



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**FACULTAD DE QUÍMICA**

**TESIS: PROPUESTA DE UN GUIÓN EXPERIMENTAL  
SOBRE BALANCE DE MATERIA EN UN PROCESO DE  
DESTILACIÓN DIFERENCIAL EN EL LABORATORIO DE  
INGENIERÍA QUÍMICA**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERA QUÍMICA**

**PRESENTA**

**SAMANTHA HERRERA CAMACHO**



**MÉXICO, D.F. a Noviembre del 2013.**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

**JURADO ASIGNADO:**

**PRESIDENTE:** Profesor: Antonio Valiente Barderas

**VOCAL:** Profesor: Lucila Cecilia Méndez Chávez

**SECRETARIO:** Profesora: María Luisa Galicia Pineda

**1er. SUPLENTE:** Profesor: Reynaldo Sandoval González

**2° SUPLENTE:** Profesora: Aida Gutiérrez Alejandre

**SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:**

**LABORATORIO DE INGENIERÍA QUÍMICA, FACULTAD DE QUÍMICA.**

**ASESOR DEL TEMA:**

-----

I.Q. María Luisa Galicia Pineda

**SUSTENTANTE:**

-----

Samantha Herrera Camacho

## INDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>2. OBJETIVO.....</b>	<b>3</b>
<b>3. MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>4</b>
<b>3.1 Historia</b>	
<b>3.2 Equilibrio en destilación</b>	
<b>3.3 Temperatura de ebullición de soluciones ideales</b>	
<b>3.4 Proceso de destilación diferencial</b>	
<b>4. DESARROLLO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>16</b>
<b>4.1 Descripción del equipo</b>	
<b>4.2 Mezcla de Monoetilenglicol (MEG)-Agua</b>	
<b>4.3 Mantenimiento mecánico</b>	
<b>5. PRUEBAS EXPERIMENTALES.....</b>	<b>26</b>
<b>5.1 Técnica de operación</b>	
<b>5.2 Diagrama del equipo de destilación diferencial</b>	
<b>5.3 Calibración del medidor de la olla vaporizadora</b>	
<b>5.4 Datos experimentales</b>	
<b>6. CÁLCULOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....</b>	<b>40</b>
<b>6.1 Cálculo de la temperatura de la mezcla</b>	
<b>6.2 Cálculo de los moles finales</b>	
<b>6.3 Cálculo de la composición final del destilado</b>	
<b>7. CONCLUSIONES.....</b>	<b>58</b>
<b>8. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>60</b>

**ANEXOS.....61**

**Anexo 1 Propuesta de gui3n experimental: “Balance de Materia en un proceso de Destilaci3n Diferencial”**

**Anexo 2 Experimentaciones**

**Anexo 3 Toxicidad de la mezcla MEG-AGUA**

## 1. INTRODUCCIÓN

La enseñanza experimental así como las asignaturas teóricas ambas tiene un papel relevante en la formación del Ingeniero Químico, es por eso que el Laboratorio de Ingeniería Química (LIQ) cuenta con equipo suficiente y algunos semejantes a los industriales, siendo el primer lugar en donde el alumno se enfrenta a resolver problemas reales a través de los guiones experimentales que forman parte del programa de cada curso del LIQ y a la aplicación de sus conocimientos adquiridos en sus cursos teóricos.

Dentro de los equipos planta piloto en el LIQ se cuenta con el Módulo de Destilación Brighton Copper, que está construido principalmente en cobre y consta de una olla vaporizadora (alambique) con un volumen de 170 litros y una columna de destilación con 20 platos tipo campana; ambos equipos comparten condensadores, bomba de alimentación y líneas de tuberías de alimentación, destilado y fondos así como los servicios auxiliares de vapor y agua de enfriamiento.

En 1982 cuando se elaboró el primer manual de Laboratorio de Transferencia de Masa se formalizaron los experimentos sobre destilación continua y destilación diferencial en la olla vaporizadora en el Módulo de Destilación antes mencionado, de acuerdo a los requerimientos del plan de estudio y de las técnicas de esa época.

Los experimentos en el Módulo de Destilación quedaron fuera del programa del LIQ en el plan de estudios 2005 vigente, debido al deterioro del equipo y a la falta de presupuesto para su mantenimiento, principalmente para la columna que resultó más afectada.

El presente trabajo de tesis se llevará a cabo en la olla vaporizadora, en la que se realizará la separación de la mezcla de Monoetilenglicol (MEG)- Agua por Destilación Diferencial hasta lograr en la olla una mezcla con una composición del 60% de MEG. El monoetilenglicol es utilizado actualmente en la realización de los

experimentos de Balance de Materia a Régimen Permanente y a Régimen no Permanente, en el Laboratorio de Ingeniería Química I (LIQ I), los residuos de MEG-AGUA generados dentro de estos experimentos se utilizarán en el experimento de Destilación Diferencial propuesto, al mismo tiempo se logrará concentrar los residuos y reutilizarlos en los experimentos de LIQ I antes mencionados.

Se realizarán corridas experimentales en el equipo para encontrar las condiciones de operación y posteriormente plantear el problema que el alumno resolverá mediante la experimentación y la aplicación de sus conocimientos teóricos adquiridos, así como adquirir nuevas habilidades y aptitudes.

Los principales objetivos de este trabajo de tesis son reincorporar el equipo al programa de Laboratorio actual, elaborar un guion experimental y recuperar como ya se mencionó los residuos generados en otros experimentos.

Para lograr estos objetivos es necesario el mantenimiento mecánico del equipo como primera etapa. En el año 2011 el Módulo de Destilación entró al programa PAPIME (Programa de Apoyo a Proyectos para la Innovación y Mejoramiento de la Enseñanza) "Mejora y Actualización en la enseñanza Experimental en el Laboratorio de Ingeniería Química: Módulo de Destilación Continua y por Lotes" con el cual se asignó un presupuesto para llevar a cabo una parte del mantenimiento mecánico del equipo, la segunda parte se concluyó este año con la renovación de dicho proyecto, la rehabilitación del equipo consistió principalmente en: cambio de válvulas, bombas, cambio del sistema de trampeo y el cambio del aislamiento.

La empresa Emerson Process Management tiene un compromiso con el LIQ de colocar instrumentos de medición y control en el equipo, con esto el LIQ contará con un equipo actualizado y moderno de destilación.



## **2. OBJETIVO**

Dentro del trabajo de tesis se encuentran 3 principales objetivos:

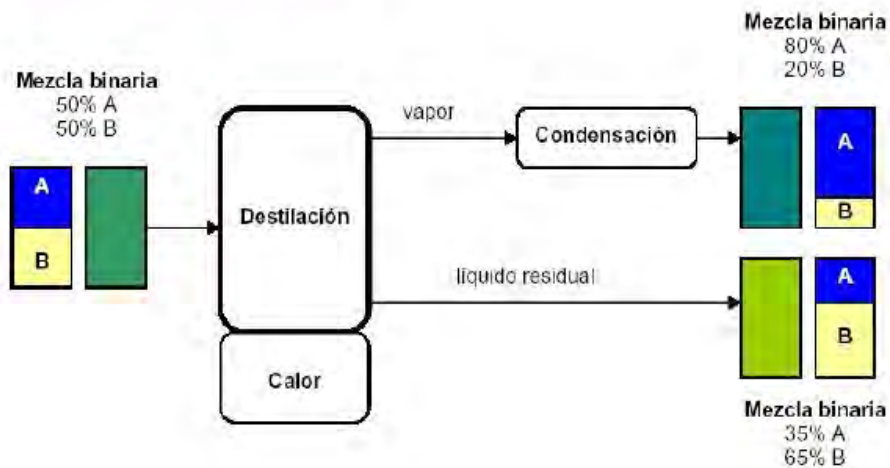
1. Rehabilitar el equipo, con el mantenimiento mecánico para su buen funcionamiento e integrarlo nuevamente a los experimentos en el LIQ.
2. Elaborar un guion experimental con el título “Balance de Materia en un proceso de Destilación Diferencial”, como aportación del presente trabajo de tesis. Cabe mencionar que este guión experimental se reportará como uno de los productos finales en el proyecto PAPIME PE100511.
3. Concentrar la mezcla de MEG-AGUA al 60% peso de MEG a partir de los residuos generados en otros experimentos realizados en el LIQ I, por el proceso de Destilación Diferencial.

### 3. MARCO TEÓRICO

Para el estudio de los procesos industriales se es necesario estudiar las operación básicas, el concepto fue introducido por Arthur D. Little en 1915: Un proceso químico, cualquiera que sea la escala en que se efectuó, puede considerarse que se verifica por una serie coordinada de etapas , a las que llamamos operaciones básicas, dentro de las cuales se encuentra secar, filtrar, evaporar , destilar y múltiples operaciones que se encuentran dentro de los procesos químicos industriales.

La destilación diferencial es el método de destilación más antiguo conocido, también recibe el nombre de destilación simple. Para llevar a cabo este proceso se hace hervir el líquido que se va a destilar y el vapor generado se separa del líquido condensándolo tan rápidamente como se genera. Los alambiques o aparatos que se usan en este tipo de destilación, se empezaron a usar en la edad media. Este tipo de destilación se sigue utilizando en ciertas industrias tradicionales como la industria vitinícola, así como en la purificación intermitente de reactivos y en los laboratorios para valorar el rango de ebullición y las características de la mezcla.

#### Diagrama simplificado



### 3.1 HISTORIA.

El proceso de destilación fue inventado por los alquimistas egipcios, quienes emplearon aparatos para vaporizar sustancias volátiles y tratar los metales con ellas. Sin embargo fueron los griegos los primeros en inventar el alambique, los alquimistas utilizaban alambiques primitivos elaborados de cerámica, con el perfeccionamiento del alambique los árabes descubrieron el alcohol.

La obtención del alcohol dio lugar a la industria del perfume, los árabes comenzaron a extraer la esencia de las flores y hierbas con alcohol o agua y a destilar la mezcla para producir perfume líquido. Los europeos fueron quienes introdujeron la práctica de enfriar el tubo de salida del alambique y a partir del siglo XIV, la salida de este se convirtió en serpentín, condensador del que se deriva el refrigerante moderno.

Durante la Europa Medieval, el alcohol concentrado solía prepararse en dos etapas; la primera destilación producía un alcohol del 60% al que se le daba el nombre de "agua ardens" o aguardiente, una nueva destilación subía la concentración hasta el 96% al que se le llamaba "aqua vitae" o agua de vida. El alcohol producido lo empleaban los monasterios y las farmacias para preparar infusiones de hierbas que se vendían como medicinas.

Las mejoras en las técnicas de la destilación hicieron posible otros progresos en la química. Desde 1150 los químicos comenzaron a destilar ácido nítrico a partir de una mezcla de nitro y alumbre, Venecia y algunas ciudades Francesas fueron las principales ciudades productoras de este ácido. En el siglo XIII se producía ácido sulfúrico y en el siglo XV se destilaba ácido clorhídrico. El conocimiento de los ácidos se difundió y se aplicó en la disolución de sales y en el trabajo de los metales.

Boyle destiló alcohol de madera y vinagre, y recibió las diferentes fracciones de acuerdo con sus puntos de ebullición, lo que constituyó probablemente la primera destilación analítica.

Hasta la Revolución Industrial se le dio un nuevo uso a los Alambiques, en experimentos realizados para obtener coque de buena calidad demostraron que del carbón se desprendían gases inflamables, este gas fue utilizado para el alumbrado. Entre los productos que también se destilaron se encuentra el alquitrán, del que se obtenía benceno, el cual al descubrirse los colorantes sintéticos en 1856, condujo a las plantas destiladoras de alquitrán de hulla.

En 1822, Perrier inventó las campanas de burbujeo y desarrolló un alambique continuo, con precalentamiento de la alimentación y uso de reflujo interno; Blumenthal, combinó los principios utilizados por los dos inventores, para fabricar una columna que proporcionaba una corriente de alcohol rectificado a partir de una alimentación continua de vino; logró así el primer proceso de destilación a régimen permanente.

Desde mediados del siglo XIX los equipos más empleados en la industria empezaron a construirse de acero o de otros metales y recibieron el nombre de columnas de rectificación o de destilación, que se encontraban constituidas por un rehervidor, una columna de platos o empaques y un condensador. Con el diseño de los motores por Otto y Diesel la demanda de la gasolina y el diesel aumento por lo que la industria petrolera puso en práctica métodos más científicos para la destilación y la refinación del petróleo.

A finales del siglo XIX y principios del siglo XX, Henry, Raoult, Rayleigh, McCabe, Thiele, Ponchon, Savarit, Sorel, Lewis, etc, explicaron el fenómeno de destilación, la forma de operación de los equipos y los primeros métodos de cálculo para las columnas de destilación y de alambiques aplicados a mezclas binarias. Con el desarrollo de la fisicoquímica a mediados del siglo XX ya se poseían técnicas para sistemas de multicomponentes, los cuales se pudieron implementar con el uso de las computadoras. El diseño de las torres empacadas requirió del desarrollo de ecuaciones de transferencia de masa propuestas por Sherwood, Gilliland, Murphree, Smith, etc.

Hoy en día, la destilación es la operación unitaria de transferencia de masa más estudiada y que contiene el mayor número de aplicaciones, ecuaciones y correlaciones por lo que es posible el diseño confiable de esos aparatos para lograr la separación de mezclas mediante esta técnica.

### 3.2 EQUILIBRIO EN DESTILACIÓN.

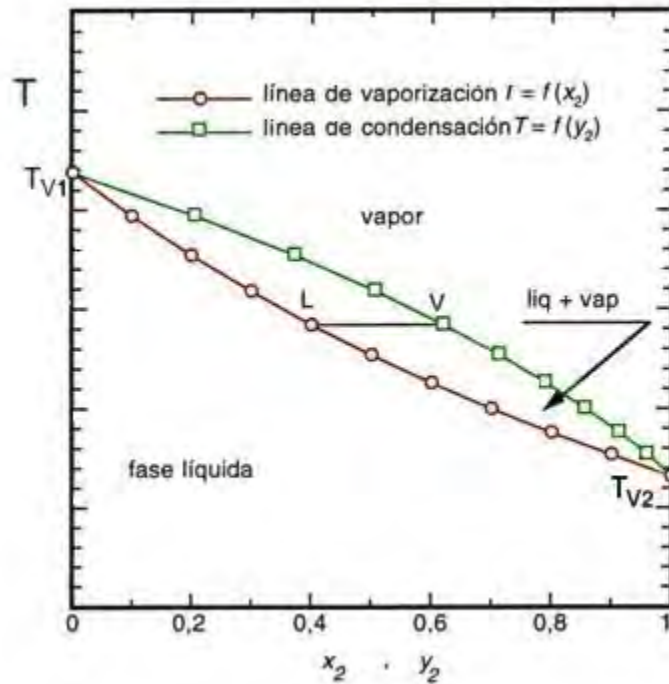
Se dice que una solución líquida está en equilibrio con sus vapores cuándo las presiones de sus componentes en la fase líquida ( $P_{AL}$ ) y vapor ( $P_{AG}$ ) sean iguales

$$P_{AL} = P_{AG} \quad \text{Ecuación 1}$$

Los datos básicos de cualquier problema de destilación son los de equilibrio entre la fase líquida y gaseosa del sistema sometido a destilación, por tal motivo es necesario disponer de diagramas de punto de ebullición, en estos diagramas se representa la relación que existe, entre el punto de ebullición y la composición de equilibrio a presión constante para todas las mezclas de un líquido A con un punto de ebullición  $T_{V1}$  y un líquido B con un punto de ebullición  $T_{V2}$  (Figura 1).

En tal diagrama se representan las temperaturas en el eje de las ordenadas y las composiciones en el eje de las abscisas.

En general, los diagramas de composición contra temperatura deben obtenerse experimentalmente, supongamos una mezcla líquida de composición  $x$  que se calienta lentamente. Esta mezcla líquida empezará a hervir a una temperatura  $T$ . El primer vapor producido tendrá una composición definida representada por " $y$ ". Tan pronto como se forma una cantidad apreciable de vapor, la composición de líquido deja de ser " $x$ " de partida, ya que el vapor que se desprende es más rico en el componente más volátil, que el líquido alimentado inicialmente y en consecuencia la composición del vapor también cambia debido a que se enriquece con el componente más volátil.

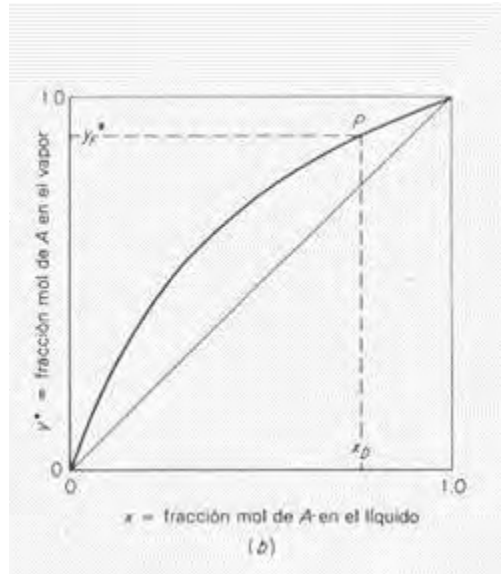


**Figura 1 Diagrama de punto de ebullición**

En el estudio de los problemas de destilación se utilizan los diagramas de equilibrio líquido- vapor, que representan la relación que existe entre las composiciones del líquido y el vapor que están en equilibrio a una presión constante y determinada. La construcción del diagrama líquido vapor es fácil cuando se dispone de un diagrama de puntos de ebullición (Figura 1).

Solo es necesario elegir una composición, trazar una vertical hasta que corte la línea inferior o del líquido, desde este punto trazar una horizontal hasta que corte la línea superior o de vapor y de este punto trazar una vertical hacia abajo hasta el eje de las composiciones, obteniéndose la composición del vapor que está en equilibrio a su punto de ebullición con el líquido de partida.

Los datos obtenidos se grafican "y" vs "x" resultando una curva llamada de equilibrio L-V como se muestra en la Figura 2.



**Figura 2 Equilibrio L-V a P cte. Mezclas ideales (Fuente: Treybal, 1993, pp.381).**

### 3.3 TEMPERATURA DE EBULLICIÓN DE SOLUCIONES IDEALES

La temperatura de ebullición en una mezcla ideal de líquidos se alcanzará cuando la suma de las presiones parciales sea igual a la presión total de operación Ecuación 2.

$$P_T = P_A^\circ X_A + P_B^\circ X_B \quad \text{Ecuación 2}$$

Para obtener la temperatura de ebullición, se selecciona una temperatura, obteniendo la presión de vapor de los componentes puros verificando que la suma de las presiones parciales sea igual a la presión total, si no es así se selecciona otra temperatura hasta comprobar que la suma de las presiones parciales es igual a la presión total, a esta temperatura se le llama la temperatura de burbuja.

$$\sum_i^n Y_i = \frac{\sum_i^n X_i P_i^\circ}{P_t} = 1 \quad \text{Ecuación 3}$$

### 3.4 VOLATILIDAD Y VOLATILIDAD RELATIVA.

La volatilidad relativa es una medida directa de la facilidad de la separación de los componentes por medio de un proceso de destilación generalmente, el termino volatilidad “v” es usado para comparar las presiones de vapor de las sustancias. Cuando se compara una con otra, la sustancia con la más alta presión de vapor es considerada la más volátil. La presión de vapor no es exclusivamente un criterio valido para la determinación de la facilidad de la separación de los componentes de la mezcla líquida, así la presión de vapor de cada sustancia se ve disminuida por la presencia de otros, para una mezcla que contienen los componentes A y B:

$$V_A = P(Y_A/X_A) \quad V_B = P(Y_B/X_B) \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde  $V_i$ , es la actividad de cada componente,  $x$  y  $y$  son las fracción mol de cada componente en las fases vapor y líquido y  $P$  es la presión total del sistema .

La volatilidad relativa se define como:

$$\alpha = \frac{v_A}{v_B} = \frac{Y_A \cdot X_B}{Y_B \cdot X_A} \quad \text{Ecuación 5}$$

El coeficiente de actividad  $Y$  es  $v_i/P^\circ$ , para cada componente, de aquí

$$Y_A = \frac{v_A}{P^\circ} = X_A \quad \text{Ecuación 6}$$

$$Y_B = \frac{v_B}{P^\circ} = X_B \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde  $P^\circ$  es la presión de vapor del componente puro. En consecuencia

$$\alpha = \frac{Y_A \cdot X_B}{Y_B \cdot X_A} = \frac{Y_A P_A^\circ}{Y_B P_B^\circ} = \text{VOLATILIDAD RELATIVA} = \frac{K_A}{K_B} \quad \text{Ecuación 8}$$

$K_A$  y  $K_B$  son constantes de equilibrio de vaporización para A y B respectivamente, si  $Y_A = Y_B$ ,

$$\alpha = \frac{P_A}{P_B} \quad \text{Ecuación 9}$$

De esta manera las sustancias fácilmente separables por destilación tienen valores grandes de volatilidad relativa. Para una volatilidad relativa de un promedio



de uno no es posible la separación y una volatilidad que es menor a uno en la relación molar de los constituyentes en el vapor será  $\alpha$  veces su relación molar en el líquido. Cuando existe una diferencia de volatilidades el valor de  $\alpha$  siempre será mayor que 1, solo si la volatilidad del componente más volátil se encuentra en el numerador de la expresión para  $\alpha$ . La volatilidad relativa de dos componentes cambia con la temperatura. Desde el punto de vista, solo para una separación fácil, el rango de temperatura óptima para llevar a cabo la destilación es en el cual el valor de  $\alpha$  es el máximo. La siguiente relación derivada de la expresión para  $\alpha$  nos da para una mezcla binaria, la relación entre  $x$  y  $y$  para un valor constante de  $\alpha$ .

$$y = \frac{\alpha * x}{1 + x(\alpha - 1)} \quad \text{Ecuación 10}$$

Durante una destilación por lotes la presión constante la temperatura se eleva, como la concentración de sustancias volátiles disminuye en el líquido residual. Para mezclas de sustancias similares que tienen valores bajos de  $\alpha$ , estos tendrán un cambio muy lento de  $\alpha$ , con la temperatura de esto la ecuación anterior nos dará resultados confiables. Esas condiciones se encuentran por ejemplo para miembros adyacentes de una serie homologa tal como las parafinas (hidrocarburos). Se debe investigar variaciones de  $\alpha$  cuando se use la ecuación anterior.

### 3.5 PROCESO DE DESTILACIÓN DIFERENCIAL.

En principio se llena una olla vaporizadora o alambique con la solución en este caso MEG-AGUA y luego se calienta hasta la ebullición. A medida que se generan los vapores ricos en agua, éstos ascienden hasta el condensador, por ello el volumen inicial de la olla desciende, así como aumenta la concentración de la sustancia menos volátil, MEG. Por otro lado la concentración del vapor destilado varía también con el tiempo, teniendo en principio la mayor cantidad de volátiles y disminuyendo esta progresivamente a medida que continúa la destilación.

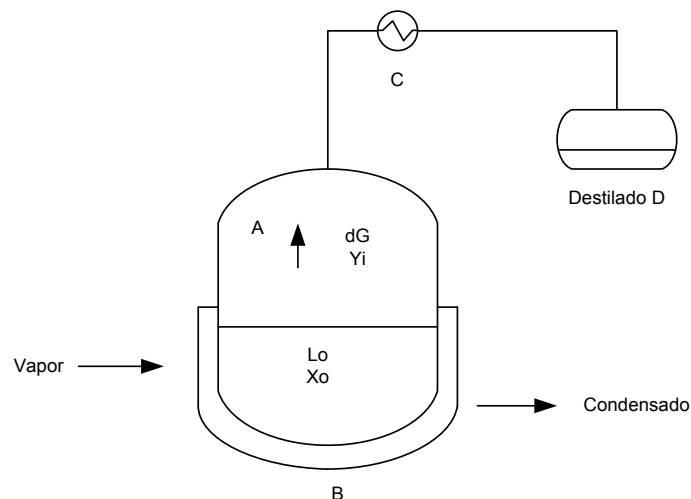
Para analizar las condiciones de operación de un sistema de destilación diferencial vamos a partir de los equipos más sencillos que intervienen en un sistema de destilación diferencial.

La carga entra al destilador con una composición  $X_o^i$  de componente que nos interesa  $i$ . Luego comienza el calentamiento, al parecer las primeras burbujas, el líquido comienza a hervir y desprender vapores el líquido en el destilador o alambique se empobrece en el componente más volátil produciéndose a su vez un vapor más pobre en el componente más volátil. Este proceso continúa hasta que termina la destilación.

Como se explicó anteriormente en los diagramas de equilibrio en esta destilación el vapor que sale en cualquier momento está en equilibrio con el líquido del que procede así como se tiene un incremento de la temperatura mientras se produce la destilación.

### Balance de Materia.

Si se efectúa un balance de materia alrededor del siguiente equipo



**Figura 3 Diagrama del equipo de destilación diferencial**

A Alambique

B Chaqueta

C condensador

D Tanque acumulador de destilados

En donde

$L_A$  es la cantidad inicial alimentada

$L_R$  es la cantidad final que queda en el alambique al terminar el proceso

$L_D$  es la cantidad del líquido obtenido

$$L_A = L_R + L_D \quad \text{Ecuación 11}$$

Y para el componente i

$$L_A X_A^i = L_D y_{Dm}^i + L_R X_R^i \quad \text{Ecuación 12}$$

En donde  $X_A^i$  es la fracción mol del componente i en la composición,  $X_R^i$  la fracción mol del componente i en los residuos, después de que termino la destilación y  $y_{Dm}^i$  es la composición promedio de todos los destilados ( o sea la composición de la mezcla destilada). El balance anterior se efectuó entre el comienzo y el final del proceso, pero también es posible efectuar un balance diferencial, esto es en un instante dado del proceso. A continuación se efectúa este balance:

Balance general

Entrada = salida + acumulación

En este caso

Entradas=0, ya que es una operación por lotes o intermitente, por lo tanto:

$$0 = D + \frac{dL}{d\theta} \quad \text{Ecuación 13}$$

Siendo D el vapor destilado, L es líquido que queda en el calderín y  $\theta$  el tiempo.

Para el componente más volátil el balance parcial daría:

$$0 = Dy_D + D \frac{d(Lx)}{d\theta} = Dy_D + \frac{xDL}{d\theta} + L \frac{dx}{d\theta} \quad \text{Ecuación 14}$$

$$\text{Pero } D = -\frac{dL}{d\theta}$$

$$0 = \frac{dL}{d\theta} y_D + x \frac{dL}{d\theta} + L \frac{dx}{d\theta} \quad \text{Ecuación 15}$$

Multiplicando por  $d\theta$

$$dLy_D = Ldx + x dL$$

$$dL(y - x) = Ldx$$

Por lo tanto

$$\frac{dL}{L} = \frac{dx}{y-x} \quad \text{Ecuación 16}$$

Integrando desde la composición inicial a la final

$$\int_{L_o}^L \frac{dL}{L} = \int_{x_i}^{x_k} \frac{dx}{y-x} \quad \text{Ecuación 17}$$

$$\ln \frac{L_A}{L_R} = \int_{x_i}^{x_k} \frac{dx}{y-x} \quad \text{Ecuación 18}$$

Esta expresión (Ecuación 18) recibe el nombre de ecuación de Rayleigh. El lado derecho se puede integrar o no directamente dependiendo de si conocemos o no la relación de  $x$  vs  $y$ .

La ecuación de Rayleigh se puede resolver analíticamente si se conoce el valor de la volatilidad promedio  $\alpha = \frac{P_i^\circ}{P_j^\circ}$  y esta se toma como constante.

$$\alpha = \frac{P_A^\circ}{P_b^\circ} = \frac{P_T y_A x_B}{P_T y_B x_A} = \frac{y_A (1-x_A)}{x_A (1-y_A)} \quad \text{Ecuación 19}$$

$$\alpha * (x_A (1 - y_A)) = y_A - y_A x_A$$

$$\alpha x_A - \alpha x_A y_A = y_A - y_A x_A$$

$$y_A (1 - x_A + x_A \alpha) = \alpha x_A$$

$$y_A = (1 - x_A (1 - \alpha)) = \alpha x_A$$

$$y_A = \frac{\alpha x_A}{1 - x_A (1 + \alpha)} \quad \text{Ecuación 20}$$

Y reemplazando y por la expresión dada en la ecuación de Rayleigh se obtiene.

$$\int_{L_A}^{L_R} \frac{dL}{L} = \int_{X_A}^{X_R} \frac{dx}{\frac{\alpha x_A}{1 - x_A (1 + \alpha)} x} ; \int_{L_R}^{L_A} \frac{dL}{L} = \int_{X_R}^{X_A} \frac{dx}{\frac{\alpha x_A}{1 - x_A (1 + \alpha)} x} ; \quad \text{Ecuación 21}$$

$$\ln \frac{L_A}{L_R} = \frac{1}{\alpha - 1} \ln \frac{x_A (1 - x_R)}{x_R (1 - x_A)} + \ln \frac{(1 - x_R)}{(1 - x_A)}$$

$$\frac{L_A}{L_R} = \left( \frac{1 - x_R}{1 - x_A} \right)^{\frac{1}{\alpha - 1}} \left( \frac{1 - x_R}{1 - x_A} \right) \left( \frac{x_A}{x_R} \right)^{\frac{1}{\alpha - 1}}$$

$$\frac{L_A}{L_R} = \left( \frac{1 - x_R}{1 - x_A} \right)^{\frac{\alpha}{\alpha - 1}} \left( \frac{x_A}{x_R} \right)^{\frac{1}{\alpha - 1}}$$

$$\frac{L_A}{L_R} = \sqrt[\alpha - 1]{\left( \frac{1 - x_R}{1 - x_A} \right)^\alpha \left( \frac{x_A}{x_R} \right)} \quad \text{Ecuación 22}$$

Para sistemas no ideales en donde se puede obtener el valor del coeficiente K o coeficiente de equilibrio

$$Y = Kx \quad \text{Ecuación 23}$$

$$\ln \frac{L_A}{L_R} = \int_{x_R}^{x_A} \frac{dx}{x(K-1)} \quad \text{Ecuación 24}$$

#### **4.- DESARROLLO EXPERIMENTAL.**

##### **4.1 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO.**

El módulo de Destilación en donde se encuentra la olla vaporizadora está instalado dentro del Laboratorio de Ingeniería Química.



La sección de la olla vaporizadora está conformado por:

1. Olla vaporizadora y una columna de destilación de 20 platos.
2. Bomba de alimentación.
3. Tanque de alimentación de la mezcla con agitador.
4. Condensadores.
5. Subenfriador de destilado.

Otros:

- Rotámetro para medir el flujo de agua de enfriamiento

Líneas de tuberías de proceso:

- Alimentación de la mezcla del tanque a la bomba de alimentación y a la olla vaporizadora o a la columna de 20 platos (tubería de color azul rey).
- Vaporizaciones de la olla a los condensadores (tubería con aislante).
- Destilados de los condensadores al subenfriador y a las probetas para medir flujo (tubería color azul claro).
- Residuo del fondo de la olla al tanque de mezclado (tubería color café).

Líneas de servicios auxiliares:

- Vapor de calentamiento, del cabezal de suministro al serpentín de la olla vaporizadora (tubería aislada).
- Condensados del vapor de calentamiento, del serpentín a la trampa de vapor y a la rejilla recolectora..
- Agua de enfriamiento, del cabezal de suministro al subenfriador, a los condensadores, al rotámetro y rejilla recolectora (tubería de color verde).

## **4.2 MEZCLA MONOETILENGLICOL-AGUA**

La mezcla utilizada durante las experimentaciones fue la mezcla de monoetilenglicol (MEG) –Agua con una concentración inicial de entre 30-35% en MEG.

Se eligió esta mezcla principalmente porque es un residuo en experimentos realizados en la asignatura del Laboratorio de Ingeniería Química I, además es una mezcla segura por su baja toxicidad y su baja explosividad.

**Anexo 2** Toxicidad de la mezcla.

## **4.3 MANTENIMIENTO MÉCANICO**

El equipo de destilación Brighthon- Copper está dentro del proyecto PAPIME PE100511 “Mejora y actualización de enseñanza experimental en el Laboratorio de Ingeniería Química: Módulo de Destilación continua y por lotes”, con el cual se realizó un mantenimiento al equipo ya que múltiples instrumentos y accesorios se encontraban dañados. Colaboré con otros tesisistas en la etapa de mantenimiento no sólo al correspondiente a la olla vaporizadora si no a la de todo el Módulo, realizando corridas experimentales para encontrar las fallas (fugas de válvulas y tuberías, corrosión en tuberías y equipos, mal funcionamiento de instrumentos, etc).

Durante el primer y segundo año del proyecto PAPIME se llevó acabo el mantenimiento del equipo de destilación Brightoon Cooper, principalmente del lado de la columna, por la empresa Generatoris S.A. de C.V., a continuación se muestran las partes cambiadas durante el mantenimiento que involucran al equipo de la olla vaporizadora.

Las actividades realizadas que competen a la olla vaporizadora fueron las siguientes:

- Se cambió la bomba que pertenece a la línea de fondos por una bomba centrífuga de 1/8 HP (Horse Powers).





- Se lijó y pintó la olla vaporizadora.
- Se cambió la bomba que pertenece a la línea de alimentación por una bomba centrífuga de 1/4 HP (Horse Powers).
- Se realizó el aislamiento a la línea de vapor con medias cañas de fibra de vidrio de 2" de espesor, lámina de aluminio cal 32 y fleje de 1/2" en acero inoxidable.
- Se realizó el aislamiento a la olla vaporizadora con fibra de vidrio de 1" de espesor, lámina de acero inoxidable cal 32 y flejes de 1/2" en acero inoxidable.
- Las válvulas de número 56, 58, 138 que corresponden a la línea de vapor se cambiaron por válvulas de tipo esfera de 1 pulgada.
- Cambio de la trampa de vapor.

\*La ubicación de las válvulas se encuentra en el Diagrama del Equipo de Destilación Diferencial.




A continuación se presentan las evidencias fotográficas del grado de deterioro que tenía el equipo.

## EVIDENCIAS FOTOGRÁFICAS DE FALLAS EN LA OLLA

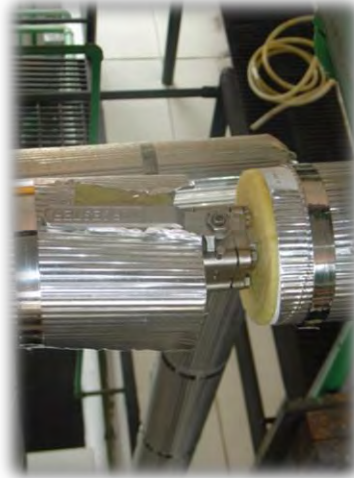
FALLA	FOTOGRAFÍA
Base de la olla oxidada	
Cambio del aislamiento a las líneas de vapor del proceso.	
Aislamiento de la olla deteriorado	

<p>Válvulas con fuga</p>	
<p>Bomba de alimentación presentaba fuga</p>	
<p>Sistema de trampeo con mal funcionamiento</p>	

## EVIDENCIAS DESPUÉS DEL MANTENIMIENTO EN LA OLLA

ACTIVIDAD	DESPUÉS
Lijado y pintado de la base de la olla vaporizadora	
Cambio del aislamiento a las líneas de vapor del proceso.	
Cambio de aislante de la olla vaporizadora	

Cambio de la válvula de ramal de la línea de vapor para la olla vaporizadora



Cambio de la válvula de suministro de vapor para la olla vaporizadora



Cambio de la válvula de regulación de vapor para la olla vaporizadora



Cambio de la bomba de alimentación



Cambio del sistema de trampeo



## 5. PRUEBAS EXPERIMENTALES

### 5.1 TÉCNICA DE OPERACIÓN

Se realizaron pruebas en el equipo de Destilación Diferencial antes y después del mantenimiento mecánico, de acuerdo a la siguiente técnica de operación.

Preparación.

1. Revisar el nivel de la olla vaporizadora, si contiene mezcla regrésarla al tanque de alimentación y agitar la mezcla para homogenizarla.
2. Verificar que el tanque de alimentación contenga aproximadamente 140 litros de una mezcla Monoetilenglicol (MEG) – Agua, con una composición cerca de 40 % en peso de MEG.
3. Alimentar la mezcla a la olla hasta que el medidor de nivel marque un volumen de 140 l , logrado lo anterior, **apague la bomba**.
4. Alinear la tubería y abrir las válvulas del destilado, de tal manera, que mande las vaporizaciones de la olla a los condensadores y el total de esos condensados al subenfriador de destilado, y de allí a las probetas para medir el flujo.
5. Alinear la tubería y suministrar agua de enfriamiento desde el cabezal que surte al equipo, al subenfriador de destilado, a los, al rotámetro de agua de enfriamiento y a la rejilla recolectora, todo en este orden.
6. Alinear la tubería del vapor de calentamiento desde la caldera hasta la válvula de suministro de vapor al serpentín de la olla.

Operación.

1. Alimentar vapor a una presión de  $1.5 \text{ Kg/cm}^2$  al serpentín de la olla **simultáneamente**, purgar la línea de condensados de vapor de calentamiento para ello, abrir la válvula de descarga directa a la rejilla recolectora. Cerrar la válvula que hace pasar los condensados por la trampa de vapor.



2. Cuando se haya eliminado el total de condensados acumulados, hacer pasar los condensados generados por la trampa de vapor,
3. Verificar nuevamente el nivel de la olla y anotar el volumen.
4. Tomar el tiempo tan pronto se reciban las primeras gotas de destilado en una probeta y desde ese momento acumule también el condensado del vapor de calentamiento en una probeta.

Cada diez minutos

1. Tomar una muestra de la mezcla en la olla (residuo) y una muestra del destilado para determinar su composición por refractometría.
2. Medir el volumen acumulado del destilado y de los condensados del vapor de calentamiento.
3. Medir el volumen de residuo en la olla.
4. Tomar la temperatura en la olla.
5. Medir la presión de vapor. Aumentar la presión de vapor en  $0.1 \text{ kg/cm}^2$  cuando así se requiera para mantener un flujo de destilado constante alrededor de 3 a 4 litros acumulados durante los diez minutos.
6. Registrar los datos experimentales en la Tabla 1.

Paro

1. Cuando se tenga en el residuo una composición del 60% en MEG.
2. Cierre la válvula que alimentan vapor de calentamiento al serpentín de la olla.
3. Cierre las válvulas de suministro de agua de enfriamiento.
4. Cierre la válvula de descarga del destilado a la probeta y abra la válvula de descarga al tanque de almacenamiento de destilado (7).  
Dejar la carga final de residuo en la olla.

## 5.2 DIAGRAMA DEL EQUIPO DE DESTILACIÓN DIFERENCIAL

En el proyecto de mantenimiento se vió la necesidad de crear un diagrama de Flujo del Proceso (DFP) el cual ayudaría a la identificación del equipo, los instrumentos y accesorios, así como para facilitar la comunicación con la Empresa Generatoris .El diagrama se elaboró con la colaboración de otro alumno tesista, Javier Vanegas Terrones, quien participo dentro del proyecto PAPIME con la tesis sobre destilación continua en la columna de platos.

Para la realización de este diagrama:

- Se buscó información acerca de la elaboración de DTI
- Se buscó un software que facilitará la elaboración del mismo, se eligió usar Microsoft Visio el cual contenía ya una simbología para los equipos y accesorios.
- Se buscó asesoría y opinión de profesores que imparten la asignatura de Ingeniería de Proyectos dentro de la Facultad de Química.

El diagrama de que se muestra a continuación es una modificación del DTI original del Módulo de Destilación, ya que en éste sólo se muestran las líneas de proceso, equipos y accesorios que estén dentro del proceso de destilación diferencial.

A continuación se muestra.

**Figura 4. Diagrama del equipo de Destilación Diferencial**

### 5.3 CALIBRACIÓN DEL MEDIDOR DE NIVEL DE LA OLLA VAPORIZADORA

Durante la experimentación realizada antes del mantenimiento se encontró que la regleta que marca el nivel del volumen contenido en la olla no es correcto, ya que el volumen indicado no correspondía al volumen real que esta contenía.

Para calibrar el medidor de nivel de la olla se realizó lo siguiente:

1. Se experimentó dentro de la olla vaporizadora
2. Se llenó la olla hasta un nivel de 142 l.
3. Se fue vaciando la olla y midiendo con probetas en volumen que contenía.
4. Los resultados se anotaron en la siguiente tabla.

En la Tabla 1 se observan las mediciones directas del nivel de la olla vaporizadora (columna 2) y el volumen medido en la probeta (columna 3) tomadas en la experimentación, posteriormente se realizó la comparación de la diferencia del nivel en la olla (acumulada, columna 4) con respecto al volumen acumulado en la probeta (columna 5). Estos resultados se graficaron en la Figura 5 donde se observa:

1.- Los resultados graficados dan una línea recta, lo que nos indica que el volumen de la olla es uniforme en la primera parte de esta.

2.- Se pueden representar mediante una ecuación, que se utilizó para corregir la diferencia de volúmenes reales:

$$y = 1.3671 \quad R^2 = 0.999 \quad \text{Ecuación 25}$$

Mediante la ecuación antes escrita, se calculó el volumen de la olla y posteriormente se optimizó la pendiente mediante el método de mínimos cuadrados. Nota: se restó el resultado 19 porque el error es muy grande.

Se determinó por las mediciones que el volumen de la olla después de que la regleta ya no es capaz de marcar nivel es de 69.69 l de esta manera sumando el volumen en la probeta en cada experimento podemos saber el volumen inicial que teníamos en la olla 171.8 l.

En la Figura 6 se tiene graficado en el eje de las ordenadas el volumen del tanque, como se calculó anteriormente y el abscisas en nivel del tanque, con ayuda de una línea de 45° para realizar la intersección y de esta manera saber el volumen inicial de la olla.

Por el método de mínimos cuadrados nuevamente. Se obtiene entonces una ecuación para calcular el volumen del tanque. Arreglando la ecuación se obtiene:

$$V_{olla} = 61.5 + 1.367 * (N_{olla} - 61.5) \quad \text{Ecuación 26}$$

$V_{olla}$  = Volumen en la olla

$N_{olla}$  = Nivel en la olla

También podemos observar que los existen errores grandes en varias de las mediciones que pasan el 0.2 marcados con amarillo.

Y el error más grande, marcado con rojo.

Con la calibración del nivel en la olla y haciendo uso de la ecuación 26 se puede saber volumen de la olla.

Ejemplo:

$$N_{olla} = 141$$

$$V_{olla} = 61.5 + 1.367 * (141 - 61.5) = 126 \text{ l}$$

**Tabla 1 RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN DEL MEDIDOR DE NIVEL DE LA OLLA VAPORIZADORA**

MEDICIONES DIRECTAS				PENDIENTE		61.5			
				1.367		1.367			
No.	Nivel en la Olla Medición Directa	Volumen Probeta Medición Directa	Diferencia Nivel en la Olla (Acumulada)	Volumen Acumulado Probeta	Diferencia Volumen en la olla ECUACIÓN 25	Error	Volumen en la Olla ECUACIÓN 26	Volumen en la Olla con Volumen Probeta	Error
	Litros	Litros	Litros	Litros	Litros	Litros	Litros	Litros	Litros
1	142.20		0	0	0	0	171.817	171.800	0.017
2	141.0	1.900	1.20	1.900	1.640	-0.260	170.177	169.900	0.277
3	139.5	1.860	2.70	3.760	3.691	-0.069	168.126	168.040	0.086
4	138.0	1.940	4.20	5.700	5.741	0.041	166.076	166.100	-0.024
5	136.5	1.910	5.70	7.610	7.792	0.182	164.025	164.190	-0.165
6	135.2	1.820	7.00	9.430	9.569	0.139	162.248	162.370	-0.122
7	134.0	1.900	8.20	11.330	11.209	-0.121	160.608	160.470	0.138
8	132.5	1.920	9.70	13.250	13.260	0.010	158.557	158.550	0.007
9	131.2	1.950	11.00	15.200	15.037	-0.163	156.780	156.600	0.180
10	129.8	1.900	12.40	17.100	16.951	-0.149	154.866	154.700	0.166
11	128.4	1.940	13.80	19.040	18.865	-0.175	152.952	152.760	0.192

12	127.0	1.930	15.20	20.970	20.778	-0.192	151.039	150.830	0.209
13	125.5	1.940	16.70	22.910	22.829	-0.081	148.988	148.890	0.098
14	124.0	1.960	18.20	24.870	24.879	0.009	146.938	146.930	0.008
15	122.6	1.920	19.60	26.790	26.793	0.003	145.024	145.010	0.014
16	121.2	1.940	21.00	28.730	28.707	-0.023	143.110	143.070	0.040
17	119.8	1.930	22.40	30.660	30.621	-0.039	141.196	141.140	0.056
18	118.6	1.920	23.60	32.580	32.261	-0.319	139.556	139.220	0.336
19	117.8	1.930	24.40	34.510	33.355	-1.155	138.462	137.290	1.172
20	115.6	1.920	26.60	36.430	36.362	-0.068	135.455	135.370	0.085
21	113.9	1.930	28.30	38.360	38.686	0.326	133.131	133.440	-0.309
22	112.6	1.900	29.60	40.260	40.463	0.203	131.354	131.540	-0.186
23	111.3	1.940	30.90	42.200	42.240	0.040	129.577	129.600	-0.023
24	109.8	1.860	32.40	44.060	44.291	0.231	127.526	127.740	-0.214
25	108.5	1.910	33.70	45.970	46.068	0.098	125.749	125.830	-0.081
26	107.0	1.940	35.20	47.910	48.118	0.208	123.699	123.890	-0.191
27	105.5	1.940	36.70	49.850	50.169	0.319	121.648	121.950	-0.302
28	104.3	1.910	37.90	51.760	51.809	0.049	120.008	120.040	-0.032
29	102.9	1.940	39.30	53.700	53.723	0.023	118.094	118.100	-0.006
30	101.5	1.920	40.70	55.620	55.637	0.017	116.180	116.180	0.000
31	100.0	1.940	42.20	57.560	57.687	0.127	114.130	114.240	-0.110

32	98.6	1.920	43.60	59.480	59.601	0.121	112.216	112.320	-0.104
33	97.3	1.920	44.90	61.400	61.378	-0.022	110.439	110.400	0.039
34	95.8	1.930	46.40	63.330	63.429	0.099	108.388	108.470	-0.082
35	94.5	1.900	47.70	65.230	65.206	-0.024	106.611	106.570	0.041
36	93.0	1.950	49.20	67.180	67.256	0.076	104.561	104.620	-0.059
37	91.6	1.940	50.60	69.120	69.170	0.050	102.647	102.680	-0.033
38	90.0	1.940	52.20	71.060	71.357	0.297	100.460	100.740	-0.280
39	88.6	1.930	53.60	72.990	73.271	0.281	98.546	98.810	-0.264
40	87.3	1.960	54.90	74.950	75.048	0.098	96.769	96.850	-0.081
41	86.0	1.900	56.20	76.850	76.825	-0.025	94.992	94.950	0.042
42	84.5	1.975	57.70	78.825	78.876	0.051	92.941	92.975	-0.034
43	83.3	1.900	58.90	80.725	80.516	-0.209	91.301	91.075	0.226
44	82.0	1.880	60.20	82.605	82.293	-0.312	89.524	89.195	0.329
45	80.3	1.990	61.90	84.595	84.617	0.022	87.200	87.205	-0.005
46	78.9	1.940	63.30	86.535	86.531	-0.004	85.286	85.265	0.021
47	77.6	1.900	64.60	88.435	88.308	-0.127	83.509	83.365	0.144
48	76.0	1.980	66.20	90.415	90.495	0.080	81.322	81.385	-0.063
49	74.6	1.940	67.60	92.355	92.409	0.054	79.408	79.445	-0.037
50	73.3	1.960	68.90	94.315	94.186	-0.129	77.631	77.485	0.146
51	71.8	1.940	70.40	96.255	96.237	-0.018	75.580	75.545	0.035



52	70.5	1.960	71.70	98.215	98.014	-0.201	73.803	73.585	0.218		
53	69.0	1.955	73.20	100.170	100.064	-0.106	71.753	71.630	0.123		
54	67.6	1.940	74.60	102.110	101.978	-0.132	69.839	69.690	0.149		
55	No es posible Visualizar el nivel en la olla con la regleta.	1.950	No es posible visualizar el nivel en la olla con la regleta.	1.950	<b>SUMA</b>		<b>1.21567</b>		<b>SUMA</b>		<b>1.22089</b>
56		1.990		3.940							
57		1.960		5.900							
58		1.960		7.860							
59		1.970		9.830							
60		1.960		11.790							
61		2.020		13.810							
62		1.980		15.790							
63		1.910		17.700							
64		1.990		19.690							
65		1.940		21.630							
66		1.940		23.570							
67		1.920		25.490							
68		1.940		27.430							
69	1.900	29.330									
70	1.910	31.240									
71	1.980	33.220									

72		1.930		35.150
73		1.950		37.100
74		1.930		39.030
75		1.940		40.970
76		1.940		42.910
77		1.990		44.900
78		1.930		46.830
79		1.970		48.800
80		1.950		50.750
81		1.960		52.710
82		1.960		54.670
83		1.940		56.610
84	No es posible	1.860	No es posible	58.470
85	visualizar	1.970	visualizar el nivel	60.440
86	el nivel en	1.960	en la olla con la	62.400
87	la olla con	1.940	regleta.	64.340
88	la regleta	1.610		65.950
89		1.410		67.360
90		1.640		69.000
91		0.690		69.690

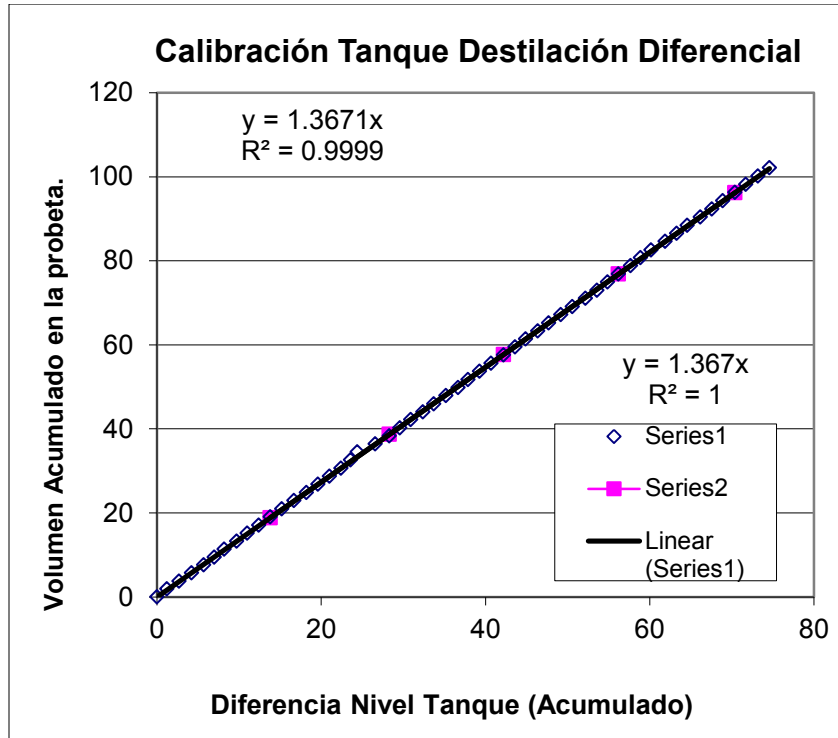


Figura 5 Grafica de Volumen Acumulado en la probeta vs Diferencia de Nivel acumulado

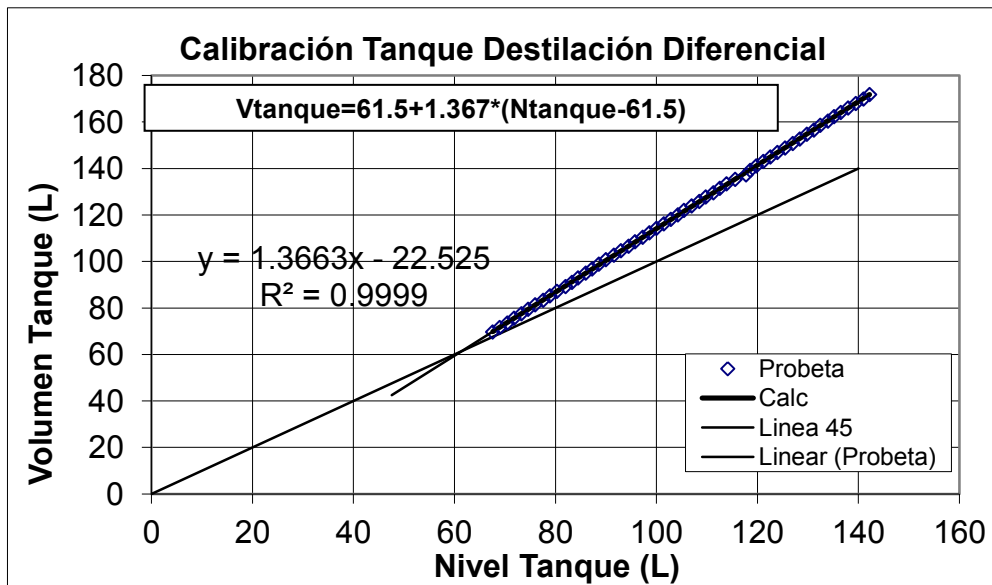


Figura 6 Grafica de Volumen en el Tanque vs Nivel en el Tanque

## 5.4 DATOS EXPERIMENTALES

A continuación se presentan los resultados experimentales producto de una corrida, siguiéndose la técnica de operación del equipo de Destilación Diferencial presentada en el capítulo 5 Pruebas experimentales.

**Tabla 2 RESULTADOS EXPERIMENTALES EN DESTILACIÓN DIFERENCIAL**

No. de medición	t min	Pv kg/cm <sup>2</sup>	T °C	Volumen en la olla (L) I	volumen en el destilado (D) I	volumen en el condensado (C) I	Liq en la Olla vaporizadora		Destilado	
							Conc. de MEG	Xa	Conc. de MEG	Ya
							IR	% peso	IR	% peso
Inicial	0	0	98.00	137			1.3804	48.02		
1	10	1.4	98.00	126	4.44	6.28	1.3802	47.82	1.3357	2.73
2	20	1.6	98.00	124	4.66	5.79	1.3817	49.34	1.3348	1.82
3	30	1.6	98.00	120	4.27	5.56	1.3835	51.16	1.3348	1.82
4	40	1.6	98.00	115	4.60	5.49	1.3852	52.88	1.3350	2.02
5	50	1.8	98.00	113	4.74	6.11	1.3864	54.10	1.3354	2.43

6	60	1.8	98.00	109	4.30	5.46	1.3880	55.72	1.3350	2.02
7	70	1.9	98.00	106	4.30	5.75	1.3900	57.75	1.3352	2.22
8	80	2.0	98.00	103	4.52	6.16	1.3918	59.57	1.3353	2.33
9	90	2.1	98.00	99	4.41	5.65	1.3944	62.20	1.3358	2.83
10	100	2.1	98.00	96	4.27	5.18	1.3954	63.22	1.3354	2.43
11	110	2.2	98.00	93	4.20	5.10	1.3986	66.46	1.3356	2.63
12	120	2.3	98.00	90	3.95	5.28	1.4012	69.09	1.3366	3.64
13	130	2.4	98.00	89	3.70	5.04	1.4039	71.83	1.3366	3.64

## 6. CÁLCULOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En la Tabla 2 se observa:

- La concentración en el residuo de la olla de MEG aumenta conforme pasa el tiempo, ya que el componente volátil que se recupera como destilado es el agua.
- El volumen del condensado de vapor de calentamiento recolectado es prácticamente constante, de 5 litros cada 10 minutos.
- El volumen de destilado acumulado es prácticamente constante, de 4 litros cada 10 minutos, modificando la presión de vapor según se requiere.
- La temperatura se mantiene constante en 98°C, si la concentración en la olla aumenta de una concentración inicial de 48.02 % en peso de MEG a una concentración final de 71.83 % de MEG, la temperatura de ebullición debe aumentar ya que la temperatura de ebullición del MEG es de 198°C, por lo tanto se concluye que el termómetro ubicado en la olla vaporizadora está dañado.
- El volumen de destilado es menor que el del condensado de vapor de calentamiento, esto se debe a que existen pérdidas de calor, no toda la cantidad de vapor se aprovecha en producir el destilado.

Con los resultados en la Tabla 2 se procede a calcular las fracciones masa en el residuo y el destilado.

Ejemplo de cálculo:

Concentración % peso de MEG= 45.71

$$\text{fracción masa } Xa = \frac{45.71}{100} = 0.4571$$

$$\text{fracción masa } Xb = 1 - \left(\frac{45.71}{100}\right) = 0.5429$$

Peso Molecular del Agua =18.015 g/mol

Peso Molecular del MEG=62.069 g/mol

$$\text{fracción mol } X_a = \frac{(0.4571 \text{ g MEG} * \frac{\text{mol MEG}}{62.069 \text{ g MEG}})}{\left( (0.4571 \text{ g MEG} * \frac{\text{mol MEG}}{62.069 \text{ g MEG}}) + (0.5429 \text{ g AGUA} * \frac{\text{mol AGUA}}{18.015 \text{ g AGUA}}) \right)} = 0.1964$$

Se calcula el volumen de la olla con base a la ecuación 26 obtenida en la calibración:

$$V_{\text{tanque}} = 61.5 + 1.367 * (N_{\text{tanque}} - 61.5)$$

Los volúmenes medidos en la olla (L) y en el destilado (D) se pasan a masa con la densidad, la densidad es calculada la Ecuación 27 que involucra la temperatura de la mezcla y las composiciones.

$$\rho_{AGUA} = 1.007 - (0.00006501 * T(^{\circ}C)) - (0.0000040378 * T(^{\circ}C)^2) - (0.0000000046987 * T(^{\circ}C)^3)$$

$$\rho_{MEG} = 1.12637 - (0.0006842 * T(^{\circ}C))$$

$$\rho_{MEZCLA} = \rho_{MEG} * \rho_{AGUA} * T(^{\circ}C) * X_A * \left( (0.04418 - 0.00031541 * T(^{\circ}C)) + (-0.027415 + 0.00022506 * T(^{\circ}C)) \right) * (X_A * X_B)$$

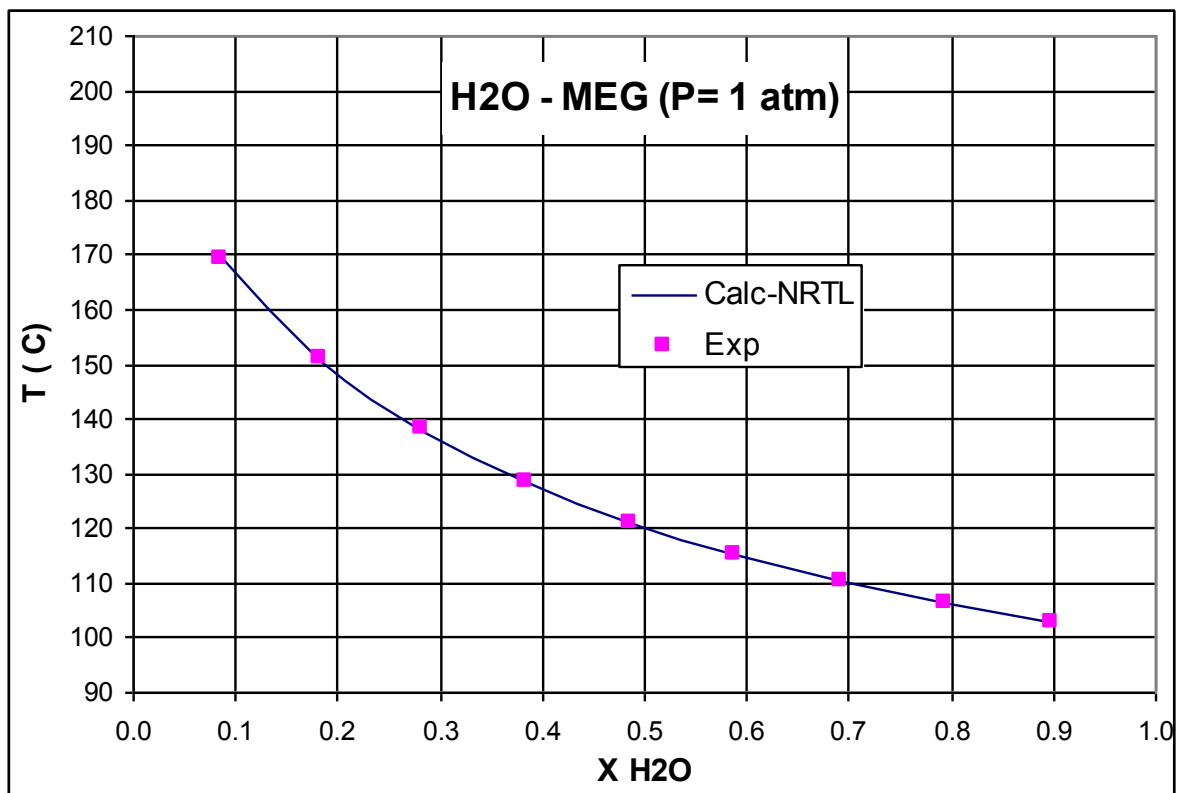
**Ecuación 27**

NOTA: La ecuación 27 y su derivación para el cálculo de la densidad ( $\rho$ ) fueron proporcionadas por el Dr. Enrique Rueda Bazúa.

## 6.1 CÁLCULO DE LA TEMPERATURA DE LA MEZCLA

Es importante conocer la temperatura de la mezcla para poder calcular la densidad y a su vez la masa de la mezcla. Debido a que el termómetro ubicado en la olla vaporizadora no funciona, el cálculo de la temperatura de ebullición de la mezcla para cada una de las composiciones en el residuo se realizó por el cálculo de la temperatura de burbuja, es decir se supuso una temperatura de ebullición, posteriormente se calculó una presión de vapor con el uso de las constantes de Antuan, se calculó la composición del vapor "y" y la suma de estas debe ser igual a uno, si es diferente nuevamente se vuelve a suponer otra temperatura de forma que iterando la suma de las composiciones de vapor sea igual a uno, se hizo uso de la herramienta "solver" de Microsoft Excel para facilitar las iteraciones.

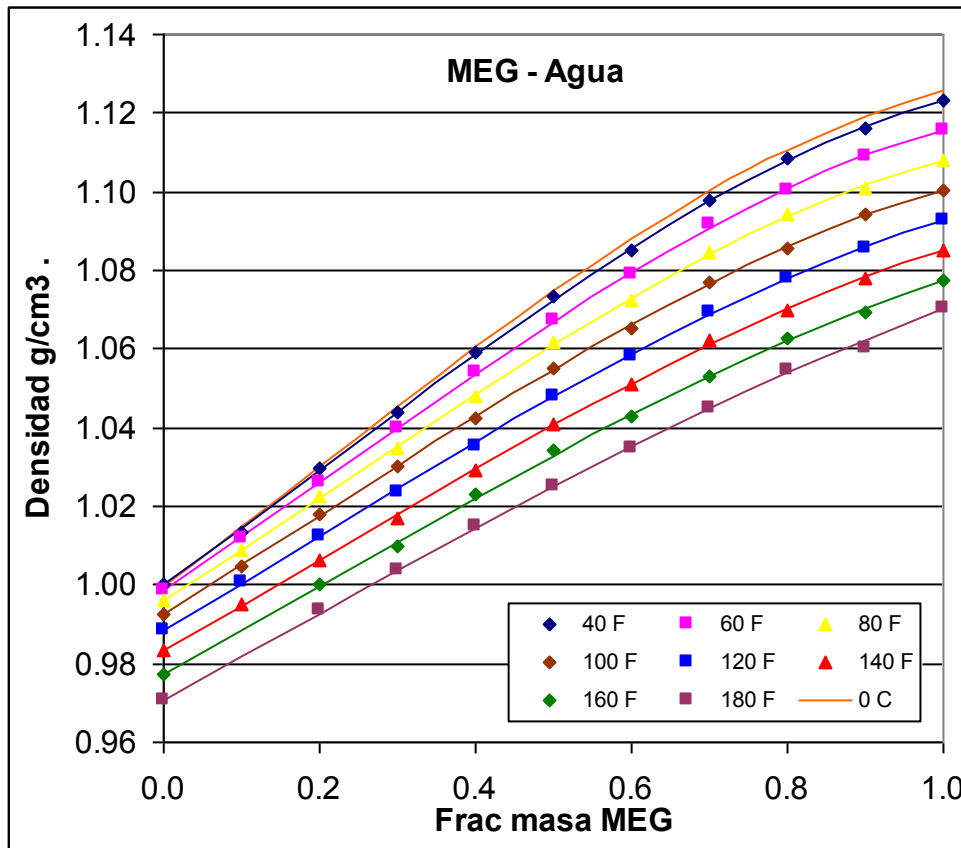
Con los resultados graficados como en la Figura 7 es posible conocer una aproximación de la temperatura de la mezcla para la composición en el residuo.





**Figura 7 Diagrama de la temperatura de la mezcla vs la concentración de agua en la mezcla**

También se elaboró una serie de gráficas, tomando como referencia el Manual de Procesos de Separación II\*, para la densidad de la mezcla de acuerdo a la composición de la mezcla y a su temperatura, Figura 8.



**Figura 8 Densidad de la mezcla vs la fracción masa de MEG, a diferentes temperaturas**

*\*Procesos de Separación II, Laboratorio de Ingeniería Química Facultad de Química UNAM,  
Diciembre del 2002.*

**Tabla 3 RESULTADOS EXPERIMENTALES CON LA TEMPERATURA EN LA OLLA CALCULADA Y LA DENSIDAD**

t(min)	T(°C) de la mezcla	volumen en la olla (L)	$\rho$ kg/l	masa en la olla (L) kg	Volumen en el destilado (D) l	T(°C) del destilado (D)	$\rho$ kg/l	masa del destilado (D) kg	volumen del condensado (C) l
0	99.73	145.17	1.0074	146.25					
10	99.68	140.73	1.0088	141.96	4.44	20	1.0025	4.45	6.28
20	100.05	135.95	1.0100	137.31	4.66	20	1.0010	4.66	5.79
30	100.52	131.55	1.0111	133.01	4.27	20	1.0010	4.27	5.56
40	100.99	126.85	1.0124	128.42	4.60	20	1.0013	4.61	5.50
50	101.34	122.10	1.0139	123.80	4.74	20	1.0020	4.75	6.11
60	101.83	117.74	1.0153	119.54	4.30	20	1.0013	4.31	5.46
70	102.49	113.33	1.0167	115.22	4.30	20	1.0017	4.31	5.75
80	103.12	108.79	1.0184	110.79	4.52	20	1.0019	4.53	6.16
90	104.12	104.22	1.0199	106.29	4.41	20	1.0027	4.42	5.65
100	104.54	100.19	1.0219	102.38	4.27	20	1.0020	4.28	5.18
110	105.99	95.75	1.0233	97.98	4.20	20	1.0024	4.21	5.10
120	107.34	91.74	1.0248	94.02	3.95	20	1.0041	3.97	5.28
130	108.94	87.98	1.0254	90.29	3.70	20	1.0041	3.72	5.04

En la tabla 3 se observa que la temperatura aumenta conforme pasa el tiempo y a su vez aumenta la concentración de mezcla en el residuo de la olla, la densidad también aumenta conforme aumenta la concentración en la mezcla del residuo en la olla.

**Tabla 4 Comparación de la masa calculada con la masa medida en la probeta**

No.exp	t (min)	Volumen en la olla (L) I	masa (L) kg		masa de destilado (D) kg	masa D calc Ln- Ln+1 kg	Error kg
Inicial	0	145.17	146.25				
1	10	140.73	141.96		4.45	4.29	-0.16
2	20	135.95	137.31		4.66	4.65	-0.01
3	30	131.55	133.01		4.27	4.30	0.03
4	40	126.85	128.42		4.61	4.58	-0.02
5	50	122.10	123.80		4.75	4.62	-0.13
6	60	117.74	119.54		4.31	4.26	-0.04
7	70	113.33	115.22		4.31	4.32	0.01
8	80	108.79	110.79		4.53	4.44	-0.09
9	90	104.22	106.29		4.42	4.50	0.08
10	100	100.19	102.38		4.28	3.91	-0.37
11	110	95.75	97.98		4.21	4.40	0.19
12	120	91.74	94.02		3.97	3.96	0.00
13	130	87.98	90.29		3.72	3.73	0.01
		<b>Diferencia de masa inicial y final=</b>	<b>55.96</b>	<b>Masa Total de destilado Suma=</b>	<b>56.47</b>	<b>Suma errores</b>	<b>0.24</b>

Si realizamos un Balance Generala de Materia de todo el experimento:

$$L_0 - L_R = D_{acumulado}$$

$$146.25 \text{ kg} - 90.29 \text{ kg} = 56.47 \text{ kg}$$

$$55.96 \text{ kg} \neq 56.47 \text{ kg}$$

En la Tabla 4 se muestra la diferencia entre la masa inicial en la olla y la masa final en la olla, éstas son muy semejantes a la masa total de destilado existe una pequeña diferencia de 0.51 l, esta diferencia puede atribuirse a errores durante las mediciones (la probeta utilizada en el experimento para medir el flujo de destilado es de 2 l, lo cual no la hace muy precisa).

**Tabla 5 TABLA DE COMPOSICIONES CALCULADAS EN EL RESIDUO DE LA OLLA VAPORIZADORA**

No. de medición	t (min)	Liq en la Olla		MEG		H2O	
			Xa	Liq en la Olla	Liq en la Olla	Liq en la Olla	Liq en la Olla
		IR	% peso	fracción masa Xa	fracción mol xa	fracción masa Xb	fracción mol xb
Inicial	0	1.3781	45.71	0.4571	0.1964	0.5429	0.8036
1	10	1.3795	47.06	0.4706	0.2051	0.5294	0.7949
2	20	1.3810	48.59	0.4859	0.2153	0.5141	0.7847
3	30	1.3825	50.10	0.5010	0.2256	0.4990	0.7744
4	40	1.3842	51.82	0.5182	0.2379	0.4818	0.7621
5	50	1.3860	53.71	0.5371	0.2519	0.4629	0.7481
6	60	1.3878	55.57	0.5557	0.2663	0.4443	0.7337
7	70	1.3898	57.56	0.5756	0.2825	0.4244	0.7175
8	80	1.3920	59.81	0.5981	0.3016	0.4019	0.6984
9	90	1.3944	62.19	0.6219	0.3231	0.3781	0.6769
10	100	1.3968	64.61	0.6461	0.3464	0.3539	0.6536
11	110	1.3994	67.32	0.6732	0.3742	0.3268	0.6258
12	120	1.4021	70.01	0.7001	0.4038	0.2999	0.5962
13	130	1.4048	72.74	0.7274	0.4365	0.2726	0.5635

**Tabla 6 TABLA DE COMPOSICIONES CALCULADAS EN EL DESTILADO**

No.exp	t (min)	Destilado		MEG		H2O	
			Ya	Destilado	Destilado	Destilado	Destilado
		IR	% peso	fracción masa Ya	fracción mol ya	fracción masa Yb	fracción mol yb
Inicial	0	-	-	-	-	-	-
1	10	1.3357	2.73	0.0273	0.0081	0.9727	0.9919
2	20	1.3348	1.82	0.0182	0.0053	0.9818	0.9947
3	30	1.3348	1.82	0.0182	0.0053	0.9818	0.9947
4	40	1.3350	2.02	0.0202	0.0060	0.9798	0.9940
5	50	1.3354	2.43	0.0243	0.0072	0.9757	0.9928
6	60	1.3350	2.02	0.0202	0.0060	0.9798	0.9940
7	70	1.3352	2.22	0.0222	0.0066	0.9778	0.9934
8	80	1.3353	2.33	0.0233	0.0069	0.9767	0.9931
9	90	1.3358	2.83	0.0283	0.0084	0.9717	0.9916
10	100	1.3354	2.43	0.0243	0.0072	0.9757	0.9928
11	110	1.3356	2.63	0.0263	0.0078	0.9737	0.9922
12	120	1.3366	3.64	0.0364	0.0109	0.9636	0.9891
13	130	1.3366	3.64	0.0364	0.0109	0.9636	0.9891

En la Tabla 5 se puede observar que la composición de MEG aumenta de 45% peso al 72% peso.

En la Tabla 6 observamos que la composición de MEG en el destilado es muy baja 2-3 % peso, lo que corresponde a una mezcla que en su mayoría se compone de agua.

## 6.2 CÁLCULO DE LOS MOLES FINALES EN LA OLLA VAPORIZADORA $L_R$

Con los resultados anteriores se realizaron los siguientes cálculos con el propósito de verificar su buen resultado para incluirlos en el guión experimental como trabajo solicitado al alumno después de la experimentación.

Se realiza el cálculo de los moles finales contenidos en la olla vaporizadora con la ecuación de Rayleigh mencionada en el marco teórico, calculando por la técnica del trapecio la integral, es decir el área bajo la curva. Con los resultados experimentales se llena la Tabla 7.

Ecuación de Rayleigh

$$\ln \frac{L_A}{L_R} = \int_{x_i}^{x_k} \frac{dx}{y-x} \quad \text{Ecuación 18}$$

$L_A$  = Moles iniciales

$L_R$  = moles finales

y = composición de la mezcla en el destilado

x = composición de la mezcla en el residuo

\* El estudio en base a la ecuación de Rayleigh se realiza en base al componente volátil, en nuestro caso el agua.



**Tabla 7 Cálculo de los moles finales por técnica del trapecio**

No.exp	fracción mol Xb	fracción mol Yb	Yb-Xb	1/(Yb-Xb)	ΔX	ΔX (1/(Yb-Xb))
inicial	0.804					
1	0.795	0.992	0.197	5.076	0.009	0.044
2	0.785	0.995	0.210	4.763	0.010	0.049
3	0.774	0.995	0.220	4.539	0.010	0.047
4	0.762	0.994	0.232	4.311	0.012	0.053
5	0.748	0.993	0.245	4.086	0.014	0.057
6	0.734	0.994	0.260	3.841	0.014	0.055
7	0.718	0.993	0.276	3.624	0.016	0.059
8	0.698	0.993	0.295	3.393	0.019	0.065
9	0.677	0.992	0.315	3.178	0.021	0.068
10	0.654	0.993	0.339	2.948	0.023	0.069
11	0.626	0.992	0.366	2.729	0.028	0.076
12	0.596	0.989	0.393	2.545	0.030	0.075
13	0.564	0.989	0.426	2.350	0.033	0.077
					<b>SUMA</b>	<b>0.793</b>

Secuencia de cálculo

Sustituyendo en la Ecuación 18

$$\ln \frac{L_A}{L_R} = 0.793$$

$$\frac{L_A}{L_R} = e^{0.793}$$

Cálculo de  $L_A$

Se conoce la masa inicial de la mezcla 146.20 kg ( $L_A$ ) Tabla 1, se calculan los moles totales, que es igual a la suma de moles de MEG mas los moles de AGUA.

Moles de MEG

$$n_{MEG} = \frac{M_{MEZCLA} \left( \frac{\%PESO_{MEG}}{100} \right)}{PM_{MEG}}$$

$$n_{MEG} = \frac{146.20 \text{ kg} \left( \frac{45.71 \%_{MEG}}{100} \right)}{62.069 \frac{\text{kg}}{\text{kgmol}}} = 1.077 \text{ kmol de MEG}$$

$$n_{AGUA} = \frac{(M_{MEZCLA} - M_{MEG})}{PM_{AGUA}}$$

$M_{MEG}=66.83 \text{ kg}$

$$n_{AGUA} = \frac{(146.20 \text{ kg} - 66.83 \text{ kg})}{18.015 \frac{\text{kg}}{\text{kgmol}}} = 4.406 \text{ kmol de AGUA}$$

$$L_A = n_{TOTALES} = n_{AGUA} + n_{MEG}$$

$$L_A = 1.077 \text{ kmol} + 4.406 \text{ kmol} = 5.483 \text{ kmol}$$

$$L_R = \frac{L_A}{e^{0.793}}$$

Despejar  $L_R$

$$L_R = \frac{5.483 \text{ kmol}}{e^{0.793}} = 2.48 \text{ kmol}$$

**Cálculo de las moles totales finales  $L_R$  por medición del volumen final en la olla**

De acuerdo con la Tabla 3

$V_F=87.98 \text{ l}$

$\rho = 1.0254 \text{ kg de mezcla / l de mezcla}$

$M_F =$  Masa final

$$M_F = V_F * \rho$$

$$M_F = 87.98 \text{ l de MEZCLA} * 1.0254 \frac{\text{kg de MEZCLA}}{\text{l MEZCLA}} = 90.21 \text{ kg de MEZCLA}$$

$$M_{MEG} = M_F * X_A$$

$X_A = 0.7274$  fracción masa de MEG en la olla, Tabla 5.

$M_{MEG} =$  Masa de MEG

$$M_{MEG} = 90.21 \text{ kg de MEZCLA} * 0.7274 \frac{\text{kg de MEG}}{\text{kg de MEZCLA}} = 65.62 \text{ kg de MEG}$$

$$M_{AGUA} = M_F - M_{MEG}$$

$$M_{AGUA} = 90.21 \text{ kg de MEZCLA} - 65.62 \text{ kg de MEG} = 24.59 \text{ kg de AGUA}$$

Calculo de n:

$$n_{MEG} = \frac{M_{MEG}}{PM_{MEG}}$$

$$n_{MEG} = \frac{65.62 \text{ kg de MEG}}{62.069 \frac{\text{kg}}{\text{kgmol}}} = 1.057 \text{ kmol de MEG}$$

$$n_{AGUA} = \frac{M_{AGUA}}{PM_{AGUA}}$$

$$n_{AGUA} = \frac{24.59 \text{ kg de AGUA}}{18.015 \frac{\text{kg}}{\text{kgmol}}} = 1.365 \text{ kmol de AGUA}$$

$$L_A = n_{TOTALES} = n_{AGUA} + n_{MEG}$$

$$L_A = 1.057 \text{ kmol de MEG} + 1.365 \text{ kmol de AGUA} = 2.422 \text{ kmol}$$

### Cálculo de las moles totales finales en la olla L<sub>R</sub> por Balance de Materia

Balance de Materia por componente de MEG:

$$L_R X_A + D Y_A = L_A X_{A \text{ inicial}} \quad \text{Ecuación 28}$$

Despejando L<sub>R</sub>

$$L_R = \frac{L_A X_{A \text{ inicial}} - D Y_A}{X_A}$$

Calculo de moles iniciales L<sub>A</sub>

$$M_A = V_A * \rho$$

Tomando los datos de la Tabla 3

$$V_A = 145.17 \text{ l}$$

$\rho = 1.0074 \text{ kg de mezcla/ l mezcla}$

$$M_A = 145.17 \text{ l de MEZCLA} * 1.0074 \frac{\text{kg de MEZCLA}}{\text{l MEZCLA}} = 146.25 \text{ kg de MEZCLA}$$

$$M_{MEG} = M_F * X_A$$

$$M_{MEG} = 146.25 \text{ kg de MEZCLA} * 0.4571 \frac{\text{kg de MEG}}{\text{kg de MEZCLA}} = 66.85 \text{ kg de MEG}$$

$$M_{AGUA} = M_F - M_{MEG}$$

$$M_{AGUA} = 146.24 \text{ kg de MEZCLA} - 66.85 \text{ kg de MEG} = 79.39 \text{ kg de AGUA}$$

$$n_{MEG} = \frac{M_{MEG}}{PM_{MEG}}$$

$$n_{MEG} = \frac{66.85 \text{ kg de MEG}}{62.069 \frac{\text{kg MEG}}{\text{kgmol MEG}}} = 1.077 \text{ kmol de MEG}$$

$$n_{AGUA} = \frac{M_{AGUA}}{PM_{AGUA}}$$

$$n_{AGUA} = \frac{79.39 \text{ kg de AGUA}}{18.015 \frac{\text{kg AGUA}}{\text{kgmol AGUA}}} = 4.406 \text{ kmol de AGUA}$$

$$L_0 = n_{TOTALES} = n_{AGUA} + n_{MEG}$$

$$L_0 = 4.406 \text{ kmol de MEG} + 1.077 \text{ kmol de AGUA} = 5.483 \text{ kmol}$$

Cálculo de D

$$n_{MEG} = \frac{M_{destilado} * Y_A}{PM_{MEG}}$$

Sumando el destilado acumulado en la probeta con los resultados obtenidos en la tabla 3 se tiene que:

$M_{destilado} = 55.96 \text{ kg de mezcla}$

La composición final de MEG en el destilado, Tabla 6 es de:

$Y_A = 0.0109$  kg de MEG/ kg de mezcla

$$n_{MEG} = \frac{55.96 \text{ kg de mezcla} * 0.0109 \frac{\text{kg de MEG}}{\text{kg de mezcla}}}{62.069 \frac{\text{kg}}{\text{kgmol}}} = 0.0098 \text{ kmol}$$

$$n_{AGUA} = \frac{M_{MEZCLA} * Y_B}{PM_{AGUA}}$$

La composición final de agua en el destilado, Tabla 6 es de:

$Y_B = 0.09891$  kg de agua/ kg de mezcla

$$n_{AGUA} = \frac{55.96 \text{ kg de mezcla} * 0.09891 \frac{\text{kg de AGUA}}{\text{kg de mezcla}}}{18.015 \frac{\text{kg}}{\text{kgmol}}} = 3.072 \text{ kmol}$$

$$D = n_{TOTALES} = n_{AGUA} + n_{MEG}$$

$$D = n_{TOTALES} = 0.0098 \text{ kmol} + 3.072 \text{ kmol} = 3.082 \text{ kmol}$$

Despejando  $L_R$

$$L_R = \frac{L_A X_{A \text{ inicial}} - D Y_A}{X_A}$$

$$L_R = \frac{(5.483 \text{ kmol mezcla} * 0.1964 \frac{\text{kmol de MEG}}{\text{kmol de mezcla}}) - (3.083 \text{ kmol mezcla} * 0.0081 \frac{\text{kmol de MEG}}{\text{kmol de mezcla}})}{(0.4365 \frac{\text{kmol de MEG}}{\text{kmol de mezcla}})} =$$

2.41 kmol

Resultado del cálculo de las moles finales en la olla L<sub>R</sub>

<b>MÉTODO</b>	<b>RESULTADO</b>
ECUACIÓN DE RAYLEIGH	2.48 kmol
MEDICIÓN DEL VOLUMEN FINAL EN LA OLLA	2.43 kmol
BALANCE DE MATERIA	2.41 kmol

Por los métodos anteriores para el cálculo de las moles finales en la olla vaporizadora, se encuentra que los resultados obtenidos en los tres métodos son muy similares por lo que se concluye que las mediciones son bastante aceptables a pesar de no contar con los instrumentos necesarios.

### 6.3 CÁLCULO DE LA COMPOSICIÓN FINAL DEL DESTILADO

Balance de Materia

$$L_0 X_A^{L_0} = L_R X_A^{L_R} + D Y_A^D \quad \text{Ecuación 29}$$

Despejando  $Y_A^D$

$$Y_A^D = \frac{L_0 X_A^{L_0} - X_A^{L_R} L_R}{D} \quad \text{Ecuación 30}$$

$Y_A^D$

$$= \frac{(5.483 \text{ kmol mezcla} * 0.1964 \frac{\text{kmol de MEG}}{\text{kmol de mezcla}}) - (2.42 \text{ kmol mezcla} * 0.4365 \frac{\text{kmol de MEG}}{\text{kmol de mezcla}})}{3.083 \text{ kmol mezcla}}$$

$$Y_A^D = 0.006659$$

La concentración de MEG en el destilado calculada por el Balance de Materia es muy diferente a la concentración de MEG obtenida experimentalmente en el refractómetro, en el Diagrama de Equilibrio para MEG-AGUA del Anexo 1, observamos que la concentración de MEG es prácticamente constante a partir de 0.65 mol de AGUA en la mezcla en el residuo, con este comentario se explica que la composición en el destilado no presenta un gran cambio durante el proceso de Destilación Diferencial.



## 7. CONCLUSIONES

- Se realizó la calibración del medidor de nivel correspondiente a la olla vaporizadora, mediante la medición del volumen con una probeta, de los resultados obtenidos se deriva una ecuación para el cálculo del volumen en la olla con respecto al nivel indicado en la regleta.  $V_{\text{olla}} = 61.5 + 1.367 \cdot (N_{\text{olla}} - 61.5)$ .
- Con el balance de materia para régimen no permanente existe una diferencia entre el volumen de vapor de mezcla que sale de la olla y el volumen acumulado en la probeta de 0.5 l aproximadamente, esto se debe a errores experimentales.
- Se calculó la temperatura para cada una de las composiciones de la mezcla en la olla vaporizadora. Se observó que la temperatura aumenta conforme aumenta la concentración de MEG en la olla vaporizadora.
- El experimento es reproducible es decir, siempre se comporta igual, como se observa en las tablas de resultados experimentales del Anexo 1.
- Se logró llegar al 60 % de composición de MEG en aproximadamente 1.7 horas de experimentación.
- La concentración de MEG en el destilado se mantiene prácticamente constante en 1-2 % en todas las experimentaciones.
- La concentración de MEG en el destilado calculada por el balance de materia es muy diferente a la concentración de MEG obtenida experimental y leída en el refractómetro, esto se explica porque en el Diagrama de Equilibrio para MEG-AGUA del Anexo 3, observamos que la curva se vuelve prácticamente constante, es decir, la concentración de MEG es prácticamente la misma a partir de 0.65 mol de AGUA en la mezcla.
- Con los métodos utilizados para el cálculo de las moles finales de mezcla en la olla vaporizadora, se encuentra que los resultados obtenidos en los tres métodos descritos en Análisis de Resultados son muy similares por lo que se concluye que

las mediciones son bastante aceptables y representativas del proceso a pesar de no contar con los instrumentos necesarios.

- Concentrar la mezcla MEG- AGUA hasta un 60% en peso es un experimento factible para recuperar los residuos de MEG generados en os experimentos de LIQ I.

- Se elaboró el guión experimental con el nombre de “Balance de Materia en un proceso de Destilación Diferencial”, que se integrará al banco de guiones experimentales del LIQ I.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

*Valiente, Antonio “Destilación Diferencial en Alambiques y en columnas de platos”, 2002.*

Profesores del LIQ. *Procesos de Separación II*, Laboratorio de Ingeniería Química Facultad de Química UNAM, Diciembre del 2002.

Faust, Alan S. *“Principios de Operaciones Unitarias”*, 2<sup>a</sup> edición, Editorial Continental, México 2006.

Mc Cabe L. Warren ; Julian C. Smith. *“Operaciones básicas de Ingeniería Química”*. Editorial Reverté. Barcelona 1968.

## ANEXO 1 EXPERIMENTACIONES

A continuación se presentan los datos experimentales obtenidos y cálculos realizados durante la elaboración del presente trabajo de Tesis.

### PRUEBA EXPERIMENTAL 1

### RESULTADOS EXPERIMENTALES EN DESTILACIÓN DIFERENCIAL

No.exp	t min	Pv kg/cm <sup>2</sup>	temperatura en la olla (T) °C	volumen en la olla (L) 	volumen en el destilado (D) 	volumen en el condensado (C) 	Liq en la Olla vaporizadora		Destilado	
							Conc. de MEG IR	Xa % peso	Conc. de MEG IR	Ya % peso
Inicial			Tamb=22	137			1.3804	48.02		
1	10	1.4	98.00	126	4.44	6.28	1.3802	47.82	1.3357	2.73
2	20	1.6	98.00	124	4.66	5.79	1.3817	49.34	1.3348	1.82
3	30	1.6	98.00	120	4.27	5.56	1.3835	51.16	1.3348	1.82
4	40	1.6	98.00	115	4.60	5.49	1.3852	52.88	1.3350	2.02
5	50	1.8	98.00	113	4.74	6.11	1.3864	54.10	1.3354	2.43
6	60	1.8	98.00	109	4.30	5.46	1.3880	55.72	1.3350	2.02
7	70	1.9	98.00	106	4.30	5.75	1.3900	57.75	1.3352	2.22
8	80	2.0	98.00	103	4.52	6.16	1.3918	59.57	1.3353	2.33
9	90	2.1	98.00	99	4.41	5.65	1.3944	62.20	1.3358	2.83
10	100	2.1	98.00	96	4.27	5.18	1.3954	63.22	1.3354	2.43
11	110	2.2	98.00	93	4.20	5.1	1.3986	66.46	1.3356	2.63
12	120	2.3	98.00	90	3.95	5.28	1.4012	69.09	1.3366	3.64
13	130	2.4	98.00	89	3.70	5.04	1.4039	71.83	1.3366	3.64

## RESULTADOS EXPERIMENTALES CON LA TEMPERATURA EN LA OLLA CALCULADA Y LA DENSIDAD

t min	temperatura de la mezcla en la olla °C	volumen en la olla (L) l	$\rho$ kg/L	masa en la olla (L) kg	Volumen en el destilado (D) l	temperatur a del destilado (D) °C	$\rho$ kg/L	masa del destilado (D) kg	volumen del condensad o (C) l
	22	145.17	1.0074	146.25					
10	99.68	140.73	1.0088	141.96	4.44	20	1.0025	4.45	6.28
20	100.05	135.95	1.0100	137.31	4.66	20	1.0010	4.66	5.79
30	100.52	131.55	1.0111	133.01	4.27	20	1.0010	4.27	5.56
40	100.99	126.85	1.0124	128.42	4.60	20	1.0013	4.61	5.50
50	101.34	122.10	1.0139	123.8	4.74	20	1.0020	4.75	6.11
60	101.83	117.74	1.0153	119.54	4.30	20	1.0013	4.31	5.46
70	102.49	113.33	1.0167	115.22	4.30	20	1.0017	4.31	5.75
80	103.12	108.79	1.0184	110.79	4.52	20	1.0019	4.53	6.16
90	104.12	104.22	1.0199	106.29	4.41	20	1.0027	4.42	5.65
100	104.54	100.19	1.0219	102.38	4.27	20	1.0020	4.28	5.18
110	105.99	95.75	1.0233	97.98	4.20	20	1.0024	4.21	5.10
120	107.34	91.74	1.0248	94.02	3.95	20	1.0041	3.97	5.28
130	108.94	87.98	1.0253	90.29	3.70	20	1.0041	3.72	5.04

**TABLA DE COMPOSICIONES CALCULADAS EN EL RESIDUO DE LA OLLA VAPORIZADORA**

No.exp	t (min)	Liq en la Olla		MEG		H2O	
			Xa	Liq en la Olla	Liq en la Olla	Liq en la Olla	Liq en la Olla
		IR	% peso	fracción masa Xa	fracción mol xa	fracción masa Xb	fracción mol xb
Inicial		1.3781	45.71	0.4571	0.1964	0.5429	0.8036
1	10	1.3795	47.06	0.4706	0.2051	0.5294	0.7949
2	20	1.3810	48.59	0.4859	0.2153	0.5141	0.7847
3	30	1.3825	50.10	0.5010	0.2256	0.4990	0.7744
4	40	1.3842	51.82	0.5182	0.2379	0.4818	0.7621
5	50	1.3860	53.71	0.5371	0.2519	0.4629	0.7481
6	60	1.3878	55.57	0.5557	0.2663	0.4443	0.7337
7	70	1.3898	57.56	0.5756	0.2825	0.4244	0.7175
8	80	1.3920	59.81	0.5981	0.3016	0.4019	0.6984
9	90	1.3944	62.19	0.6219	0.3231	0.3781	0.6769
10	100	1.3968	64.61	0.6461	0.3464	0.3539	0.6536
11	110	1.3994	67.32	0.6732	0.3742	0.3268	0.6258
12	120	1.4021	70.01	0.7001	0.4038	0.2999	0.5962
13	130	1.4048	72.74	0.7274	0.4365	0.2726	0.5635

## TABLA DE COMPOSICIONES CLACULADAS EN EL DESTILADO

No.exp	t (min)	Destilado		MEG		H2O	
			Ya	Destilado	Destilado	Destilado	Destilado
		IR	% peso	fracción masa Ya	fracción mol de ya	fracción masa Yb	fracción mol yb
Inicial		-	-	-	-	-	-
1	10	1.3357	2.73	0.0273	0.0081	0.9727	0.9919
2	20	1.3348	1.82	0.0182	0.0053	0.9818	0.9947
3	30	1.3348	1.82	0.0182	0.0053	0.9818	0.9947
4	40	1.3350	2.02	0.0202	0.0060	0.9798	0.9940
5	50	1.3354	2.43	0.0243	0.0072	0.9757	0.9928
6	60	1.3350	2.02	0.0202	0.0060	0.9798	0.9940
7	70	1.3352	2.22	0.0222	0.0066	0.9778	0.9934
8	80	1.3353	2.33	0.0233	0.0069	0.9767	0.9931
9	90	1.3358	2.83	0.0283	0.0084	0.9717	0.9916
10	100	1.3354	2.43	0.0243	0.0072	0.9757	0.9928
11	110	1.3356	2.63	0.0263	0.0078	0.9737	0.9922
12	120	1.3366	3.64	0.0364	0.0109	0.9636	0.9891
13	130	1.3366	3.64	0.0364	0.0109	0.9636	0.9891

PRUEBA EXPERIMENTAL 2

RESULTADOS EXPERIMENTALES EN NDESTILACIÓN DIFERENCIAL

No.exp	t min	Pv kg/cm <sup>2</sup>	temperatura en la olla (T) °C	volumen en la olla (L) 	volumen en el destilado (D) 	volumen en el condensado (C) 	Liq en la Olla vaporizadora		Destilado	
							Conc. de MEG	Xa	Conc. de MEG	Ya
							IR	% peso	IR	% peso
Inicial	----	1.5	Tamb=25	137	0	0	1.3804	48.02	0	0
1	10	1.4	198	126	4.44	6.28	1.3802	47.82	1.3357	2.73
2	20	1.6	198	124	4.66	5.79	1.3817	49.34	1.3348	1.82
3	30	1.6	198	120	4.27	5.56	1.3835	51.16	1.3348	1.82
4	40	1.6	198	115	4.6	5.495	1.3852	52.88	1.335	2.02
5	50	1.8	198	113	4.74	6.11	1.3864	54.10	1.3354	2.43
6	60	1.8	198	109	4.3	5.46	1.3880	55.72	1.335	2.02
7	70	1.9	198	106	4.3	5.75	1.3900	57.75	1.3352	2.22
8	80	2	198	103	4.52	6.16	1.3918	59.57	1.3353	2.33
9	90	2.1	198	99	4.405	5.65	1.3944	62.20	1.3358	2.83
10	100	2.1	198	96	4.27	5.18	1.3954	63.22	1.3354	2.43
11	110	2.2	198	93	4.2	5.1	1.3986	66.46	1.3356	2.63
12	120	2.3	198	90	3.95	5.28	1.4012	69.09	1.3366	3.64
13	130	2.4	198	87	3.7	5.04	1.4039	71.83	1.335	2.02



## RESULTADOS EXPERIMENTALES CON LA TEMPERATURA EN LA OLLA CALCULADA Y LA DENSIDAD

t min	temperatura de la mezcla en la olla °C	volumen en la olla (L) l	$\rho$ kg/L	masa en la olla (L) kg	Volumen en el destilado (D) l	temperatura del destilado (D) °C	$\rho$ kg/L	masa del destilado (D) kg	volumen del condensado (C) l
	25.00	<b>164.66</b>	0.9821	161.71					
10	132.70	<b>149.63</b>	0.9821	146.94	4.44	20	1.0025	4.45	6.28
20	134.02	<b>146.90</b>	0.9825	144.33	4.66	20	1.0010	4.66	5.79
30	135.62	<b>141.43</b>	0.9830	139.03	4.27	20	1.0010	4.27	5.56
40	137.15	<b>134.60</b>	0.9835	132.38	4.6	20	1.0013	4.61	5.495
50	138.23	<b>131.87</b>	0.9839	129.74	4.74	20	1.0020	4.75	6.11
60	139.70	<b>126.40</b>	0.9844	124.43	4.3	20	1.0013	4.31	5.46
70	141.55	<b>122.30</b>	0.9850	120.46	4.3	20	1.0017	4.31	5.75
80	143.24	<b>118.20</b>	0.9855	116.49	4.52	20	1.0019	4.53	6.16
90	145.72	<b>112.74</b>	0.9863	111.19	4.405	20	1.0027	4.42	5.65
100	146.69	<b>108.64</b>	0.9865	107.18	4.27	20	1.0020	4.28	5.18
110	149.84	<b>104.54</b>	0.9875	103.23	4.2	20	1.0024	4.21	5.1
120	152.46	<b>100.44</b>	0.9883	99.26	3.95	20	1.0041	3.97	5.28
130	155.26	<b>96.34</b>	0.9891	95.29	3.7	20	1.0013	3.70	5.04

**TABLA DE COMPOSICIONES CALCULADAS EN EL RESIDUO DE LA OLLA VAPORIZADORA**

No.exp	t (min)	Liq en la Olla		MEG		H2O	
			Xa	Liq en la Olla	Liq en la Olla	Liq en la Olla	Liq en la Olla
		IR	% peso	fracción masa Xa	fracción mol xa	fracción masa Xb	fracción mol xb
Inicial		<b>1.3804</b>	<b>48.02</b>	0.4802	0.7609	0.5198	0.2391
1	10	1.3802	47.82	0.4782	0.7595	0.5218	0.2405
2	20	1.3817	49.34	0.4934	0.7704	0.5066	0.2296
3	30	1.3835	51.16	0.5116	0.7830	0.4884	0.2170
4	40	1.3852	52.88	0.5288	0.7945	0.4712	0.2055
5	50	1.3864	54.10	0.5410	0.8024	0.4590	0.1976
6	60	1.388	55.72	0.5572	0.8126	0.4428	0.1874
7	70	1.39	57.75	0.5775	0.8248	0.4225	0.1752
8	80	1.3918	59.57	0.5957	0.8354	0.4043	0.1646
9	90	1.3944	62.20	0.6220	0.8501	0.3780	0.1499
10	100	1.3954	63.22	0.6322	0.8555	0.3678	0.1445
11	110	1.3986	66.46	0.6646	0.8722	0.3354	0.1278
12	120	1.4012	69.09	0.6909	0.8851	0.3091	0.1149
13	130	1.4039	71.83	0.7183	0.8978	0.2817	0.1022

**TABLA DE COMPOSICIONES CALCULADAS EN EL DESTILADO**

No.exp	t (min)	Destilado		MEG		H2O	
			Ya	Destilado	Destilado	Destilado	Destilado
		IR	% peso	fracción masa Ya	fracción mol de ya	fracción masa Yb	fracción mol yb
Inicial		-	-	-	-	-	-
1	10	1.3357	2.73	0.0273	0.0882	0.9727	0.9118
2	20	1.3348	1.82	0.0182	0.0600	0.9818	0.9400
3	30	1.3348	1.82	0.0182	0.0600	0.9818	0.9400
4	40	1.335	2.02	0.0202	0.0664	0.9798	0.9336
5	50	1.3354	2.43	0.0243	0.0789	0.9757	0.9211
6	60	1.335	2.02	0.0202	0.0664	0.9798	0.9336
7	70	1.3352	2.22	0.0222	0.0727	0.9778	0.9273
8	80	1.3353	2.33	0.0233	0.0758	0.9767	0.9242
9	90	1.3358	2.83	0.0283	0.0913	0.9717	0.9087
10	100	1.3354	2.43	0.0243	0.0789	0.9757	0.9211
11	110	1.3356	2.63	0.0263	0.0851	0.9737	0.9149
12	120	1.3366	3.64	0.0364	0.1152	0.9636	0.8848
13	130	1.335	2.02	0.0202	0.0664	0.9798	0.9336

PRUEBA EXPERIMENTAL 3

RESULTADOS EXPERIMENTALES EN DESTILACIÓN DIFERENCIAL

No.exp	t min	Pv kg/cm <sup>2</sup>	temperatura en la olla (T) °C	volumen en la olla (L) I	volumen en el destilado (D) I	volumen en el condensado (C) I	Liq en la Olla vaporizadora		Destilado	
							Conc. de MEG	Xa	Conc. de MEG	Ya
							IR	% peso	IR	% peso
Inicial			Tamb=22	121			1.38	47.61		
1	10	1.6	194	118	5.72	5.5	1.3832	50.86	1.3358	2.83
2	20	1.7	195	116	4.74	5.47	1.3865	54.20	1.3362	3.24
3	30	1.7	194	114	4.48	5.11	1.3885	56.23	1.3362	3.24
4	40	1.65	194	111	4.2	5	1.3905	58.25	1.3372	4.25
5	50	1.9	194	108	4.26	5.16	1.3912	58.96	1.3352	2.22
6	60	1.9	194	104	4.8	5.44	1.3943	62.10	1.3378	4.86
7	70	1.8	194	100	4.46	5.32	1.3964	64.23	1.3355	2.53
8	80	2	194	98	4.1	4.92	1.3994	67.27	1.3374	4.45
9	90	2	194	94	4	4.7	1.4015	69.40	1.3395	6.58
10	100	2	194	91	3.36	4.184	1.402	69.90	1.3367	3.74
11	110	2.5	196	88	3.82	4.83	1.4062	74.16	1.3382	5.26
12	120	2.5	1.96	84.5	4.12	4.9	1.4073	75.27	1.3374	4.45

## RESULTADOS EXPERIMENTALES CON LA TEMPERATURA EN LA OLLA CALCULADA Y LA DENSIDAD

t min	temperatura de la mezcla en la olla °C	volumen en la olla (L) l	$\rho$ kg/L	masa en la olla (L) kg	Volumen en el destilado (D) l	temperatura del destilado (D) °C	$\rho$ kg/L	masa del destilado (D) kg	volumen del condensado (C) l
0	22.00	<b>142.80</b>	0.9820	140.23					
10	135.35	<b>138.70</b>	0.9829	136.33	5.72	20	1.0027	5.74	5.5
20	138.33	<b>135.97</b>	0.9839	133.78	4.74	20	1.0034	4.76	5.47
30	140.16	<b>133.23</b>	0.9845	131.17	4.48	20	1.0034	4.50	5.11
40	142.02	<b>129.13</b>	0.9851	127.21	4.2	20	1.0051	4.22	5
50	142.67	<b>125.04</b>	0.9853	123.20	4.26	20	1.0017	4.27	5.16
60	145.62	<b>119.57</b>	0.9862	117.92	4.8	20	1.0061	4.83	5.44
70	147.66	<b>114.11</b>	0.9868	112.60	4.46	20	1.0022	4.47	5.32
80	150.64	<b>111.37</b>	0.9877	110.01	4.1	20	1.0054	4.12	4.92
90	152.77	<b>105.91</b>	0.9883	104.67	4	20	1.0089	4.04	4.7
100	153.28	<b>101.81</b>	0.9885	100.64	3.36	20	1.0043	3.37	4.184
110	157.69	<b>97.71</b>	0.9897	96.71	3.82	20	1.0068	3.85	4.83
120	158.88	<b>92.93</b>	0.9901	92.00	4.12	20	1.0054	4.14	4.9

**TABLA DE COMPOSICIONES CALCULADAS EN EL RESIDUO DE LA OLLA VAPORIZADORA**

No.exp	t (min)	Liq en la Olla		MEG		H2O	
			Xa	Liq en la Olla	Liq en la Olla	Liq en la Olla	Liq en la Olla
		IR	% peso	fracción masa Xa	fracción mol xa	fracción masa Xb	fracción mol xb
Inicial		1.38	47.61	0.4761	0.7580	0.5239	0.2420
1	10	1.3832	50.86	0.5086	0.7810	0.4914	0.2190
2	20	1.3865	54.20	0.5420	0.8030	0.4580	0.1970
3	30	1.3885	56.23	0.5623	0.8157	0.4377	0.1843
4	40	1.3905	58.25	0.5825	0.8278	0.4175	0.1722
5	50	1.3912	58.96	0.5896	0.8319	0.4104	0.1681
6	60	1.3943	62.10	0.6210	0.8495	0.3790	0.1505
7	70	1.3964	64.23	0.6423	0.8609	0.3577	0.1391
8	80	1.3994	67.27	0.6727	0.8763	0.3273	0.1237
9	90	1.4015	69.40	0.6940	0.8865	0.3060	0.1135
10	100	1.402	69.90	0.6990	0.8889	0.3010	0.1111
11	110	1.4062	74.16	0.7416	0.9082	0.2584	0.0918
12	120	1.4073	75.27	0.7527	0.9130	0.2473	0.0870

**TABLA DE COMPOSICIONES CALCULADAS EN EL DESTILADO**

No.exp	t (min)	Destilado		MEG		H2O	
			Ya	Destilado	Destilado	Destilado	Destilado
		IR	% peso	fracción masa Ya	fracción mol de ya	fracción masa Yb	fracción mol yb
Inicial		-	-	-	-	-	-
1	10	1.3358	2.83	0.0134	0.0446	0.9866	0.9554
2	20	1.3362	3.24	0.0134	0.0446	0.9866	0.9554
3	30	1.3362	3.24	0.0134	0.0446	0.9866	0.9554
4	40	1.3372	4.25	0.0134	0.0446	0.9866	0.9554
5	50	1.3352	2.22	0.0134	0.0445	0.9866	0.9555
6	60	1.3378	4.86	0.0134	0.0446	0.9866	0.9554
7	70	1.3355	2.53	0.0134	0.0446	0.9866	0.9554
8	80	1.3374	4.45	0.0134	0.0446	0.9866	0.9554
9	90	1.3395	6.58	0.0134	0.0447	0.9866	0.9553
10	100	1.3367	3.74	0.0134	0.0446	0.9866	0.9554
11	110	1.3382	5.26	0.0134	0.0446	0.9866	0.9554
12	120	1.3374	4.45	0.0134	0.0446	0.9866	0.9554

PRUEBA EXPERIMENTAL 4

RESULTADOS EXPERIMENTALES EN NDESTILACIÓN DIFERENCIAL

No.exp	t min	Pv kg/cm <sup>2</sup>	temperatura en la olla (T) °C	volumen en la olla (L) I	volumen en el destilado (D) I	volumen en el condensado (C) I	Liq en la Olla vaporizadora		Destilado	
							Conc. de MEG	Xa	Conc. de MEG	Ya
							IR	% peso	IR	% peso
Inicial	-----	-----	23	136	-----	-----	1.3770	44.58	-----	-----
1	10	1.9	190	133	3.85	4.5	1.3780	45.59	1.3340	1.01
2	20	2	193	130	4.17	5.16	1.3785	46.09	1.3345	1.52
3	30	2	196	127	4.20	5.8	1.3800	47.61	1.3340	1.01
4	40	2	196	124	4.30	5.44	1.3820	49.64	1.3345	1.52
5	50	2	196	121	4.55	6	1.3830	50.65	1.3350	2.02
6	60	2	196	117	4.75	6	1.3840	51.67	1.3345	1.52
7	70	2	196	114	4.75	5.7	1.3850	52.68	1.3345	1.52
8	80	2	196	111	3.02	5.5	1.3860	53.69	1.3340	1.01
9	90	2	196	109	3.86	5.4	1.3880	55.72	1.3340	1.01
10	100	2	196	106	3.76	5.62	1.3900	57.75	1.3345	1.52
11	110	2.1	196	103	3.84	6.2	1.3920	59.77	1.3340	1.01
12	120	2.1	196	100	3.88	5.5	1.3952	71.80	1.3340	1.01



## RESULTADOS EXPERIMENTALES CON LA TEMPERATURA EN LA OLLA CALCULADA Y LA DENSIDAD

t min	temperatura de la mezcla en la olla °C	volumen en la olla (L) l	$\rho$ kg/L	masa en la olla (L) kg	volumen en el destilado (D) l	temperatura del destilado (D) °C	$\rho$ kg/L	masa del destilado (D) kg	volumen del condensado (C) l
0	23	163.29	0.9811	160.20					
10	130.78	159.19	0.9814	156.23	3.85	20	0.9996	3.85	4.50
20	131.22	155.09	0.9815	152.23	4.17	20	1.0005	4.17	5.16
30	132.53	151.00	0.9820	148.28	4.20	20	0.9996	4.20	5.80
40	134.29	146.90	0.9826	144.34	4.30	20	1.0005	4.30	5.44
50	135.18	142.80	0.9829	140.35	4.55	20	1.0013	4.56	6.00
60	136.07	137.33	0.9832	135.02	4.75	20	1.0005	4.75	6.00
70	136.97	133.23	0.9835	131.03	4.75	20	1.0005	4.75	5.70
80	137.87	129.13	0.9838	127.04	3.02	20	0.9996	3.02	5.50
90	139.70	126.40	0.9844	124.43	3.86	20	0.9996	3.86	5.40
100	141.55	122.30	0.9850	120.46	3.76	20	1.0005	3.76	5.62
110	143.43	118.20	0.9855	116.50	3.84	20	0.9996	3.84	6.20
120	145.33	114.11	0.9861	112.52	3.88	20	0.9996	3.88	5.50

**TABLA DE COMPOSICIONES CALCULADAS EN EL RESIDUO DE LA OLLA VAPORIZADORA**

No.exp	t (min)	Liq en la olla		MEG		H2O	
			Xa	Liq en la Olla	Liq en la Olla	Liq en la Olla	Liq en la Olla
		IR	% peso	fracción masa Xa	fracción mol xa	fracción masa Xb	fracción mol xb
Inicial		1.3770	<b>44.58</b>	0.4458	0.7348	0.5542	0.2652
1	10	1.3780	45.59	0.4559	0.7427	0.5441	0.2573
2	20	1.3785	46.09	0.4609	0.7466	0.5391	0.2534
3	30	1.3800	47.61	0.4761	0.7580	0.5239	0.2420
4	40	1.3820	49.64	0.4964	0.7725	0.5036	0.2275
5	50	1.3830	50.65	0.5065	0.7796	0.4935	0.2204
6	60	1.3840	51.67	0.5167	0.7865	0.4833	0.2135
7	70	1.3850	52.68	0.5268	0.7932	0.4732	0.2068
8	80	1.3860	53.69	0.5369	0.7998	0.4631	0.2002
9	90	1.3880	55.72	0.5572	0.8126	0.4428	0.1874
10	100	1.3900	57.75	0.5775	0.8248	0.4225	0.1752
11	110	1.3920	59.77	0.5977	0.8366	0.4023	0.1634
12	120	1.3952	71.80	0.6180	0.8479	0.3820	0.1521

## TABLA DE COMPOSICIONES CALCULADAS EN EL DESTILADO

No.exp	t (min)	Destilado		MEG		H2O	
			Ya	Destilado	Destilado	Destilado	Destilado
		IR	% peso	fracción masa Ya	fracción mol de ya	fracción masa Yb	fracción mol yb
Inicial		-	-	-	-	-	-
1	10	1.3340	1.01	0.0101	0.0339	0.9899	0.9661
2	20	1.3345	1.52	0.0152	0.0503	0.9848	0.9497
3	30	1.3340	1.01	0.0101	0.0339	0.9899	0.9661
4	40	1.3345	1.52	0.0152	0.0503	0.9848	0.9497
5	50	1.3350	2.02	0.0202	0.0664	0.9798	0.9336
6	60	1.3345	1.52	0.0152	0.0503	0.9848	0.9497
7	70	1.3345	1.52	0.0152	0.0503	0.9848	0.9497
8	80	1.3340	1.01	0.0101	0.0339	0.9899	0.9661
9	90	1.3340	1.01	0.0101	0.0339	0.9899	0.9661
10	100	1.3345	1.52	0.0152	0.0503	0.9848	0.9497
11	110	1.3340	1.01	0.0101	0.0339	0.9899	0.9661
12	120	1.3340	1.01	0.0101	0.0339	0.9899	0.9661

PRUEBA EXPERIMENTAL 5

RESULTADOS EXPERIMENTALES EN NDESTILACIÓN DIFERENCIAL

No.exp	t min	Pv kg/cm <sup>2</sup>	temperatura en la olla (T) °C	volumen en la olla (L) I	volumen en el destilado (D) I	volumen en el condensado (C) I	Liq en la Olla vaporizadora		Destilado	
							Conc. de MEG	Xa	Conc. de MEG	Ya
							IR	% peso	IR	% peso
Inicial			Tamb=22°C	138			1.3730	<b>40.52</b>		<b>0</b>
1	10	1.4	192	137	3.37	4.30	1.3750	42.55	1.3335	0.50
2	20	1.7	192	135	4.00	4.27	1.3765	44.07	1.334	1.01
3	30	1.8	200	127	4.72	5.80	1.3785	46.09	1.334	1.01
4	40	1.8	200	127	4.60	5.10	1.3785	46.09	1.3340	1.01
5	50	1.8	200	124	4.20	5.20	1.3810	48.63	1.3335	0.50
6	60	1.9	200	121	4.46	5.30	1.3815	49.13	1.3335	0.50
7	70	1.9	200	118	4.20	4.90	1.3840	51.67	1.3335	0.50
8	80	2.0	200	115	4.40	5.53	1.3850	52.68	1.3335	0.50
9	90	2.0	200	112	4.20	6.50	1.3865	54.20	1.3335	0.50
10	100	2.0	200	108	4.60	5.34	1.3885	56.23	1.3340	1.01
11	110	2.1	200	105	4.36	6.00	1.3910	58.76	1.3335	0.50

## RESULTADOS EXPERIMENTALES CON LA TEMPERATURA EN LA OLLA CALCULADA Y LA DENSIDAD

t min	temperatura de la mezcla en la olla °C	volumen en la olla (L) l	$\rho$ kg/L	masa en la olla (L) kg	Volumen en el destilado (D) l	temperatura del destilado (D) °C	$\rho$ kg/L	masa del destilado (D) kg	volumen del condensado (C) l
0	22	166.02	0.9799	162.68					
10	128.20	164.66	0.9805	161.44	3.37	20	0.9987	3.37	4.30
20	129.49	161.93	0.9809	158.84	4.00	20	0.9996	4.00	4.27
30	131.22	151.00	0.9815	148.21	4.72	20	0.9996	4.72	5.80
40	131.22	151.00	0.9815	148.21	4.60	20	0.9996	4.60	5.10
50	133.40	146.90	0.9823	144.29	4.20	20	0.9987	4.19	5.20
60	133.85	142.80	0.9824	140.29	4.46	20	0.9987	4.45	5.30
70	136.07	138.70	0.9832	136.37	4.20	20	0.9987	4.19	4.90
80	136.97	134.60	0.9835	132.38	4.40	20	0.9987	4.39	5.53
90	138.33	130.50	0.9839	128.40	4.20	20	0.9987	4.19	6.50
100	140.16	125.04	0.9845	123.10	4.60	20	0.9996	4.60	5.34
110	142.48	120.94	0.9853	119.15	4.36	20	0.9987	4.35	6.00

**TABLA DE COMPOSICIONES CALCULADAS EN EL RESIDUO DE LA OLLA VAPORIZADORA**

No.exp	t (min)	Liq en la olla		MEG		H2O	
			Xa	Liq en la Olla	Liq en la Olla	Liq en la Olla	Liq en la Olla
		IR	% peso	fracción masa Xa	fracción mol xa	fracción masa Xb	fracción mol xb
Inicial		1.3730	<b>40.52</b>	0.4052	0.7013	0.5948	0.2987
1	10	1.3750	42.55	0.4255	0.7184	0.5745	0.2816
2	20	1.3765	44.07	0.4407	0.7308	0.5593	0.2692
3	30	1.3785	46.09	0.4609	0.7466	0.5391	0.2534
4	40	1.3785	46.09	0.4609	0.7466	0.5391	0.2534
5	50	1.3810	48.63	0.4863	0.7653	0.5137	0.2347
6	60	1.3815	49.13	0.4913	0.7690	0.5087	0.2310
7	70	1.3840	51.67	0.5167	0.7865	0.4833	0.2135
8	80	1.3850	52.68	0.5268	0.7932	0.4732	0.2068
9	90	1.3865	54.20	0.5420	0.8030	0.4580	0.1970
10	100	1.3885	56.23	0.5623	0.8157	0.4377	0.1843
11	110	1.3910	58.76	0.5876	0.8308	0.4124	0.1692

## TABLA DE COMPOSICIONES EN EL DESTILADO

No.exp	t (min)	Destilado		MEG		H2O	
			Ya	Destilado	Destilado	Destilado	Destilado
		IR	% peso	fracción masa Ya	fracción mol de ya	fracción masa Yb	fracción mol yb
Inicial		-	-	-	-	-	-
1	10	1.3335	0.50	0.0050	0.0171	0.9950	0.9829
2	20	1.334	1.01	0.0101	0.0339	0.9899	0.9661
3	30	1.334	1.01	0.0101	0.0339	0.9899	0.9661
4	40	1.3340	1.01	0.0101	0.0339	0.9899	0.9661
5	50	1.3335	0.50	0.0050	0.0171	0.9950	0.9829
6	60	1.3335	0.50	0.0050	0.0171	0.9950	0.9829
7	70	1.3335	0.50	0.0050	0.0171	0.9950	0.9829
8	80	1.3335	0.50	0.0050	0.0171	0.9950	0.9829
9	90	1.3335	0.50	0.0050	0.0171	0.9950	0.9829
10	100	1.3340	1.01	0.0101	0.0339	0.9899	0.9661
11	110	1.3335	0.50	0.0050	0.0171	0.9950	0.9829

PRUEBA EXPERIMENTAL 6

RESULTADOS EXPERIMENTALES EN NDESTILACIÓN DIFERENCIAL

No.exp	t min	Pv kg/cm <sup>2</sup>	temperatura en la olla (T) °C	volumen en la olla (L) 	volumen en el destilado (D) 	volumen en el condensado (C) 	Liq en la Olla vaporizadora		Destilado	
							Conc. de MEG	Xa	Conc. de MEG	Ya
							IR	% peso	IR	% peso
Inicial			Tamb=22°C	148			1.3740	<b>41.54</b>		
1	10	1.8	196	144	2.92	4.68	1.3750	42.55	1.3360	3.04
2	20	1.9	196	141	3.72	5.6	1.3760	43.56	1.3350	2.02
3	30	1.9	196	140	4.65	5.45	1.3780	45.59	1.3340	1.01
4	40	2.0	196	136	5.19	6.2	1.3790	46.60	1.3340	1.01
5	50	2.0	196	132	5.88	6	1.3800	47.61	1.3350	2.02
6	60	2.0	196	128	5.24	5.92	1.3810	48.63	1.3340	1.01
7	70	2.0	196	125	5.78	6.2	1.3820	49.64	1.3340	1.01
8	80	2.0	196	123	4.72	5.8	1.3840	51.67	1.3340	1.01
9	90	2.0	196	119	4.63	5.95	1.3860	53.69	1.3340	1.01
10	100	2.1	196	116	4.79	6.25	1.3870	54.71	1.3340	1.01



## RESULTADOS EXPERIMENTALES CON LA TEMPERATURA EN LA OLLA CALCULADA Y LA DENSIDAD.

t min	temperatura de la mezcla en la olla °C	volumen en la olla (L) l	$\rho$ kg/L	masa en la olla (L) kg	volumen en el destilado (D) l	temperatura del destilado (D) °C	$\rho$ kg/L	masa del destilado (D) kg	volumen del condensado (C) l
0	22.00	179.69	0.9802	176.13	-----	-----	-----		-----
10	128.20	174.22	0.9805	170.82	2.92	20	1.0031	2.93	4.68
20	129.06	170.12	0.9808	166.86	3.72	20	1.0013	3.72	5.60
30	130.78	168.76	0.9814	165.62	4.65	20	0.9996	4.65	5.45
40	131.65	163.29	0.9817	160.30	5.19	20	0.9996	5.19	6.20
50	132.53	157.83	0.9820	154.98	5.88	20	1.0013	5.89	6.00
60	133.40	152.36	0.9823	149.66	5.24	20	0.9996	5.24	5.92
70	134.29	148.26	0.9826	145.68	5.78	20	0.9996	5.78	6.20
80	136.07	145.53	0.9832	143.08	4.72	20	0.9996	4.72	5.80
90	137.87	140.06	0.9838	137.79	4.63	20	0.9996	4.63	5.95
100	138.78	135.97	0.9841	133.80	4.79	20	0.9996	4.79	6.25

**TABLA DE COMPOSICIONES CALCULADAS EN EL RESIDUO DE LA OLLA VAPORIZADORA**

No.exp	t (min)	Liq en la olla		MEG		H2O	
			Xa	Liq en la Olla	Liq en la Olla	Liq en la Olla	Liq en la Olla
		IR	% peso	fracción masa Xa	fracción mol xa	fracción masa Xb	fracción mol xb
Inicial		1.3740	<b>41.54</b>	0.4154	0.7100	0.5846	0.2900
1	10	1.3750	42.55	0.4255	0.7184	0.5745	0.2816
2	20	1.3760	43.56	0.4356	0.7267	0.5644	0.2733
3	30	1.3780	45.59	0.4559	0.7427	0.5441	0.2573
4	40	1.3790	46.60	0.4660	0.7504	0.5340	0.2496
5	50	1.3800	47.61	0.4761	0.7580	0.5239	0.2420
6	60	1.3810	48.63	0.4863	0.7653	0.5137	0.2347
7	70	1.3820	49.64	0.4964	0.7725	0.5036	0.2275
8	80	1.3840	51.67	0.5167	0.7865	0.4833	0.2135
9	90	1.3860	53.69	0.5369	0.7998	0.4631	0.2002
10	100	1.3870	54.71	0.5471	0.8063	0.4529	0.1937

**TABLA DE COMPOSICIONES CALCULADAS EN EL DESTILADO**

No.exp	t (min)	Destilado		MEG		H2O	
			Ya	Destilado	Destilado	Destilado	Destilado
		IR	% peso	fracción masa Ya	fracción mol de ya	fracción masa Yb	fracción mol yb
Inicial		-	-	-	-	-	-
1	10	1.3360	3.04	0.0304	0.0973	0.9696	0.9027
2	20	1.3350	2.02	0.0202	0.0664	0.9798	0.9336
3	30	1.3340	1.01	0.0101	0.0339	0.9899	0.9661
4	40	1.3340	1.01	0.0101	0.0339	0.9899	0.9661
5	50	1.3350	2.02	0.0202	0.0664	0.9798	0.9336
6	60	1.3340	1.01	0.0101	0.0339	0.9899	0.9661
7	70	1.3340	1.01	0.0101	0.0339	0.9899	0.9661
8	80	1.3340	1.01	0.0101	0.0339	0.9899	0.9661
9	90	1.3340	1.01	0.0101	0.0339	0.9899	0.9661
10	100	1.3340	1.01	0.0101	0.0339	0.9899	0.9661

## ANEXO 2 TOXICIDAD DE LAS SUSTANCIAS (AGUA Y MEG)

### HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD AGUA DESTILADA\*

#### \*Hoja de Seguridad de Agua Destilada CTR Scientific

#### 1. Identificación de la sustancia/preparado y de la sociedad o empresa

##### 1.1 Identificación de la sustancia o del preparado

Denominación:

Agua Destilada.

##### 1.2 Uso de la sustancia o preparado:

Para usos de laboratorio, análisis, investigación y química fina.

##### 1.3 Identificación de la sociedad o empresa:

CONTROL TÉCNICO Y REPRESENTACIONES, S.A. DE C.V.

Av. Lincoln No. 3410 Pte. Col. Mitras Norte

Apdo. Postal 044-C Monterrey N.L. C.P. 64320, México

Tels. (81) 8158 0600, 8158 0628, 8158 0633

e-mail: ctrscientific@infosel.net.mx

www.ctr.com.mx

#### 2. Identificación de los peligros

2.1 Sustancia no peligrosa

#### 3. Composición/Información de los componentes

##### 3.1

Denominación: Agua Desionizada

Fórmula: H<sub>2</sub>O M.=18,016

#### 4. Primeros auxilios

4.1 Indicaciones generales: -----

4.2 Inhalación: ----

4.3 Contacto con la piel: -----

4.4 Ojos: -----

4.5 Ingestión:

Por ingestión de grandes cantidades: En caso de malestar, pedir atención médica.

#### 5. Medidas de lucha contra incendio

5.1 Medios de extinción adecuados: -----

5.2 Medios de extinción que NO deben utilizarse: -----

5.3 Riesgos especiales:

Incombustible.

5.4 Equipos de protección: -----

#### 6. Medidas a tomar en caso de vertido accidental

6.1 Precauciones individuales: -----

6.2 Precauciones para la protección del medio ambiente: -----

6.3 Métodos de recogida/limpieza: -----

#### 7. Manipulación y almacenamiento

7.1 Manipulación:

Sin indicaciones particulares.

7.2 Almacenamiento:

Recipientes bien cerrados. Temperatura ambiente.

## **8. Controles de exposición/protección personal**

**8.1 Medidas técnicas de protección:** -----

**8.2 Control límite de exposición:** -----

**8.3 Protección respiratoria:** -----

**8.4 Protección de las manos:** -----

**8.5 Protección de los ojos:** -----

**8.6 Medidas de higiene particulares:** -----

**8.7 Controles de la exposición del medio ambiente:**

Cumplir con la legislación local vigente sobre protección del medio ambiente.

El proveedor de los medios de protección debe especificar el tipo de protección que debe usarse para la manipulación del producto, indicando el tipo de material y, cuando proceda, el tiempo de penetración de dicho material, en relación con la cantidad y la duración de la exposición.

## **9. Propiedades físicas y químicas**

Aspecto: Líquido transparente e incoloro.

Olor: Inodoro.

Punto de ebullición: 100°C

Punto de fusión: 0°C

Presión de vapor: (20°C) 23 hPa

Densidad (20/4): 1,00

Solubilidad: Soluble en etanol.

pH 5,0 – 6,5

Conductividad: 1,5-4,0 µmhos/cm

Dureza: <1,0 ppm

## **10. Estabilidad y reactividad**

**10.1 Condiciones que deben evitarse:** -----

**10.2 Materias que deben evitarse:**

Metales alcalinos. Formación de hidrógeno (riesgo de explosión)

Metales alcalinotérreos en polvo. Anhídridos. Ácidos fuertes.

(ATENCIÓN: Se genera calor). Fósforo. Aluminio en polvo.

**10.3 Productos de descomposición peligrosos:** -----

**10.4 Información complementaria:** -----

## **11. Información toxicológica**

**11.1 Toxicidad aguda:** -----

**11.2 Efectos peligrosos para la salud:**

No son de esperar características peligrosas.

Observar las precauciones habituales en el manejo de productos químicos.

## **HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD**

### **AGUA DESTILADA**

## **12. Información Ecológica**

**12.1 Movilidad:** -----

**12.2 Ecotoxicidad:**

12.2.1 - Test EC50 (mg/l): -----

12.2.2 - Medio receptor:

Riesgo para el medio acuático = ----

Riesgo para el medio terrestre = ----

12.2.3 - Observaciones: -----

**12.3 Degradabilidad :**

12.3.1 - Test: -----

12.3.2 - Clasificación sobre degradación biótica:

DBO5/DQO Biodegradabilidad = -----

12.3.3 - Degradación abiótica según pH: -----

12.3.4 - Observaciones: -----

**12.4 Acumulación:**

12.4.1 - Test: -----

12.4.2 - Bioacumulación: Riesgo = -----

12.4.3 - Observaciones: -----

**12.5 Otros posibles efectos sobre el medio natural : -----**

**13. Consideraciones sobre la eliminación**

**13.1 Sustancia o preparado:**

En América no están establecidas pautas homogéneas para la eliminación de residuos químicos, los cuales tienen carácter de residuos especiales, quedando sujetos su tratamiento y eliminación a los reglamentos internos de cada país. Por tanto, en cada caso, procede contactar con la autoridad competente, o bien con los gestores legalmente autorizados para la eliminación de residuos.

**13.2 Envases contaminados:**

**14. Información relativa al transporte -----**

**15. Información reglamentaria**

Etiquetado: -----

**16. Otra información**

**Grados de NFPA:**

**Salud: 0**

**Inflamabilidad: 0**

**Reactividad: 0**

## HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD MEG \*

### \*Hoja de Seguridad de Química Técnica LTDA

#### MONOETILENGLICOL

##### IDENTIFICACIÓN

**Sinónimos:** Anticongelante, etilenglicol, 1, 2-Etanodiol, Etileno dihidrato, Glicol, 1, 2-Etanodiol, 1, 2- Dihidroxietano.

**Fórmula:** C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O<sub>2</sub>

**Composición:** 99.5% de pureza.

**Número Interno:**

**Número CAS:** 107-21-1

**Número UN:** N.R.

**Clases UN:**

**Usos:** Usado como anticongelante, humectante, plastificante, fluido hidráulico, solvente, agente transmisor de calor en tubos refrigerantes y electrónicos, usado en la síntesis de fibras poliéster como polietilentereftalato, productos cosméticos, lacas, tintas de imprenta, para madera y para cueros.

**Efectos para la Salud.**

**Límites de exposición ocupacional:**

**TWA:** 125 mg/m<sup>3</sup>

**STEL:** 20 mg/m<sup>3</sup>

**TECHO (C):** N.R.

**IPVS:** N.R.

**Inhalación:** Dolor de cabeza. Puede desarrollarse edema pulmonar. La inhalación de altas

concentraciones produce síntomas similares a los de la intoxicación con alcohol etílico

**Ingestión:** Ocasiona alteraciones del sistema nervioso central. Primero se presenta excitación y más tarde cansancio, dolor abdominal, náusea, vómito, incoordinación, inconsciencia, coma, daños renales. La muerte puede resultar por paro respiratorio o colapso cardiovascular. En humanos una dosis de 100 ml causa la muerte.

**Piel:** Irritación.

**Ojos:** Irritación. El líquido causa la inflamación de los párpados pero no un daño permanente.

**Efectos Crónicos:** Voluntarios expuestos a aproximadamente 30 mg/m<sup>3</sup> (12 ppm), 22 hr/día por

28 días experimentaron únicamente moderada irritación en la garganta, ligero dolor de cabeza y débil dolor de espalda. Trabajadores expuestos al vapor y neblina del Etilenglicol calentado alrededor de 100°C experimentaron frecuentes ataques de inconsciencia y disturbios visuales. El producto contenía 40% Etilenglicol, 55% ácido bórico y 5% de amonio. En estudio con animales indicó que ingestión repetida causa la formación de cálculos en la vejiga y daño en el riñón. Se reportaron casos de sensibilización de la piel en gente

ocupacionalmente expuesta a este químico durante el pulimento y corte de lentes de vidrio.

**Primeros Auxilios.**

**Inhalación:** Trasladar al aire fresco. Si no respira administrar respiración artificial. Si respira con dificultad suministrar oxígeno. Mantener la víctima abrigada y en reposo.

Buscar atención médica inmediatamente.

**Ingestión:** Lavar la boca con agua. Si está consciente, suministrar abundante agua. No inducir el vómito. Buscar atención médica inmediatamente.

**Piel:** Retirar la ropa y calzado contaminados. Lavar la zona afectada con abundante agua y jabón, mínimo durante 15 minutos. Si la irritación persiste repetir el lavado. Buscar atención médica

**Ojos:** Lavar con abundante agua, mínimo durante 15 minutos. Levantar y separar los párpados para asegurar la remoción del químico. Si la irritación persiste repetir el lavado. Buscar atención médica.

**Riesgo de Incendio y/o Explosión.**

**Punto de inflamación (°C):** 111

**Temperatura de autoignición (°C):** 398

**Límites de inflamabilidad (%V/V):** 3.2-15.3

**Peligros de incendio y/o explosión:**

Puede formar mezclas explosivas con el aire. Los contenedores pueden explotar al calentarse. A temperatura mayor de 100 °C el vapor se oxida formando ácidos en el ambiente.

**Productos de la combustión:**

Monóxido de carbono, dióxido de carbono y Oxidos de nitrógeno (NOx).

**Precauciones para evitar incendio y/o explosión:**

Evitar el calentamiento excesivo. Mantener los recipientes bien cerrados.

Conectar a tierra los recipientes para evitar descargas electrostáticas.

**Procedimientos en caso de incendio y/o explosión:**

Evacuar o aislar el área de peligro. Eliminar toda fuente de ignición. Restringir el acceso a personas innecesarias y sin la debida protección. Ubicarse a favor del viento. Usar equipo de protección personal. Retirar los contenedores si no hay riesgo. Mantenerlos refrigerados con agua desde una distancia segura. Alejarse del área.

**Agentes extintores del fuego:**

Niebla de agua, espuma para alcohol, dióxido de carbono, polvo químico seco.

El agua o la espuma pueden causar espumeo.

**Almacenamiento y Manipulación.**

**Almacenamiento:** Lugares ventilados, frescos y secos. Lejos de fuentes de calor e ignición (y de la acción directa de los rayos solares). Separado de materiales incompatibles.

Rotule los recipientes adecuadamente. Limite la cantidad de material en almacenamiento, alejado de combustibles y oxidantes, a temperatura ambiente.

Contenedores de acero cubiertos con resina, de aluminio o de acero inoxidable, deben permanecer cerrados y debidamente etiquetados.

Conecte a tierra los recipientes para evitar descargas electrostáticas. Los equipos eléctricos, de iluminación y ventilación deben ser a prueba de



**Manipulación:** Evitar la generación de polvo. Usar siempre protección personal así sea corta la exposición o la actividad que realice con el producto. Mantener estrictas normas de higiene, no fumar, ni comer en el sitio de trabajo. Usar las menores cantidades posibles. Conocer en donde está el equipo para la atención de emergencias. Leer las instrucciones de la etiqueta antes de usar el producto. Rotular los recipientes adecuadamente.

**Procedimiento en caso de fuga o derrame.**

Evacuar o aislar el área de peligro. Eliminar toda fuente de ignición. Restringir el acceso a personas innecesarias y sin la debida protección. Ubicarse a favor del viento. Usar equipo de protección personal. Ventilar el área. No permitir que caiga en fuentes de agua y alcantarillas.

Absorber con tierra u otro material no combustible y disponer en contenedores limpios, secos y con cierre hermético. Construir diques para prevenir la contaminación. Limpiar con agua los residuos.

**Equipo de Protección Personal.**

**Uso Normal:** Guantes de caucho, gafas de seguridad y respirador con filtro para vapores orgánicos.

**Control de Emergencias:**

Equipo de respiración autocontenido (SCBA) y ropa apropiada.

**Controles de Ingeniería:**

Ventilación local y general, para asegurar que la concentración no exceda los límites de exposición ocupacional. Debe disponerse de duchas y estaciones lavaojos.

**Propiedades Físicas y Químicas.**

**Apariencia:** Líquido incoloro casi inodoro. De olor suave, sabor ligeramente dulce, higroscópico.

**Gravedad Específica (Agua=1):** 1.15 / 20°C

**Punto de Ebullición (°C):** 196-198

**Punto de Fusión (°C):** -13

**Densidad Relativa del Vapor (Aire=1):** 2.1

**Presión de Vapor (mm Hg):** 0.05 / 20°C

**Viscosidad (cp):** 21

**pH:** Neutro.

**Solubilidad:** Soluble en agua, alcoholes alifáticos y acetona. Poco solubilidad en benceno, tolueno, diclorometano y cloroformo.

**Estabilidad y Reactividad.**

**Estabilidad:** Estable bajo condiciones normales

**Incompatibilidades o materiales a evitar:**

**Agua:** No

**Aire:** No

**Otras:** Ácido nítrico, permanganato, ácido clorosulfónico, oleum, ácido sulfúrico, cloruro de cromilo, hidróxidos alcalinos, oxidantes, aluminio y óxido de fósforo.

**Información Toxicológica.**

DL50 (oral, rata): 5.89 g/kg.

DL50 (oral, conejo): 5.0 g/kg.

Toxicidad apreciable. Irritante. La ingestión causa desórdenes del sistema nervioso. Por intoxicación crónica daña gravemente los riñones y el cerebro. Dosis letal humanos: 100ml. Puede causar efectos teratógenos.

**Información Ecológica.**

Toxicidad peces:

LC50 > 100 ppm/48 h/Shrimp/Agua salada.

Toxicidad acuática = 100-1000/96h/agua fresca.

DBO5= 16-68%

**Transporte.**

Etiqueta roja de precaución. No transportar con materiales oxidantes, explosivos, productos alimenticios, combustibles ni incompatibles.

**Otra Información.**

La información relacionada con este producto puede no ser válida si éste es usado en combinación con otros materiales o en otros procesos. Es responsabilidad del usuario la interpretación y aplicación de esta información para su uso particular.

## **ANEXO 3 PROPUESTA DE GUIÓN EXPERIMENTAL**

### **BALANCE DE MATERIA EN UN PROCESO DE DESTILACIÓN DIFERENCIAL**

#### **1. PROBLEMA**

Se requiere concentrar por destilación diferencial en una olla vaporizadora, 140 litros de una mezcla de monoetilenglicol (MEG) en agua, desde una composición inicial de 40% peso de MEG, hasta obtener el residuo una composición de 60% en peso de MEG en la olla vaporizadora. Determina:

- La composición global del destilado obtenido
- Los moles finales totales en la olla por medición del volumen final
- Los moles totales en la olla por balance de materia.

#### **2. PARTE EXPERIMENTAL**

##### **2.1 Medidas de Seguridad e Higiene**

- Utilizar casco, guantes y lentes protectores
- Evitar derrames de mezcla en el piso, si esto ocurre limpiar con agua el área para evitar accidentes.

##### **2.2 Materiales:**

- Un refractómetro con mangueras
- Un cronómetro
- Dos gradillas
- Veinte tubos de ensaye
- Cuatro probetas de dos litros
- Una cubeta
- Dos pares de guantes
- Cascos uno por alumno
- Un marcador

##### **2.3 Sustancias**

- Mezcla de Monoetilenglicol (MEG) – agua al 40%

##### **2.4 Servicios Auxiliares**

- Vapor
- Corriente eléctrica
- Agua de enfriamiento.

##### **2.5 Descripción del equipo:**

1. Olla vaporizadora (1) y/o columna de 20 platos (2).

2. Estos equipos comparten el equipo secundario, la instrumentación, líneas de proceso (alimentación y destilado) y los servicios auxiliares.
3. Bomba de alimentación (3).
4. Tanque de alimentación de la mezcla (4) con agitador (8).
5. Condensadores (5 A,B,C).
6. Subenfriador de destilado (6).

### Instrumentación Básica

En la olla se encuentra:

1. Medidor de nivel
2. Manómetro para medir la presión de vapor de calentamiento
3. Termómetro para medir la temperatura interna
4. Manómetro para medir la presión de las vaporizaciones

Otros:

- Rotámetro para medir el flujo de agua de enfriamiento

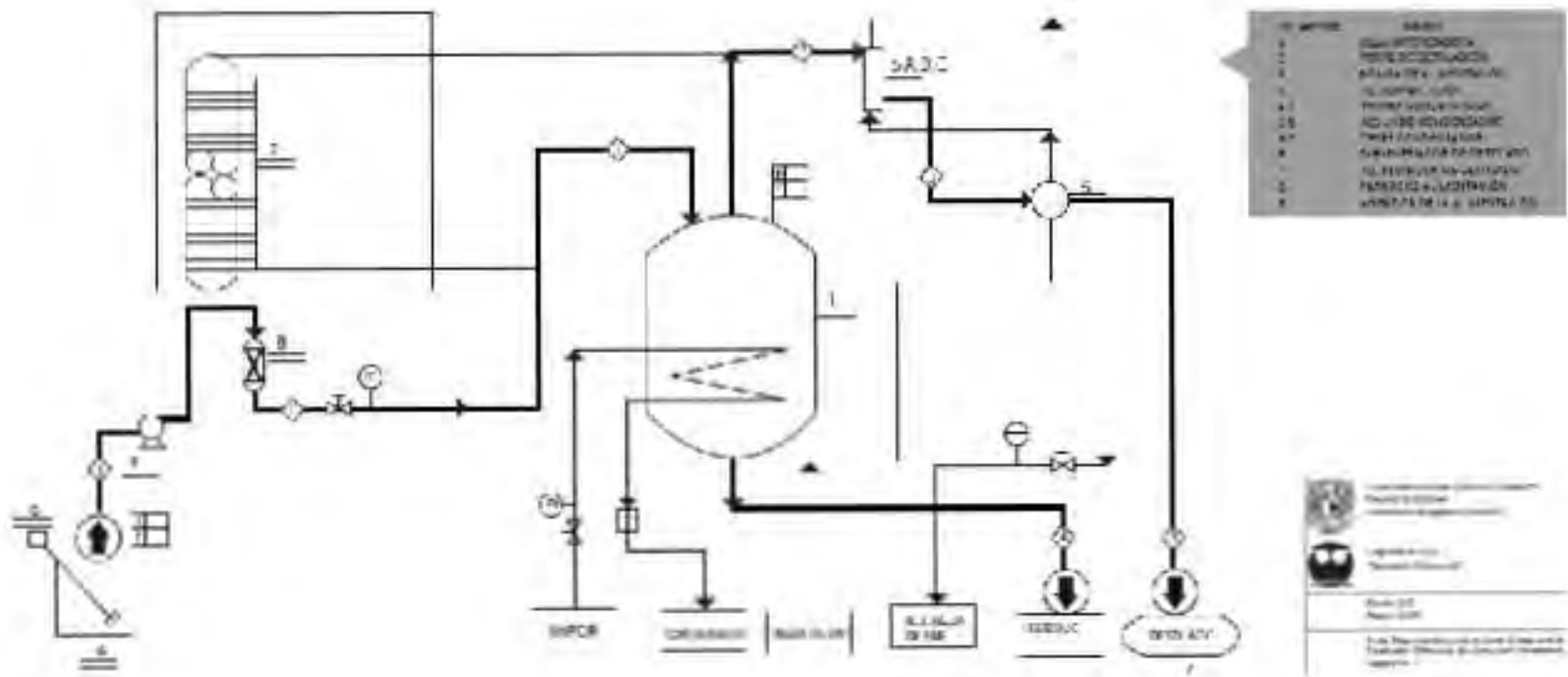
### Líneas de proceso

- Alimentación de la mezcla del tanque a la bomba de alimentación y a la olla vaporizadora o a la columna de 20 platos (tubería de color azul rey).
- Vaporizaciones de la olla a los condensadores (tubería con aislante).
- Destilados de los condensadores al subenfriador y a las probetas para medir flujo (tubería color azul claro).
- Residuo del fondo de la olla al tanque de mezclado (tubería color café).

### Líneas de servicios auxiliares:

- Vapor de calentamiento, del cabezal de suministro al serpentín de la olla vaporizadora ( tubería aislada).
- Condensados del vapor de calentamiento, del serpentín a la trampa de vapor y a la rejilla recolectora..
- Agua de enfriamiento, del cabezal de suministro al subenfriador, a los condensadores, al rotámetro y rejilla recolectora (tubería de color verde).

## 2.5 DIAGRAMA DEL EQUIPO



## 2.6 Medidas de Higiene y seguridad

## 2.7 DESARROLLO EXPERIMENTAL

La destilación se realizará a presión atmosférica y a flujo de destilado constante.

Preparación.

1. Abrir la válvula que descarga la mezcla de la olla al tanque de alimentación y agitar la mezcla para homogenizarla.
2. Verificar que el tanque de alimentación (4), contenga aproximadamente 140 litros de una mezcla Monoetilenglicol ( MEG ) – Agua, con una composición cerca de 40 % en peso de MEG.
3. Alimentar la mezcla a la olla hasta que el medidor de nivel marque un volumen de 140 l , logrado lo anterior, **apague la bomba**.
4. Alinear la tubería y abrir las válvulas del destilado, de tal manera, que mande las vaporizaciones de la olla a los condensadores (5 A, B, C) y el total de esos condensados al subenfriador de destilado (6), y de allí a las probetas para medir el flujo.
5. Alinear la tubería y suministrar agua de enfriamiento desde el cabezal que surte al equipo, al subenfriador de destilado, a los condensadores (5 A, B ,C) ,al rotámetro de agua de enfriamiento y a la rejilla recolectora, todo en este orden.
6. Alinear la tubería del vapor de calentamiento desde la caldera hasta la válvula de suministro de vapor al serpentín de la olla.

Operación.

7. Alimentar vapor de calentamiento a una presión de 1.5 Kg /cm<sup>2</sup> al serpentín de la olla **simultáneamente**, purgar la línea de condensados de vapor de calentamiento para ello, abrir la válvula de la tubería de descarga directa a la rejilla recolectora. Cerrar la válvula que hace pasar los condensados por la trampa de vapor.
8. Cuando se haya eliminado el total de condensados acumulados, hacer pasar los condensados de vapor de calentamiento generados durante el proceso por la trampa de vapor y de ahí a la rejilla.
9. Verificar nuevamente el nivel de la olla y anotar el volumen.
10. Empezar a tomar el tiempo tan pronto se reciban las primeras gotas de destilado en una probeta y desde ese momento acumule también el condensado del vapor de calentamiento en una probeta.

Cada diez minutos

11. Tomar una muestra de la mezcla en la olla (residuo) y una muestra del destilado para determinar su composición por refractometría.
12. Medir el volumen acumulado del destilado durante los diez minutos y de los condensados del vapor de calentamiento durante los diez minutos.
13. Medir el volumen de residuo en la olla.
14. Tomar la temperatura en la olla.
15. Medir la presión de vapor de calentamiento. Aumentar la presión de vapor en  $0.1 \text{ kg/cm}^2$  cuando así se requiera para mantener un flujo de destilado constante alrededor de 3 a 4 litros durante los diez minutos.
16. Registrar los datos experimentales en la Tabla 1.

Paro

17. Cuando se tenga en el residuo una composición aproximada del 60% en MEG en la olla.
18. Cierre la válvula que alimentan vapor de calentamiento al serpentín de la olla.
19. Cierre todas las válvulas de suministro de agua de enfriamiento al equipo.
20. Cierre la válvula de descarga del destilado a la probeta y abra la válvula de descarga al tanque de almacenamiento de destilado (7).
21. Dejar la carga final de residuo en la olla, debido a que se encuentra muy caliente.

## 2.8 INFORMACIÓN EXPERIMENTAL

**Tabla 1**

No.exp	t (min)	Pv (kg/cm <sup>2</sup> )	T(°C)	volumen L (l)	volumen D (l)	volumen C (l)	Liq en Tanque		Destilado	
							Conc. de MEG	Xa	Conc. de MEG	Ya
							IR	% peso	IR	% peso
Inicial	0				-----	-----			-----	-----
1	10									
2	20									
3	30									
4	40									
5	50									
6	60									
7	70									
8	80									
9	90									
10	100									
11	110									
12	120									
13	130									

NOTA: Tomar en cuenta la siguiente información para realizar los cálculos

$$1) \% \text{peso}_{\text{MEG}} = 1013.17 (I_r) - 1350.56 \quad I_r = \text{índice de refracción}$$

Corrección del volumen en la olla

$$2) V_{\text{olla}} = 61.5 + 1.367 * (N_{\text{olla}} - 61.5) \quad N_{\text{olla}} = \text{nivel en la olla}$$



Llenar las siguientes tablas con los resultados calculados.

**Tabla 2**

t(min)	Temperatura de la mezcla en la olla (L) °C	Volumen en la olla (L) l	Densidad en la olla ρ(kg/L)	Masa en la olla (L) kg	Volumen de destilado (D) l	Temperatura del destilado (D) °C	Densidad ρ del destilado (D) kg/L	Masa del destilado (D) kg	Volumen del condensado (C) l
0	Tamb=				-----	-----	-----	-----	-----
10									
20									
30									
40									
50									
60									
70									
80									
90									
100									
110									
120									
130									

**NOTA:** La  $\rho_{mezcla}$  del destilado se tomará constante a una temperatura de 20°C y es igual a 1.0020 (Kg/l).

La temperatura de la mezcla puede ser calculada por medio de la temperatura de burbuja:

$$P^0(mmHg) = 10^{\left( A - \frac{B}{T(^{\circ}C) + C} \right)}$$

Constantes de Antuan Log 10, mmHg

A=7.7151

B=1818.591

C= 178.65

También puede ser calculada utilizando las gráficas de temperatura vs fracción mol de agua del Anexo.

La densidad debe leerse en la gráfica que se encuentra en el Anexo

**Tabla 3 Composiciones calculadas en el residuo de la olla.**

No.exp	t (min)	Liq en Tanque		MEG		H2O	
			Xa	Liq en la Olla	Liq en la Olla	Liq en la Olla	Liq en la Olla
		IR	% peso	fracción masa Xa	fracción mol xa	fracción masa Xb	fracción mol xb
Inicial	0						
1	10						
2	20						
3	30						
4	40						
5	50						
6	60						
7	70						
8	80						
9	90						
10	100						
11	110						
12	120						
13	130						

**Tabla 4 Composiciones calculadas en el destilado.**

No.exp	t (min)	Destilado		MEG		H2O	
			Ya	Destilado	Destilado	Destilado	Destilado
		IR	% peso	fracción masa Ya	fracción mol de ya	fracción masa Yb	fracción mol yb
Inicial		-----	-----	-----	-----	-----	-----
1	10						
2	20						
3	30						
4	40						
5	50						
6	60						
7	70						
8	80						
9	90						
10	100						
11	110						
12	120						
13	130						

**Tabla 5**

Tiempo (min)	Volumen L (L)	$\rho_{mezcla}$ (Kg/L)	Masa (Kg)	Diferencia de masa en la olla (Kg)	Volumen D (L)	$\rho_{mezcla}$ (Kg/L)	Masa acumulada en el destilado (Kg)
0							
10							
20							
30							
40							
50							
60							
70							
80							
90							
100							
110							
120							

**ACTIVIDADES PREVIAS:**

Con los resultados anteriores elaborar las gráficas:

- 1.-La fracción mol del componente volátil (Agua) en el destilado  $y_b$  vs tiempo
- 2.-La fracción mol del componente volátil (Agua) en el residuo  $x_b$  vs tiempo. Hacer las mismas gráficas para el componente pesado (MEG).

**3. CUESTIONARIO**

1. ¿A qué régimen se lleva a cabo el proceso de destilación diferencial?. Observa los resultados de la tabla 1 y explica.
2. ¿Qué relación tiene el volumen de destilado y el volumen de condensado del vapor de calentamiento, acumulados, en cada tiempo (Tabla 1).
3. ¿Es correcto que la temperatura en la olla permanezca constante durante el proceso de destilación?, si o no, explica ¿por qué?
5. ¿Cuál es la relación entre las columnas de la diferencia de la masa en la olla (columna 5) y la masa acumulada de destilado (columna 8) de la tabla 5? Explica

7. Representa tu respuesta anterior por medio de una ecuación de balance de materia global y por balance de MEG.

8. Calcula por balance de Materia la composición global de MEG en el destilado.

9. Calcula las moles finales en la olla por:

a) medición del volumen final

b) balance de materia.

Compara ambos resultados.

10. ¿Cuánto MEG en kg/h se pierde en el destilado durante todo el proceso?

11. ¿Cuánto vapor se necesita para concentrar la mezcla?

12. ¿Es recomendable el proceso de destilación diferencial para recuperar el MEG a la concentración del 60%?. Explica tu respuesta.

#### 4. NOMENCLATURA

T- tiempo

$P_v$ - presión de vapor.

T- temperatura en la olla.

$L_0$ - volumen inicial en la olla.

L- volumen a cada tiempo en la olla.

D- volumen en el destilado.

C- volumen del condensado de vapor.

$X_a$ - fracción masa de MEG en la olla.

$X_b$ - fracción masa de AGUA en la olla.

$x_a$ - fracción mol de MEG en la olla.

$x_b$ - fracción mol de AGUA en la olla.

$Y_a$ - fracción masa de MEG en el destilado.

$Y_b$ - fracción masa de AGUA en el destilado.

$Y_a$ - fracción mol de MEG en el destilado.

$Y_b$ - fracción mol de AGUA en el destilado.

## 5. BIBLIOGRAFÍA

Foust, S. Alan et al. Principios de operaciones unitarias. Editorial Continental. México 1961.

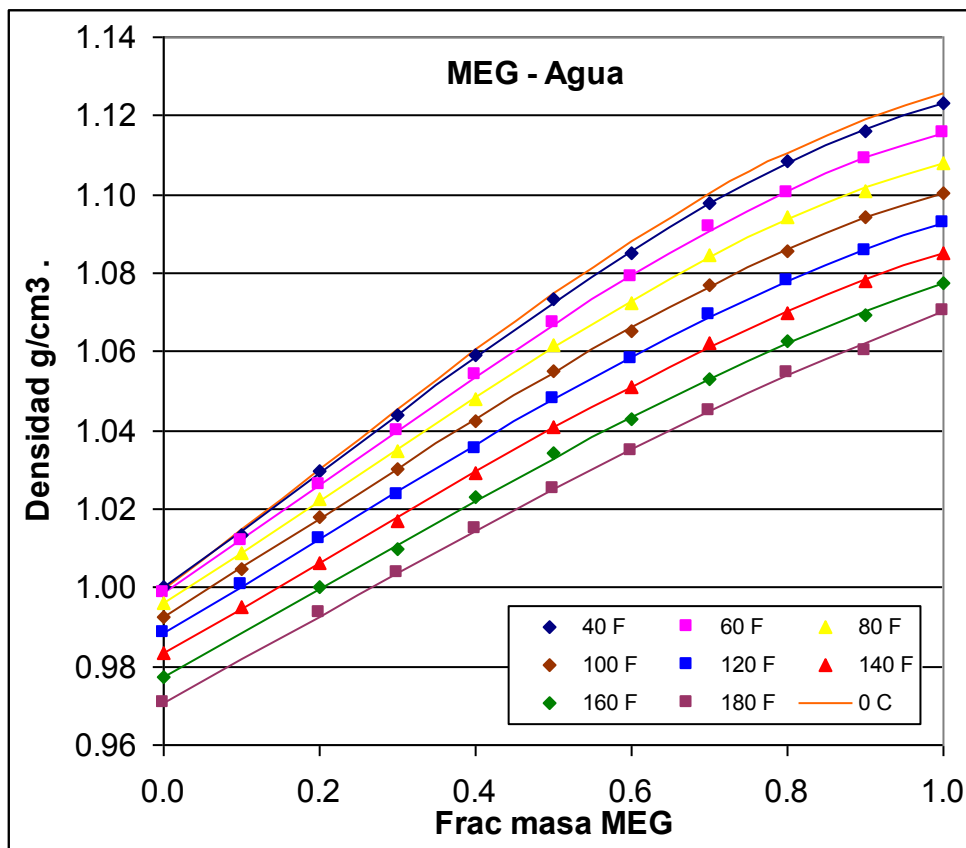
Mc Cabe L. Warren ; Julian C. Smith. Operaciones básicas de Ingeniería Química. Editorial Reverté. Barcelona 1968.

Prácticas de Laboratorio de Procesos de Separación II. Facultad de Química UNAM. Diciembre 2002.

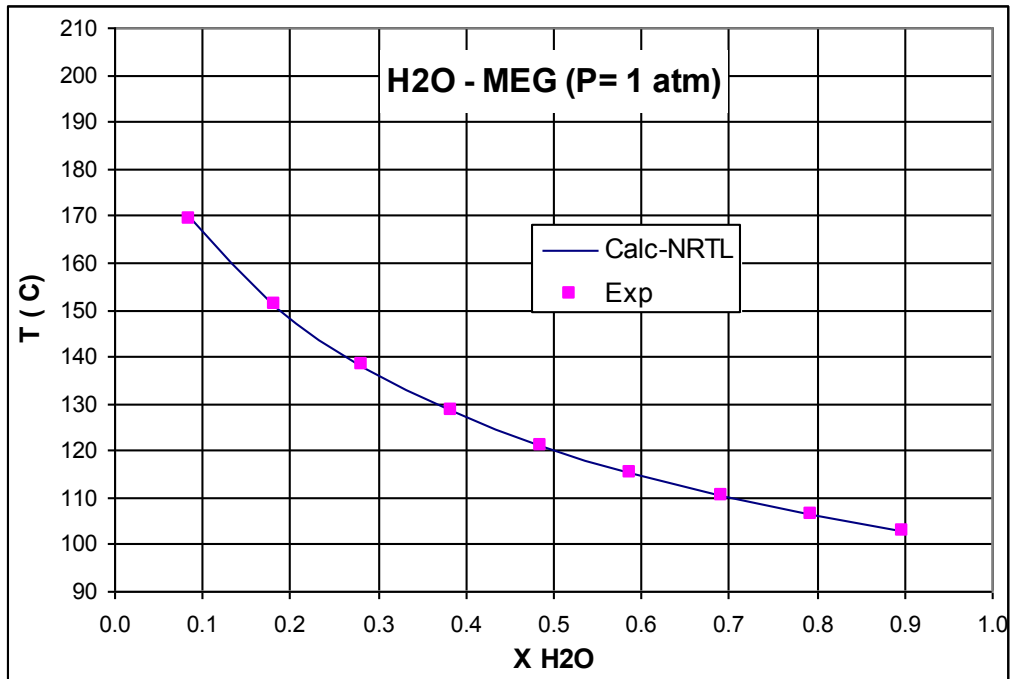
Valiente, Barderas Antonio. Destilación diferencial.

## 6. ANEXOS DEL GUIÓN EXPERIMENTAL

### 1.- GRÁFICA DE DENSIDADES CONTRA FRACCIÓN MASA DE MEG A DIFERENTES TEMPERATURAS.



## 2.-GRÁFICA DE TEMPERATURA CONTRA CONCENTRACIÓN DE AGUA.



## 3.- DIAGRAMA DE EQUILIBRIO MEG-AGUA

