retroalimentación cuando se aplican los conocimientos científicos en la resolución de problemas prácticos. Así, la Escuela de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería, reconoce la necesidad de fortalecer académicamente al estudiante de Ingeniería Química a través del trabajo de laboratorio y de otras actividades como Pasantías Industriales y visitas a plantas de proceso.

Desafortunadamente no todas las áreas de la carrera están asistidas con equipos que permitan complementar con experiencias prácticas lo aprendido en los salones de clase; sin embargo, muchas de las asignaturas con mayor peso dentro de la carrera, como mecánica de fluidos y transferencia de calor, cuentan con sus respectivas prácticas de laboratorio.

En el caso específico de Transferencia de Masa, las condiciones actuales de los equipos de prácticas no permiten realizar mediciones y obtener datos con los cuales se puedan evaluar difusividades o coeficientes de transferencia de masa. Se ejecutan las experiencias y con un balance global se determina la masa total transferida, sin hacer hincapié en los fenómenos que gobiernan el transporte de materia. Por tal razón, es objetivo de este Trabajo Especial de Grado el diseño, montaje y puesta en marcha de equipos que permiten el estudio del fenómeno de transferencia de masa a través de la determinación de los parámetros antes descritos.

La puesta en marcha de estos nuevos equipos viene a reforzar el conjunto de prácticas pertenecientes a la asignatura Laboratorio de Ingeniería Química II dando respuesta

a los nuevos retos que cada vez enfrenta la carrera y colocando la enseñanza de la Ingeniería Química al nivel de las principales universidades del mundo.

## **I.2. ANTECEDENTES.**

Los estudios en el área de transferencia de masa datan de los mismos tiempos de origen de la ingeniería como ciencia; y en la medida en que crecieron las necesidades para el desarrollo de tecnologías en el terreno de los procesos químicos, se profundiza su estudio a fin de caracterizarla. Cuantificar el fenómeno de transferencia de masa depende de muchos elementos y parámetros interrelacionados entre sí, por ejemplo: fases donde ocurre, número de especies que intervienen, viscosidad de la mezcla, concentración, etc.

Aunque la transferencia de masa por difusión y convección no son eventos aislados, los trabajos realizados al respecto se basan en modelos donde la intervención de uno u otro proceso se obvia por conveniencia; en lo que respecta a difusividad las ecuaciones desarrolladas por Fick (primera y segunda ley de Fick) dan respuesta a una innumerable cantidad de procesos difusionales, pero por la complejidad de cómo otros procesos se llevan a cabo se hace necesario abordarlos con otros elementos de juicio; por ejemplo, sustentándose en la teoría cinética de los gases, importantes trabajos como los de Hirschfelder-Bird-Spotz (según Bird, 1998) modelan procesos difusionales con poco margen de error; sin embargo, la relación propuesta por estos investigadores y muchas otras ecuaciones trabajadas con el mismo marco teórico, para la determinación de difusividades en gases, no se pueden emplear si no se conocen los diámetros de las moléculas. Como en la limitación anterior impuesta en los gases; dependiendo del sistema involucrado (gas-gas, gas-liquido, liquido-liquido, etc.) se originan otras series de restricciones que no permiten a los investigadores converger en un modelo único. La solución práctica al problema se ha delimitado en torno al desarrollo de innumerables ecuaciones empíricas.

Con la idea de ser implementados en laboratorios de docencia, existen diversos trabajos basados en las leyes de Fick, adaptados a situaciones particulares como por

ejemplo: evaporación de un líquido puro en un gas estancado o mezclas de líquidos miscibles. Con relación a la determinación de difusividades en gases dos trabajos muy didácticos son presentados por Kwon, et al, (2002) y Nirdosh et al, (2000). En sus documentos proponen un desarrollo matemático apoyados en la primera ley de Fick junto con un balance de masa, cuando se evaporan líquidos orgánicos puros (como pentano, hexano, n-heptano, acetona y otros) en tubos abiertos; sus resultados experimentales comparados con los teóricos presentan un error máximo de 10%.

Para líquidos se trata la situación de modo similar. Con basamento en la segunda ley de Fick, Ruiz et al, (2002), plantean un método experimental sencillo para la determinación de difusividades en mezclas de líquidos. Sus resultados manejan desviaciones de un 10%.

Los progresos para describir la transferencia de masa por convección no se desvinculan de los logros o fracasos obtenidos para el transporte de materia por difusión. Los procesos reales son macro procesos y en las condiciones normalmente imperantes los coeficientes convectivos incluyen a los difusivos.

Se ha estudiado con detalle el proceso de transferencia de materia desde un líquido cayendo por la pared interior de un tubo hasta un fluido en movimiento, numerosas correlaciones al respecto están disponibles, pero como ya se ha planteado antes, los modelos de resolución deben estar circunscriptos a condiciones propias de los sistemas.

Un trabajo interesante relacionado con el tema fue desarrollado por Rodríguez et al, (2002). En dicho trabajo se estudia la evaporación de un sólido inmerso en una corriente de aire. El sistema consta de una columna de vidrio, con una entrada lateral inferior por donde se introduce el gas, en la parte superior de la torre se suspende el sólido de modo de que quede expuesto totalmente a la corriente del fluido; por la interacción, el sólido se va desgastando y se mide la variación de su masa en el tiempo, lo cual permite calcular el coeficiente de difusividad.

Amplios estudios para la determinación de coeficientes de transferencia de masa se han hecho en columnas tipo pared mojada. Gilliland, Sherwood y Woerztz, Chilton y Colburn entre otros, presentan trabajos rigurosos donde se han obtenido resultados interesantes que han podido ser correlacionados. El sistema agua-aire ha sido el más estudiado (Perry, 1972 ; Badger et al, 1964).

En conocimiento de estas experiencias, es posible sentar las bases necesarias para alcanzar los objetivos que se muestran en la siguiente sección.

### **I.3. OBJETIVOS.**

En este segmento se presentan los objetivos de este Trabajo Especial de Grado.

El objetivo general de este Trabajo Especial de Grado consiste en el diseño, construcción y puesta en marcha de equipos para ser utilizados a nivel de docencia en la determinación de difusividades de un componente en mezclas gaseosas y líquidas, así como coeficientes de transferencia de masa en fase gaseosa.

Para ello se establecen los siguientes objetivos específicos.

- Realizar el diseño de los equipos que se implementaran para la determinación de:
  - a) Difusividad de un componente en una mezcla gaseosa.
  - b) Difusividad de un componente en una mezcla líquida.
  - c) Coeficiente de transferencia de masa en fase gaseosa.
- Construir y poner en marcha los equipos diseñados.
- Realizar pruebas experimentales para evaluar el desempeño de los equipos.
- Elaborar los manuales de operación de los equipos.

## II. MARCO TEÓRICO.

En función de cumplir con los objetivos trazados, se plantea el alcance y profundidad en los fundamentos teóricos necesarios para el desarrollo de los temas que conforman la investigación.

### II.1. FUNDAMENTOS DE TRANSFERENCIA DE MASA.

Un gran campo de la Ingeniería Química tiene que ver con el mecanismo de cambio de composición por efecto de la interacción entre dos sustancias; tal fenómeno describe a todos los procesos donde el principal objetivo es separar o purificar corrientes. La destilación, extracción, absorción, así como otros tipos de operaciones unitarias, son ejemplos de procesos donde está presente la transferencia de masa.

La fuerza impulsora para la transferencia de materia tiene relación directa con el desbalance o gradiente de concentración existente entre dos regiones. Pero se ha demostrado que el verdadero impulsor para el transporte de especies en un sistema con un desequilibrio, es la diferencia del potencial químico establecido (Abbott y Vanness, 1991):

$$F = \Delta\mu = \Delta \left[ \frac{\partial G_i}{\partial n_i} \right]_{(T,P)} \quad (1)$$

Donde: F: fuerza impulsora (kJ/kmol)

$\Delta\mu$ : diferencia de potencial químico (kJ/kmol)

$G_i$ : energía libre de Gibbs del componente i (kJ)

$n_i$ : número de moles del componente i (kmol)

T: temperatura (K)

P: presión (Pa)

Cuando la migración o la inmigración de una molécula i ocurre desde un punto **a** a un punto **b** donde sus potenciales respectivos son  $\mu_{ia}$  y  $\mu_{ib}$  se debe cumplir  $\mu_{ia} > \mu_{ib}$ ; y

no es hasta alcanzarse el equilibrio, cuando los procesos de transporte de materia se detienen. La condición de equilibrio para un sistema a temperatura (T) y presión (P) constantes está relacionada con la energía libre de Gibbs por:

$$(\partial G_i)_{(T,P)} = 0 \quad (2)$$

La ecuación (1) se reduce a  $\Delta\mu=0$  y por consiguiente los procesos de transporte de materia se detienen cuando  $\mu_{ia} = \mu_{ib}$ .

Cuando se presenta el caso, en que se tiene más de una fase ( $\alpha= 1,2, \dots, m$ ) y mas de un componente ( $i= 1,2, \dots, w$ ) en el sistema, la condición de equilibrio se alcanza cuando el potencial químico de cada especie en el sistema es la misma en todas las fases,  $\mu_{i1} = \mu_{i2} = \dots = \mu_{im}$  (Abbott y Vanness, 1991).

La transferencia de masa opera a través de dos caminos asociados muy directamente con la dinámica en el proceso: ellos son la difusión molecular y la transferencia de masa por convección. En la difusión el transporte de las especies está ligada a la perturbación y posterior excitación que tiene lugar en las moléculas, y ocurre en zonas estancadas o cuando los fluidos se desplazan en régimen laminar; por el contrario en la convección la transferencia de masa se da primordialmente cuando el movimiento de los fluidos crea turbulencia (Perry, 1972; Badger, 1964).

## II.2. TRANSFERENCIA DE MASA POR DIFUSIÓN.

Con referencia a la figura 1; representando en este caso un grupo de elementos de una sola especie moviéndose con relación a dos sistemas de referencia, un sistema de coordenadas donde todo el conjunto de moléculas se mueven juntas como un solo objeto (ejes fijos) y el otro sistema de coordenadas, desplazándose con el conglomerado de partículas (el movimiento de cada elemento es independiente uno de otro). Se define un sistema en el cual la densidad de flujo molar promedio de los entes individuales en una dirección dada, ecuaciones (6) y (7), corresponde al aporte de dos términos: el flujo molar resultante del gradiente de concentración (ocurre



dentro del conjunto de moléculas, referido al segundo sistema de coordenadas), el cual es llamado flujo de difusión:

$$J_i = C_i [V_i - V] \quad (3)$$

Donde:

$J_i$ : flujo de difusión de la especie  $i$  (kmol/m<sup>2</sup> s)

$C_i$  concentración volumétrica del compuesto  $i$  (kmol/m<sup>3</sup>)

$V_i$ : velocidad con que se mueve la especie  $i$  (m/s)

$V$ : velocidad media molar de la mezcla (m/s)

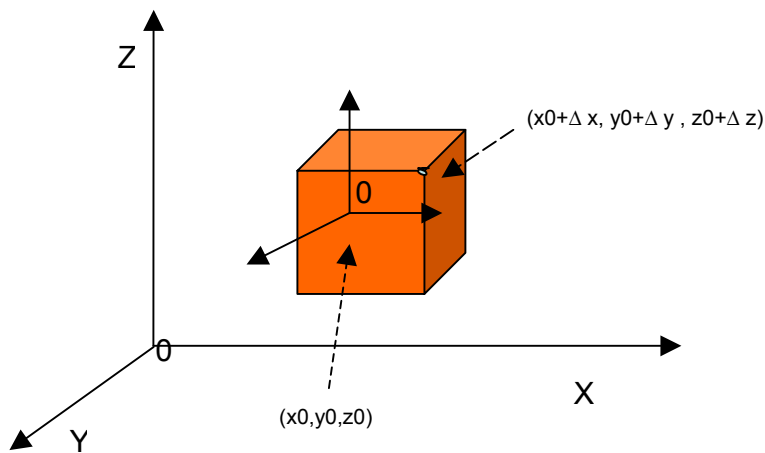


Figura N° 1. Difusión en un volumen de control

El flujo molar relacionado con la velocidad del conjunto de componentes que se movilizan (flujo convectivo, referido a los ejes fijos).

$$X_i N = C_i V \quad (4)$$

Donde:

$X_i$ : fracción molar del compuesto  $i$  (kmol  $i$  / kmol totales)

$N$ : densidad de flujo molar de mezcla (kmol totales/m<sup>2</sup> s)

Por otro lado se tiene que  $v = \frac{\sum_{i=1}^n -C_i V}{\sum_{i=1}^n C_i} > V = \sum_{i=1}^n X_i V_i$  (5)

Y  $\underline{N}_i = C_i V_i$  (6)

al sumar entonces los términos correspondientes a la ecuación (3) y (4) se obtiene la ecuación general de difusión:

$J_i = N_i - X_i N$  (7)

Cuando se tiene en particular un sistema constituido por dos elementos A y B se ha demostrado experimentalmente que el término  $J_i$  esta dado por:

$J_{AZ} = -C D_{AB} \frac{\partial X_A}{\partial Z}$  (8)

Y si C es constante:

$J_{AZ} = -D_{AB} \frac{\partial C_A}{\partial Z}$  (9)

Donde:

$C_A$ : concentración de compuesto A (kmol A /m<sup>3</sup>)

C: concentración de mezcla (kmol totales/m<sup>3</sup>)

$D_{AB}$ : difusividad del componente A en la mezcla A-B (m<sup>2</sup>/s)

Z: dirección y camino de difusión (m)

$\frac{\partial C_A}{\partial Z}$ : gradiente de concentración del componente A en la dirección Z (kmol /m<sup>4</sup>)

La ecuación anterior es la llamada primera ley de Fick para cuando el componente A difunde en la mezcla A-B y alcanza homogeneidad en concentración; en los gases, si la presión y la temperatura son constantes a lo largo de la trayectoria de difusión, las ecuaciones (8) y (9) son equivalentes. Para los líquidos, si la solución es muy diluida, C se relaciona con la densidad y peso molecular del solvente por:

$$C = \frac{\rho_s}{P_{MS}}$$

Con:

$P_{MS}$ : peso molecular del solvente (kg/kmol)

$\rho_s$ : densidad del solvente (kg/m<sup>3</sup>)

El término  $D_{AB}$  es llamado difusividad y mide la movilidad del soluto en el seno del solvente en relación al flujo molar promedio de los componentes, está afectada directamente por las condiciones de temperatura y presión del medio, pero principalmente está condicionada por características inherentes al compuesto (viscosidad, peso molecular, etc). Para los gases, la difusividad es casi independiente de la concentración; a diferencia de los líquidos, que si es afectada directamente por el grado de concentración; condición atribuida a cambios en la viscosidad y a los efectos ocasionados cuando las soluciones se apartan de la idealidad (Treybal,1980).

El orden de magnitud de las difusividades en fase gaseosa, líquida y sólida se presenta en la tabla N° 1.

Tabla N° 1. Cuadro comparativo para difusividades. (presión atmosférica estándar 101.3 kPa)

	Gases	Líquidos	Sólidos
Rango de difusividad (m <sup>2</sup> /s)	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-9</sup>	10 <sup>-24</sup>

Fuente: J.H.Krasuk,(2002)

En general, para un sistema binario y difusión en tres direcciones en el desplazamiento de las especies, la ecuaciones (7) y (8) se transforman en:

$$N_A = (N_A + N_B)X_A - CD_{AB} \nabla X_A \quad (10)$$

Si la difusión ocurre sólo en la dirección z se obtiene:

$$N_{AZ} = (N_{AZ} + N_{BZ})X_A - CD_{AB} \frac{dX_A}{dZ} \quad (11)$$

Considerando un desplazamiento de las especies en todas las direcciones posibles en el espacio, se pueden relacionar las ecuaciones de difusión con un balance de masa.

Para un volumen de control fijo en el espacio (figura 1); se puede establecer un balance de masa diferencial sin reacción química, cuando a través del elemento diferencial de volumen se registran flujos de materia de la especie i desde el punto  $(x_0, y_0, z_0)$  hasta el punto  $(x_0 + \Delta x, y_0 + \Delta y, z_0 + \Delta z)$ , entonces:

$$\text{ENTRADA}(x_0, y_0, z_0) = \text{SALIDA}(x_0 + \Delta x, y_0 + \Delta y, z_0 + \Delta z) + \text{ACUMULACION}(\text{en } \Delta v) \quad (12)$$

Si la acumulación se relaciona con la concentración másica:

$$\frac{\partial}{\partial t}(C_i \Delta x \Delta y \Delta z) = \text{ENTRADA}(x_0, y_0, z_0) - \text{SALIDA}(x_0 + \Delta x, y_0 + \Delta y, z_0 + \Delta z) \quad (13)$$

Con:  $\Delta v: \Delta x \Delta y \Delta z$

Donde:

v: elemento de volumen ( m<sup>3</sup>)

t: tiempo (s)

Linealizando alrededor del punto  $(x_0 + \Delta x, y_0 + \Delta y, z_0 + \Delta z)$ , con base a la hipótesis de que  $\Delta x \Delta y \Delta z$  son muy pequeños se obtiene por desarrollo en series de Taylor:

$$(N_{ix})_{x_0 + \Delta x} \equiv (N_{ix})_{x_0} + [(\partial N_{ix} / \partial X)_{x_0}] \Delta x \quad (14)$$

$$(N_{iy})_{y_0 + \Delta y} \equiv (N_{iy})_{y_0} + [(\partial N_{iy} / \partial Y)_{y_0}] \Delta y \quad (15)$$

$$(N_{iz})_{z_0 + \Delta z} \equiv (N_{iz})_{z_0} + [(\partial N_{iz} / \partial Z)_{z_0}] \Delta z \quad (16)$$

Sustituyendo estas tres ecuaciones en ecuación (13), se obtiene:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = \frac{\partial N_{ix}}{\partial x} + \frac{\partial N_{iy}}{\partial y} + \frac{\partial N_{iz}}{\partial z} \quad (17)$$

Esta ecuación permite seguir la evolución en el tiempo y el espacio del fenómeno de difusión.

Derivando la ecuación (10) (suponiendo que no hay flujo global) en términos de las coordenadas  $x, y, z$  :

$$\frac{\partial N_{AZ}}{\partial z} = CD_{AB} \frac{\partial^2 X_A}{\partial z^2} \quad \text{Para las otras direcciones la derivada es análoga.}$$

Aplicada para un sistema binario y suponiendo solución diluida con  $C$  y  $D_{AB}$  constantes, se obtiene después de operar con ecuación (17):

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} = CD_{AB} \left[ \frac{\partial^2 X_A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Y_A}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 Z_A}{\partial z^2} \right]$$

Expresada en concentración del componente a difundir:

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} = D_{AB} \nabla^2 C_A \quad (18)$$

La ecuación (18) es conocida como la segunda ley de Fick; la cual cuantifica en un sistema binario la evolución de la difusión en el tiempo a través de la variación de la concentración y en todas las direcciones posibles, pero con la observación de las siguientes restricciones: se emplea para gases cuando la presión y la temperatura son constantes; soluciones líquidas diluidas y difusión no estacionaria en sólidos (Treybal,1980).

### II.3. DETERMINACIÓN DE DIFUSIVIDAD.

El mecanismo y velocidad en el transporte de materia difiere en gran medida entre gases, líquidos y sólidos. Las fuerzas de atracción molecular en los tres estados físicos se relacionan con la configuración y distribución de los elementos en el sistema. La difusividad es inversamente proporcional a la cohesión; cuantifica la movilidad (las moléculas se difunden fácilmente o no en el medio) de las especies como una constante de proporcionalidad entre la velocidad de transferencia y la

diferencia de potencial, finalmente los cálculos asociados a este parámetro pueden ser de carácter empírico o pueden depender de datos experimentales.

### II.3.1. DETERMINACIÓN DE DIFUSIVIDAD EN GASES.

Para los gases, el número de moléculas que ocupa un volumen varía según la presión y la temperatura; no obstante, las fuerzas intermoleculares son relativamente débiles y las moléculas del gas tienen la libertad de moverse en un espacio considerablemente grande antes de colisionar unas con otras.

Para determinar la difusividad en mezclas binarias de gases ideales, se cuenta con la primera ley de Fick y junto con su tratamiento físico-matemático, se aprovecha para validar datos experimentales; por otro lado, se cuentan con relaciones que permiten calcular los coeficientes de difusividad para condiciones específicas de mezclas binarias, basadas en la teoría cinética de los gases; de tal manera, que, cuando no se tienen datos experimentales o cuando se quiera comparar, se estima la difusividad por diversas ecuaciones empíricas.

#### II.3.1.1. ECUACIONES EMPÍRICAS.

- a) Ecuación de Hirschfelder-Bird-Spotz: útil para estimar difusividades en mezclas gaseosas binarias no polares o de un gas polar con otro no polar a baja presión (Perry, 2001).

$$D_{AB} = \left\{ 10^{-4} \left[ 1.084 - \left( 0.249 \sqrt{\frac{P_{MA} + P_{MB}}{P_{MA} P_{MB}}} \right) T^{3/2} \sqrt{\frac{P_{MA} + P_{MB}}{P_{MA} P_{MB}}} \right] \right\} * \frac{1}{P_i r_{AB}^2 f(kT / \epsilon_{AB})} \quad (19)$$

Donde:

$r_{AB}$ : separación molecular durante el choque ( nm )

$f(kT / \epsilon_{AB})$ : función de choque (dada por gráfica de figura 2)

$k$ : constante de Boltzmann (  $1.38 * 10^{-26}$  kJ/ K )

$\epsilon_{AB}$ : energía de atracción molecular. (kJ)

Para calcular  $D_{AB}$ :

$(\epsilon_{AB}/k)=[(\epsilon_A/k)(\epsilon_B/k)]^{1/2}$  y  $\epsilon/k$  se calcula para cada elemento (ver tabla 2) o puede calcularse por la relación  $(\epsilon/k)=1.21 T_b$ , con  $T_b$  temperatura de ebullición normal. La función  $f(k T/\epsilon_{AB})$  esta representada en la figura 2.

Para el parámetro  $r_{AB}=(r_A+r_B)/2$ , y para cada elemento  $r=1.18 v^{1/3}$ , con  $v$  volumen molar del líquido en el punto de ebullición normal; para algunas sustancias  $r$  se consigue tabulado (tabla 2).

Tabla N° 2. Volúmenes atómicos y moleculares para el cálculo de volúmenes molares en el punto de ebullición normal y constantes de fuerza de gases.

Elemento	Volumen atómico	Volumen molecular	Componente	$\epsilon/k$ , (K)	$r$ ,(nm)
Carbono	14.8		Aire	78.6	0.3711
Hidrogeno	3.7	14.3	CCL	322.7	0.5947
Cloro	24.6	48.4	CH <sub>3</sub> OH	481.8	0.3626
Bromo	27.0	53.2	CH <sub>4</sub>	148.6	0.3758
Iodo	37	71.5	CO	91.7	0.3690
Azufre	25.6	--	CS <sub>2</sub>	467	0.4483
Nitrógeno	15.6	31.2	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	215.7	0.4443
Nitrógeno en Aminas primarias	10.5	-	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	237.1	0.5118
Nitrógeno en Aminas secundarias	12.0	-	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	412.3	0.5349
Oxígeno	7.4	25.6	CL <sub>2</sub>	316	0.4217
Oxígeno en Ester metílico	11.0	-	HCL	344.7	0.3339
Oxígeno en un doble Enlace	7.4	-	He	10.22	0.2551
Oxígeno en aldehídos Y cetonas	7.4	-	H <sub>2</sub>	59.7	0.2827
Oxígeno en Éter metílico	9.9	-	H <sub>2</sub> O	809.1	0.2641
Aire	-	29.9	H <sub>2</sub> S	301.1	0.3623
CO	-	30.7	NH <sub>3</sub>	558.3	0.2900
CO <sub>2</sub>	-	34.0	NO	116.7	0.3492
NO	-	23.6	N <sub>2</sub>	71.4	0.3798
N <sub>2</sub> O	-	36.4	N <sub>2</sub> O	232.4	0.3828

Fuente:Treybal, (1980).

b) Ecuación de Gilliland: de utilidad para mezclas gaseosas binarias a baja presión (Perry, 2001).

$$D_{AB} = 4,3 \cdot 10^{-4} \left[ \frac{1}{P} (v_A^{1/3} + v_B^{1/3})^2 \right] T^{1.5} \sqrt{\frac{P_{MA} + P_{MB}}{P_{MA} P_{MB}}} \quad (20)$$

Donde:

$v_A$ ,  $v_B$  volúmenes atómicos de las especies involucradas (ver tabla 2).

Se evalúa la difusividad a presión y temperatura de ensayo.

c) Ecuación de Fuller, Schettler, y Giddings: de interés para aplicar a mezclas gaseosas binarias a baja presión, predice la difusividad con un error del 5-10%; no es recomendable para presiones mayores de 10 atm y bajas temperaturas (Perry, 2001).

$$D_{AB} = 10^{-3} \left[ \frac{1}{P} ((v_A^{1/3} + v_B^{1/3})^2) \right] T^{1.75} \sqrt{\frac{P_{MA} + P_{MB}}{P_{MA} P_{MB}}} \quad (21)$$

Cuando se desea corregir la difusividad por presión y temperatura; siendo la presión menor a 10 atm y la variación de temperatura absoluta no es muy grande (10% de variación) se puede utilizar la siguiente ecuación para ello.

$$\frac{D_{AB}}{D_{AB}^*} \frac{P}{P^*} = \left( \frac{T}{T^*} \right)^{3/2} \quad (21-A)$$

Donde:

$D_{AB}$ : difusión a la presión  $P$  y temperatura  $T$ .

$D_{AB}^*$ : difusión a la presión  $P^*$  y temperatura  $T^*$ .

### II.3.1.2. SOPORTE FÍSICO-MATEMÁTICO.

Antes de describir el método analítico; soporte para la determinación experimental de la difusividad de un componente en una mezcla gaseosa, se debe tomar en cuenta lo siguiente: la mayoría de los procesos reales de transferencia de masa por difusión no



se desarrollan en un régimen estacionario, es decir  $(\partial CA/\partial t) \neq 0$ . Entonces, para efectos de plantear un cálculo en el cual se tome en cuenta este factor, se sigue la hipótesis de que el régimen existente sólo se aproxima al estado estacionario; esto no es más que suponer que el fenómeno ocurre en régimen estacionario pero adecuando sus condiciones de frontera al cambio suscitado en el tiempo (régimen pseudo estacionario) (Krasuk, 2002).

El sistema considerado para la determinación de la difusividad en una mezcla de gases, es la celda de Arnold (ver figura 2). Esta celda consta de un tubo angosto parcialmente lleno con líquido puro A el cual se somete a evaporación a temperatura y presión constantes (el baño térmico regula la temperatura del líquido en celda). El gas B, que fluye a través del terminal abierto del tubo, debe tener una solubilidad despreciable en el líquido A (se deduce que el flujo NBZ es igual a cero a lo largo de toda la trayectoria, de tal manera que el componente B se comporta como un gas que no difunde) y también debe ser inerte químicamente a él. El componente A se vaporiza y difunde dentro de la fase gaseosa, cambiando progresivamente el nivel de líquido en el tubo de la celda. Si la longitud de la trayectoria de difusión varía muy poco en un tiempo relativamente largo, puede utilizarse el modelo de difusión pseudo estacionario propuesto. Es decir que para cada Z (camino de la difusión)  $N_{AZ}$  se calcula en condiciones estacionarias.

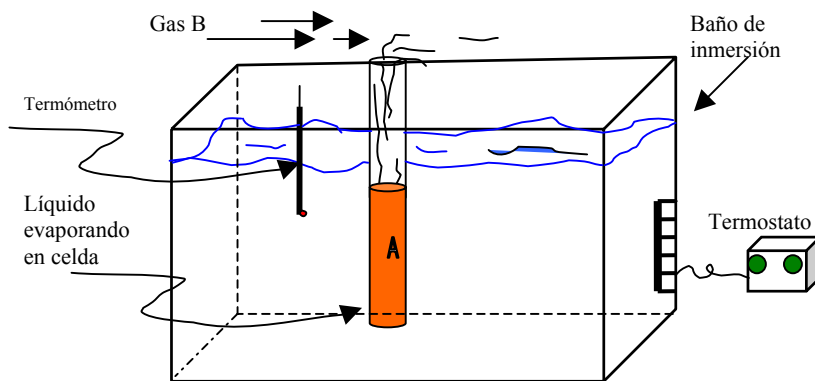


Figura N° 2. Aparato para medición de difusividad en gases.

Así, la ecuación de velocidad de vaporización de A (para la condición antes descrita).

Operando con la ecuación (11).

$$N_{AZ} = (N_{AZ} + N_{BZ})Y_A - CD_{AB} \frac{dY_A}{dz}$$

Como  $N_{BZ}=0$ , entonces se obtiene: 
$$N_{AZ} = -\frac{CD_{AB}}{(1 - Y_A)} \frac{dY_A}{dz}$$

Integrando la ecuación anterior para el caso estacionario, se logra en términos de las fracciones molares de los componentes de la mezcla, la siguiente relación:

$$N_{AZ} = \frac{CD_{AB}(Y_{A2} - Y_{A1})}{z Y_{Bm \ln}} \quad (22)$$

Con 
$$Y_{Bm \ln} = \frac{(Y_{B2} - Y_{B1})}{\text{LN}\left(\frac{Y_{B2}}{Y_{B1}}\right)}$$

Si para las condiciones de presión y temperatura del experimento puede considerarse gas ideal, entonces de la ecuación (22) se deriva:

$$N_{AZ} = \frac{D_{AB} P (Y_{A2} - Y_{A1})}{R T z Y_{Bm \ln}} \quad (23)$$

Donde:

$Y_{A1}, Y_{B1}$ : fracciones molares de mezcla de gases en el borde de la celda.

$Y_{A2}, Y_{B2}$ : fracciones molares de la mezcla de gases en la superficie del líquido.

R: constante universal de los gases (8,314 kJ/ K kmol )

Realizando un balance de materia a través de un volumen diferencial a lo largo del cilindro según se esquematiza en la figura 3, el flujo molar de A, relacionándolo con la velocidad de evaporación está dado por:

$$N_{AZ} = -\frac{\rho_L a_t dz}{P_{MA} dt} \quad (24)$$

Donde:

at: área transversal de la celda (m<sup>2</sup>)

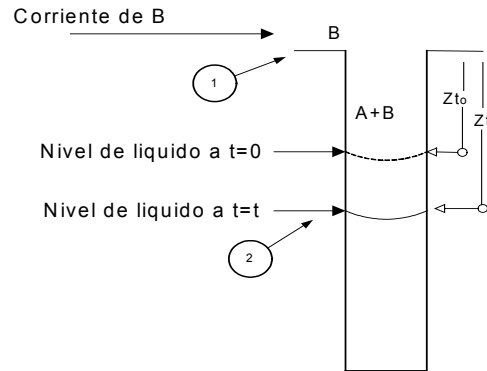


Figura N° 3. Celda de evaporación.

Para la condición antes descrita de estado pseudo estacionario del sistema, las ecuaciones (23) y (24) se pueden combinar para obtener:

$$N_{AZ} = \frac{D_{AB} P (Y_{A2} - Y_{A1})}{R T Z Y_{BM \ln}} = \frac{\rho_L a_t dz}{P_{MA} dt} \quad (25)$$

Si se separan variables y se integra desde  $t=t_0=0$  hasta  $t=t$ , y desde  $z=z_{t0}$  hasta  $z=z_t$ , el resultado es:

$$\frac{z_t^2 - z_{t0}^2}{2} = \frac{D_{AB} P P_{MA} (Y_{A2} - Y_{A1})}{\rho_L R T Z Y_{BM \ln}} t \quad (26)$$

Esta ecuación permite evaluar la difusividad a partir de datos experimentales de la variación de nivel de líquido en el tiempo. Para ello la ecuación (26) se puede escribir como:

$$\frac{z_t^2 - z_{t_0}^2}{2} = s t \quad \text{Donde} \quad s = \frac{D_{AB} P P_{MA} (Y_{A2} - Y_{A1})}{\rho_L R T Y_{Bn,ln}}$$

El valor de  $s$  es la pendiente de la recta  $\frac{z_t^2 - z_{t_0}^2}{2}$  en función de  $t$

(ver figura 4), luego  $D_{AB}$  puede ser calculado por:

$$D_{AB} = s \frac{\rho_L R T Y_{Bn,ln}}{P P_{MA} (Y_{A2} - Y_{A1})} \quad (27)$$

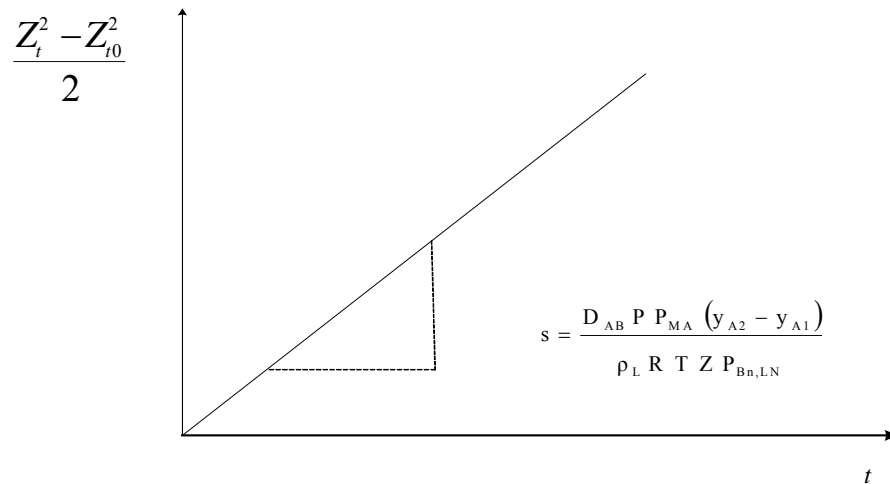


Figura N° 4. Curva de datos experimentales para la determinación de difusividad en fase gaseosa.

### II.3.2. DETERMINACIÓN DE DIFUSIVIDAD EN LÍQUIDOS.

El procedimiento teórico de cálculo para líquidos es muy diferente al de los gases; para determinar coeficientes de difusividad experimentalmente, se parte de la segunda ley de Fick para difusión en estado no-estacionario sin reacción química y para algunos sistemas de mezclas binarias en particular se pueden hacer cálculos aproximados con ecuaciones empíricas que toman en cuenta el grado de concentración.

#### II.3.2.1. ECUACIONES EMPÍRICAS.

- Correlaciones empíricas para soluciones diluidas no electrolíticas en agua:
  - a) Ecuación de Wilke – Chang: para esta situación B es el solvente y  $\varphi$  es su factor de asociación (tabla 3), éste toma en cuenta las uniones H-H. el error del método para esta situación es de 35% para (Perry, 2001).

$$D_{AB} = \frac{7.4 * 10^{-8} (\varphi P_{MB})^{1/2}}{\mu_B v_A^{0.6}} T \quad (28)$$

Donde:

$\mu_B$ : viscosidad del solvente (Pa s)

$v_A$ : Volumen molal en el punto de ebullición normal (ver tabla 2) ( $m^3/kmol$ )

Tabla N° 3. Factores de asociación para algunos elementos

solventes	agua	metanol	etanol	propanol	benceno	éter	heptano
$\varphi$	2.26	1.9	1.5	1.2	1	1	1

Fuente: J.H.Krasuk, (2002)

- b) Ecuación de Siddiqui-Lucas: arroja resultados excelentes para mezclas líquidas orgánicas con un error de 13% y para soluciones acuosas 20%

$$D_{AB} = \frac{9.89 * 10^{-8} (v_B^{0.265})}{\mu_B^{0.907} v_A^{0.45}} T \quad (29)$$

Donde:

$v_B$  : Volumen molar el punto de ebullición normal ( $m^3/kmol$ )

- c) Ecuación de Othmer-Thakar: esta correlación es útil solo para soluciones acuosas y se obtienen resultados con un margen de error de 12%-14% para un rango de temperatura de 10-30 °C.

$$D_{A,H_2O} = 14.0 * 10^{-5} \mu_{H_2O}^{-1.1} v_A^{-0.6} \quad (30)$$

- d) Correlación de Scheibel: esta correlación es de utilidad para solventes no acuosos; en un rango de temperaturas de 10-30 °C, el error es de aproximadamente 20%.

$$D_{AB} = \frac{T}{\mu_B v_A^{1/3}} 8.2 * 10^{-8} \left[ 1 + \left( \frac{3 v_B}{v_A} \right)^{2/3} \right] \quad (31)$$

- Correlaciones para las soluciones concentradas:
- e) Correlación de Bearman: se han obtenido resultados muy precisos para hidrocarburos de bajo peso molecular no polares; para otros tipos de compuestos donde se incluyen a polares y no polares presenta una desviación de promedio de 14% (Krasuk, 2002).

$$D_{AB} = (D_{AB}^{\circ} X_B + D_{BA}^{\circ} X_A) \left[ 1 + \left( \frac{\partial \ln \gamma_A}{\partial \ln X_A} \right) \right]_{T,P} \quad (32)$$

Donde:

$D_{AB}^{\circ}, D_{BA}^{\circ}$ : Coeficientes de difusión en soluciones diluidas.

$\gamma_A$ : Coeficiente de actividad se obtiene de los datos de equilibrio vapor-líquido, por:

$$\gamma_A = \frac{P_A^v}{X_A P_A}$$

Con:

$P_A$ : presión parcial del componente A (Pa)

$P_A^v$ : presión de vapor del componente A (Pa)

### II.3.2.2. SOPORTE FÍSICO-MATEMÁTICO.

El modelo supone que la difusión ocurre en la dirección Z y varía con el tiempo, para el cual la sustancia a difundir A y la sustancia en reposo B ocupan una región infinita y donde las concentraciones en el fondo y el tope de la celda de difusión no cambian con el tiempo, tal como se observa en la figura 5

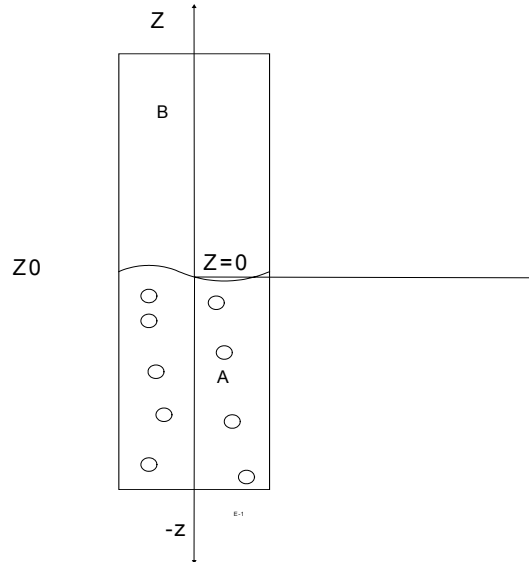


Figura N° 5. Difusión no estacionaria en fase líquida, en un medio infinito de sección recta constante.

A partir de la segunda ley de Fick .

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} = D_{AB} \frac{\partial^2 C_A}{\partial Z^2}$$

Y resolviendo dicha ecuación con condición inicial:

$$C_A(z, 0) = 0 \text{ Para } z > 0$$

$$C_A(z, 0) = C_{A0} \text{ Para } z < 0$$

Y con dos condiciones de frontera:

$$C_A(0, t) = \frac{C_{A0}}{2}$$

$$C_A(\infty, t) = 0 \text{ En la región del disolvente.}$$



Donde:

$C_{A0}$ : es la concentración volumétrica inicial del compuesto A antes de comenzar el experimento.

Se obtiene una solución particular de la forma:

$$C_A(z, t) = \frac{C_{A0}}{2(\pi D_{AB} t)^{0.5}} \exp\left(\frac{-z^2}{4 D_{AB} t}\right) \quad (33)$$

Si se realiza un cambio de variable:

$$\xi^2 = z^2/4 D_{AB} t$$

La ecuación (34) se convierte en

$$C_A(z, t) = \frac{C_{A0}}{\pi^{0.5}} \frac{d\xi}{dz} \exp(-\xi^2) d\xi$$

Según el modelo planteado, la masa que difunde más allá de  $z=z_0$ , al tiempo  $t$  lo hace hasta el infinito, por tal:

$$C_A(z, t) = \frac{C_{A0}}{\pi^{0.5}} \int_{\xi_0}^{\infty} \exp(-\xi^2) d\xi$$

Efectuando un arreglo conveniente:

$$2 \frac{C_A(z, t)}{C_{A0}} = \frac{2}{\pi^{0.5}} \int_{\xi_0}^{\infty} \exp(-\xi^2) d\xi \quad (34)$$

El término del lado derecho de la ecuación anterior (34), es llamada la complementaria de la función error y se denota  $\text{erfc}(\xi)$ :

$$\text{erfc}(\xi) = \frac{2}{\pi^{0.5}} \int_{\xi_0}^{\infty} \exp(-\xi^2) d\xi$$

Por otra parte  $1 - \text{erf}(\xi) = \text{erfc}(\xi)$ ; donde el término  $\text{erf}(\xi)$  es la función error.

La ecuación (34) en términos de  $\text{erfc}(\xi)$  representa la concentración de A dependiente de la posición y el tiempo:

$$C_A(z,t) = \frac{C_{A0}}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{z}{2\sqrt{D_{AB}t}}\right) \quad (35)$$

Si la columna de líquido B en un principio es agua pura, y luego se decide experimentar con una solución diluida de A, la ecuación (35) se vuelve:

$$C_A(t,z) = C_{A0,m} + \frac{(C_{A0,M} - C_{A0,m})}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{z}{2\sqrt{D_{AB}t}}\right) \quad (36)$$

Donde  $C_{A0,M}$  y  $C_{A0,m}$  son las concentraciones del soluto A en las soluciones concentrada y diluida respectivamente (Ruiz et al,2002).

En las figuras 6 y 7 se esquematiza este resultado.

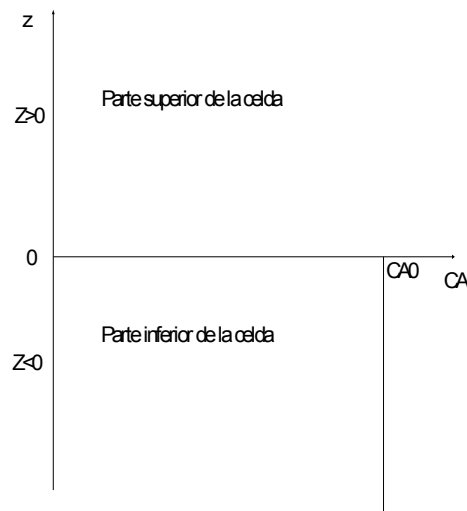


Figura N° 6. Distribución de concentración de A en la celda al tiempo t=0

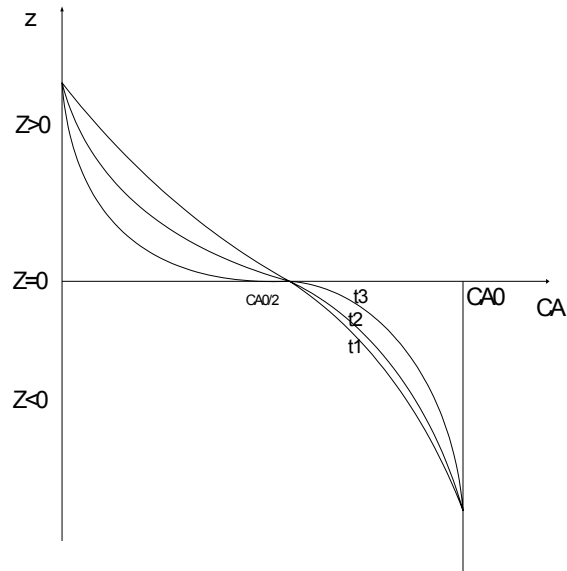


Figura N° 7. Distribución de concentración de A en la celda para distintos tiempos.

En la figura 8 se presenta un esquema de una celda tradicional para observar la difusión en líquidos. Inicialmente dos sustancias A y B están confinadas y en reposo en una celda; además separadas por una pared móvil, cuando la pared es removida, cuidando de que no se origine turbulencia en el primer contacto entre las sustancias, comienza el proceso difusivo. Después de pasado un tiempo el fenómeno ha evolucionado y para cuantificarlo se toman muestras en toda la región de difusión; de este modo, la concentración en cualquier punto de la celda  $C_A$  puede medirse para luego estimar la difusividad experimental por intermedio de ecuación (35) o (36), con el uso de tabla 3 según sea el caso.

Tabla N° 4. Función error y funciones relacionadas.

Z	erf (Z)	erfc (Z)	Z	erf (Z)	Erfc (Z)
0	0	1.00	0.70	0.67780	0.32220
0.05	0.05637	0.94360	0.80	0.74210	0.25790
0.10	0.11246	0.88754	0.90	0.79691	0.20309
0.15	0.16800	0.83200	1.00	0.84270	0.15730
0.20	0.22270	0.77730	1.20	0.91031	0.08969
0.25	0.27633	0.72367	1.40	0.95228	0.04772
0.30	0.32863	0.67137	1.60	0.97635	0.02365
0.35	0.37938	0.62062	1.80	0.98909	0.01091
0.40	0.42839	0.57161	2.00	0.99532	0.00468
0.45	0.47548	0.52452	2.50	0.99959	0.00041
0.50	0.52050	0.47950	3.00	0.99998s	0.00002
0.60	0.60386	0.39614	----	----	-----

J.H.Krasuk, Transferencia de Masa por Difusión.,135,(2002)

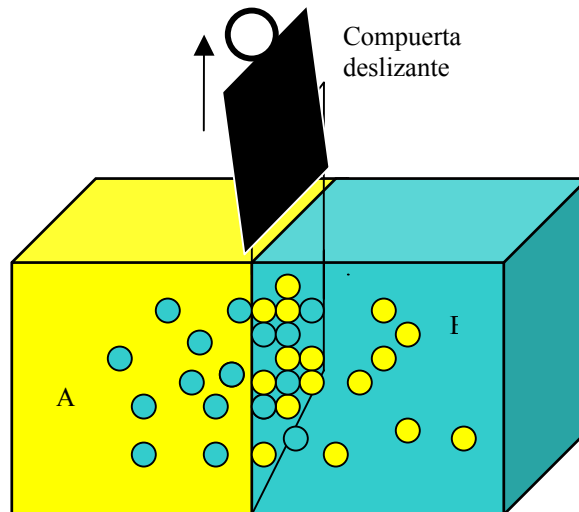


FIGURA N° 8. Celda para determinación de difusividad en líquidos.

#### II.4. TRANSFERENCIA DE MASA POR CONVECCIÓN.

De igual modo que para la difusión se han estudiado los mecanismos que rigen la transferencia de masa en la convección. La ecuación característica de transporte para este fenómeno es:

$$N_A = K \Delta F \quad (37)$$

Donde:

$N_A$ : cantidad de material transferido (kmol / s m<sup>2</sup>)

$K$ : coeficiente de transferencia de masa (kmol/ s m<sup>2</sup> Δ F)

$\Delta F$ : fuerza directora que rige el sistema (gradientes de concentración, presión, fracción molar).

Es de interés considerar ahora, la transferencia de materia que se efectúa entre dos fases. Por lo general, en los procesos industriales donde interviene una operación de transferencia de masa, ésta se lleva a cabo en sistemas de dos fases insolubles (gas-liquido, liquido-liquido, etc.).

El equilibrio entre las fases condicionará la transferencia de masa. En principio cuando las dos fases se ponen en contacto el sistema está alejado del equilibrio; es cuando entonces actúa el gradiente de concentración como fuerza impulsora para la transferencia y distribución de la materia entre las fases, pasado el tiempo y en condición de régimen estacionario se llegará al equilibrio y la transferencia de masa cesará.

Representando el fenómeno de transferencia de masa que ocurre entre dos fases, cuando una fase es gaseosa y la otra líquida, según se observa en figura 9.

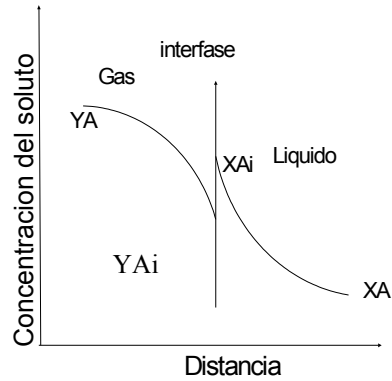


Figura N° 9. Distribución de concentración del soluto A en las fases.

Para cuantificar el régimen de transferencia de masa dado en función del esquema, (figura 10) se necesita relacionar las cantidades representativas de la fuerza impulsora para el transporte de materia las cuales a su vez están ligadas con el potencial químico (Treybal,1980).

Cuando se transfiere materia entre dos fases, se ha determinado que el transporte de las especies a través de la interfase, se efectúa sin oposición de resistencia por parte de ésta; se desprende entonces de la consideración anterior, que en la interfase las concentraciones de ambas fases están en el equilibrio y por no existir resistencia al flujo de materia en la frontera de las dos fases, se puede expresar el flujo de A en un sistema gas líquido y en condiciones estacionarias en función de coeficientes de transferencia para cada fase, (ver figura 11):

$$N_A = k_Y (Y_{Ai} - Y_A) \quad (38)$$

$$N_A = k_X (X_{Ai} - X_A) \quad (39)$$

Donde:

$k_X$ : coeficiente individual de transferencia de masa para la fase líquida

(Kmol/s m<sup>2</sup> f.molar)

$k_Y$ : coeficiente individual de transferencia de masa para la fase gas

(Kmol/s m<sup>2</sup> f.molar)

---

$Y_A$ : concentración del soluto en el gas	(fracción molar)
$X_A$ : concentración del soluto en el líquido	(fracción molar)
$Y_{Ai}$ : concentración del soluto en el gas en la interfase	(fracción molar)
$X_{Ai}$ : concentración del soluto en el líquido en la interfase	(fracción molar)

Los coeficientes individuales de transferencia de masa, representan el inverso de la resistencia referida a cualquiera de las fases, pero las restricciones físicas impuestas por el mismo sistema para el muestreo en la interfase imposibilitan su determinación. El efecto global de la interacción si se puede medir, porque se establece una condición única de equilibrio en el sistema a la temperatura y presión de trabajo; de allí se deduce que la utilización de un coeficiente global de transferencia de masa y la diferencia entre la concentración en cualquiera de las fases y su concentración respectiva en el equilibrio, muestran el efecto completo de la transferencia de masa en las dos fases, (ver figura 10):

$$N_A = K_Y(Y_A - Y_{AEQ}) \quad (40)$$

$$N_A = K_X(X_{AEQ} - X_A) \quad (41)$$

Donde:

$K_Y$ : coeficiente global de transferencia de masa referido a la fase gas  
( kmol/s m<sup>2</sup> f.molar)

$K_X$ : coeficiente global de transferencia de masa referido a la fase líquida.  
(Kmol/s m<sup>2</sup> f.molar)

$Y_{AEQ}$ : concentración del soluto en el gas en el equilibrio (fracción molar)

$X_{AEQ}$ : concentración del soluto en el líquido en el equilibrio (fracción molar)

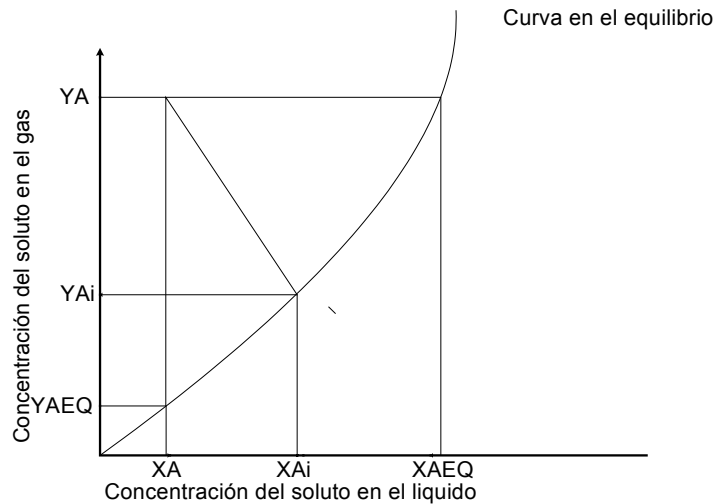


Figura N° 10. Relación de concentración del soluto en las fases con su valor en la curva de distribución en el equilibrio.

Como se supone la existencia del equilibrio entre el vapor y el líquido y también comportamiento de gas ideal de la mezcla líquido-gas,  $Y_{AEQ}$  está dado por la relación entre la presión parcial del compuesto A presión total en la columna, esto es:

$$Y_{AEQ} = \frac{P_A}{P} = \frac{X_A P_A^V}{P} \quad (42)$$

Donde:

$P_A$ : presión parcial del compuesto A (Pa)

$P_A^V$ : presión de vapor del compuesto A (Pa)

$Y_{AEQ}$  debe estimarse a la temperatura de la interfase. Pero en régimen de flujo de película sobre todo en equipos de pequeñas dimensiones, la presión total y la temperatura del líquido a lo largo de la columna tiene poca variación y a su vez la diferencia de temperatura entre el líquido y la temperatura de la región de separación



de las fases es pequeña; se resuelve así el problema del cálculo de la concentración del soluto en la interfase  $Y_{Ai}$ , por que se puede se utilizar la temperatura del líquido como una buena aproximación de la temperatura en la frontera de separación de las fases .

#### II.4.1. DETERMINACIÓN DE COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA DE MASA.

Un aparato útil y sencillo para la determinación experimental de coeficientes de transferencia de masa en fase gaseosa, es la torre de pared mojada (ver figura 12). Consta de un tubo cilíndrico generalmente, donde el líquido penetra por el tope, resbala y cae en forma de película interaccionando con el gas circulante; se utilizan eficientemente en el estudio de vaporización de líquidos puros en aire. En este tipo de columnas el contacto entre el líquido y el gas se puede controlar de manera que el líquido fluya en régimen laminar y el gas se mantiene en flujo turbulento. (Perry, 1972; Badger, 1964).

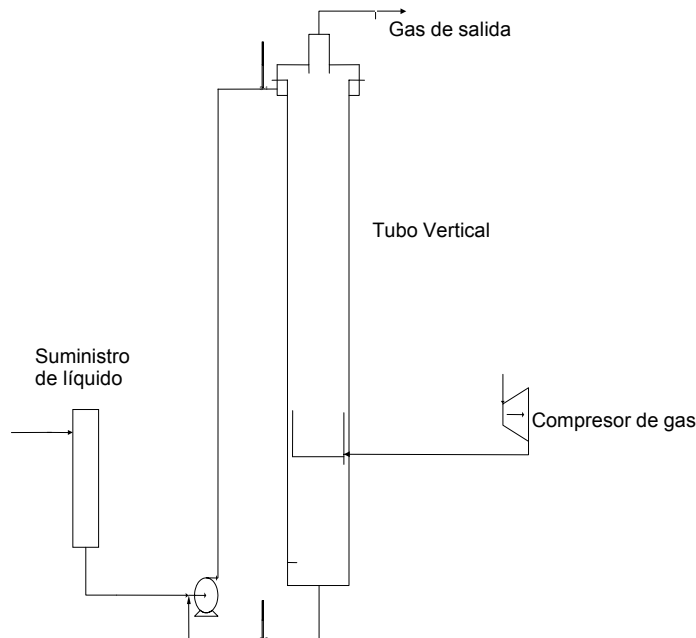


Figura N° 11. Esquema de instalación de torre de pared mojada.

Consta de un tubo cilíndrico generalmente, donde el líquido penetra por el tope, resbala y cae en forma de película interaccionando con el gas circulante; se utilizan eficientemente en el estudio de vaporización de líquidos puros en aire. En este tipo de columnas el contacto entre el líquido y el gas se puede controlar de manera que el líquido fluya en régimen laminar y el gas se mantiene en flujo turbulento. (Perry, 1972; Badger, 1964).

Para generar las relaciones matemáticas necesarias en el estudio a realizar (determinación experimental de coeficientes de transferencia de masa en fase gas), se considerará una columna de pared mojada, donde se tendrá una fase gas y una fase líquida.

#### II.4.1.1. ECUACIONES EMPIRICAS.

Las semejanzas entre los procesos de transferencia de calor y transferencia de masa, ha propiciado el interés de los investigadores para caracterizar los dos fenómenos con el mismo tipo de relaciones matemáticas. A raíz de esto, el coeficiente de transferencia de masa se puede estimar por dos vías distintas.

Muchos experimentos en torres de paredes mojadas se han correlacionado; la mayor parte de los datos generados han sido para vaporización de líquidos en aire. Gilliland y Sherwood a partir del estudio de muchas sustancias, presentan una ecuación análoga a la de Dittus- Boelter, pero con un cambio leve en los exponentes de los números adimensionales vinculados a la transferencia de masa, los cuales permiten estimar los coeficientes asociados ( $K_G, K_Y, K_Y', K_c$ , etc.).

La relación obtenida por Gilliland y Sherwood utilizando una gran cantidad de datos experimentales en fase gaseosa, es confiable en un intervalo  $2000 < Re < 35000$  y  $0.6 < Sc < 2.5$  (según Bird, 1998) y tiene la forma:

$$Sh_G = 0.023 Re_G^{0.83} Sc_G^{0.44} \quad (43)$$

Donde:

$$Sh_G = k'_y \frac{D}{C D_{AB}} \quad (44)$$

Donde:

$Sh_G$ : número de Sherwood (adimensional)

$Re_G$ : número de Reynolds ( $D G' / \mu_G$ ) (adimensional)

$Sc_G$ : número de Schmidt ( $\mu_G / D_{AB}$ ) (adimensional)

$D$ : diámetro interno de la columna (m)

$\mu_G$ : viscosidad del gas ( $kg/m^2 s$ )

$\rho_G$ : densidad del gas ( $kg/m^3$ )

$G'$ : velocidad másica superficial del gas ( $kg/m^2 s$ )

$k'_y$ : coeficiente de transferencia de masa para el modelo contra difusión equimolar  
( $Kmol/ s m^2 f.molar$ )

En el mismo orden de ideas, se supone solución diluida; por lo cual, el coeficiente  $k'_y$  definido para el modelo contra difusión equimolar es aproximadamente igual al coeficiente  $k_y$  (según Bird, 1998). Si la solución no es diluida  $k_y$  se corrige según:

$$k_y = k'_y / Y'_{BMln} \quad (45)$$

Con:

$Y'_{BMln}$ : fracción molar media logarítmica promedio del líquido en toda la torre  
(fracción molar)

$Y'_{BMln}$  se calcula por:

$$Y_{TBMln} = \frac{(1 - Y_{Ai}) - (1 - Y_{AT})}{LN \left[ \frac{(1 - Y_{Ai})}{(1 - Y_{AT})} \right]} ; Y_{FBMln} = \frac{(1 - Y_{Ai}) - (1 - Y_{AF})}{LN \left[ \frac{(1 - Y_{Ai})}{(1 - Y_{AF})} \right]}$$

Donde:

$$Y_{BM \ln} = \frac{(Y_{TBM \ln} + Y_{FBM \ln})}{2} \quad (46)$$

Operando con las ecuaciones (43),(44) se puede estimar el coeficiente de transferencia de masa del lado de la fase gas:

$$k_y = \frac{C D_{AB}}{D Y_{BM \ln}} 0.023 Re_G^{0.83} Sc_G^{0.44} \quad (47)$$

### II.4.1.2. BALANCE DE MASA.

Según esquema de la figura:

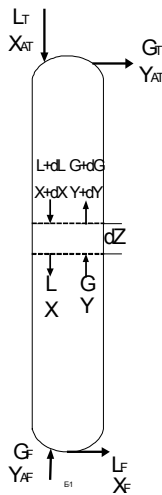


Figura N° 12. Esquema de columna de paredes mojadas para balance de masa.

Partiendo de la ecuación  $N_A = k_Y (Y_{Ai} - Y_A)$  se construye:

$$d(N_A \ A) = k_Y (Y_{Ai} - Y_A) \ dA \quad (48)$$

$$(N_A \ A) = k_Y \ A (Y_A - Y_{AEQ}) \quad (49)$$

Con:

$$A = \pi D Z$$

Donde:

$$A: \text{área de interfase} \quad (\text{m}^2)$$

$$D: \text{Diámetro interno de la columna} \quad (\text{m})$$

$$Z: \text{altura de transferencia} \quad (\text{m})$$

El área de transferencia de masa coincide con el área cilíndrica interna de la columna (A) debido a que el espesor de película del líquido es despreciable frente del radio interno de la torre.

Haciendo un balance de materia (balance en componentes) en condiciones de régimen estacionario, cuando se transfiere el componente A del líquido a la corriente de gas:

$$-d(LX_A) = d(GY_A) = d(N_A A) \quad (50)$$

Donde:

$$L: \text{caudal de líquido en la columna} \quad (\text{kmol/s})$$

$$G: \text{caudal de gas circulando en la columna} \quad (\text{kmol/s})$$

Desarrollando la ecuación (50) y tomando en cuenta que el líquido, es un líquido puro:

$$-dL = G dY_A + Y_A dG \Rightarrow -dL - Y_A dG = G dY_A$$

Sustituyendo  $-dL$  por  $dG$  y efectuando se tiene:

$$\frac{G dY_A}{(1 - Y_A)} = dG \Rightarrow \frac{G}{(1 - Y_A)} = d(N_A A) \quad (51)$$

Combinando la ecuación (48) y la ecuación (51) se obtiene:

$$\frac{G dY_A}{1 - Y_A} = k_Y (Y_{Ai} - Y_A) dA \quad (52)$$

Separando variables e integrando entre los límites establecidos:

$$\int_{Y_{AF}}^{Y_{AT}} \frac{1}{k_Y} \frac{G dY_A}{(1 - Y_A)(Y_{Ai} - Y_A)} = \int_0^A dA \quad (53)$$

Donde:

$Y_{AF}$ : fracción molar del gas en el fondo de la torre (fracción molar)

$Y_{AT}$ : fracción molar del gas en el tope de la torre (fracción molar)

Si la solución es diluida, entonces  $G$  es aproximadamente constante por lo que, la ecuación (53) se convierte en:

$$\frac{G}{k_Y} \int_{Y_{AF}}^{Y_{AT}} \frac{dY_A}{(Y_{Ai} - Y_A)} = A \quad (54)$$

Tomando en cuenta una variación media logarítmica de la diferencia de potencial, cuando se transfiere el líquido al gas, la ecuación (54) se reduce a.

$$\frac{G}{k_Y} \frac{(Y_{AT} - Y_{AF})}{\Delta Y_{AM \ln}} = A \quad (55)$$

Que es equivalente a:

$$G (Y_{AT} - Y_{AF}) = k_y A Y_{AM \ln} = (N_A A) \quad (56)$$

Donde:

$Y_{AM \ln}$ : fracción molar media logarítmica del gas en toda la torre (f. molar)

Se calcula por:

$$\Delta Y_{AmLN} = \frac{(Y_{Ai} - Y_{AF}) - (Y_{Ai} - Y_{AT})}{LN \left[ \frac{Y_{Ai} - Y_{AF}}{Y_{Ai} - Y_{AT}} \right]}$$

Reordenando la ecuación (56) se obtendrá la ecuación general que nos permitirá estimar el coeficiente de transferencia de masa del lado de la fase gas, esto es:

$$k_y = \frac{G (Y_{AT} - Y_{AF})}{A Y_{AMLN}} \quad (57)$$

### **III. METODOLOGÍA.**

En esta sección se puntualizan los procedimientos y pasos seguidos en cuatro etapas fundamentales de labor; el propósito, cumplir con las metas trazadas en el Trabajo Especial de Grado. Dichas etapas son:

- Diseño de los equipos para el estudio de transferencia de masa.
- Construcción y puesta en marcha de los equipos.
- Realización de pruebas experimentales.
- Elaboración de los manuales de los equipos.

#### **III.1. DISEÑO DE LOS EQUIPOS PARA EL ESTUDIO DE TRANSFERENCIA DE MASA.**

Se recopiló toda la información básica y de avanzada asociada al proceso de transferencia de masa y en especial, material de contenido pedagógico referido a la determinación de la difusividad de un componente en mezclas líquidas como gaseosas y de coeficientes de transferencia de masa para la fase gas. En esta primera etapa, fue necesario adquirir, comprender y madurar los conceptos teóricos y la información tecnológica disponible a fin de escoger el mejor camino y las mejores técnicas, con el fin de construir los módulos para las prácticas.

La revisión del material bibliográfico y otros medios de consulta (tutores y profesores de la escuela) llevó a establecer una base de criterios que junto a las alternativas disponibles, permitió construir una línea de trabajo en función de realizar el diseño y/o especificar los equipos con el menor gasto de los recursos disponibles.

Como consecuencia inmediata de esta fase de la investigación, se hizo una selección de las relaciones y ecuaciones que modelan los fenómenos de transferencia de masa a estudiar. No todos los modelos matemáticos existentes referidos al tema fueron tomados en consideración; se escogieron aquellos que se adecuan a fenómenos simples de transferencia de masa (escalables a nivel de laboratorio) los cuales cumplen o están sometidos a ciertas restricciones en cuanto a propiedades físico-químicas y dinámicas. En el caso de Este Trabajo

Especial de Grado, las relaciones matemáticas y los procedimientos de cálculo presentados en el marco teórico, fueron muy específicos para los objetivos a cumplir.

Por las mismas características y uso a dar a los módulos de prácticas, lo idóneo es la sencillez y practicidad. En este caso de competencia particular, para la determinación de difusividades y coeficientes de transferencia de masa, no se requirió de rigurosidad en el diseño y/o especificación; pues, para las relaciones y condiciones de trabajo establecidas en el marco teórico, fue más sencillo y práctico dimensionar y/o especificar en función de datos aportados por diversos autores en las referencias bibliográficas y sobre todo con el soporte de los resultados generados en la observación de la experimentación propia post ingeniería conceptual.

Otros elementos tomados en cuenta para la sustentación del diseño y/o especificación, fueron los siguientes:

- El factor seguridad: el equipo construido no deberá presentar riesgos de ningún tipo a la hora de su manipulación, por otro lado se escogieron compuestos que no representan peligro a la salud (ninguna toxicidad en el tiempo de exposición).
- Configuración modular a fin de poder ser reubicado dentro del Laboratorio de Operaciones Unitarias.
- Configuración que facilite el trabajo pedagógico de profesores, preparadores y técnicos, además de la estética, resistencia y ergonomía.
- El bajo costo y fácil adquisición: los materiales de construcción, equipos de medición y los productos que se utilicen en las prácticas deberán ser económicos y estar disponibles en el mercado.
- La participación de ayuda externa: condicionado al apoyo de personal técnico con experiencia en montajes de este estilo.



### **III.1.1 DETERMINACIÓN DE DIFUSIVIDAD EN MEZCLA GASEOSA.**

En lo que respecta a la difusividad en mezclas gaseosas en un primer avance la experimentación permitió seleccionar los compuestos y diámetro óptimo de celda, así como ajustar el procedimiento operacional en función del tiempo total disponible para la realización de la práctica (4 horas aproximadamente) y el tiempo total de difusión de los compuestos puros en el aire.

Los compuestos puros sometidos a evaluación en tubos de distintos diámetros necesariamente presentan alta presión de vapor a fin de asegurar buenos resultados en un tiempo prudencial, menor o igual a tres y media (3.5) horas.

Para dimensionar las celdas de Arnold; prevalecieron como criterio de selección de diámetro y los compuestos, los siguientes elementos:

- La observación del descenso de nivel de los líquidos evaporándose en un rango de entre 6 y 10 unidades de altura, (a temperatura y presión ambiente del laboratorio de operaciones) en un tiempo de tres horas y media (3.5).
- Se escogerán dos diámetros de celda, pues no conocemos la vinculación del efecto de cambio de diámetro con resultados que se obtendrán.
- Disponibilidad suficiente, prevaleciendo sobre este último los dos primeros criterios.

### **III.1.2 DETERMINACIÓN DE DIFUSIVIDAD EN MEZCLA LÍQUIDA.**

Al igual que para el caso de mezclas gaseosas, a fin de observar el fenómeno difusivo en líquidos y realizar una evaluación preliminar, se construyó una celda de material acrílico de 20 cm. de altura y 10 cm. de diámetro interno.

Con la idea entonces de obtener información para especificar las dimensiones finales de la celda y seleccionar los compuestos, se proyectaron y armaron algunas pruebas rápidas que consistían en poner en contacto (tratando de no promover mezclado inicial) dos soluciones concentradas o diluidas de los siguientes compuestos: metanol, etanol, propanol, acetona, ácido acético, cloruro de sodio, sacarosa y algunos colorantes (naranja de metilo, rojo cereza), así como agua pura.

Inicialmente se realizaron mediciones cualitativas y cuantitativas de modo muy discreto, pero luego fue necesario trabajar con más detalle en virtud del surgimiento de algunas complicaciones técnicas; como por ejemplo: la imposibilidad de caracterizar el fenómeno a través de la evolución de la concentración en el tiempo estipulado para realizar la práctica, restricciones con los instrumentos para medir la concentración, el mezclado inicial de los compuestos, generación de desperdicio de los reactivos por ser la celda muy grande.

Con el trabajo experimental previo se logró escoger los compuestos para los experimentos finales y ajustar parámetros tales como: concentración promedio del soluto en soluciones acuosas diluidas, volumen total de mezcla, diámetro y altura de celda, disposición espacial del equipo, tiempos y modo de muestreo, eliminación del mezclado inicial al dosificar los compuestos en la celda.

### **III.1.3 DETERMINACIÓN DE COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE MASA.**

La torre de pared mojada fue proyectada como práctica para estudiar principalmente la evaporación de agua en aire, aunque a futuro no se descarta la posibilidad de realizar experimentación con otro sistema debido a que se planteó colocar una derivación en la línea principal del aire de modo de poder incorporar otro gas distinto a éste, e igualmente el agua también se puede sustituir por otros líquidos o soluciones; como alcoholes, agua-acetona, por ejemplo. El trabajar con este sistema, agua-aire, redujo los costos y facilitó los cálculos. Otra ventaja: las composiciones de entrada y salida del aire se obtienen mediante el uso de un termómetro de bulbo seco y uno de bulbo húmedo; para calibrar este sistema se realizó una medición de la humedad del medio ambiente con la ayuda de un higrómetro de pared, paralelamente se ventiló aire del medio sobre los termómetros; con la ayuda de las tablas psicométricas se determinó la humedad; se cotejaron las dos mediciones.

La temperatura en el sistema y la humedad del aire de entrada son dos elementos muy importantes a la hora de diseñar el equipo. Las condiciones de transferencia de masa varían cuando el sistema opera a una o a otra temperatura distinta y mientras menos humedad el aire de entrada posea, el sistema tenderá a favorecer el fenómeno de evaporación del agua en el aire; es lo que se quiere observar y medir para estimar el coeficiente de transferencia de masa en fase gas. La opción más viable en este caso para variar la temperatura del proceso, es

calentando la corriente de aire y para disminuir su humedad, debe tratarse la corriente con un sistema de desecación antes de ingresar a la columna.

La experimentación previa fue difícil, pues no se pudo realizar sin antes tener armado por lo menos el 70 % del equipo. Sin embargo, permitió seleccionar el diámetro de la torre de tres opciones de escogencia en tubos para torres (9 cm x 150 cm; 2.54 cm x 150 cm; 5 cm x 100 cm). Los demás equipos y accesorios (bombas, distribuidores de líquido, distribuidores del gas, válvulas reguladoras, tuberías, etc.) fueron dimensionados y especificados en función de los parámetros anteriores aplicando criterios de cálculo de ingeniería.

### **III.2. CONSTRUCCIÓN Y PUESTA EN MARCHA DE LOS EQUIPOS.**

Se desarrolló en cuatro (4) fases consecutivas:

- Con una visión general de las dimensiones y características de los equipos a construir, se ubicaron y seleccionaron los materiales según lista de necesidades. Dependiendo de la disponibilidad de insumos en los depósitos del LOU, se procedió a construir algunos elementos en el taller y/o adquirir por compra el resto de los componentes y materiales necesarios.
- De acuerdo a los fundamentos planteados en la fase de diseño y/o especificación y ya en posesión de componentes y materiales, se inició el ensamblaje de los módulos de prácticas.
- Concluida la construcción se procedió a evaluar el funcionamiento general, desempeño y elementos operacionales peligrosos.
- Se corrigieron fallas en general, se realizaron las adaptaciones y cambios necesarios.

### **III.3. REALIZACIÓN DE PRUEBAS EXPERIMENTALES.**

Las pruebas experimentales preliminares se necesitaron para generar información para la sección de diseño y luego ya con los equipos en condiciones óptimas de operación, se realizaron las corridas y pruebas experimentales finales.

No se pretendió con el trabajo experimental realizar una investigación exhaustiva y detallada, acerca de cuales parámetros o no afectan en mayor grado los fenómenos estudiados; el esquema de trabajo experimental se planeó de modo individualizado para cada módulo de práctica y se enfocó en función de determinar sólo aquellos elementos necesarios para la certificación del equipo y la validación del modelo adoptado; la discusión de los resultados se planteó alrededor de este objetivo.

A continuación se presentan los procedimientos experimentales seguidos para cada equipo:

### III.3.1 DIFUSIVIDAD EN GASES.

Los pasos en la experimentación en esta sesión son como sigue:

Etapa inicial para escoger diámetros de celda y compuestos:

- a) Se tomaron varios tubos de vidrio de distintos diámetros y se llenaron con los compuestos (el mismo compuesto en todos los tubos por vez).
- b) Se llevó el nivel de líquido en las celdas entre 0.5 y 1.5 cm. medidos desde la parte superior del tubo; se inicializó cronómetro y se dejó pasar un lapso de tiempo de entre 3 y 3.5 horas. Se midió y registró nivel de líquido final por cada compuesto y por celda.

Tabla N° 5 Control de experimentación en gases.

compuestos evaluados preliminarmente	metanol, etanol, propanol, acetona, n-hexano.
Diámetros evaluados (mm)	10; 6; 4; 2.8; 2

Etapa de experimentación con compuestos seleccionados y diámetros de celda especificados.

- a) Se ubicaron los compuestos a estudiar.
- b) Se midió y registró condiciones ambientales en el laboratorio, dimensiones de la celda:
  1. Presión: barómetro;
  2. Temperatura: termómetro.
  3. Diámetro interno: vernier.

Se llenó la batería de cuatro celdas de Arnold (se hace con una jeringa) con: acetona, etanol, n-Hexano, metanol, se reporta nivel inicial de líquido correspondiente a  $t_0$  (0.01320 m es el espacio vacío entre el tope de la celda y nivel de inicio), inicializar cronómetro.

- c) Se realizaron mediciones y se registró: temperatura del baño y la variación del nivel de líquido cada 30 minutos hasta tener un mínimo de seis puntos experimentales, con ayuda de un lente de aumento instalado en el equipo se puede apreciar con exactitud el menisco de líquido dentro de la celda.
- d) Se midió y registró la densidad del líquido a temperatura y presión ambiente. (se pesa picnómetro vacío y luego se pesa picnómetro con muestra). Cuando la determinación experimental de la difusividad se efectuó a una temperatura distinta a la ambiente; entonces la densidad para esa temperatura se corrigió con ecuaciones teóricas.
  - Para la estimación de la difusividad a otra temperatura se procedió como sigue:
- f) Se varió la temperatura del baño de inmersión al valor o en un rango deseado.
- g) Se midió la temperatura del baño, se esperó hasta la estabilización de ésta y se regresa a paso dos (b).

Los datos experimentales recogidos se ajustaron a la forma de la ecuación (26), y la ecuación (27) permite obtener el valor de la difusividad. La ecuación (20) proporciona el cálculo para estimar la difusividad teórica.

El error se evalúa por:

$$\text{Error} = \left( \frac{D_{AB_{teo}} - D_{AB_{exp}}}{D_{AB_{teo}}} \right) * 100$$

Los datos producidos en la experimentación se recopilarán en el formato de tablas que se da a continuación.

Tabla N° A. Datos en la difusión de gases.

Camino de Difusión, $Zt$ (m)	Temperatura del baño, T (k)			
	Elemento N° 1	Elemento N° 2	Elemento N° 3	Elemento N° 4
	Tiempo, t (s)			

Tabla N° B. Parámetros constantes.

Apreciación de celda (m)	$Zt(m)$	Presión atmosférica, P (kPa)	Temperatura ambiente, T(K)

### III.3.2. DIFUSIVIDAD EN LÍQUIDOS.

Pasos seguidos en la experimentación previa:

- Prueba N° 1. Prueba cualitativa. Evaluación visual de proceso de difusión.
  - a) Se colorearon los reactivos o soluciones (metanol, etanol, acetona) con bixina (el pigmento del onoto es peculiar por que presenta la nor-bixina que sólo es miscible con compuestos orgánicos, y los carotenos que son solubles en agua, se utilizaron apenas ppm del pigmento para evitar el solapamiento de las difusividades).
  - b) Se colocó el agua (solvente) en el fondo de la celda.
  - c) Se dosificó el soluto coloreado (puro) en el seno del solvente.
- Prueba N° 2. Prueba cualitativa. Evaluación visual.
  - a) Se colocó el agua (solvente) en el fondo de la celda.
  - b) Se dosificó el soluto coloreado (puro) sobre el solvente.

- Prueba N° 3. Prueba cualitativa. Evaluación visual.
  - a) Se colocó el soluto en el fondo de la celda.
  - b) Se dosificó el agua en el seno del soluto puro.
- Prueba N° 4. Prueba cualitativa. Evaluación visual.
  - a) Se colocó el soluto en el fondo de la celda.
  - b) Se dosificó el agua sobre el soluto puro.

Se realizaron cuatro (4) pruebas más (pruebas 5 a la 8) con el mismo procedimiento anterior; pero se cambió la concentración de los solutos de puros a una solución al 5 % en peso.

- Prueba N° 9. Prueba cualitativa. Evaluación visual.
  - a) Se preparó una solución de rojo cereza en agua al 5% en peso.
  - b) Se impregnó un algodón con esta solución coloreada y luego se colocó en el fondo de la celda.
  - c) Se dosificó agua clara sobre el algodón.
- Prueba N° 10. Prueba cualitativa. Evaluación visual.
  - a) Se colocó el agua (solvente) en el fondo de la celda.
  - b) Se coloca malla de acero en el nivel superior del agua.
  - c) Se dosificó el soluto coloreado (puro) sobre el solvente.
- Prueba N° 11. Prueba cualitativa. Evaluación visual.
  - a) Se colocaron desordenadamente una sobre otras, varias rejillas de acero a lo largo de la celda.
  - b) Se colocó el agua (solvente) en el fondo de la celda.
  - c) Se dosificó el soluto coloreado (puro) sobre el solvente.
- Prueba N° 12. Prueba cualitativa. Evaluación visual.
  - a) Se colocó relleno pyrex (anillos doble de 2 mm), a lo largo de la celda.
  - b) Se colocó rejilla de acero sobre el relleno.
  - c) Se colocó el agua (solvente) en el fondo de la celda.
  - d) Se dosificó el soluto coloreado (puro) sobre el solvente.
- Prueba N° 13. Prueba cuantitativa. Evaluación de distribución de la concentración.
  - a) Se colocó relleno pyrex (anillos doble de 2 mm), a lo largo de la celda.

- b) Se coloca rejilla de acero sobre el relleno.
- c) Se colocó el agua (solvente) en el fondo de la celda.
- d) Se dosificó el soluto puro no coloreado sobre el solvente.
- e) Transcurridas cuatro (4) horas, se sacan muestras en la región del soluto (se utilizaron cuatro jeringas de aguja larga), se ingresa en la celda por el tope de ella.
- Prueba N° 14. Prueba cuantitativa. Evaluación de distribución de la concentración (este se evaluó con acetona).
  - a) Se colocó relleno pyrex (anillos doble de 2 mm), a lo largo de la celda.
  - b) Se coloca rejilla de acero sobre el relleno.
  - c) Se colocó el agua (solvente) en el fondo de la celda.
  - d) Se dosificó el soluto puro no coloreado sobre el solvente.
  - e) Transcurridas cuatro (4) horas, se sacan muestras en toda la región de difusión (se utilizaron cuatro jeringas de aguja larga), se ingresa en la celda por la pared lateral a través de los orificios destinados para tomar la muestras.
  - f) Se analizan las muestras en refractómetro de Abbe.
- Prueba N° 15. Prueba cuantitativa. Evaluación de distribución de la concentración.
  - a) Se colocó relleno pyrex (anillos doble de 2 mm), a lo largo de la celda.
  - b) Se coloca rejilla de acero sobre el relleno.
  - c) Se colocó el agua (solvente) en el fondo de la celda.
  - d) Se dosificó el soluto diluido al 20% en peso no coloreado sobre el solvente.
  - e) Transcurridas cuatro (4) horas, se sacan muestras en toda la región de difusión (se utilizaron cuatro jeringas de aguja larga), se ingresa en la celda por la pared lateral a través de los orificios destinados para tomar la muestras.
  - f) Se analizan las muestras en refractómetro de Abbe.

Para la experimentación final se procedió de la siguiente manera:

- a) Se ubicaron los compuestos o soluciones a estudiar.
- b) Se midió la concentración inicial (con refractómetro)
- c) Se midió y se registró viscosidad del solvente



- d) Se cargó la celda con compuestos o soluciones A y B.
- e) Al término de la dosificación de compuesto A en B se inicializó cronómetro.
- f) Se realizó muestreo en todo el trayecto de difusión y en diferentes tiempos.
- g) Se midió y se registró las concentraciones correspondientes para cada tanda de muestra.

Para medir la concentración de las soluciones por la técnica de refractometría; fue necesario construir curvas de calibración: índice de refracción vs. concentración para los compuestos en estudio.

A partir de los datos obtenidos se estimó la difusividad experimental por intermedio de ecuación (35) o (36) según sea el caso, se utiliza también tabla 4.

A través de las correlaciones empíricas para soluciones diluidas no electrolíticas, ecuación de Wilke – Chang y ecuación de Siddiqui-Lucas, se calcula el coeficiente de difusividad teórico, ecuaciones (28) y (29).

El formato de las tablas para datos experimentales es como sigue:

Tabla N° C. Parámetros constantes.

Constante del viscosímetro	Presión atmosférica, P (kPa)	Temperatura ambiente, T(K)

Tabla N° D. Datos fisicoquímicos

	Elemento N° 1	Elemento N° 2
Peso de picnómetro lleno (kg)		
Peso de picnómetro vacío (kg)		
Volumen del picnómetro (m <sup>3</sup> )		
Tiempo de escurrimiento en el viscosímetro capilar (s)		

Tabla N° E. Concentración inicial de sustancias.

	Elemento N° 1	Elemento N° 2
Concentración inicial, (% peso o índice de refracción )		

Tabla N° F. Datos en la difusión de líquidos.

Longitud de Difusión. x E+02 (m)	Elemento N° 1	Elemento N° 2
	Tiempo total de experimentación (s)	
	CA(t,Z) (% Peso o índice de refracción )	
-1.6		
-1.4		
-1.2		
-1.0		
-0.8		
-0.6		
-0.4		
-0.2		
0.0		
0.2		
0.4		
0.6		
0.8		
1.0		
1.2		
1.4		
1.6		

---

### III.3.3. COEFICIENTE DE TRASFERENCIA DE MASA.

La experimentación en la torre de pared mojada, se realizó como sigue:

Etapas previas:

- a) Se revisó conexión eléctrica.
- b) Se llenó tanque de suministro de líquido.
- c) Se hizo circular caudal de agua, encendiendo bomba.

La experimentación final se realizó de la siguiente manera:

- a) Se revisó conexión eléctrica.
- b) Se llenó tanque de suministro de líquido.
- c) Se midió y registró: concentración, densidad y viscosidad cinemática inicial del líquido.
- d) Se ajustó presión de gas de entrada a 20 psig (se hace con válvula reguladora).
- e) Se hizo circular caudal de agua previamente establecido, encendiendo bomba (observar regularidad de la película descendente).
- f) Se hizo circular flujo de gas previamente establecido.
- g) Se esperó hasta observar condiciones estacionarias (2 minutos).
- h) Se midió y registró en régimen continuo: temperaturas en termómetros seco y húmedo, presión y temperatura en el laboratorio.
- i) Se varió el caudal de gas a otro valor y volver al paso g.
  - Para la experimentación a otra temperatura se procedió como sigue:
    - a) Se hizo circular flujo de gas previamente establecido.
    - b) se encendió equipo de calentamiento y se vuelve al paso g)

A partir de los datos obtenidos y con aplicación de las ecuaciones (47) y (57) se estimó el coeficiente de transferencia de masa del lado de la fase gas, por balance de masa y por correlación de Sherwood respectivamente.

Los datos experimentales se asientan en el siguiente formato de tabla.

Tabla N° G. Datos experimentales para coeficientes de transferencia de masa.

Parámetros	Lado del Gas				Lado del líquido			
	1A	2B	3C	4D	1A	2B	3C	4D
Prueba Número								
Temperatura en tope (K)	-	-	-	-				
Temperatura en fondo (K)	-	-	-	-				
Temperatura bulbo seco en fondo, (K)					-	-	-	-
Temperatura bulbo húmedo en fondo (K)					-	-	-	-
Temperatura bulbo seco en tope, (K)					-	-	-	-
Temperatura bulbo húmedo en tope, (K)					-	-	-	-
G X E+05 (SC) (kmol/s)					-	-	-	-
L x E+04 (m <sup>3</sup> /s)	-	-	-	-				

### III.4. ELABORACIÓN DE LOS MANUALES DE OPERACION DEL LOS EQUIPOS.

El procedimiento experimental formal y la estrategia operacional para la manipulación de los módulos de práctica se dan en el manual de operación del equipo. Aunque son dos prácticas distintas; determinación de coeficientes de transferencia de masa y determinación coeficientes de difusión (gases y líquidos), la estructuración del cuerpo del manual es el mismo. Consta de las siguientes partes:

- **Objetivos:** involucra los aspectos que se deben cubrir y desarrollar en la realización de la experiencia práctica.
- **Marco teórico:** se presenta un esbozo de todos los conceptos y fundamentos básicos necesarios del tema.

- Descripción del equipo: se hace una descripción del equipo a fin de familiarizar al usuario con todo el circuito de operación.
- Procedimiento experimental: se especifica y se reglamenta la manipulación y modo de proceder en la realización de las experiencias prácticas.
- Tablas de datos: se presenta el formato de las tablas, donde se deben asentar los datos obtenidos de las experiencias realizadas:
- Cálculos tipo: se presenta uno o varios modelos de cálculo tipo.

---

## **IV. RESULTADOS.**

A continuación se presentan los resultados obtenidos para todas las etapas señaladas en la metodología de trabajo.

### **IV.1. DISEÑO DE LOS EQUIPOS PARA EL ESTUDIO DE TRANSFERENCIA DE MASA.**

De acuerdo a los criterios reseñados en la metodología, y en base a los resultados previos obtenidos en la sección de pruebas experimentales se presentan las características y especificaciones de los equipos a construir.

#### **IV.1.1. DIFUSIVIDAD EN GASES.**

Los diámetros seleccionados, así como los compuestos más adecuados a utilizar con esa geometría son los siguientes:

Diámetro de tubo para celda (mm)	2.8 y 10
Compuestos	Metanol, n-hexano, acetona

En función a lo requerido para los objetivos propuestos y a lo reflejado en la tabla anterior, la configuración final del equipo es la siguiente (ver figura 12 y tabla 6).

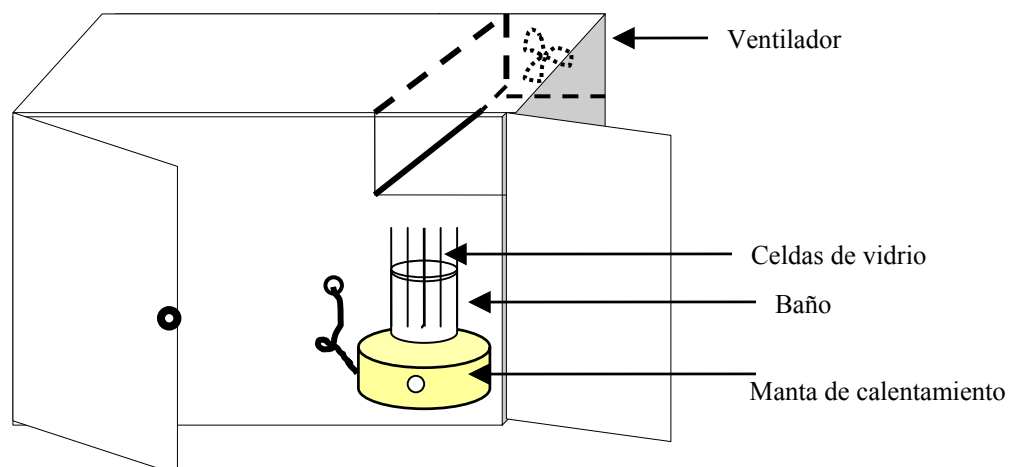


Figura N° 12. Esquema de módulo construido para determinación experimental de difusividad en gases.

La tabla 6 muestra las especificaciones finales del equipo para evaluar experimentalmente la difusividad en gases.

Tabla N° 6. Características técnicas del equipo.

Caja de confinamiento en madera y fórmica blanca, de: 0.40 m diámetro x 0.50 m altura x 0.60 m
Ventilador en hierro. para proporcionar una corriente suave de aire de: 0.3 (HP)
Manta de calentamiento en hierro y aluminio de: 200 (W)
Baño de inmersión (beacker de Vidrio borosilicato) de: 500 (cm <sup>3</sup> )
Celdas de Arnold (vidrio borosilicato) de: 2.8 mm x 100 mm. 10 mm x 100mm
Termómetro de vidrio escala 0-100 °C
Compuestos para practicas : n-hexano, metanol, acetona .Grado P.a

#### IV.1.2. DIFUSIVIDAD EN LÍQUIDOS.

En base a los resultados de las pruebas experimentales cualitativas y cuantitativas preliminares, obtenidas con la celda de material acrílico, la configuración final del equipo y las especificaciones se dan a continuación.

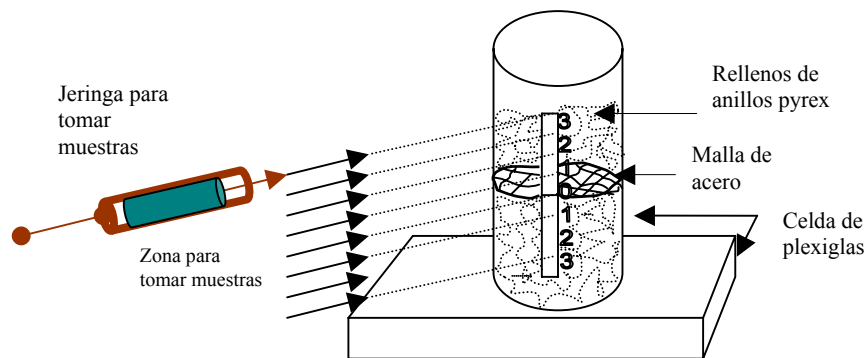


Figura N° 13. Esquema de celda construida para determinación experimental de difusividad en líquidos.

Tabla N° 7. Características técnicas del equipo.

Celda de 0.044 m diámetro x 0.15 m altura x 0.0025 espesor en Polimetacrilato de metilo (plexiglás)
Jeringa (tipo para insulina)
Relleno Anillos dobles de 2 mm (pyrex)
Mesón de soporte de la celda en hierro
Compuestos: Agua, metanol, etanol, sacarosa, acetona



### IV.1.3. COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE MASA.

La disposición final para este equipo se proporcionan en el esquema de la figura 14 y las especificaciones se dan en la tabla 7

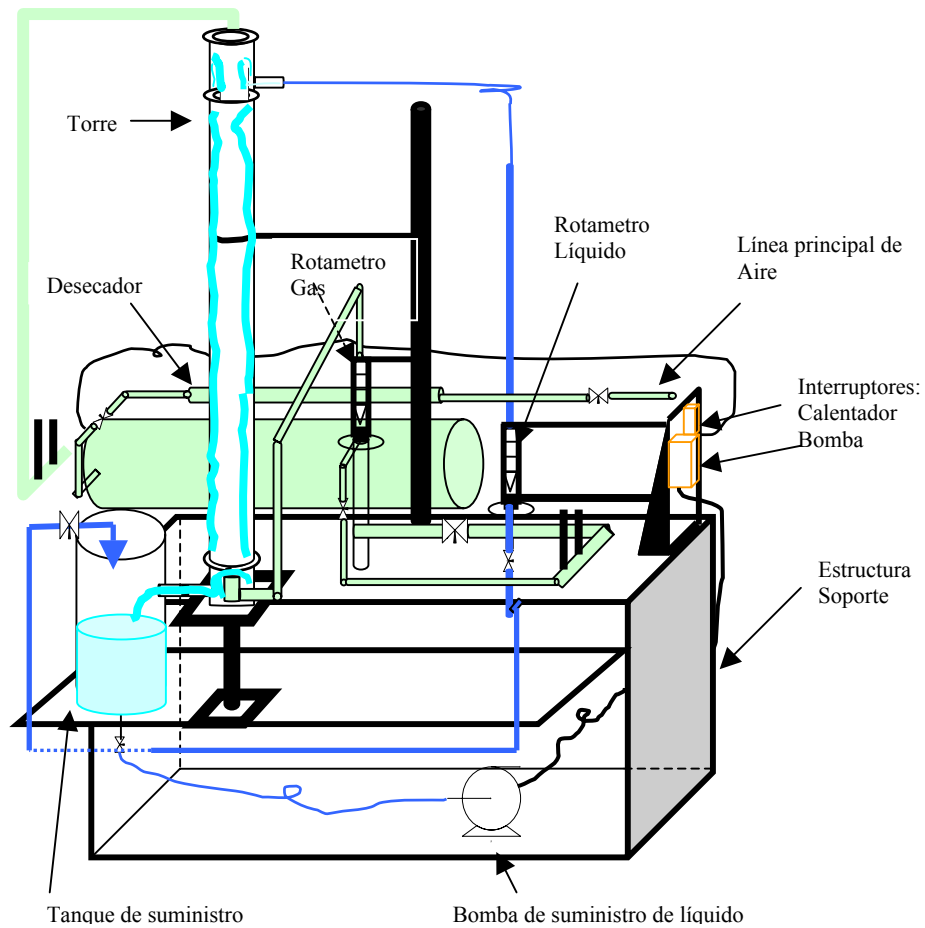


Figura N° 14. Esquema de equipo para la determinación de coeficientes de transferencia de masa lado gas.

Tabla N° 8. Características técnicas del equipo.

Torre de vidrio de 0.051 m diámetro x 1 m altura x 0.0025 m espesor
Tanque de vidrio de 0.12 m diámetro x 0.30 m altura x 0.005 m espesor
Bomba centrífuga de 0.5 HP de potencia y alimentación 120 V.
Tanque pulmón para el aire de 0.20 m diámetro x 0.40 m altura x 0.0025 m espesor en hierro.
Rotámetro para gases de capacidad máxima 4.34 SCFM.
Rotámetro para líquidos de capacidad máxima 650 lts/h.
Calentador de resistencias de 3000 W .
Válvulas, tuberías, mangueras
Termómetros tipo termocupla escala de 0-100 °C

#### **IV.2. CONSTRUCCIÓN Y PUESTA EN MARCHA DE LOS EQUIPOS.**

Con soporte en la metodología y solventando lo concerniente al suministro de los materiales (ver tablas del número 9 al 11), se construyeron los siguientes equipos:

- Módulo para la determinación de difusividades de un componte en mezcla binaria gaseosa.
- Celdas cilíndricas de plexiglás: para determinación de difusividades de un componte en mezclas líquidas.
- Columna de pared mojada: para determinación de coeficiente de transferencia de masa en fase gaseosa.

#### IV.2.1. EQUIPO PARA DETERMINACIÓN DE DIFUSIVIDADES EN MEZCLA GASEOSA.

Tabla N° 9. Lista de materiales necesarios A.

Material, o equipo	dimensiones	Cantidad	En existencia Si/no/ % del total necesario	Adquirir por compra Si/no/%	Construir o adaptar	comentarios
Tubos de vidrio para celdas de Arnold	De 2.8 mm de diámetro.	7 unidades	No	Si	trabajo de adaptación en taller de vidrio	Se utilizaran pipeta de 10 cm <sup>3</sup>
	De 10 mm	7 unidades	no	si		
Pega	-	2 unidades	no	si		Epóxidica, silicona,
termómetros	(0-100 °C)	1	si	-	-	Termómetro ecológico
módulo	Aproximadamente 50 cm x 50cm x 70 cm	1	no	si	Construir	En madera
Ventilador	De 4 a 10 pulgadas de diámetro	1	no	si	Adaptar	Pequeño
Baño de calentamiento con termostato	El más pequeño del mercado, (1 litro de capacidad)	1	no	si	Adaptar	-

Se construyó un módulo pequeño en madera y enchapado en formica blanca, con una distribución de espacio tal que permite determinar la difusividad de cuatro componentes puros al mismo tiempo, (ver figura 15); la batería de cuatro celdas de vidrio calibrada en nivel y volumen de líquido, está ventilada en su parte superior y se encuentra inmersa en un baño, el cual está conformado por una manta con un control de termostato y un beacker de 500 cm<sup>3</sup>; la temperatura en las celdas de evaporación se puede variar y controlar por medio de este sistema, así se podrá estimar la difusividad a distintas temperaturas.

La mitad de la cara lateral derecha del cajón es de vidrio y permite visualizar su interior con la ayuda de un lente de aumento pegado en esa pared; de esta forma se puede ver con más detalle el descenso de nivel en las celdas desde afuera.



Figura N° 15. Foto de módulo construido para determinación experimental de difusividad en gases.

En las corridas para evaluar el desempeño se detectó lo siguiente:

- Aunque es difícil ajustar el equipo para lograr una temperatura específica en el baño térmico, debido a que el variador de potencia eléctrica en la manta es poco preciso, se pueden realizar mediciones en un rango amplio de temperaturas ( 35-70 °C ).
- El capilar de 2.8 cm. o celda tiende a dar problemas en el llenado de la misma, no es un problema grave, pero en algunas ocasiones se quedaron burbujas atrapadas.

Las siguientes observaciones y recomendaciones deberán tomarse en cuenta:

- Efectué el llenado de la celda de menor diámetro con una jeringa y en forma lenta.
- Adquirir a futuro un baño con termostato mas preciso a fin de evaluar la difusividad a distintas temperaturas con confiabilidad.
- Utilizar dos cronómetros se puede dar el caso de que uno de ellos se averíe durante la experiencia.
- Es recomendable que sea un sólo estudiante quien mida para disminuir los errores asociados a la manipulación.
- Experimentar con compuestos con una presión de vapor mayor de 25 KPa a fin de poder generar suficientes datos experimentales en el tiempo estipulado para la realización de la práctica.

#### IV.2.2 EQUIPO PARA DETERMINACIÓN DE DIFUSIVIDADES EN MEZCLA LÍQUIDA.

Tabla N° 10. Lista de materiales necesarios B.

Material, o equipo	dimensiones	Cantidad	En existencia Si/no/ % del total necesario	Adquirir por compra Si/no/%	Construir o adaptar	comentarios
Tubo de plexiglás	De 4 a 5 cm. de diámetro interno x 100 cm. de largo	1	no	si	-	-
Pega	-	4 unidades	no	si		Epóxica, silicona,
Mesón	25 cm. X 35 cmx120 cm.	1	no	no	construir	Se construirá en hierro
relleno	Aros de 2 mm	2 Kg.	si	-	-	Anillos pyrex
Malla de acero	Círculos de 4 cm. de diámetro	400 cm <sup>2</sup>	si	-	-	-
Jeringas	1 ml	12	no	si	-	Tipo para insulina

El equipo es sencillo, y por ser para fines didácticos fue construido en un material transparente acrílico (plexiglás) (ver figura 15), la celda está constituida por un cilindro montado en una base rectangular con soporte y mesa de apoyo, al cilindro se le ha abierto un canal en su parte central; el canal está cubierto con un material que funciona como sello

(cinta adhesiva y silicona), el cual permite realizar la toma de muestras en el tramo de longitud donde sucede la difusión (esta calibrado en mm). El dispositivo de eliminación de mezclado inicial lo conforma una porción de relleno de vidrio pyrex (aros dobles) y una malla de acero inoxidable.

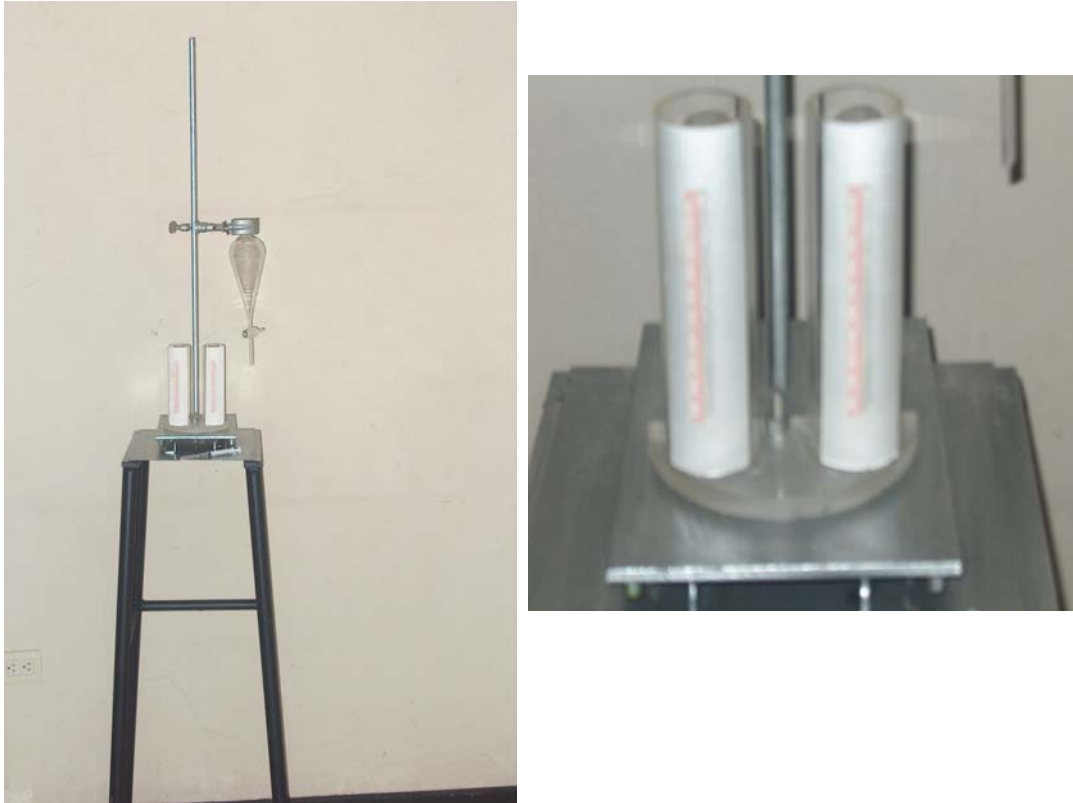


Figura N° 16. Foto de celda construida para determinación experimental de difusividad en líquidos.

En la evaluación del desempeño se observó lo siguiente:

- La base tipo mesa que soporta la celda debe colocarse en un piso nivelado, para evitar movimientos y balanceo.
- La cantidad de muestra a extraer debe ser pequeña (aproximadamente (0.012 ml), con la jeringa para insulina se puede hacer sin ninguna complicación.
- La manera como se va a introducir el relleno en la celda debe cambiar levemente, en el manual de la práctica se explica con mayor detalle.

### IV.2.3. EQUIPO PARA DETERMINACIÓN DE COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE MASA.

Tabla N° 11. Lista de materiales necesarios para construcción C.

Material, o equipo	dimensiones	Cantidad	En existencia Si/no/ % del total necesario	Adquirir por compra Si/no/%	Construir o adaptar comentarios	Material, o equipo
Teflón	-	5 rollos	no	si	-	-
Pega	-	4 Unidades	no	si		silicona,
Conexiones y/o accesorios	½"; 3/8"; 1"	40 unidades	70%	30%		Hierro galvanizado
válvulas	½"; 3/8"; 1"	6	75%	25%		Hierro galvanizado
Niples	½"; 3/8"; 1"	12	25%	75%		Hierro
Soportes menores	variada	Varios	no		construir	En hierro
Estructuras y soportes	variada	varios	90%		10%	hierro
Clavos y tornillos	variada	varios	20%	80%		
pintura		varios	no	100%		
Torre de vidrio	5 cm. 100 cm.	1	si		adaptar	Vidrio pyrex
Distribuidor de fondo	-	1	Si	-	adaptar	-
Distribuidor de tope	-	1	no	-	construir	Acero 316
rotámetros	-	2	si	-	-	cumplen con los requisitos
termómetros	-	6	si	-	adaptar	-
mangueras		3 m	50 %	si	-	-
Bomba	1"	1	si	-	adaptar	centrifuga



El módulo se armó con una estructura metálica que sirve de mesón y soporte a todos los elementos del equipo, (ver figura 17). Para fines docentes el tubo que funciona como torre, el tanque de alimentación y los dos distribuidores de tope y fondo son de vidrio pyrex; para cuantificar los flujos de aire y agua se montaron dos rotámetros de área variable de carcasa metálica y tubo de vidrio; el transporte de las fases por el resto de la instalación se completo con mangueras y tuberías de hierro galvanizado. Todo el conjunto montado necesito quedar bien nivelado para asegurarse de que el líquido bajara desde el distribuidor pegado a la pared forma de película uniforme.

Para cambiar las condiciones y trabajar el sistema a otra temperatura de saturación, se acondiciona el aire de entrada con un calentador de resistencias; para estimar la humedad de entrada y de salida en la columna, se colocaron dos pares de termómetros (para medir temperatura en seco y en húmedo).



Figura N° 17. Foto de equipo para la determinación de coeficientes de transferencia de masa lado gas.

Una vez concluida la construcción y armado se realizaron algunas corridas a fin de corregir fugas y fallas en general.

Las adaptaciones y cambios realizados fueron los siguientes.

- a) En algunos tramos se cambiaron tuberías de hierro por mangueras de tygon, son fáciles de manipular y se adaptan mejor en posiciones difíciles.
- b) Se rediseñó circuito para montar recirculación, esto con el fin de proteger la bomba.
- c) Se cambió válvula reguladora de presión de aire, la primera que se montó se dañó.
- d) La instalación original del sistema de desecación fue cambiado; en principio se dejó montado semi- fijo, luego se instaló de modo de que pueda ser removido con facilidad. El desecante requiere ser activado o cambiado con frecuencia.
- e) Se reparó fuga de aire persistente en el tambor calentador.

### IV.3. REALIZACIÓN DE PRUEBAS EXPERIMENTALES.

#### IV.3.1. DIFUSIVIDAD EN GASES.

- Realización de pruebas experimentales.

La tabla presentada a continuación, contiene los resultados preliminares de los descensos de nivel (unidades de descenso, con una apreciación en el tubo de 1.52 mm) por evaporación de los distintos compuestos, en un tiempo de 4 horas.

Tabla N° 12. Resultados previos en mezclas de gases.

Compuestos	Diámetro del tubo (mm)				
	<b>2</b>	<b>2.8</b>	<b>4</b>	<b>6</b>	<b>10</b>
Etanol	5	7	8	8	9
metanol	6	7	9	9	10
propanol	4	4	5	5	6
Acetona	9	10	10	12	13
n-hexano	7	9	10	10	11
n-heptano	3	4	4	5	6

Los mejores resultados se obtienen para el diámetro mayor (10 mm), aunque se observa más diferenciación por el grado de volatilidad que por efecto del cambio de diámetro. La velocidad de evaporación no parece perturbarse por este hecho; está es una observación cualitativa basada en los resultados de la tabla 11, porque para evaluar cuantitativamente el efecto de cambio de diámetro en el coeficiente de difusividad se requiere de un estudio más detallado.

Con base a lo puntualizado en la metodología y a los resultados de la tabla 11, los diámetros y compuestos seleccionados son:

Diámetro de tubo para celda (mm)	2.8 y 10
Compuestos	Metanol, etanol, n-hexano, acetona

- Resultados finales.

La gráfica 17 muestra parte de los resultados experimentales en el estudio de difusividad en gases.

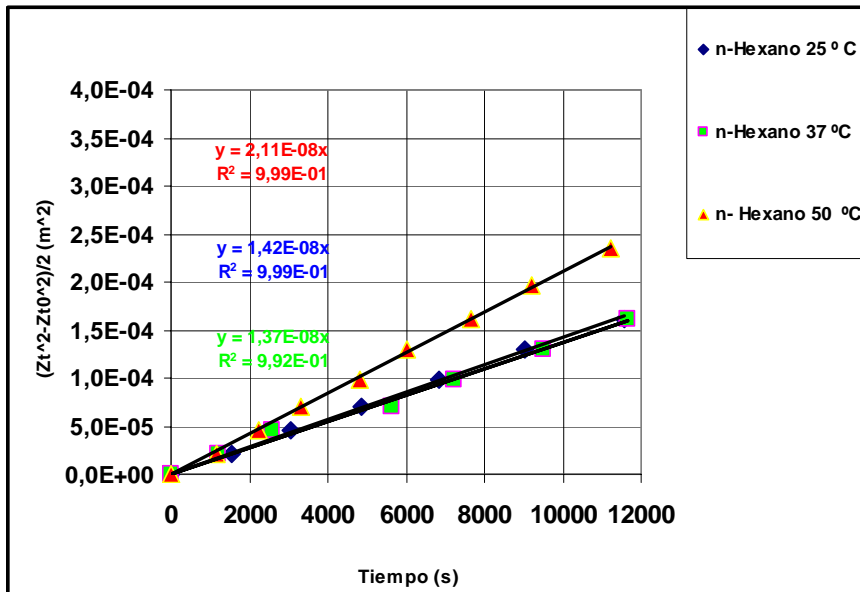


Figura N° 18. Difusión de n-hexano en aire a tres temperaturas distintas.

Según el modelo matemático planteado para caracterizar el fenómeno de difusividad en gases (ecuación 26) y con un análisis cualitativo preliminar de las graficas 17 a la 19, el tratamiento del conjunto de datos experimentales se realizó con el método de mínimos cuadrados. Posteriormente el factor  $R^2$  indicó que los datos efectivamente se ajustan a una recta, por lo tanto el comportamiento es lineal y se ajusta al modelo propuesto.

Cuando se comparan los resultados experimentales con los calculados por las ecuaciones empíricas (ver tabla 11), no se aprecia una variación sistemática de las desviaciones con la temperatura, aunque a 50 °C se obtiene la mayor desviación. Las ecuaciones teórico-empíricas predicen un aumento de 8% para la difusividad cuando la variación de temperatura absoluta es del orden de 10%, experimentalmente sucede lo inverso y no se aprecia un incremento de las desviaciones por este hecho.

Tabla N° 13. Resultados experimentales finales en mezcla de gases.

	n-Hexano		
	Temperatura, T (K)		
	298	310	323
Pendiente, S XE+08 (m <sup>2</sup> /s)	1.42	1,37	2,11
Difusividad experimental, DAB exp. X E+ 06 (m <sup>2</sup> /s)	11.1	6.51	5.18
Difusividad teórica, DAB teo X E+ 06 (m <sup>2</sup> /s) Fuller, Schettler, y Giddings	8.38	8.98	9.65
Difusividad teórica, DAB teo X E+ 06 (m <sup>2</sup> /s) Hirschfelder-Bird-Spotz:	8.22	8.80	9.44
% Error por Fuller, Schettler, y Giddings	<b>32</b>	<b>28</b>	<b>46</b>
% Error por Hirschfelder-Bird- Spotz:	<b>35</b>	<b>26</b>	<b>45</b>

Una premisa en el presente trabajo fue experimentar con compuestos con una presión de vapor elevada fin de asegurar buenos resultados, pero lo obtenido nos dicen que es un aspecto que no se puede tomar a priori si el experimento no esta bien controlado.

En resumen, las desviaciones encontradas entre las difusividades experimentales y las dadas por las correlaciones de referencia (ecuaciones 19 y 21), se atribuyen a los errores asociados al método en sí; de hecho, todas las correlaciones teóricas-empíricas son restrictivas en cuanto a propiedades y condiciones de experimentación; por otro lado, como ya se había comentado, el modelo adoptado para cuantificar experimentalmente la difusividad también tiene sus propias limitaciones: se plantearon los cálculos suponiendo la hipótesis de que el régimen existente sólo se aproxima al estado estacionario (pseudo- estacionario) ; la difusión es a través de una película de gas estancado y el diámetro de la celda debe ser pequeño para evitar la convección en el interior de ella.

#### IV.3.2. DIFUSIVIDAD EN LÍQUIDOS.

- Resultados preliminares

Los resultados experimentales preliminares obtenidos con la celda de material acrílico, según las pruebas planteadas en la sección de metodología, se dan a continuación.

Tabla N° 14. Resultados experimentales preliminares en mezcla de líquidos.

Número de prueba	Resultado de las pruebas preliminares.
1	Se observa mezclado inicial de las soluciones.
2	Sólo se observa mezclado inicial en las inmediaciones de la frontera de contacto.
3 , 4 y 5	Se observa mezclado rápido por diferencia de densidades
6	Sólo se observa mezclado inicial en las inmediaciones de la frontera de contacto.
7 y 8	Se observa mezclado por diferencia de densidades
9	Se observa poco mezclado inicial Se observa bien el fenómeno difusivo
10	Se observa poco mezclado inicial en las inmediaciones de la frontera de contacto.
11	Se observa menos mezclado inicial que en prueba 10, pero cualquier otro movimiento leve perturba todo el resto del sistema
12	Excelente resultado cuando se utiliza el relleno de pyrex en cuanto a mezclado inicial y perturbación del sistema.
13	Se hace engorroso sacar las muestras por el tope de la celda, y no se tiene precisión.
14	Se taladró en el lado lateral de la celda cada 0,5 cm. para sacar las muestras. Con esto mejoró el ingreso a la celda para la toma de muestras, pero el espaciamiento entre cada toma es muy grande.

Como complemento de los resultados mostrados en la tabla anterior se desprende lo siguiente:

- a) Fue necesario ajustar las dimensiones de la celda por que el gasto de reactivos para ese tamaño de celda fue excesivo.
  - b) La solución de mayor densidad debe colocarse en el fondo de la celda y la de menor densidad debe dosificarse después, si se invierten se provocara transferencia de masa no difusiva, afectando los resultados.
  - c) El relleno pyrex y la malla de acero funciona muy bien para evitar el mezclado de las soluciones.
  - d) La concentración inicial de la solución con soluto debe estar sobre el 20 % en peso del soluto.
- Resultados finales.

En la figura 19 la gráfica muestra la distribución de concentración en el tiempo para tres compuestos diluidos en agua.

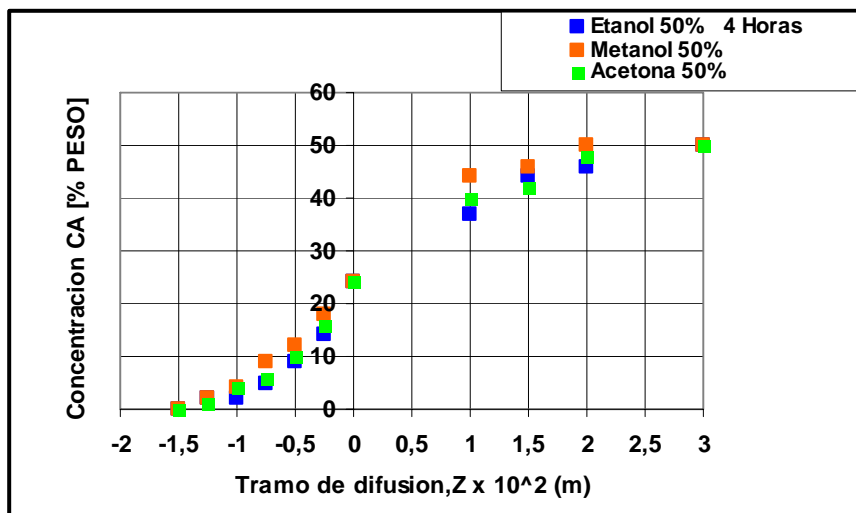


Figura N° 19. Difusión de etanol, metanol y acetona en agua.

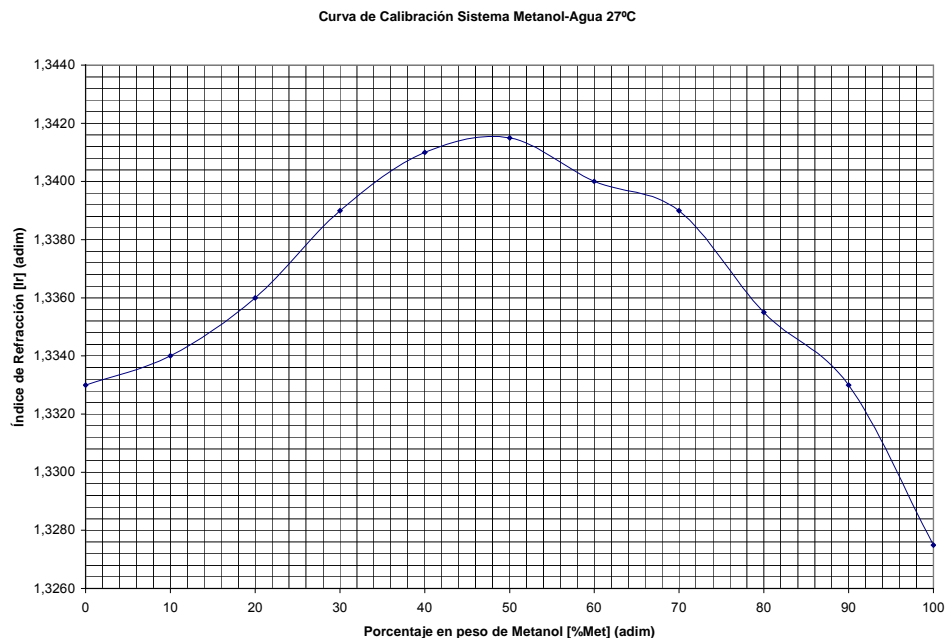
Las curvas de distribución experimentales del soluto A en la región de difusión, figuras 19, 24, 25 y 26, exhiben el comportamiento esperado; la distribución de los datos es normal o de gauss, (ver curva teórica en figura N° 8).

El modelo utilizado y las ecuaciones empíricas de cotejo (Wilke – Chang; Siddiqui-Lucas), restringen la experimentación a trabajar sólo con soluciones diluidas. No fue fácil experimentar con soluciones diluidas, pues el principal problema es medir la evolución de las moléculas del soluto en un sistema de baja movilidad de las especies, más aun para un tiempo estipulado para las prácticas tan corto (4 horas). Para resolver el problema fue necesario partir de un sistema no diluido (soluciones al 50 % en peso, puesta en contacto con agua pura) y atribuir a la otra región de confinamiento en la celda, la calidad de diluida, para poder utilizar el modelo propuesto y suponer los resultados como valederos. Esta hipótesis tiene soporte en los resultados, por que cuando revisamos la composición promedio en la celda del lado del solvente (región de la celda donde difunde el soluto), cuando termina el experimento, es de alrededor de 8%.

Se probaron soluciones al 50% y 100%, también se trabajó con una solución de sacarosa al 14% en peso. Los resultados expuestos en las tablas 22 y 23 (no tomando en cuenta los del etanol y metanol para 100% por presentar errores demasiado elevados) muestran como la difusividad exhibe desviaciones menores cuanto más está diluido el soluto. A 50 % de dilución para los alcoholes, acetona y para la solución de sacarosa al 14% se alcanzaron los mejores resultados. La ecuación de Wilke – Chang es la que presenta menos desviación respecto a los datos experimentales (ver tabla 22 y 23).

Tabla N° 15. Resultados en la experimentación con mezclas líquidas.

	Mezcla (50 %-100 %) Etanol- Agua	Mezcla (50 %-100 %) Metanol- Agua	Mezcla (50 %-100 %) Acetona- Agua
	4 Horas de difusión	4 Horas de difusión	4 Horas de difusión
Difusividad experimental, $D_{AB,exp} \times E+09 \text{ (m/s}^2\text{)}$	1.2	1.82	1.33
Difusividad teórica, $D_{AB,teo} \times E+09$ Wilke – Chang	1.2	1.6	1.1
Difusividad teórica, $D_{AB,teo} \times E+09 \text{ (m/s}^2\text{)}$ Siddiqui-Lucas	0.96	1.19	0.87
% Error Wilke – Chang	0	14	21
% Error Siddiqui-Lucas	25	53	53



Fuente: J.Griman, (2007)

Figura N° 20. Curva de calibración

#### IV.3.3. COEFICIENTE DE TRASFERENCIA DE MASA.

- Resultados previos.
  - a) No se pudo utilizar la torre 9 cm. x 150 cm., faltó un distribuidor de fondo de ese diámetro.
  - b) En la torre de 2.54 cm. x 150 cm. no se pudo controlar la caída del líquido por su pared, se sustituyó por la torre de 5 cm. x 100 cm.
  - c) Se pudo ajustar completamente, se logró observar regularidad en la película de líquido descendiente.
- Resultados finales.

La experimentación no fue extensa y la humedad inicial en el gas estuvo muy alta, pues se presentó problemas con el desecante (se saturó de humedad), sin embargo se pudieron obtener datos confiables en las tres corridas efectuadas para un caudal constante de líquido de  $3 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ . El primer caudal de gas utilizado, fue del 70% del máximo establecido según los equipos disponibles; se retiró un 15% de humedad. En la segunda corrida se trabajó con un caudal de gas de 90%, con esto no se apreció variación de humedad con relación a la primera experiencia. Para la tercera y última valoración el gas fue calentado a 45% y con un caudal de



gas igual al de la primera parte, se obtuvo mayor retiro de humedad (un 23 % en relación a la inicial).

Para las condiciones de operación en las cuales se evaluó el equipo, los datos experimentales arrojaron desviaciones del orden de 27 %.(ver tabla 26).

Tabla N° 16. Resultados para coeficientes de transferencia de masa.

Parámetros	Lado del Gas		
	1A	2B	3C
Prueba Número	1A	2B	3C
número de Reynolds, $Re_G$ (adim)	2690	3477	2222
número de Sherwood, $Sc_G$ (adim)	0.72	0.72	0.88
Coefficiente de transferencia de masa, $k_y \times E+04$ ( $Kmol/ m^2 s F$ molar) por balance de masa	1.6	2.0	1.6
Coefficiente de transferencia de masa, $k_y \times E+04$ ( $Kmol/ m^2 s F$ molar) por ecuación de Sherwood	2.3	2.8	2.0
% Error	30	29	20

#### IV.4. ELABORACIÓN DEL MANUAL DE OPERACION DEL LOS EQUIPOS.

El resultado de esta sección es el manual de operación en sí, se ha editado en un documento aparte.

## V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

- Las metas se cumplieron: diseñar, construir y poner en marcha equipos para la realización de prácticas docentes en transferencia de masa, específicamente para la determinación de difusividades en mezclas de gases y líquidos, y para la determinación de coeficientes de transferencia de masa en fase gas con el sistema agua-aire.
- Los equipos fueron puestos a prueba y validados y aunque para las condiciones puntuales de experimentación se alcanzó una desviación no deseable (sólo en algunos casos), los equipos están a punto y disponibles para establecer las mejores condiciones, a fin de disminuir a su menor expresión los errores y mejorar su desempeño.
- La sencillez de los equipos construidos permite realizar cambios y adaptaciones sin muchos inconvenientes.
- Se cuenta con una herramienta experimental muy sencilla pero efectiva para ahondar e introducir al estudiante de ingeniería química en el estudio de fenómenos de transporte.
- Seguir el procedimiento experimental propuesto en el manual de operación de los equipos, como buena práctica, a fin de evitar o disminuir los errores asociados a la manipulación.
- Respetar las normas de seguridad que se deben seguir en un laboratorio destinado a la docencia, con compuestos químicos involucrados.
- Para investigar y promover mejoras futuras en los equipos montados, se hace necesario destinar un poco más de presupuesto al Laboratorio de Operaciones Unitaria.

## VI BIBLIOGRAFÍA.

- HOLMAN. “Transferencia de Calor”, 8ª Edición, 1998.
- CURTIS F, GERALD. “Análisis Numérico”, 2ª Edición, 1991.
- ABBOTT, VANNESS. “Termodinámica”. Editorial McGraw-Hill, 2ª Edición, 1991.
- J.H.KRASUK. “Transferencia de Masa por Difusión”. 1ª Edición, 2002.
- TREYBAL. “Operaciones de Transferencia de Masa 2/e”. Editorial McGraw-Hill, 2ª Edición, 1980.
- PERRY, ROBERT. “Manual del Ingeniero Químico”. Tomo III, Editorial Española, 3ª edición, 1972.
- BADGER y BANCHERO. “Introducción a la Ingeniería Química”. Editorial McGraw-Hill, 1ª Edición, 1964.
- WELTY, J., C.WICKS y R. WILSON. ”Fundamentos de Transferencia de Momento, Calor y Masa”. Editorial Limusa Wiley, 2004, México, 929 pp.
- USB-UNIVERSIDAD SIMON BOLIVAR. ”Manual División de Estudios Profesionales”, SF.
- KWON, K., T. IBRAIN, Y. PARK y C. SIMMONS. “Inexpensive and Simple Binary Molecular Diffusion Experiments”, Chemical Engineering Education, 36(1), 68(2002).
- <http://html.rincondelvago.com/coeficientes-de-difusion-molecular.html>, Consultada en enero 2007

- NIRDOSH, I, L. GARRED y M. BAIRD. “Low Cost Mass Transfer Experiments. Part 6. Determination of Vapor Diffusion Coefficient”, Chemical Engineering Education, 34(2), 158 (2000).
- RODRIGUEZ, J., V. HENRIQUEZ Y A. MACIAS-MACHIN. “A Simple Experiment for Mass Transfer”, Chemical Engineering Education, 36(2), 156(2002).
- RUIZ. F. y M. OLAYA. “Mass Transfer Experiment”. Determination of Liquid Difusión Coefficients”, Chemical Engineering Education, 36(2), 156 (2002).
- BIRD.” Fenómenos de Transporte”. Editorial Reverte,s.a “ 2ª Edición, 1998.

## ANEXOS.

## ANEXOS A. Difusividad en gases, tablas de datos, resultados y graficas.

Tabla N° 17. Datos producidos en la experimentación para mezcla de gases.

Camino de Difusión Zt (m)	Acetona			n-Hexano			Metanol		
	Temperatura (K)			Temperatura (K)			Temperatura (K)		
	298	310	323	298	310	323	298	310	323
	t(s)	t(s)	t(s)	t(s)	t(s)	t(s)	t(s)	t(s)	t(s)
0,01320	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,01472	1490	911	979	1545	1194	1165	2514	1657	2356
0,01624	2991	2100	2133	3051	2575	2232	5331	6210	4780
0,01776	4476	4640	3197	4846	5655	3315	8706	9340	6941
0,01928	6126	6300	4774	6832	7214	4800	12691	0	10020
0,02080	7941	8115	6025	9025	9484	6030	-	-	-
0,02232	10090	10011	7695	11553	11635	7645	-	-	-
0,02384	12395	-	-	-	-	9204	-	-	-
0,02536	-	-	-	-	-	11220	-	-	-

Tabla N° 18. Parámetros constantes en la celda.

m	Zto(m)
0,00152	0,0132

Donde:

m: Apreciación de la escala graduada en la celda.

Zto: espacio vacío entre el tope de la celda y nivel de líquido en el inicio.

Tabla N° 19. Datos para gráficas.

$\frac{Z_t^2 - Z_{t0}^2}{2}$ XE+05 (m <sup>2</sup> )	Acetona			n-Hexano			Metanol		
	Temperatura (K)			Temperatura (K)			Temperatura (K)		
	298 t(s)	310 t(s)	323 t(s)	298 t(s)	310 t(s)	323 t(s)	298 t(s)	310 t(s)	323 t(s)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	1490	911	979	1545	1194	1165	2514	1657	2356
4	2991	2100	2133	3051	2575	2232	5331	6210	4780
7	4476	4640	3197	4846	5655	3315	8706	9340	6941
10	6126	6300	4774	6832	7214	4800	12691	0	10020
13	7941	8115	6025	9025	9484	6030	-	-	-
16	10090	10011	7695	11553	11635	7645	-	-	-
20	12395	-	-	-	-	9204	-	-	-
23	-	-	-	-	-	11220	-	-	-

Tabla N° 20. Datos de resultados.

	Metanol			Acetona		
	Temperatura, T (K)			Temperatura, T (K)		
	298	310	323	298	310	323
Pendiente, $S \times 10^8 \text{ (m}^2\text{/s)}$	0.75	0.76	0.99	1.60	1.62	1.74
Difusividad experimental, DAB exp. $\times 10^6 \text{ (m}^2\text{/s)}$	26	14.5	7.48	14.20	7.63	3.04
Difusividad teórica, DAB teo $\times 10^6 \text{ (m}^2\text{/s)}$ Fuller, Schettler, y Giddings	18.4	19.7	21.2	11.6	12.4	13.3
Difusividad teórica, DAB teo $\times 10^6 \text{ (m}^2\text{/s)}$ Hirschfelder-Bird-Spotz:	15.95	17.11	18.2	10.7	11	11.3
% Error por Fuller, Schettler, y Giddings	<b>41</b>	<b>26</b>	<b>65</b>	<b>21</b>	<b>39</b>	<b>77</b>
% Error por Hirschfelder-Bird-Spotz:	<b>63</b>	<b>15</b>	<b>59</b>	<b>33</b>	<b>31</b>	<b>68</b>

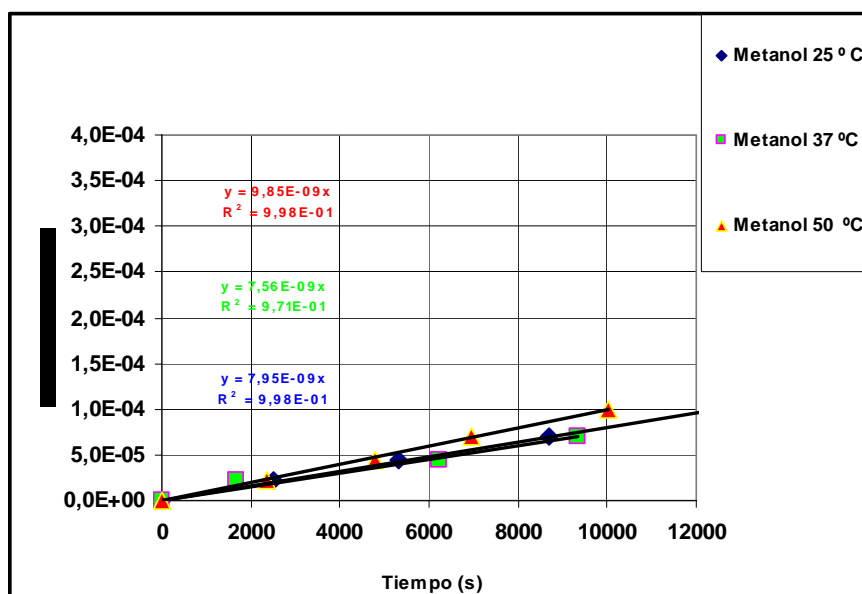


Figura N° 22. Difusión de metanol en aire a tres temperaturas distintas

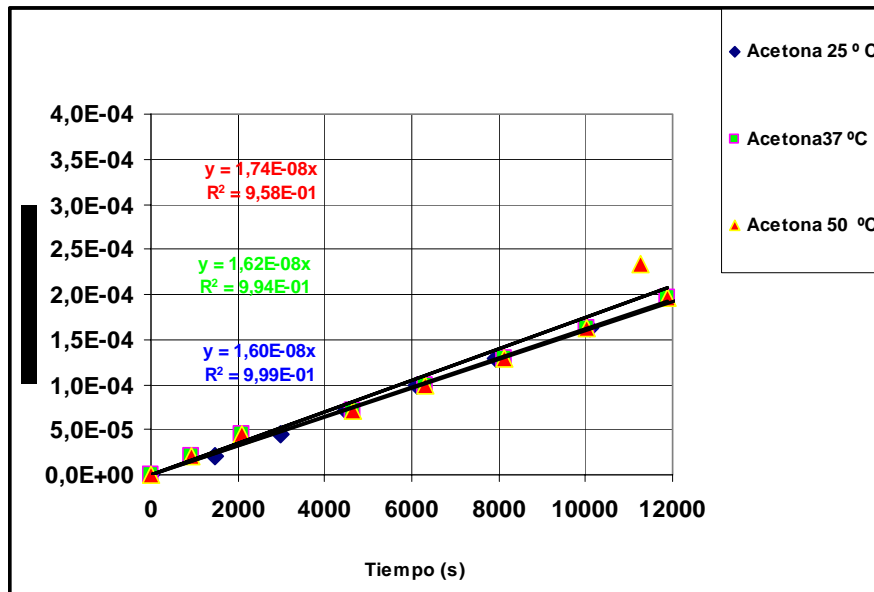


Figura N° 23. Difusión de acetona en aire a tres temperaturas distintas.

**ANEXOS B.** Difusividad en mezcla de líquidos, tablas de datos, resultados y graficas.

Tabla N° 21. Datos de experimentación.

Longitud de Difusión · x E+02 (m)	Etanol al 50 % en Peso	Metanol al 50 % en Peso	Acetona al 50 % en Peso	Etanol, Metanol y Acetona al 20 % en Peso
	Experimento a 298 K			
	14400 (s)	14400 (s)	14400 (s)	14400 (s)
	CA(t,Z) (% Peso)			
-1.5	0	0	0	0
-1.25	2	2	1	0
-1,0	2	4	4	0
-0.75	5	9	6	0
-0,5	9	12	10	0
0.25	14	18	16	0
0	24	24	24	9
0,5	37	44	40	9
1	44	46	42	14
1,5	46	50	48	16
2	50	50	50	20
3	50	50	50	20



Tabla N° 22. Resultados experimentales de difusión en celdas para mezclas líquidas.

Etanol 50%- Agua						
Longitud de difusión x E+02 (m)	4 horas de difusión					
	$(C_A^2 / C_{A0})$	$\text{erfc}(Z) = (C_A^2 / C_{A0})$	Z (m)	$D_{AB}^2 \text{ XE}+09$ (m <sup>2</sup> /s)	$D_{AB}^2 \text{ XE}+09$ (m <sup>2</sup> /s) promedio aritmético	Desviación Estándar XE+09
-1.5	0,00	0,0	3	-	1.2	0.3
-1.25	0,08	0,08	1,25	1,73		
-1,0	0,08	0,08	1,25	1,11		
-0.75	0,20	0,20	0,91	1,17		
-0.5	0,36	0,360	0,65	1,02		
0.25	0,56	0,560	0,35	0.89		
0	0,96	0,960	0	-		
Metanol 50%- Agua						
-1.5	0,00	0,00	3	-	1.82	0.3
-1.25	0,08	0,08	1,25	1,73		
-1,0	0,16	0,16	1,00	1,73		
-0.75	0,36	0,36	0,65	2,31		
-0.5	0,48	0,48	0,52	1,60		
0.25	0,72	0,72	0,25	1,73		
0	0,96	0,96	0	-		
Acetona 50%- Agua						
-1.5	0,00	0,00	3	-	1.33	0.3
-1.25	0,04	0,04	1,5	1,20		
-1.0	0,16	0,16	1,00	1,73		
-0.75	0,24	0,24	0,82	1,45		
-0.5	0,40	0,40	0,59	1,24		
0.25	0,64	0,64	0,32	1,05		
0	0,96	0,96	0,02	-		

Tabla N° 23

Solución de sacarosa						
Longitud de difusión x E+02 (m)	4 horas de difusión					
	CA*2/0CA0	erfc(Z)=(CA*2/CA0)	Z (m)	D <sub>AB</sub> XE+10 (m <sup>2</sup> /s)	D <sub>AB</sub> XE+10 (m <sup>2</sup> /s) promedio aritmético	Desviación Estándar XE+10
-3.0	0	0	3	-	6.2	1.4
-2.0	0	0	3	-		
-1.5	0	0	3	-		
-1.0	0.03	0.03	1.6	6.78		
-0.5	0.21	0.3	0.91	5,24		
0	1.49	1.49	0.0050	-		
Solución de sacarosa						
Longitud de difusión x E+02 (m)	24 horas de difusión					
	CA*2/CA0	erfc(Z)=(CA*2/CA0)	Z (m)	D <sub>AB</sub> XE+10 (m <sup>2</sup> /s)	D <sub>AB</sub> XE+10 (m <sup>2</sup> /s) promedio aritmético	Desviación Estándar XE+10
-3.0	0	0	3	-	5.5	0.4
-2.0	0	0	3	-		
-1.5	0.15	0.15	1.1	5,38		
-1.0	0.3	0.3	0.75	5,14		
-0.5	0.63	0.63	0,35	5,91		
0	1.0	1.01	0	-		

Tabla N° 24 Cálculo de difusividades teóricas

	$\psi$	P <sub>MB</sub> (Kg/Kmol)	v <sub>A</sub>	$\mu_B$	v <sub>B</sub>	D <sub>AB,X</sub> E+09 (m <sup>2</sup> /s) Teórica a 298 K	
						Wilke – Chang 35 % Des	Siddiqui-Lucas 20 % Des
Mezcla Etanol- Agua	2.26	18.02	59	0.001	14.8	1.2	0.96
Mezcla Metanol- Agua	2.26	18.02	37	0.001	14.8	1.6	1.19
Mezcla Acetona- Agua	2.26	18.02	74	0.001	14.8	1.1	0.87
Solución de sacarosa	2.26	18.02	339	0.001	14.8	0.43	0.44

En las figuras 24, 25 y 26 las gráficas muestran la distribución de concentración en el tiempo.

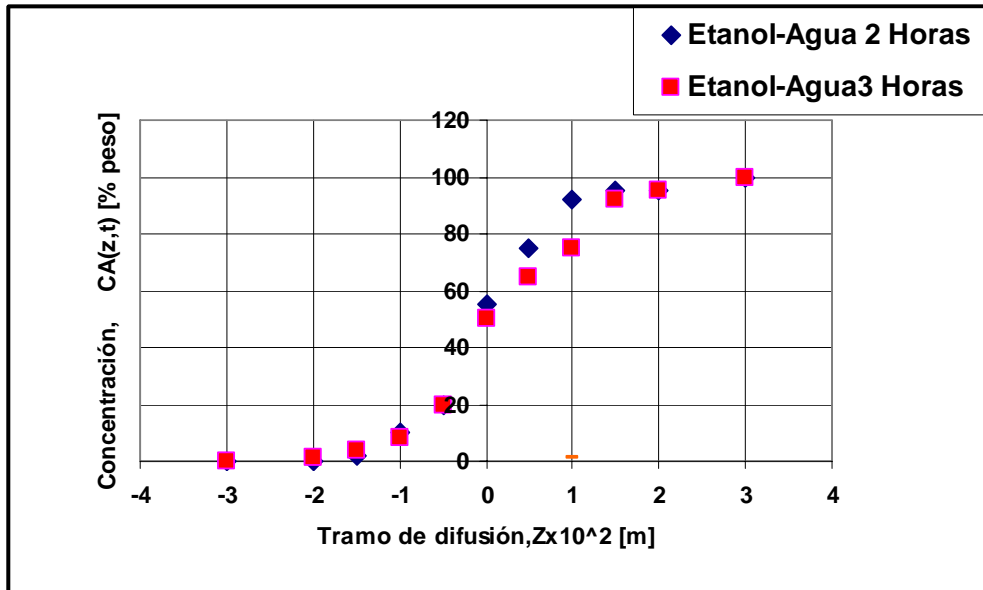


Figura N° 24. Difusión de etanol en agua.

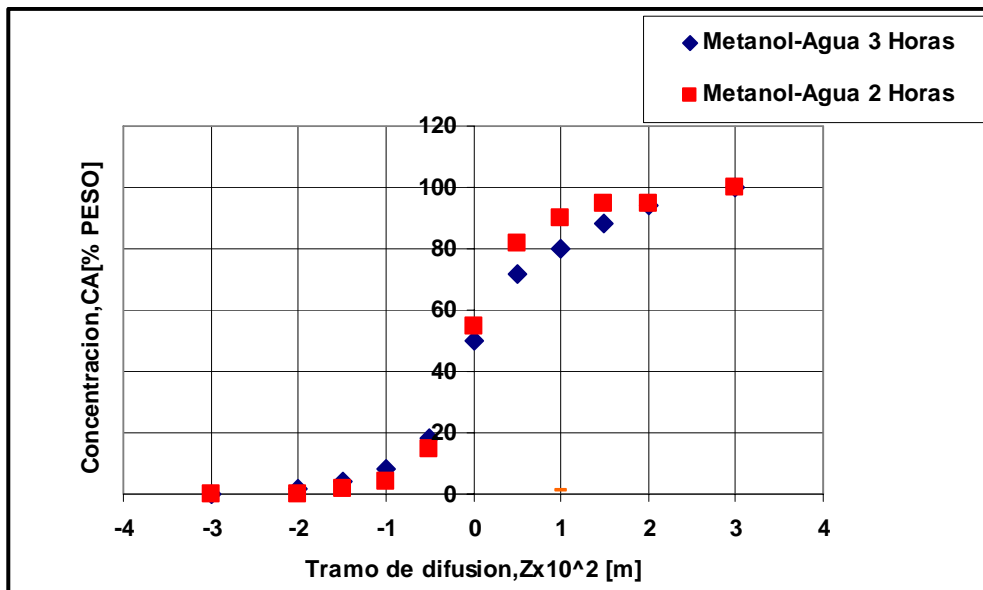


Figura N° 25. Difusión de metanol en agua.

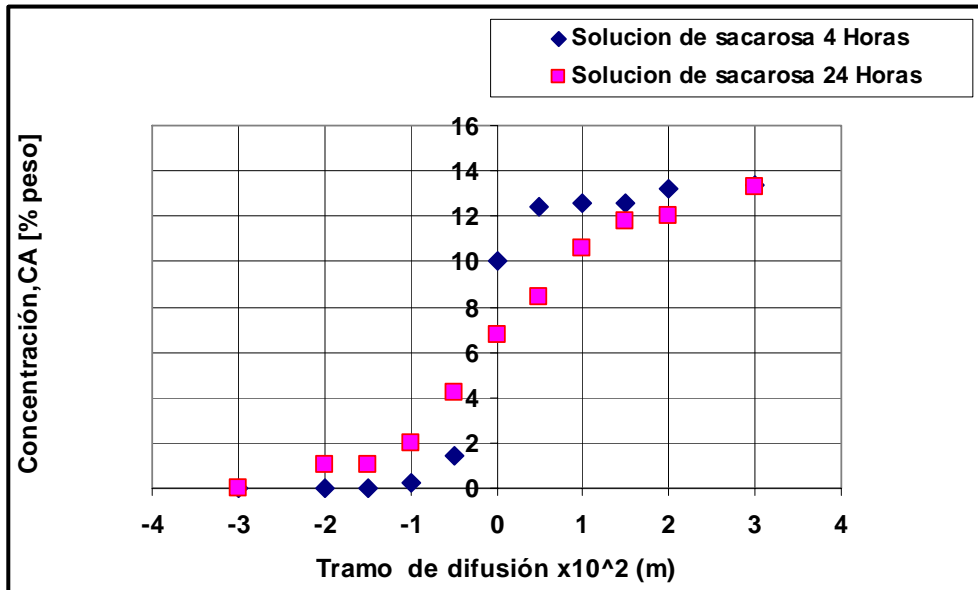


Figura N° 26. Difusión de solución de sacarosa en agua.