



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Estudios de Postgrado  
Maestría en Artes en Energía y Ambiente

**OPTIMIZACIÓN DE LOS RECURSOS AMBIENTAL-ENERGÉTICOS EN EL  
LABORATORIO DE FISICOQUÍMICA UTILIZANDO UN CÍRCULO DE PRODUCCIÓN  
ECOLÓGICA (CPE) EN EL ÁREA DE FISICOQUÍMICA, FIUSAC**

**Ing. César Ariel Villela Rodas**

Asesorado por el Dr. Ing. Químico Adolfo Narciso Gramajo Antonio

Guatemala, junio de 2019



**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**OPTIMIZACIÓN DE LOS RECURSOS AMBIENTAL-ENERGÉTICOS EN EL  
LABORATORIO DE FISICOQUÍMICA UTILIZANDO UN CÍRCULO DE PRODUCCIÓN  
ECOLÓGICA (CPE) EN EL ÁREA DE FISICOQUÍMICA, FIUSAC**

**INFORME FINAL**

**PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR**

**ING. CÉSAR ARIEL VILLELA RODAS**

Asesorado por el Dr. Ing. Químico Adolfo Narciso Gramajo Antonio

**PARA OPTAR AL TÍTULO DE**

**MAESTRO EN ARTES EN ENERGÍA Y AMBIENTE**

**GUATEMALA, JUNIO DE 2019**



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA



### **NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Luis Diego Aguilar Ralón
VOCAL V	Br. Christian Daniel Estrada Santizo
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

### **JURADO EVALUADOR QUE PRÁCTICO EL EXAMEN DE DEFENSA**

DECANO	Mtro. Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
SECRETARIA	Mtra. Inga. Lesbia Magalí Herrera López



## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

### **OPTIMIZACIÓN DE LOS RECURSOS AMBIENTAL-ENERGÉTICOS EN EL LABORATORIO DE FISICOQUÍMICA UTILIZANDO UN CÍRCULO DE PRODUCCIÓN ECOLÓGICA (CPE) EN EL ÁREA DE FISICOQUÍMICA, FIUSAC**

Tema que me fuera aprobado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha 6 de junio de 2018.

**Ing. César Ariel Villela Rodas**



## **ACTO QUE DEDICO A:**

### **Dios**

Porque a través de su palabra comprendo que pasos debo dar cada día para llegar a ser una mejor persona y soportar los tropiezos.

### **Mis padres**

César Augusto Villela Pérez y Olga Esperanza Rodas Valenzuela de Villela, por darme la vida, haber formado la persona que soy, darme todo el amor que necesita un hijo.

### **Mi esposa**

Brenda de Villela por su amor, comprensión y dedicación como esposa y madre, enseñándome a ser paciente en los momentos difíciles y ser mi apoyo siempre.

### **Mis hijos**

Abddel Ariel y Sasha Pamela, por ser mi razón de ser, de amor, comprensión, dedicación y sobre todo, por inspirarme para ser mejor cada día.

### **Mis hermanos**

Luis Eduardo y Linda Rocío, por estar conmigo en los momentos de tristeza y alegría, y en especial por acompañarme en cada triunfo de mi vida y ser los mejores hermanos que Dios me regalo.

**Mi cuñada y sobrinos**

Luis Eduardo, Linda Saraí, César Emilio, María Alejandra y Julio Adrián, gracias por su amor y hacer felices a mis hijos. Y a Sara Ortiz gracias por ser una gran cuñada.

**Mis suegros**

Víctor Hugo (q. e. p. d.) y Brenda De Jesús, gracias por confiar en mí y darme la mejor esposa del mundo.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Dios</b>	Por darme la oportunidad de culminar una meta más en mi vida.
<b>Mi patria</b>	Guatemala por verme crecer y ser el país más hermoso del mundo.
<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por haberme formado como profesional y darme un trabajo digno y gratificante para servir a mi país.
<b>Laboratorio de Fisiquímica de la Facultad de Ingeniería</b>	Por haber permitido llevar a cabo la compleja labor experimental del presente trabajo.
<b>Dr. Adolfo Narciso Gramajo</b>	Por ser un excelente amigo, jefe y catedrático; y que gracias a él fue posible terminar con éxito este trabajo de graduación.
<b>Ing. Arturo Samayoa</b>	Por su valiosa amistad, confianza, buenos consejos y sobre todo gracias por su apoyo como coordinador en el Departamento de Matemática de la Facultad de Ingeniería.

**Amigos de trabajo en el  
Área de Fisicoquímica**

Por su apoyo, en las tareas difíciles del trabajo del día a día, y en la elaboración del presente trabajo. Gracias William, Ana, Julio, Helen, Luis Zarat, Luis Díaz y todos aquellos auxiliares que han colaborado para el buen desempeño del área.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	VII
GLOSARIO .....	XI
RESUMEN.....	XV
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	XVII
FORMULACIÓN DE PREGUNTAS .....	XXI
OBJETIVOS.....	XXIII
RESUMEN MARCO METODOLÓGICO .....	XXV
INTRODUCCIÓN .....	XXVII
1. MARCO TEÓRICO.....	1
1.1. Generalidades .....	1
1.2. Conceptos de energía y ambiente .....	3
1.2.1. Concepto de energía.....	4
1.2.2. Concepto de medio ambiente o ambiente.....	4
1.2.3. Conceptos básicos relacionados de química y termodinámica.....	5
1.3. El ser humano y el ambiente .....	6
1.3.1. La educación ambiental .....	6
1.3.2. Optimización y rendimiento.....	8
1.4. Estudio de la fisicoquímica .....	9
1.4.1. Fisicoquímica y conceptos .....	9
1.4.2. Equilibrio químico.....	10
1.4.3. Concepto de equilibrio de fases.....	11
1.4.4. Concepto de cinética de reacción química.....	12
1.4.5. Concepto de destilación fraccionada .....	13

1.4.6.	Regla de las fases .....	14
1.5.	Estudio de los equilibrios fisicoquímicos .....	15
1.5.1.	Equilibrio ternario líquido-líquido.....	15
1.5.2.	Equilibrio químico en fase líquida .....	16
1.5.3.	Destilación fraccionada.....	17
1.5.4.	Equilibrio de fases líquido-vapor en mezcla binaria .....	20
2.	DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN .....	23
2.1.	Reconocimiento de mejoras .....	23
2.2.	Preparación de materiales.....	24
2.3.	Desarrollo de las prácticas .....	24
3.	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....	27
3.1.	Propuesta de la modificación de las prácticas.....	27
3.2.	Modificación de prácticas .....	28
3.2.1.	Curva de calibración (comportamiento volumétrico).....	29
3.2.2.	Experimento 1. Equilibrio Líquido-Líquido en sistemas ternarios... ..	32
3.2.3.	Experimento 2. Equilibrio químico en fase líquida .....	34
3.2.4.	Experimento 3. Destilación fraccionada. Purificación de orgánicos.. ..	36
3.2.5.	Experimento 4. Equilibrio de fases binario. ....	38
3.3.	Resultados experimentales .....	41
3.3.1.	Curva de calibración .....	41
3.3.2.	Modelo matemático de calibración .....	41
3.3.3.	Equilibrio de fases ternario. Líquido-líquido .....	42
3.3.4.	Equilibrio de fases ternario. Líquido-Líquido. Agregando Agua Destilada en exceso para generar dos fases .....	43

3.3.5.	Equilibrio de fases ternario. Líquido-líquido. Agregando etanol absoluto para generar curva de solubilidad .....	44
3.3.6.	Equilibrio Químico en fase líquida. Grado de avance .....	45
3.3.7.	Equilibrio Químico. $Q_c$ .....	46
3.3.8.	Destilación fraccionada. Purificación de orgánicos .....	47
3.3.9.	Equilibrio de fases binario. Líquido-vapor. Curva de distribución .....	48
3.3.10.	Equilibrio binario. Líquido-vapor. Diagrama de fases.....	49
3.3.11.	Círculo de producción ecológica (CPE) y rendimientos ..	50
3.3.12.	Ahorro monetario, energético y agua de enfriamiento ....	51
4.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	53
4.1.	Diagnóstico de la situación actual.....	53
4.2.	Modificación del orden y contenido de las prácticas.....	56
4.2.1.	Material previamente preparado .....	57
4.2.2.	Modificación de las prácticas .....	59
4.2.3.	Curva de calibración (comportamiento volumétrico) .....	60
4.2.3.1.	Datos.....	60
4.2.3.2.	Modelo .....	61
4.2.3.3.	Preparación para las siguientes prácticas.....	61
4.2.4.	Experimento 1. Equilibrio líquido-líquido en sistema ternario.....	62
4.2.4.1.	Se realiza como primer experimento.....	62
4.2.4.2.	No se realiza como primer experimento.....	63
4.2.5.	Experimento 2. Equilibrio químico en fase líquida.....	64
4.2.5.1.	Se realiza como primer experimento.....	64
4.2.5.2.	No se realiza como primer experimento.....	64
4.2.6.	Experimento 3. Destilación fraccionada. Purificación de orgánicos.....	65

4.2.6.1.	Se realiza como primer experimento .....	66
4.2.6.2.	No se realiza como primer experimento .....	66
4.2.7.	Experimento 4. Equilibrio de fases binario. ....	67
4.2.7.1.	Se realiza como primer experimento .....	67
4.2.7.2.	No se realiza como primer experimento .....	68
4.3.	Resultados experimentales .....	68
4.3.1.	Curva y modelo matemático de calibración .....	68
4.3.2.	Equilibrio líquido-líquido en sistema ternario .....	69
4.3.2.1.	Curva de solubilidad de referencia.....	70
4.3.2.2.	Agregando agua destilada en exceso.....	70
4.3.2.3.	Agregando etanol absoluto para curva de solubilidad.....	71
4.3.3.	Equilibrio químico en fase líquida .....	71
4.3.3.1.	Grado de avance .....	72
4.3.3.2.	Qc y moles iniciales .....	73
4.3.4.	Destilación fraccionada. Purificación de orgánicos.....	73
4.3.5.	Equilibrio de fases binario. Líquido-vapor.....	75
4.3.5.1.	Curva de distribución .....	75
4.3.5.2.	Diagrama de fases.....	75
4.3.6.	Círculo de producción ecológica (CPE) y rendimientos..	76
4.4.	Ahorro monetario de agua y energético .....	80
CONCLUSIONES.....		83
RECOMENDACIONES .....		87
BIBLIOGRAFÍA.....		89
APÉNDICES.....		95
ANEXOS.....		143

# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

## FIGURAS

1.	Curva de calibración equilibrio binario.....	41
2.	Curva de solubilidad de referencia.....	42
3.	Equilibrio ternario. Agregando agua destilada en exceso.....	43
4.	Equilibrio ternario. Agregando etanol absoluto.....	44
5.	Grado de Avance en función de moles iniciales.....	45
6.	Qc en función de moles iniciales.....	46
7.	Fracción molar de B en función de temperatura de ebullición...	47
8.	Curva de distribución líquido-vapor.....	48
9.	Diagrama de fases.....	49
10.	Círculo de producción ecológica (CPE).....	50

## TABLAS

I.	Calendarización de las prácticas en el laboratorio de fisicoquímica 2.	27
II.	Reordenamiento de las prácticas del laboratorio de fisicoquímica 2...	28
III.	Fracción Molar del acetato de etilo y etanol absoluto.....	29
IV.	Fracción Molar para el equilibrio químico en fase líquida.....	31
V.	Fracción Molar para destilación fraccionada.....	36
VI.	Ahorro. Monetario-energético.....	51
VII.	Ahorro. Agua de enfriamiento.....	51
VIII.	Análisis estadístico ANOVA.....	52
IX.	Incertezas Instrumentales.....	52
X.	Linealidad.....	52
XI.	Estructura de realización de prácticas.....	55

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Simbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>B</b>	Acetato de etilo
<b>D</b>	Ácido acético glacial
<b>E</b>	Ácido clorhídrico (37 %)
<b>A</b>	Agua destilada
<b>TSS</b>	Cálculo suma total de cuadrados
$\mathcal{K}_A$	Coefficiente de distribución de A
$\mathcal{K}_B$	Coefficiente de distribución de B
$\gamma_A$	Coefficiente de fugacidad del componente A
$\gamma_B$	Coefficiente de fugacidad del componente B
$C_i$	Concentración del elemento i
<b>R</b>	Constante de los gases ideales
$C_{EE}$	Costo de consumo energético eléctrico [GTQ]
$\delta y$	Derivada parcial de la variable y
$\delta x_i$	Derivada parcial respecto a la variable x
$\sigma$	Desviación estándar poblacional

$G_m^{(E)}$	Energía libre de Gibbs en exceso
<b>C</b>	Etanol absoluto
$F_{calc}$	F de Fisher calculada
$F_{critica}$	F de Fisher crítica
<b>P</b>	Fases
$x_A$	Fracción molar de A
$x_A^{(l)}$	Fracción molar de A en el líquido
$x_A^{(v)}$	Fracción molar de A en el vapor
$x_A^{(\pi 1)}$	Fracción molar de A en fase acuosa
$x_A^{(\pi 2)}$	Fracción molar de A en fase orgánica
$x_{CH_3COOH}$	Fracción molar de ácido acético
$x_{H_2O}$	Fracción molar de agua
$x_B$	Fracción molar de B
$x_B^{(l)}$	Fracción molar de B en el líquido
$x_B^{(v)}$	Fracción molar de B en el vapor
$x_{C_6H_5CH_3}$	Fracción molar de tolueno
<b>F</b>	Hidróxido de sodio (1M)
$\Delta y$	Incertidumbre del elemento y
<b>K Pa</b>	Kilopascales

$\mu_i$	Media del elemento $i$
<b>ml</b>	Mililitro
<b>mm Hg</b>	Milímetros de mercurio
<b>M</b>	Molar (moles de soluto/litro de solución)
$N$	Número de tratamientos
<b>Pot</b>	Potencia
$Q$	Quetzal, moneda de Guatemala
<b>SST</b>	Suma de cuadrados de los tratamientos
<b>SSE</b>	Suma de cuadrados del error
$T_{arE}$	Tarifa de energía eléctrica [GTQ/kWh]
$T$	Temperatura
$t$	Tiempo (segundos)
$z_{\alpha/2}$	Valor tabla de la distribución $z$
$r$	Velocidad de reacción (molaridad/segundo)
$V_m$	Volumen molar
$\bar{V}_A$	Volumen molar de A
$\bar{V}_B$	Volumen molar de B



## GLOSARIO

<b>Azeótropo</b>	Mezcla líquida de composición definida (única) entre dos o más compuestos químicos que hierve a temperatura constante y que se comporta como si estuviese formada por un solo componente.
<b>Catalizador</b>	Incrementa la velocidad de una reacción química y se recupera sin cambios esenciales al final de la reacción.
<b>Cinética química</b>	Aquellas velocidades de las reacciones químicas que constituyen el campo de estudio.
<b>Energía libre de Gibbs</b>	(Entalpía libre) potencial termodinámico, es decir, una función de estado extensiva con unidades de energía, que da la condición de equilibrio y de espontaneidad para una reacción química (a presión y temperatura constantes).
<b>Entalpía</b>	Medida de la cantidad de energía absorbida o cedida por un sistema termodinámico, es decir, la cantidad de energía que un sistema intercambia con su entorno.

<b>Entropía</b>	Magnitud física para un sistema termodinámico en equilibrio, mide el número de microestados compatibles con el macroestado de equilibrio, también se puede decir que mide el grado de organización del sistema.
<b>Estado estacionario</b>	Se dice que un sistema o proceso está en estado estacionario si las variables que definen su comportamiento (las llamadas variables de estado) respecto del tiempo, permanecen invariantes.
<b>Fase</b>	Cada una de las partes homogéneas físicamente separables en un sistema formado por uno o varios componentes.
<b>Grado de avance</b>	Dada una reacción química cualquiera es posible definir un único parámetro $\xi$ ( $\xi$ ), válido para todas las sustancias involucradas en la reacción, y que sirva para expresar cómo va evolucionando la reacción química a lo largo del tiempo.
<b>Potencial químico</b>	Cambio de energía que experimentaría el sistema si fuera introducida en este una partícula adicional, manteniendo la entropía y el volumen constantes.
<b>Presión de vapor</b>	Presión de la fase gaseosa o vapor de un sólido o un líquido sobre la fase líquida, para una temperatura determinada, en la que la fase líquida y el vapor se encuentran en equilibrio dinámico.

**Reacción química**

Proceso termodinámico en el cual dos o más sustancias llamadas reactantes o reactivos, se transforman, cambiando su estructura molecular y sus enlaces, en otras sustancias llamadas productos.

**Termodinámica**

Rama de la física encargada del estudio de la interacción entre el calor y otras manifestaciones de la energía.



## RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se desarrolló un círculo de producción ecológica (CPE), en donde se realiza el enlace de cuatro prácticas del curso de Laboratorio de Fisicoquímica 2; cada una de las prácticas demuestra un fenómeno fisicoquímico impartido teóricamente, un semestre anterior, del curso de Fisicoquímica 2.

El objetivo es cambiar las prácticas utilizadas actualmente, ya que los desechos se lanzan al medio ambiente, es decir, trasladarlos en el lugar que le corresponde y lograr así la reutilización de estos.

Se comienza el círculo en cualquiera de las cuatro prácticas, ya que parte de los desechos de una de las prácticas se utilizan en otra u otras prácticas. El diseño inicia con el desarrollo de una curva de calibración, la cual, se construye a partir de un conjunto de soluciones de acetato de etilo y etanol absoluto, que van desde 0.1 hasta 0.9 de fracción molar de acetato de etilo. Parte de las soluciones se utilizan en la práctica de equilibrio ternario en fase líquida, y otra parte en la práctica de equilibrio químico; el sobrante se utiliza en la práctica de equilibrio líquido-vapor.

Luego se realizan los experimentos respectivos de equilibrio ternario y equilibrio químico, y los desechos se colocan en frascos de color ámbar para su reutilización en la práctica de destilación fraccionada; la cual hace posible la purificación de las mezclas orgánicas y reutilizarlas en la práctica de equilibrio binario líquido-vapor. Posteriormente, con los desechos de esta práctica se construyen las líneas de unión del equilibrio ternario líquido-líquido, y el resto de

desechos se utilizan para el siguiente grupo o la siguiente semana, según la concentración que se tenga en el balón de destilación. Los sobrantes se envían de nuevo para ser utilizados por otro grupo.

Finalmente, se observa que el círculo es un conjunto de cuatro prácticas las cuales pueden iniciarse con la secuencia de estas en cualquier punto, no obstante, sí debe realizarse como primer paso, la curva de calibración.

Se llegó a desarrollar un círculo en el cual, aproximadamente entre el 90 y 95 % de la materia prima original se recupera, ya que las pérdidas que existen es por evaporación, trasvasado o que se convierte en sales no utilizables. Esto implica que, directamente se relaciona la comparación de la forma tradicional de realizar las prácticas, en las cuales el 100 % de los productos son desechados, claro está, previamente tratados bajo las buenas prácticas de laboratorio. Por lo tanto, se produce un excelente avance al lograr la máxima cantidad de materia prima reutilizable.

Con respecto al agua potable, realizando una modificación en el sistema de enfriamiento, se ahorran 57.6 m<sup>3</sup> de agua de enfriamiento; que económicamente representa Q361.16 por semestre; y con respecto al ahorro energético, no se reconoció un incremento o disminución del gasto en la producción de calor por medio de planchas de calentamiento, que a pesar de reducir a la mitad el tiempo de calentamiento, también se aumentó el doble el sistema de destilación al incorporar la práctica de destilación fraccionada.

Las prácticas se realizaron a condiciones ambientales dentro del laboratorio en un rango de temperatura de 20 a 26 grados centígrados, dependiendo del día y la hora y a una presión atmosférica aproximada de 0.84 atm.

## **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

### **Descripción del problema**

En la Universidad de San Carlos de Guatemala se realiza el proceso de enseñanza-aprendizaje, basado en las clases magistrales y prácticas o laboratorios para la comprensión de los conceptos de cada disciplina que se esté desarrollando. En el caso particular del Área de Fisicoquímica de la Escuela de Ingeniería Química se ha introducido la Norma ISO 14001:2006 con el fin de realizar un manejo adecuado de los recursos en las prácticas de laboratorio.

A pesar que se ha realizado la disminución de los recursos y optimización de algunos procesos y la orientación a los estudiantes sobre este rubro, aún se observa la necesidad de elaborar una metodología en el aprovechamiento de los desechos en la realización de las prácticas, es decir, realizarlas en donde se evidencie el respeto al ambiente, así como el aprovechamiento óptimo de la energía, materias primas y desechos.

En el desarrollo de las prácticas realizadas en el laboratorio se observa que se utilizan materias primas, las cuales no son reutilizadas en su mayoría o incluso buscar algún mecanismo de recuperación y utilización de los desechos generados, a pesar de que los experimentos realizados en algunos casos requieren reactivos de bajo costo y de bajo impacto ambiental, pero no existen sistemas de círculos de producción ecológica (CPE) en la realización de prácticas para el estudio de los fenómenos fisicoquímicos.

Esto conlleva a determinar que no existen ciclos de reutilización y tampoco se tiene un sistema entre prácticas en las cuales se desarrolle la reducción de los desechos al reutilizarlos, como materias primas en otra práctica, que el desecho de una práctica sea la materia prima para otra, y así sucesivamente hasta cerrar el círculo.

Debido a que no se tienen sistemas del tipo cíclico, no se ha podido realizar una comparación en donde se proporcione información sobre la eficiencia, rendimiento y necesidad de realizar estudios para la reutilización de los recursos, y no así eliminarlos lanzándolos al medio ambiente.

### **Delimitación del problema**

Esto pone en evidencia que es necesario realizar prácticas de laboratorio que introduzcan el análisis de optimización, reutilización de materias primas, aprovechamiento de desechos generados y rendimiento al reutilizar los recursos disponibles, como una forma inteligente durante el proceso desarrollado, por lo que se pretende desarrollar un círculo con la finalidad de lograr establecer la confiabilidad de reutilizar las materias primas, las veces que sea posible.

Al analizar y llevar a cabo la puesta en práctica del desarrollo de círculos ecológicos de producción para el cuidado del ambiente, la utilización de los recursos energéticos adecuadamente, y así también el desarrollo de técnicas de administración efectiva de las materias primas, como de los desechos generados; y compararlas con el proceso tradicional de efectuar una práctica independiente, esto proporcionará una ilustración sobre los modelos modificados que son necesarios realizar para la buena utilización de los

recursos, así como el aprendizaje sobre el cuidado del ambiente y la optimización de los recursos en general.

Como factor decisivo para determinar si las prácticas están bien diseñadas, de tal manera que sean confiables, es necesario llevar a cabo la realización del análisis estadístico respectivo, respecto a tendencias, incertidumbres y réplicas de los procesos involucrados.

El estudio se delimitará al análisis de la realización de las prácticas del curso de laboratorio de fisicoquímica 2, el cual consta de ocho prácticas llevadas a cabo individualmente, sin conexión alguna. Este será el principio para realizar la conjunción de varias prácticas y la utilización de materias primas y desechos en cuatro prácticas electas bajo el concepto de continuidad de procesos.



## FORMULACIÓN DE PREGUNTAS

### Pregunta principal

¿Se podrá realizar un procedimiento experimental para optimizar los recursos ambiental-energéticos en el desarrollo de las prácticas del laboratorio de fisicoquímica, al introducir un círculo de producción ecológica (CPE)?

### Preguntas auxiliares

1. ¿Cómo diseñar un sistema de recirculación de materias primas apoyado en un círculo de producción ecológica para en el desarrollo de prácticas para el estudio de los fenómenos fisicoquímicos a nivel laboratorio?
2. ¿Qué rendimiento de reutilización de materias primas se tiene al realizar un círculo de producción ecológica?
3. ¿Qué cantidad de desechos se reducirá al utilizar un círculo de producción ecológica en el laboratorio de fisicoquímica?
4. ¿Proporcionará información para interpretar la validez de las prácticas que se realizarán dentro del círculo de producción ecológica a nivel laboratorio, el desarrollo del análisis estadístico?



## **OBJETIVOS**

### **General**

Optimizar los recursos ambiental-energéticos en el laboratorio de Físicoquímica utilizando un círculo de producción ecológica (CPE).

### **Específicos**

1. Desarrollar un círculo de producción ecológica, planteando un sistema de recirculación de materias primas en el desarrollo de prácticas para el estudio de los fenómenos físicoquímicos a nivel laboratorio.
2. Establecer el rendimiento de reutilización de materias primas al realizar un círculo de producción ecológica.
3. Cuantificar la reducción de desechos al utilizar un círculo de producción Ecológica en el laboratorio de físicoquímica.
4. Analizar estadísticamente el círculo de producción ecológica bajo las condiciones pertinentes.



## RESUMEN MARCO METODOLÓGICO

El tipo de investigación es cuantitativa, ya que se toma la información obtenida en cada uno de los pasos de su desarrollo; se monitorean las cantidades específicas en función de concentración de reactivos, obteniendo conclusiones de cada uno de ellos, que permitan la posibilidad de realizar el procedimiento planteado. En cada uno de los pasos se realizará el análisis sobre la cantidad de reactivos, energía utilizada, para verificar si se está obteniendo un producto que sea de nuevo utilizable; enfocado en la obtención óptima de estos y establecer su utilización correcta dentro del círculo de producción ecológica propuesto.

Para cumplir este objetivo se desarrollaron las variables de control, con el fin de tener la certeza que, lo que se está recuperando, sea el producto esperado para utilizarlo como reactivo. Las variables que se utilizaron serán el control de temperatura, cambios de concentración de cada uno de los reactivos y el consumo energético a través del tiempo; dependiendo del equipo utilizado que puede ser planchas de calentamiento y los sistemas de destilación utilizados.

En cada uno de los pasos se realizó la comprobación de los productos basado en la realización de una curva de calibración de los reactivos primarios utilizados, en este caso etanol absoluto y acetato de etilo. También se desarrolló el control de la concentración de ácido acético por medio de titulación con hidróxido de sodio, y de esta manera incorporar de nuevo los reactivos principales al círculo.

En cada uno de las prácticas realizadas se estableció si el procedimiento utilizado es el correcto, determinando que este es idóneo con los objetivos se propuestos; por otra parte, se monitoreo en cada uno de los pasos de los procedimientos, el rendimiento de las materias primas que se están utilizando. Unido a esto se desarrolló el control sobre los desechos que se están generando para reducir el impacto al ambiente, para cada uno de los procedimientos se realizaron tres repeticiones para que, estadísticamente sean confiables los datos, tanto en exactitud como en precisión.

En resumen, se establece que la búsqueda es el diseño de un círculo de producción ecológica (CPE), basado en el control de las variables pertinentes en cada uno de los pasos, obteniendo la información necesaria de cada uno de los reactivos, desechos y consumos energéticos, desarrollando un análisis estadístico específico bajo las condiciones de exactitud y precisión para darle fiabilidad a la investigación.

Los fenómenos que se analizaron paso a paso fueron el equilibrio ternario líquido-líquido, el equilibrio químico en fase líquida, destilación fraccionada y el equilibrio líquido-vapor. Las prácticas han quedado finalmente en el círculo de producción ecológica, como se muestra en la figura 10.

## INTRODUCCIÓN

El presente proyecto de investigación, su enfoque es realizar procesos útiles para la optimización y cuantificación del rendimiento de los recursos para la conservación del ambiente, así como el control del consumo energético dentro de las prácticas de laboratorio de Fisicoquímica de la Escuela de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería, Usac; teniendo como pilar fundamental la implementación de un círculo de producción ecológica (CPE). Actualmente, en ningún laboratorio de la Universidad de San Carlos de Guatemala se está trabajando este tipo de procedimiento, por lo que, se considera una innovación en el manejo adecuado de los recursos dentro de cualquier laboratorio independientemente de la especialidad.

El círculo de producción ecológica (CPE) es desarrollar una metodología que enlace varios procesos o prácticas experimentales para la aplicación de fenómenos fisicoquímicos, para este caso en particular, en donde los desechos generados por una práctica realizada se puedan utilizar como reactivos o materias primas para la siguiente práctica, y así sucesivamente hasta completar un círculo con las prácticas seleccionadas. Se espera que se obtenga una disminución en la generación de desechos al optimizar los procesos como la reutilización de los recursos.

Estos desechos que se pueden utilizar como reactivos pueden ser tratados antes de pasar al próximo proceso, dependiendo de la pureza que se esté buscando. Al realizar el círculo esperado se pretende tener beneficios, tales como: un ahorro significativo al utilizar reactivos si se comparan con cristalería o equipo, estos se utilizan constantemente sin tener que estar

reponiéndolos; salvo que se dañen o se quiebren, al contrario, los reactivos constantemente se toman, se utilizan, se transforman y se desechan de una forma desmedida o con algún tipo de control establecido. Los beneficios directos son el ahorro en la adquisición de reactivos que regularmente tienen precios elevados y al ser desechados se pierden en un cien por ciento.

Por otra parte, se pretende reducir la cantidad de energía utilizada, realizando las modificaciones necesarias a los sistemas, de tal manera que, la transferencia de calor que en algún momento se necesite, sea aprovechada efectivamente.

Otro beneficio esperado es el manejo óptimo de los desechos al ser transformados en reactivos nuevamente, y así sucesivamente en el siguiente paso del círculo; esperando que se reduzca la generación de desechos, esto directamente produce una reducción en el impacto que se le provoca al ambiente.

De tal manera que, se demuestra que sí es posible desarrollar la optimización de los recursos reutilizándolos al realizar una transformación física o química en la demostración de los fenómenos teóricos en una forma práctica. La prioridad es la conservación de la energía y reducción de las materias primas utilizadas, provocando directamente el cuidado del ambiente.

Optimizar los recursos materiales y energéticos utilizados como reactivos, como una sólida medida enfocada para la Escuela de Ingeniería Química, y tener en cuenta que dentro de esta Escuela se encuentra la carrera de Ingeniería Ambiental, conllevará el desarrollo del buen manejo de materias primas y desechos generados por los ingenieros químicos en la Industria.

La generación de este círculo debe ser un punto de partida para analizar la forma en que se está trabajando dentro de los demás laboratorios de la Escuela, así como en los laboratorios en general de la Universidad de San Carlos de Guatemala; sin perder de vista que puede llegar a ser ejemplo para que las demás universidades e identidades educativas, que enfoquen la optimización de sus recursos y reutilización de los disponibles, en los procesos experimentales con círculos de producción ecológica (CPE).

Es claro que la investigación se lleva a cabo dentro del laboratorio de Físicoquímica, contando con el equipo, cristalería y reactivos necesarios para su realización; además de los permisos para la realización del análisis de la condición actual y la fase experimental en sí dentro de este laboratorio. Se ha realizado todo el análisis de los recursos actualmente disponibles, así como el análisis económico y financiero para terminar con éxito la investigación y obtener los resultados y beneficios esperados, para beneficio del ambiente, uso correcto de la energía y optimización de los recursos dentro de los círculos ecológicos de producción (CPE). El contenido de la presente investigación está basado con los objetivos y fines primordiales que son la conservación de la energía, ambiente y la optimización de los recursos disponibles.

El capítulo refiere las generalidades, conceptos de energía y ambiente, así como de optimización y rendimiento; describiendo qué área específicamente estudia la físicoquímica y cada uno de los fenómenos que se estudiarán, en particular, toda aquella base teórica que le da sustento a la investigación planteada.

En el capítulo dos se realiza el análisis de la situación actual del laboratorio, es decir, qué prácticas, equipos, cristalería, reactivos e infraestructura posee el laboratorio de Físicoquímica, así como el análisis del

manejo adecuado de los auxiliares y docentes que actualmente laboran dentro del laboratorio. También analizar cómo los estudiantes manejan los recursos disponibles dentro del laboratorio; y si hacen uso de las buenas prácticas establecidas.

Se describe detalladamente la propuesta que se hace a la readecuación y modificación que se realizará a las prácticas de laboratorio, así como el desarrollo de estas. Tomando en cuenta la mayor cantidad de variables necesarias para que el círculo de producción ecológica (CPE) cumpla con los objetivos planteados en la presente investigación. Este capítulo es de alto impacto, ya que es en donde se describe el porqué y cómo se realizarán los cambios para llegar a obtener los resultados esperados.

En este capítulo también se realizará la recopilación de la información obtenida posterior a la realización de la experimentación en el círculo electo, sin perderse del enfoque el ambiente y el uso adecuado de la energía, entrándose en la tabulación y ordenamiento de todos aquellos datos en tablas, gráficas y diagramas necesarios para la obtención de todos los resultados, es claro que los datos intermedio que son tablas, normalmente se encuentra en la sección de datos calculados del apéndice respectivo.

En el capítulo cuatro se desarrollará la discusión de todos aquellos resultados que hacen posible la realización de círculo de producción ecológica (CPE), esta sección es una de las más importantes de la investigación realizada, debido a que la interpretación de los resultados hace posible desarrollar una secuencia lógica y detallada de los aspectos relevantes que permiten concluir una investigación. Describiendo detalladamente cada uno de los resultados presentados en el capítulo anterior.

Posteriormente, basado en el preámbulo de discusión de resultados se procede a describir las conclusiones más relevantes obtenidas en la presente investigación. También se desarrollará basado en el análisis de cada uno de los pasos de la investigación, las recomendaciones necesarias para la mejora de los procesos a utilizar dentro de los laboratorios de ensayo a la institución que considere pertinente.

Por último, se presentan los apéndices en donde se integran todas aquellas partes de la investigación que no van dentro del cuerpo principal de este documento, las partes en esta sección son: los datos originales, los calculados, metodología de cálculo; incluyendo el análisis estadístico, análisis estadístico tabulado y aquellas imágenes que dan evidencia de la investigación presentada.



# 1. MARCO TEÓRICO

## 1.1. Generalidades

En la presente investigación se pretende desarrollar la modificación del manejo de las materias primas, desechos generados y el uso de la energía en las prácticas realizadas en el curso de Laboratorio de Fisicoquímica 2. Actualmente, en las prácticas al realizar un experimento de transformación física o química genera productos, estos productos o desechos son eliminados en las buenas prácticas de laboratorio, pero no se ha tomado en cuenta intentar reducirlo o reutilizarlos.

En el Área de Fisicoquímica se desarrolló una tesis basada en la implementación del Sistema de Gestión Ambiental bajo la Norma ISO 14001:2006; con base en esta norma se han logrado avances en la disposición de los desechos generados en el laboratorio posterior a la realización de las prácticas, así como la optimización en la utilización de los recursos. A pesar de los esfuerzos que se han realizado aún no se ha desarrollado un procedimiento en el cual los productos obtenidos luego de una práctica y reutilizarlos o purificarlos para su utilización nuevamente, claro está bajo el supuesto que el gasto energético se equipare o no influya en este proceso.

Si el consumo energético tampoco es controlado, solamente se estará trasladando el problema medioambiental a otro rubro, por lo que, en la presente investigación se analizará el manejo de las materias primas, como el uso adecuado de la energía, bajo ciertas modificaciones en los equipos y procedimientos realizados actualmente.

Los fenómenos que se estudiarán serán aquellos que describan el comportamiento en equilibrio y la purificación de las mezclas, donde se analiza previamente las prácticas que se desarrollan en la actualidad, desarrollando así, el empalme coherente para el desarrollo de lo que en el presente trabajo se denomina círculo de producción ecológica (CPE). Se espera desarrollar un círculo en el cual los productos o desechos obtenidos por una práctica sean utilizados como reactivos en la siguiente; y así sucesivamente, logrando cerrar el ciclo, darle continuidad y utilidad a los reactivos utilizados, generando la menor cantidad de desechos posible, de ser posible eliminarlos por completo, y realizar un cambio en la materia prima, por lo menos cada dos años, teniendo un ahorro significativo al lograr este procedimiento primario.

Se realizará la propuesta ya expuesta a la Escuela de Ingeniería Química, para que los demás laboratorios de esta puedan generar de la misma manera círculos de producción ecológicos (CPE), en donde se puedan obtener productos de algunas prácticas para utilizarlas como reactivos en otras e incluso realizar movimiento de reactivos entre cursos y laboratorios. El desarrollo de esta metodología no se puede restringir solamente a la Escuela de Ingeniería Química, sino desarrollar programas nuevos en cada una de las facultades que tienen laboratorios didácticos y en toda aquella institución que maneje reactivos para sus prácticas de laboratorio químico, físico e incluso biológico o cualquier otra rama.

En primer lugar, se desarrollará el concepto de energía y ambiente, ya que estos son los conceptos básicos de la presente investigación dado el concepto y nombre de la maestría. Luego se propondrán las técnicas sobre el manejo adecuado de los recursos y su mejor disposición para provocar el menor impacto al ambiente.

Se analizará el manejo de los recursos materiales y de la energía, los cuales, al tener diferentes fuentes, estas pueden ser factores de influencia en los impactos producidos en el ambiente, por lo que se pretende establecer los factores significativos para el buen manejo de las materias primas y energía disponibles.

Posteriormente se desarrollará los conceptos de optimización y reducción de desechos con fines amigables al medio ambiente, luego el análisis del concepto de fisicoquímica como tal, y el estudio que realiza a profundidad esta ciencia, con el enfoque en los cursos impartidos actualmente dentro del Área de Fisicoquímica. Esto lleva a establecer aquellos fenómenos en los cuales se basará la investigación, en el curso de laboratorio de Fisicoquímica. Los fenómenos a estudiar se referirán al estudio de equilibrio termodinámico bajo el principio de la regla de fases, el equilibrio químico y la purificación de mezclas orgánicas.

## **1.2. Conceptos de energía y ambiente**

La naturaleza tiene dos formas de manifestarse básicamente, la combinación entre la masa y la energía, una de ellas se refiere al relacionar transferencia de materia en el sentido en que la materia sufre cambios, pero no se destruye, por lo que en la cuarta hipótesis de Dalton que dice así: "...la ley de la conservación de la masa, la cual establece que la materia no se crea ni se destruye". (Chang, 2010, p. 43). Esta hipótesis indica que en todo el universo la materia se mantiene constante, hasta lo que el hombre conoce hoy en sus avances científicos y tecnológicos. Por otra parte, se tiene un concepto similar al anterior que relaciona la segunda base de la naturaleza, la energía, en el cual la primera ley de la termodinámica se define como: "...el principio de la conservación de la energía. Esta expresa que durante una interacción, la

energía puede cambiar de una forma a otra, pero la cantidad permanece constante. Es decir, no se crea ni se destruye”. (Cengel, 2009, p. 2). Estos dos enunciados se complementan cuando se establece la relación entre la materia y la energía, en donde la teoría de Albert Einstein, establece la transformación de la materia en energía pura de alta calidad.

### **1.2.1. Concepto de energía**

La palabra energía es un concepto que acompaña en su camino al ser humano. Cada instante de su vida está relacionada a un cambio energético, por ejemplo, al correr por la mañana, al ingerir alimentos, conducir automóvil; para cada instante se está involucrado en cambios energéticos. Por lo que, el concepto de energía será un pilar fundamental dentro de esta investigación. Las fuentes para producir energía son variadas, que han sido dominadas por el hombre estableciendo nuevas tecnologías.

Las fuentes que lo producen en la actualidad, muchas de ellas son limitadas, por ejemplo, la quema de hidrocarburos. La energía en su concepto más elemental, se puede definir como aquella capacidad que se tiene para producir un trabajo y sus dimensionales internacionales están en joules.

### **1.2.2. Concepto de medio ambiente o ambiente**

Dentro de los conceptos a manejar en la presente investigación es la conservación del medio ambiente, ambiente o medioambiente, según lo defina cada autor, lo que sí es evidente es que está relacionado con todo lo que rodea al hombre, el concepto se puede definir como: “...el concepto de ambiente incluye no sólo las condiciones físicas, sino también las condiciones biológicas en que vive un organismo”. (Smith, 2001, p. 4). Aquí se engloba todos aquellos

factores que actúan directamente con cualquier ser vivo y no únicamente con el ser humano. Por lo que, todos los factores bióticos y abióticos junto con las actividades que interactúan, mantienen el equilibrio en los sistemas naturales.

Basado en la experiencia, el ser humano ha tenido que comprender que cualquier acción que este tome a favor o en contra del medio en donde vive, tarde o temprano llegará a desarrollarse una contraparte, que le afectará directa o indirectamente en su desenvolvimiento. Todas aquellas malas decisiones que se tomen a favor de la economía o simplemente por tener algo acoplado a necesidades, estas provocan cambios significativos en el medio, por lo que el hombre ha comprendido que el ambiente incluye aquellos factores naturales, sociales y culturales existentes e influyen en la vida y afectarán a las siguientes generaciones.

El concepto de ambiente no se puede centrar solamente al hecho de desarrollar la vida, sino todo aquello que comprende un intercambio, ya sea de materia o energía de los elementos perteneciente a estas, es decir, es el espacio en el que se desarrolla la vida de los seres vivos, objetos, agua, suelo, aire y las relaciones entre ellos.

### **1.2.3. Conceptos básicos relacionados de química y termodinámica**

Teniendo estos conceptos básicos de la ecología, química y la termodinámica, se confirma el concepto de energía con el cual se trabajará en todo el trabajo, ya que uno de los fines principales es disminuir el gasto energético. Se establece el concepto fundamental de energía como: "... en la ciencia de la física se intenta definir energía como la capacidad de producir trabajo". (Rodríguez, 2013, p. 17). Este concepto es importante para este

estudio, porque la forma de producir trabajo se puede darse de varias formas, por ejemplo, expansión de un gas, movimiento de un eje, etc.

### **1.3. El ser humano y el ambiente**

Por un lado, el género humano aparece como dominador, pero por el otro, la naturaleza se niega a los ajustes que le impone la humanidad, es decir, existen factores naturales que se resisten a la lógica actual del progreso humano y es donde surgen las dificultades, como: la aparición de nuevas enfermedades y de otras que se suponía estaban controladas, agotamiento de suelos, surgimiento de plagas agrícolas, calentamiento del clima global y el agotamiento de los recursos naturales; que han conducido a la pérdida de bienestar y salud y a la desaparición de la comodidad. "... resultando que el progreso científico y tecnológico, el bienestar de las sociedades industrializadas y el deterioro del medio ambiente están profundamente relacionados". (Avendaño, 2012, p. 15)

#### **1.3.1. La educación ambiental**

Teniendo claro el concepto de medioambiente para la explicar la presente investigación, se considera necesario el desarrollo de políticas del país, con enfoque educativo en el campo ambiental, con la fin de reducir los impactos negativos que se están desarrollando a nivel mundial, ya que al no tener esa educación unificada sobre el buen manejo de los recursos, las consecuencias recaerán sobre el ser humano. "... La educación ambiental es considerada como aquella que se mueve en el ámbito escolar y no escolar, para proporcionar en todos los niveles y a cualquier edad, unas bases de información y toma de conciencia que desemboquen en conductas activas de uso correcto del medio ambiente". (Avendaño, 2012, p. 27).

La educación ambiental no solamente se basa en informar a las personas, estudiantes, etc., sobre cómo se ha ido modificando las condiciones del planeta a causa de la contaminación y la mala administración de los recursos, tomando estos en forma desmedida y desordenada, por lo tanto, hay que desarrollar políticas sobre la formación educativa en el campo del cuidado del medioambiente y el uso adecuado de las energías, para que las personas a cargo de velar por el futuro de los países tomen las mejores decisiones "... La formación ambiental es comprendida como una educación ambiental especializada en cuanto se dirige a un grupo de profesionales, funcionarios gubernamentales, planificadores urbanos, gestores que tienen a su cargo la toma de decisiones". (Avendaño, 2012, p. 27)

Como se mencionó en el párrafo anterior, es necesario llevar un control del medioambiente, y de la contaminación, asimismo, sobre la energía; utilizando todos los principios, leyes e hipótesis que se han planteado, tanto en las ciencias básicas como en la química y la termodinámica para la conservación de la energía, es decir, toda persona a cargo del manejo de recursos debe tener, por lo menos, conocimientos de estas ciencias.

...Si bien la química, como ciencia básica, permite el conocimiento de los procesos posibles (reacciones y sus efectos) y determina las transformaciones de masa en los sistemas, se inclina en revisiones extensas sobre el principio de conservación de la masa en dichos sistemas. En el caso de la termodinámica no solo se incluye el sistema, sino también el efecto de sus transformaciones internas (sean sistemas que reaccionan o no) en sus alrededores bajo el principio de la conservación de la energía (Rodríguez, 2013, p. 19).

### **1.3.2. Optimización y rendimiento**

La oportunidad que se presenta es la implementación de estrategias de ahorro energético, manejo adecuado de recursos y la reutilización de los materiales disponibles al ser trasladados de un fenómeno a otro. Si se establece como un concepto contable/administrativo, se puede decir que la optimización de las materias primas es uno de los factores más importantes de la administración con el fin de reducir los gastos establecidos, que al mismo tiempo involucra a cualquier profesional.

En este caso es evidente que se relacionan directamente en tres ámbitos. El primero, en la protección del medio ambiente al reducir la generación de desechos; el segundo, la utilización y reutilización de los desechos generados; el tercero, el ahorro económico que produce la generación del este tipo de ciclos. Basado en esta descripción de optimización utilizado desde el punto de vista administrativo: "... La optimización de recursos es utilizada para mejorar cualquier sistema de trabajo. En particular, se utiliza este término en relación con el intento de alcanzar la rentabilidad máxima de un producto o proceso dentro de las empresas". (Gómez, 1995, p. 39)

Siguiendo con el concepto administrativo, ya se dijo que se generaliza, por lo que es importante reconocer que la optimización de los recursos establece un control importante en la economía del lugar en donde se esté introduciendo, en el caso del laboratorio se pretende tener la reducción de los materiales consumibles que cada semestre se utilizan, impactando directamente en la parte económica, como en la ambiental, al no tener un control estricto o planificado sobre estos. "...Para lograr la optimización de recursos debe ser importante, también tener un buen control de los gastos para

que estos no representen a la empresa fuga innecesaria de ingresos”. (Córdova, 2009, p. 11).

Por otra parte, al realizarse los procedimientos experimentales y con el afán de reducir los gastos, también se hay que tomar en cuenta otro factor relevante; la observación y evaluación del rendimiento de las materias primas a utilizar, y de este modo darle una mejor utilización de estos produciendo; así la mayor cantidad de rendimiento y la menor cantidad de pérdidas de materias primas y reutilizar la mayor cantidad de veces posibles. “...debe visualizar la oportunidad de los rendimientos [...], por lo cual se esfuerza por lograr la utilización óptima de los recursos con que cuenta en su entorno”. (Córdova, 2009, p. 14).

#### **1.4. Estudio de la fisicoquímica**

##### **1.4.1. Fisicoquímica y conceptos**

El tema central de la investigación es desarrollar un círculo de producción ecológica (CPE), como un modelo en la enseñanza de algunos fenómenos fisicoquímicos basados en el buen desarrollo de las prácticas de laboratorio. Al realizar este estudio se debe proporcionar el concepto fundamental de fisicoquímica por algunos autores.

“...es rama de la ciencia que establece y desarrolla los principios de la química. Sus conceptos sirven para explicar e interpretar las observaciones de la propiedades físicas y químicas de la materia”. (Atkins, 1999, p. 1)

“...es el estudio de los principios físicos fundamentales que gobiernan las propiedades y el comportamiento de los sistemas químicos”. (Levine, 2004, p. 1).

El presente autor aun agrega un poco más en cuanto al estudio puede desarrollarse en dos sentidos fundamentales, el microscópico y macroscópico para la buena comprensión de los fenómenos. “... desde el punto de vista microscópico se basa en el concepto de molécula. El punto de vista macroscópico estudia propiedades de la materia en gran escala sin utilizar explícitamente el concepto de molécula”. (Levine, 2004, p. 1).

Aunque no se logra definir toda una ciencia en unos cuantos enunciados, sí puede decirse que la fisicoquímica es el estudio de los fenómenos físicos y químicos, a través del estudio de propiedades de la materia, termodinámica, equilibrio químico, cinética química y la mecánica estadística para describir los fenómenos microscópicos como sistemas macroscópicos, para su mejor interpretación.

#### **1.4.2. Equilibrio químico**

El estudio de la fisicoquímica se divide en dos grandes pilares: el equilibrio y la cinética, es decir, el recorrido que se hace para llegar de un estado a otro, generando sus propias leyes y principios. En el presente estudio se desarrollará este, exponiendo un conjunto de prácticas enlazadas y de apoyo en las que se explicarán los conceptos de equilibrio y cinética, sin perder de vista el fin primordial que es el desarrollo del buen manejo de la energía y la conservación del ambiente. El concepto que se establece primeramente es el de equilibrio material “... significa que, en cada fase del sistema cerrado, el número de moles de cada sustancia presente permanece constante en el

tiempo". (Levine, 2014, p. 101). Este es un concepto básico para la relación física de los materiales, por lo que, se complementa al introducir el concepto equilibrio de reacción: "... es el equilibrio respecto de la conversión de un conjunto de especies químicas en otro conjunto". (Levine, 2014, p. 101). Permaneciendo constante la materia, como se mencionó al inicio sobre la cuarta hipótesis de Dalton de la conservación de la materia.

### **1.4.3. Concepto de equilibrio de fases**

El equilibrio químico es uno de los fenómenos que se estudiará, pero aún más relevante es el equilibrio de cambio de fase al tener un cambio de estado la materia, en donde, no implica que el equilibrio establezca que se convierte en un sistema estático, al contrario, este punto se basa en que las velocidades del cambio de una fase a otra se compensan con el cambio de fase inverso, por lo tanto, sin presentar una reacción química, el equilibrio de fases se conceptualiza así: "... es el equilibrio respecto del transporte de materia entre fases del sistema sin la conversión de una especie en otra". (Levine, 2014, p. 101).

El equilibrio de fases de sustancias puras, en mezcla binaria o mezcla ternaria como se estudiará en la presente investigación, involucra el comportamiento intrínseco de la materia, que al realizar modificaciones en condiciones naturales, estas presentan un cambio significativo en sus propiedades. Estas propiedades alteradas de la materia pueden producir cambios significativos en el medio ambiente si son desechadas de una forma no adecuada, por lo que, se pretende desarrollar un círculo, en donde, los desechos obtenidos en una práctica sean utilizados en otra, y así consecutivamente, hasta lograr reutilizar la mayor cantidad de desecho, produciendo un impacto menos significativo en el ambiente. Cada una de la

prácticas serán diseñadas, de tal manera que, se pueda reutilizar la mayor cantidad de desechos producido.

#### **1.4.4. Concepto de cinética de reacción química**

El otro concepto pilar que, aunque no se estudiará, es importante mencionarlo por ser fundamental para llegar en un tiempo determinado al equilibrio químico fenómenos relacionados con la fisicoquímica. La cinética de reacción química es el estudio de los modelos y predicciones que gobiernan la transformación de la materia a través de tiempo, desarrollando conceptos bases para este fenómeno, por lo que, el concepto básico de cinética química es el siguiente: "...las velocidades de las reacciones químicas constituyen el campo de estudio de la cinética química". (Castellan, 1987, p. 841).

Al desarrollarse modelos basados en la experiencia, siendo este único para cada proceso que se esté estudiando, se ha observado que aparte de la influencia que tiene el cambio de concentraciones de las especies involucradas, también la presión y la temperatura son factores decisivos al momento de plantear un modelo empírico sobre un modelo de reacción química. "... por experimentación se encuentra que la velocidad de una reacción depende de la temperatura, la presión y las concentraciones de las especies implicadas". (Castellan, 1987, p. 841).

Luego de desarrollar modelos empíricos y observar que la concentración, presión y temperatura son funciones de estado que alteran el desarrollo de una reacción química, se estudia y analiza y concluye que, al agregarle un agente externo a la reacción estudiada, en donde este agente no es un reactivo, ni un producto, es decir, que al final la reacción queda de tal manera como que si

nunca hubiese estado presente, si es un agente decisivo en el mecanismo de la reacción, produciendo una aceleración o desaceleración en el proceso de la reacción química. "... la presencia de un catalizador o inhibidor puede cambiar la velocidad de varias potencias de diez". (Castellan, 1987, p. 841), debido a esto, es evidente que también se debe incluir este estudio dentro del empalme de las prácticas a desarrollar; sin embargo, no está contemplado dentro del círculo presente, pero sí se puede incluir posteriormente.

Al desarrollar el análisis de la cinética de reacción, se tienen varios campos ganados al analizar las velocidades y variables que influyen en esta, para que se dé la reacción, el estudio del tiempo y las condiciones de los procesos para el estudio del equilibrio; y aún más importante, el profundizar en los mecanismos de reacción que son característicos para cada reacción que se lleve a cabo, utilizado en el desarrollo de medicamentos, alimentos y otros que permitan definir los efectos causados por estos en un cuerpo biológico. "... a partir del estudio de la velocidad de una reacción y de su dependencia de todos los factores, se puede aprender mucho acerca de las etapas detalladas por medio de las que los reactivos se convierten en productos". (Castellan, 1987, p. 841). A las etapas a las cuales se refiere la referencia anterior es el mecanismo de reacción que este conlleva en la formación de productos.

#### **1.4.5. Concepto de destilación fraccionada**

Dentro de las etapas de la reutilización de los desechos generados, se estudiará la recuperación de la fase orgánica producida en varias de las etapas del CPE. Esta fase orgánica se asume presentará en su seno contaminación con agua, debido a que en los procesos propuestos se producirá o se agregará agua según sea el caso. Por lo que, es necesario que en un punto determinado se colecten todos los desechos que se presume estén contaminados,

permitiendo realizar una purificación para su reutilización posterior, como se mostrará posteriormente.

Con el fin de lograr una separación purificada de la fase orgánica eliminando el agua que todavía tenga en solución, se desarrollará destilación fraccionada, aprovechando su diferencia en punto de ebullición y la volatilidad de los compuestos orgánicos. Como bien refiere: "...procedimiento de separación de los componentes líquidos de una disolución que se basa en la diferencia en sus puntos de ebullición". (Chang, 2010, p. 529)

#### **1.4.6. Regla de las fases**

Cuando se desarrolla un estudio fisicoquímico, es necesario, definir el número de variables independientes que influyen en un punto específico en el desarrollo de la práctica, las variables específicas definen que cantidad de variables independientes se puede modificar para establecer otro estado de equilibrio en el sistema estudiado. "...el número de variables independientes,  $F$ , se obtiene restando el número total de ecuaciones del número total de variables:

$$F = PC + 2 - P - C(P - 1)$$

$$F = C - P + 2". (Castellan, 1987, p. 290)$$

Se ha desarrollado la teoría básica necesaria para el buen planteamiento de la investigación, por lo que solamente está pendiente la descripción de cada uno de los fenómenos a estudiar sin entrar en profundidad, ya que los fenómenos no son el tema central del problema, por el contrario, se debe aclarar el manejo eficiente de la energía y la conservación del medio ambiente.

## **1.5. Estudio de los equilibrios fisicoquímicos**

### **1.5.1. Equilibrio ternario líquido-líquido**

En primer lugar, se desarrollará el tema de equilibrio ternario de sustancias líquidas. Este tipo de fenómeno establece que las sustancias líquidas tienen una afinidad o no una con otras debido a su estructura molecular, por ejemplo, el etanol o alcohol etílico es compatible y miscible con el agua debido a su semejanza con los puentes de hidrógeno, entonces se dice que ambos son compuestos polares. Por otra parte, se observa también que hay sustancias las cuales no son compatibles; los compuestos orgánicos con los inorgánicos un ejemplo simple es la mezcla de aceite y agua.

Las sustancias, cuando están en mezcla para establecer un equilibrio termodinámico deben presentar un potencial químico equivalente como cuando están como sustancias puras. "... consideremos un sistema en equilibrio que contiene dos capas líquidas, dos fases líquidas. Supongamos que una de esas fases líquidas es un líquido A puro y la otra fase una solución saturada de A en el líquido B. La condición termodinámica para el equilibrio es que el potencial químico de A en la solución, sea igual al potencial químico del líquido puro". (Castellan, 1987, p. 340).

Para el presente estudio se desarrollará una combinación de tres elementos, los cuales dos son miscibles entre sí, y un tercero miscible en uno de ellos; pero no con el otro componente, lo cual genera un equilibrio el cual se denomina ternario por tener tres sustancias o compuestos involucrados. Castellan presenta un sistema ejemplo simple de este fenómeno: "...entre los ejemplos más simples del comportamiento en sistemas de tres componentes está el del cloroformo, agua y ácido acético". (Castellan, 1987, p. 360).

Como se mencionó anteriormente, uno de estos compuestos no es miscible en otro, por lo que, produce el comportamiento específico a estudiar “Los pares, cloroformo-ácido acético y agua-ácido acético son completamente miscibles, mientras que el par agua-cloroformo no lo son“. (Castellan, 1987, p. 360).

Se desarrollará la construcción de la curva de solubilidad del equilibrio ternario en una representación de un triángulo equilátero, esta curva establecerá la frontera entre la miscibilidad de los tres componentes y la miscibilidad entre solamente dos componentes, llamando a cada uno de las fases inmiscibles como fase orgánica y acuosa, debido a las sustancias a utilizar. En este caso, se denomina fase orgánica la que contenga etanol y acetato de etilo, y la fase acuosa la que contiene etanol y agua, claro que cada una de las fases estará contaminada con el tercer elemento. Este componente será eliminado bajo el planeamiento de la práctica respectiva.

### **1.5.2. Equilibrio químico en fase líquida**

El equilibrio químico se refiere a tomar una serie de muestras en donde se hace una variación de las concentraciones de los elementos, si es necesario, se le agregará un catalizador para acelerar la reacción. Básicamente se estudiarán las mezclas pertinentes, en donde, se intenta establecer la constante de equilibrio promedio de las diferentes mezclas analizadas.

Se desarrollará la práctica que se refiere al equilibrio químico en fase líquida, en donde se estudia el grado de avance de esta. Como los cursos que se están estudiando involucran todo lo que sea referente a la termodinámica que habla del equilibrio macroscópico de las sustancias, este fenómeno permite reconocer y analizar el estudio de funciones de estado como la entalpía,

entropía y energía libre de Gibbs. "...La concentración de equilibrio corresponde a un mínimo en la representación de la energía de Gibbs frente al avance de la reacción, y la localización de este mínimo nos permite establecer la relación entre la constante de equilibrio y la energía de Gibbs de reacción estándar". (Atkins, 1999, p. 217).

Luego de estudiar las variables involucradas para este fenómeno, también se puede establecer que el equilibrio químico es afectado, tanto por la temperatura, como por la presión dependiendo del estado o fase en que se encuentren las sustancias a estudiar, pero si se puede estudiar el efecto que producen estas variable respecto al equilibrio de una reacción química. "...la formulación termodinámica del equilibrio nos permite evaluar cuantitativamente el efecto de los cambios de presión y temperatura". (Atkins, 1999, p. 217)

### **1.5.3. Destilación fraccionada**

En este fenómeno es necesario enfatizar su importancia, debido a que, utilizando este procedimiento es posible realizar la purificación de la fase orgánica que se obtendrá en los diferentes experimentos entrelazados que se realizarán. En cada uno de los experimentos realizados, se llevará a este reservorio que permitirá la reutilización de la mayor parte de los desechos generados, ya que independiente de la concentración de las que se obtenga de la fase orgánica se podrá reutilizar en el experimento siguiente.

Debido a que se están manejando ciertos compuestos orgánicos con puntos de ebullición similares, pero en relación con el punto de ebullición del agua se encuentra a una distancia considerable para realizar una separación con una columna de destilación fraccionada, con lo que, se deben realizar los

cálculos necesarios o el procedimiento empírico que permita la purificación y reutilización de los desechos producidos en las prácticas involucradas.

Aquellas sustancias que su comportamiento no se alejan significativamente de la idealidad pueden ser separadas fácilmente por medio de destilación fraccionada, este fenómeno se basa en una secuencia de calentamientos y saturando el vapor o dejando escapar las moléculas del componente más volátil en inicio y luego desplazar el componente menos volátil. “Las mezclas ideales o que se apartan muy poco del comportamiento ideal, pueden separarse en sus constituyentes por destilación fraccionada”. (Castellan, 1987, p. 326).

Experimentalmente se determinará si es necesario utilizar un determinado refrigerante o destilador con pocos o muchos platos teóricos, que permitan la separación deseada.

“...si los componentes individuales presentan puntos de ebullición que son muy diferentes, es suficiente una columna de destilación con pocos platos teóricos para separar la mezcla. Por otro lado, si los puntos de ebullición están muy próximos, se requiere una columna con un número mayor de platos teórico”. (Castell, 1999, p. 326).

Durante el desarrollo de la práctica de destilación fraccionada se utilizará un refrigerante que contiene protuberancias internas que simulan los platos teóricos dentro de una columna de destilación industrial. Este refrigerante hará posible la separación de los compuestos más volátiles de los menos volátiles, debido a que al momento de ascender el vapor este chocará con las protuberancias de vidrio, las moléculas de vapor perderán energía y entrarán en equilibrio produciéndose un condensado que tendrán un contacto íntimo con el

vapor, produciéndose así la separación efectiva de los compuestos más volátiles de los menos volátiles. El número de platos define la eficiencia de la columna, en este caso en particular, se utiliza el equipo existente en el laboratorio, por lo que, no se calculará el número de platos teóricos necesarios, pero si se utilizará este principio para producir la separación efectiva de la fase orgánica de la acuosa procedente de los otros experimentos. "...La eficiencia de una columna de fraccionamiento se expresa en función del número de platos teóricos, número de etapas de vaporización y condensación eficaces que se requiere para alcanzar el grado de separación indicado por las líneas de trazo". (Atkins, 1999, p. 201).

La finalidad de este experimento es la eliminación de elementos no deseados, en este caso agua, acetato de sodio, cloruro de sodio, fenolftaleína y cualquier otro compuesto producido e involucrado. Se espera que, con la destilación planteada se logre hacer la separación la mezcla orgánica purificada etanol absoluto-acetato de etilo. Logrando esta separación incluso si se presentase un punto azeotrópico no deseado. "...la destilación fraccionada separaría a la mezcla en componente puro 1 contenido en el destilado y dejaría la mezcla azeotrópica en el recipiente". (Castellan, 1987, p. 327).

Otro de los principios que se utilizará, es aquel que plantea el método de arrastre de vapor, establece que se puede extraer los elementos de una mezcla sí y solo si estos son altamente volátiles, por lo que, se espera lograr la separación de los compuestos volátiles a utilizar la columna y dejando como remanente todos aquellos elementos no deseados. "...esta diferencia es la base de la destilación por arrastre, en la que se consigue que un compuesto orgánico insoluble en agua y sensible al calor destile a una temperatura inferior a su punto de ebullición normal". (Atkins, pp. 202-203).

#### **1.5.4. Equilibrio de fases líquido-vapor en mezcla binaria**

El siguiente fenómeno es el equilibrio líquido-vapor de mezcla, estas mezclas pueden comportarse idealmente o presentar desviaciones específicas para cada grupo de sustancias analizadas; en este caso se analiza un fenómeno solamente de la mezcla de dos sustancias puras, pero experimentalmente se puede desarrollar el comportamiento de las sustancias cuando no son ideales como lo describe Castellan: “El concepto de solución ideal se extiende a soluciones que contienen varios constituyentes volátiles [...], el concepto está basado en la generalización del comportamiento experimental de las soluciones reales y representa un comportamiento límite el cual tienden las soluciones reales”. (Castellan, 1987, p. 316).

Pero el fenómeno que se estudiará en la presente investigación no es una solución ideal, esta se alejará de la idealidad, por lo que, se espera ejemplificar al estudiante lo complicado que se vuelve querer obtener un compuesto puro por algunas técnicas no viables. Cuando se desvía de la idealidad se produce una mezcla que se denomina azeotrópica. Esta se presenta cuando a una mezcla, que en particular se comporta como sustancia pura, se observa al tener como variable de control la temperatura o la presión de vapor que produce el punto de ebullición de mezcla. “La mezcla que tiene una presión de vapor máxima o mínima se denomina azeotrópica (del griego: hervir sin cambio)”. (Castellan, 1987, p. 326).

Debido a las sustancias que se están utilizando, estas presentarán un azeótropo, el cual es un punto máximo o mínimo en la desviación de la ley de Raoult, esta desviación puede ser positiva o negativa, dependiendo de la naturaleza de la mezcla trabajada. En este caso se presentará una desviación positiva para la ley de Raoult, por lo que, se espera determinar la energía libre

de Gibbs en exceso, es decir, se presentará un mínimo en el diagrama de fases de temperatura en función de la fracción molar. "... los diagramas de fases que muestran un mínimo indican que la mezcla es menos estable que la disolución ideal. Para tales mezclas, GE es positiva y pueden existir contribuciones tanto de la entalpía como de la entropía". (Atkins, 1999, p. 202).

Las prácticas planteadas a desarrollarse se basan en el equilibrio químico o de fases de las sustancias involucradas, se están desarrollando procesos físicos de separación y mostrando procesos químicos de reacción, en donde se observa dificultad que se pueda presentar en la industria, al desviarse de la idealidad el comportamiento de las sustancias.



## **2. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN**

### **2.1. Reconocimiento de mejoras**

Actualmente, en el laboratorio de fisicoquímica se llevan a cabo prácticas rotativas, es decir, la distribución de un grupo de cuatro prácticas que se llevan a cabo por cuatro grupos, estos realizan una práctica una vez a la semana, de una en una hasta completar el ciclo. Se tomó esta metodología aprovechando la estructura para realizar un circuito de prácticas, que se conectaron entre ellas al utilizar los reactivos o productos de una práctica o en la siguiente o guardando muestras para su debida utilización a través de estas cuatro semanas.

Se procedió a analizar las prácticas que se realizan actualmente, con la finalidad de determinar hacia dónde se dirigen los desechos, tanto de reactivos no utilizados como productos obtenidos, analizándose que se realizan las buenas prácticas necesarias para desecharlos, transformando la materia en compuestos poco agresivos con el ambiente. Algunos de ellos se lanzan a la cañería, otros se evaporan y se lanzan al aire, sabiendo que no es una concentración que dañe significativamente al ambiente.

Al analizar esta situación se procedió a reestructurar las prácticas, haciendo referencia a los reactivos que se pueden reutilizar al desarrollar una secuencia de prácticas, ya sea los reactivos o los productos. Se tomaron dos aspectos de esta investigación, primero que se optimizaran los recursos ambiental-energéticos y segundo que los fenómenos involucrados fuesen representativos en el estudio de los fenómenos fisicoquímicos. Los fenómenos

a estudiar son: equilibrio ternario líquido-líquido, equilibrio químico, equilibrio líquido-vapor y la purificación de orgánicos utilizando la destilación fraccionada.

## **2.2. Preparación de materiales**

Se divide en dos partes la preparación de materiales, la primera se establece cuando los reactivos se están utilizando por primera vez, los cuales son compuestos puros y son utilizados durante la primera práctica independientemente de cual sea, pero si se deja claro que cualquier práctica con que se empiece esta debe construir, como primer paso, la curva de calibración que utilizará durante toda la secuencia de prácticas, y a partir de esta se presenta la segunda parte en donde luego de cualquier práctica que se haya desarrollado se guarden los residuos que se tienen de estos en frascos de color ámbar, para conservar sus propiedades fundamentales y luego ser reutilizadas.

La curva de calibración obtenida proporciona el modelo matemático que hará posible que en cada parte del círculo se puedan desarrollar la lectura de las concentraciones solamente al medir su densidad. Este modelo matemático se desarrolló aprovechando que el comportamiento de la concentración de dos sustancias, en función de la densidad, es lineal; por lo que se puede utilizar esta curva durante todas las prácticas del círculo. La curva de calibración es la fracción molar del acetato de etilo y etanol absoluto, que son dos de los reactivos que se utilizan durante todas las prácticas.

## **2.3. Desarrollo de las prácticas**

Luego de tener las diferentes composiciones de acetato de etilo y etanol de la curva de calibración se procedió a utilizar estas muestras divididas en: una

parte para la práctica de equilibrio ternario líquido-líquido, y otra parte para el equilibrio químico. Se realizaron estos experimentos completos. Tomando para el equilibrio ternario otras muestras provenientes del equilibrio líquido-vapor. Luego de utilizar las otras muestras para el equilibrio químico, se realizaron los procedimientos necesarios para colocar las mezclas solamente que contuvieran acetato de etilo, etanol absoluto y agua destilada. Llevando estas muestras a los recipientes correspondientes para su reutilización.

En todas las prácticas desarrolladas se tienen dos condiciones para desarrollarlas. Primero, si la práctica se realiza como la primera de las cuatro, por lo que, se debe de tomar los reactivos nuevos para su realización, tanto de la curva de calibración como para su propia estructura. Pero en algunas prácticas se pueden utilizar reactivos o productos ya utilizados y purificados. La segunda condición es si la práctica a desarrollar es la número dos en adelante, esta práctica en su mayoría utiliza reactivos purificados almacenados, pero en algunas ocasiones también se desarrolla algunas partes con reactivos estrictamente nuevos, que luego se trasladan al reservorio general.

Para todos estos experimentos se monitoreo la cantidad de reactivos que se desechaban, observándose que muchos de ellos se perdían debido a la volatilidad y no estrictamente por no reutilizarlos, en general, el rendimiento de recuperación oscila entre el 90 y 95 %. Con respecto a la optimización de los recursos energéticos se realizó una balance de energía utilizada, concluyendo que no se aumento ni redujo la cantidad de energía utilizada, pero a pesar de realizar cambio significativos en las prácticas se obtienen el mismo consumo, el cual ha sido reducido con anterioridad debido a utilizar dentro del laboratorio la Norma de SGA 14001:2006.



### 3. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

#### 3.1. Propuesta de la modificación de las prácticas

Las prácticas que se desarrollan actualmente en las dos fases del curso del Laboratorio de Físicoquímica 2 se describen en la tabla I.

Tabla I. **Calendarización de las prácticas en el Laboratorio de Físicoquímica 2**

No.	Fase	Nombre de la práctica
1	1	Equilibrio de fases líquido-vapor en sistemas binarios
2		Equilibrio de fases líquido-líquido en sistemas ternarios
3		Equilibrio de fases sólido-líquido en sistemas binarios
4		Equilibrio de disociación en disolución acuosa
5	2	Equilibrio químico en fase líquida
6		Celdas galvánicas
7		Cinética de reacción redox
8		Adsorción en disolución acuosa

Fuente: Laboratorio de Físicoquímica, FIUSAC (2018). Manual del estudiante, p. 10

La propuesta de modificación de prácticas se presenta en la tabla No. II. Desarrollando un conjunto de prácticas en las cuales los productos se utilizan en la o las siguientes prácticas.

Tabla II. **Reordenamiento de las prácticas del Laboratorio de Físicoquímica 2**

No.	Fase	Nombre de la práctica
1	1	Celdas galvánicas
2		Adsorción en disolución acuosa
3		Equilibrio de fases sólido-líquido en sistemas binarios
4		Equilibrio de disociación en disolución acuosa
5	2	<b>Equilibrio de fases líquido-líquido en sistemas ternarios</b>
6		<b>Equilibrio químico en fase líquida</b>
7		<b>Destilación fraccionada, purificación de orgánicos</b>
8		<b>Equilibrio de fases líquido-vapor en sistemas binarios</b>

Fuente: elaboración propia.

### 3.2. **Modificación de prácticas**

Durante todas las prácticas debe utilizarse bata, mascarilla que contenga filtro para compuestos orgánicos y lentes de protección. Primero, preparar cuatro frascos para desechos, los cuales tendrán los reactivos a reutilizar.

- Desechos con ambas fases (fase orgánica y fase acuosa). Aquí se debe de decantar para separar la fase orgánica de la fase acuosa.
- Desechos fase orgánica no rectificadas (proviene de sobrantes de prácticas líquido-líquido y constante de equilibrio químico).
- Desechos fase orgánica rectificadas (proviene de sobrantes de prácticas de líquido-vapor y líquido-líquido).
- Desechos de fase acuosa para posteriores experimentos o transformación a acetato de etilo.

### 3.2.1. Curva de calibración (comportamiento volumétrico)

- Esta curva de calibración la realizarán todos los grupos durante la primera semana de prácticas.
  - Excepción: al grupo que tenga que realizar como primera práctica equilibrio químico en fase líquida, debe hacer con una semana de anticipación la curva de calibración, y así tener preparadas las muestras para el equilibrio ternario y equilibrio químico en fase líquida.
- A. Preparar las siguientes mezclas de acetato de etilo y etanol absoluto, en fase líquida, para un volumen aproximado de 15 ml cada una (anotar los volúmenes utilizados de cada sustancia):

Tabla III. **Fracción molar de acetato de etilo y etanol absoluto**

<b>Mezcla (Fracción molar)</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>
$x_{CH_3COOCH_2CH_3}$	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
$x_{C_2H_5OH}$	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1

Fuente: elaboración propia.

- B. Medir el volumen y la masa para cada una de las mezclas (anotar la temperatura ambiente a la que se hace cada medición).

Reportar:

- a. Tabla que contenga las fracciones parciales y las densidades respectivas.
- b. Curva " $\rho_{mezcla} = f(X_a)$ "
- c. Curva de calibración " $X_a = f(\rho_{mezcla})$ "

Nota: los datos de obtenidos de la curva de calibración se debe colocar en todos los datos originales a entregar y también en todos los reportes de las cuatro prácticas correspondientes.

Preparar para:

#### A. Equilibrio ternario

- a) Tomar 5 ml de cada una de las mezclas de acetato de etilo y etanol absoluto de la curva de calibración ( $X_a \geq 0.5$ ).
- b) A las mezclas anteriores agregarles agua destilada hasta que se vean dos fases (sin importar si se agrega en exceso).
- c) Dejar reposar durante una semana hasta la próxima práctica (dejando bien identificado en el lugar correspondiente, utilizar tubos de ensayo con tapón).

#### B. Equilibrio químico en fase líquida

- a) Tomar 5 ml de cada una de las mezclas de acetato de etilo y etanol absoluto de la curva de calibración.
- b) A las mezclas de acetato de etilo y etanol absoluto agregarle ácido acético y agua destilada como se indica en la tabla IV.

Tabla IV. **Fracción molar para el equilibrio químico en fase líquida**

No.	Fracción molar (Volumen total 5 ml)		Fracción molar (Volumen total 5 ml)		Volumen (ml)
	Acetato de etilo	Etanol absoluto	Agua destilada	Ácido acético	Ácido clorhídrico
1	0.1	0.9	0.1	0.9	0.7
2	0.2	0.8	0.2	0.8	
3	0.3	0.7	0.3	0.7	
4	0.4	0.6	0.4	0.6	
5	0.5	0.5	0.5	0.5	
6	0.6	0.4	0.6	0.4	
7	0.7	0.3	0.7	0.3	
8	0.8	0.2	0.8	0.2	
9	0.9	0.1	0.9	0.1	
10	0.0	0.0	0.0	0.0	

Fuente: elaboración propia.

### 3.2.2. Experimento 1. Equilibrio Líquido-líquido en sistemas ternarios

#### Procedimiento Experimental:

##### Curva de solubilidad

01. A las mezclas preparadas con anticipación (Curva de calibración) en donde se colocó agua destilada en exceso agregar gota a gota etanol absoluto, con una bureta (preferiblemente dentro de la campana de extracción), hasta que desaparezca la turbidez (fase totalmente homogénea). Puede agitar cada cierto tiempo las soluciones si es necesario.
02. Anotar el gasto volumétrico del etanol absoluto.
03. Repetir el paso 1-2 de las mezclas de la tabla III restantes (ya con el agua destilada agregada) hasta completar con la mezcla 9.

##### Líneas de enlace y punto de pliegue (si es como primera práctica)

01. Elegir 3 puntos que estén debajo de la curva de solubilidad y replicarlos en 10 ml c/u.
02. Separar totalmente las fases de cada mezcla utilizando ampollas de decantación.
03. Medir el volumen de cada fase y pesarla (utilizar una probeta).
04. Obtener las concentraciones utilizando la curva de calibración.
05. Las muestras finales de esta parte del experimento agregarlas en el recipiente de desechos NO RECTIFICADOS.

### Líneas de enlace y punto de pliegue (si viene del equilibrio líquido-vapor)

01. Tomar 3 muestras de 10 ml ( $X_a \geq 0.5$ ) del diagrama de fases de la práctica de equilibrio líquido-vapor y agregarle agua destilada hasta que se divida en dos fases (no importa agregar agua en exceso) y dejar reposar durante media hora.
02. Separar totalmente las fases de cada mezcla utilizando ampollas de decantación o pipeta con lápiz de succión.
03. Medir el volumen de cada fase y pesarla (utilizar una probeta).
04. Obtener las concentraciones utilizando la curva de calibración " $X_a = f(\rho_{mezcla})$ ".
05. Las muestras finales de la fase orgánica de esta parte del experimento agregarlas en el recipiente de desechos NO RECTIFICADOS. La fase acuosa colocarla en el recipiente correspondiente.

### **Reportar:**

01. Curva de calibración (comportamiento volumétrico)
02. Diagrama triangular líquido-líquido para el sistema agua destilada – acetato de etilo – etanol absoluto que contenga los siguientes elementos:
  - A. Curva de equilibrio o solubilidad (domo)
  - B. Líneas de enlace seleccionadas
  - C. Punto de pliegue
03. Diagrama de distribución " $x_A^{(\pi 1)} - x_A^{(\pi 2)}$ "
04. Diagrama de distribución  $\mathcal{K}_A = f(x_A)$  (respecto a la fracción total de etanol).

### 3.2.3. Experimento 2. Equilibrio químico en fase líquida

Nota: Si se realiza como primera práctica debe de hacer: la curva de calibración y preparar las muestras con una semana de anticipación.

Procedimiento experimental

- a. Tomar las soluciones que se prepararon en la práctica anterior o con una semana de anticipación.
- b. Tomar 2 ml de cada solución y titular cada una de las soluciones con hidróxido de sodio 1.0 M (revise si existe una solución ya preparada).
- c. Repetir el procedimiento anterior hasta que se terminen las muestras preparadas.
- d. Repetir el paso *b* y *c* cinco veces más para cada muestra.

Preparar para el siguiente experimento

- a) Mezclar las muestras, si es necesario agregarle exceso de agua o acetato de etilo hasta tener dos fases.
- b) Realizar la separación de la fase orgánica de la acuosa y verter cada muestra separada en el frasco correspondiente de desechos a reutilizar.

Reportar:

- a) Curva de calibración (comportamiento volumétrico)
- b) Gráfica de la concentración al equilibrio respecto a la concentración inicial para cada especie que reacciona (para las soluciones de la 1 a la 9 que se muestran en la tabla IV, hacer una sola gráfica).

- c) Gráfica del comportamiento del avance de reacción en función de los moles iniciales para cada especie que reacciona, (hacer una sola gráfica).
- d) Gráfica del porcentaje de rendimiento para cada una de las reacciones en función de los moles iniciales de cada especie que reacciona (hacer una sola gráfica).
- e) Estimar la constante de equilibrio y compararla con la teórica.
- f) Estimación de la energía de Gibbs de la reacción.

Nota: asumir que la disociación ácida se comporta de la misma forma en cualquier disolvente y como un ácido fuerte el ácido acético.

### 3.2.4. Experimento 3. Destilación fraccionada. Purificación de orgánicos

Procedimiento experimental

- a. Armar el sistema de destilación fraccionada como le indique su instructor (ver figura 15 del apéndice E).
- b. Si es primera práctica a realizar y no hay muestras para destilar (en desechos almacenados). Preparar en un volumen de 150 ml la mezcla siguiente:

Tabla V. **Fracción molar para destilación fraccionada**

<b>Símbolo</b>	<b>Sustancia</b>	<b>Fracción Molar</b>
A	Acetato de etilo	0.30
B	Etanol absoluto	0.10
C	Agua destilada	0.60

Fuente: elaboración propia.

Si no es la primera práctica tomar, muestra de 150 ml de los desechos almacenados no rectificado (fase orgánica) de prácticas o semestres anteriores.

- c. Proceder a calentar lentamente la muestra y llevar a ebullición, detener la destilación hasta que se tengan 10 ml del destilado. Anotar la temperatura de ebullición.
- d. Tomar la muestra de 10 ml. Si existe sobrante de destilado, regresarlo al balón de tres bocas.
- e. Medir el volumen y la masa de la muestra obtenida.

- f. Repetir los pasos del inciso c al e, nueve veces más.
- g. Hacer dos repeticiones adicionales del procedimiento anterior, con una muestra nueva no rectificada.

Preparar para el siguiente experimento

- a) Mezclar todas las muestras destiladas (medir su densidad) y agregar a desechos almacenados de fase orgánica rectificada.

Reporta

- a. Curva de calibración
- b. Diagrama  $T_{eb} = f(x_A)$
- c. Diagrama  $x_B = f(x_A)$
- d. Comparar densidad del destilado con la curva de calibración para verificar la pureza (al eliminar el agua destilada)
- e. Densidad de mezcla final

### 3.2.5. Experimento 4. Equilibrio de fases binario. Líquido-vapor

Procedimiento experimental

Diagrama de fases

- a. Armar el equipo de destilación según se lo indique su instructor (ver figura 16 del apéndice E).
- b. Tomar 150 ml desechos almacenados de fase orgánica rectificada, verificar su concentración inicial con la curva de calibración.
- c. Colocar los 75 ml de muestra orgánica en el balón de tres bocas e ir enriqueciendo con etanol absoluto como se describe a continuación.
  - c.1. Calentar el balón de tres bocas hasta que se obtengan 5 ml de destilado, detenga el calentamiento y anotar la temperatura de ebullición.
  - c.2. Esperar a que enfríe el sistema, por lo menos 10 °C por debajo del punto de ebullición, extraer 5 ml del remanente, 5 ml de destilado (en un baño de hielo) y colocar en tubos de ensayo previamente tratado. (Nota: si hay más de 5 ml de destilado, el sobrante regresarlo al balón de tres bocas).
  - c.3. Medir la densidad a cada una de las muestras, identificando correctamente.
  - c.4. Agregar al balón de tres bocas 10 ml de etanol absoluto, para mantener aproximadamente constante el volumen inicial.
  - c.5. Repetir el procedimiento del inciso c.1 y c.4, hasta que la densidad se acerque a la del etanol absoluto no excediéndose de 10 muestras.
- d. Al terminar el procedimiento anterior, repetirlo enriqueciendo esta vez con acetato de etilo.

Nota: Si no se tiene desechos, llenar el balón de tres bocas con 75 ml de acetato de etilo puro, e ir agregando etanol absoluto como se indica en el inciso c.

Preparar para el siguiente experimento

- a. Guardar tres muestras de 10 ml que tengan una fracción molar de acetato de etilo mayor o igual a 0.5 y ser utilizadas en el equilibrio ternario en la generación de las líneas de distribución.
- b. Los sobrantes combinarlos y agregarlos al frasco de desechos orgánicos rectificadas.

Reportar:

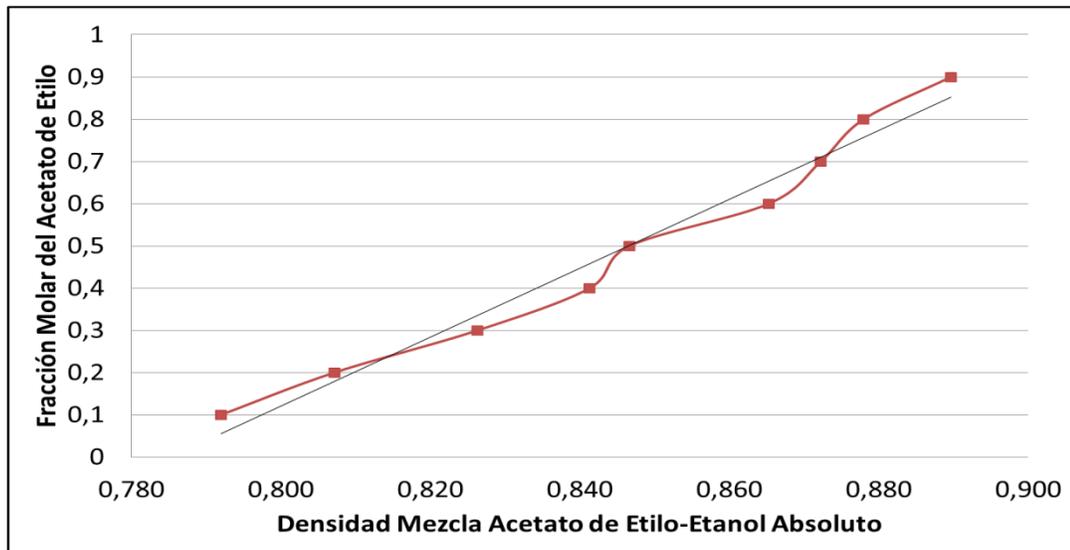
- c. Diagrama " $V_m = f(x_A^{(l)})$ "
- d. Diagrama " $\bar{V}_A = f(x_A^{(l)}), \bar{V}_B = f(x_A^{(l)})$ "
- e. Diagrama " $\mathcal{K}_A = f(x_A), \mathcal{K}_B = f(x_A)$ "
- f. Diagrama comparativo " $x_A^{(v)} = f(x_A^{(l)})$ " experimental e ideal (mediante intervalos de confianza).
- g. Diagrama comparativo " $T_{eb} = f(x_A)$ " experimental e ideal (mediante intervalos de confianza).
- h. Intervalo más probable para el azeótropo.
- i. Diagrama " $\frac{G_m^{(E)}}{R \cdot T} = f(x_A); \ln \gamma_A = f(x_A); \ln \gamma_B = f(x_A)$ "
- j. Modelo de ajuste para la regresión  $\frac{G_m^{(E)}}{x_A \cdot x_B \cdot R \cdot T} = f(x_A)$



### 3.3. Resultados experimentales

#### 3.3.1. Curva de calibración

Figura 1. Curva de calibración equilibrio binario



Color	Modelo Matemático	Incertidumbre Máxima	Rango de Validez	R <sup>2</sup>
	$y = 8.1485 x - 6.3979$	0.4515	[0.7800 – 0.9000]	0.9765

Fuente: elaboración propia.

#### 3.3.2. Modelo matemático de calibración

$$y = 8.1485 x - 6.3979$$

$$Xa = 8.1485 \rho - 6.3979$$

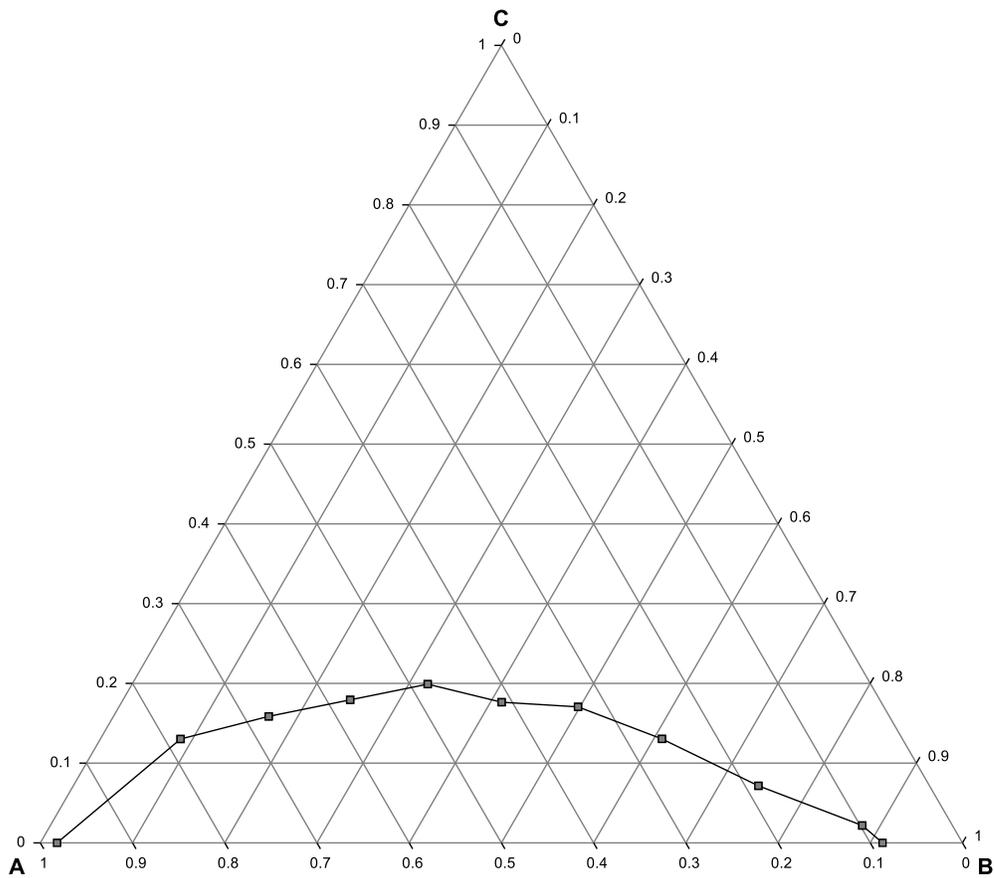
Donde:

*y* o *Xa*: fracción molar de acetato de etilo

*x* o  $\rho$ : densidad de mezcla del acetato de etilo y etanol absoluto

### 3.3.3. Equilibrio de fases ternario. Líquido-líquido

Figura 2. Curva de solubilidad de referencia

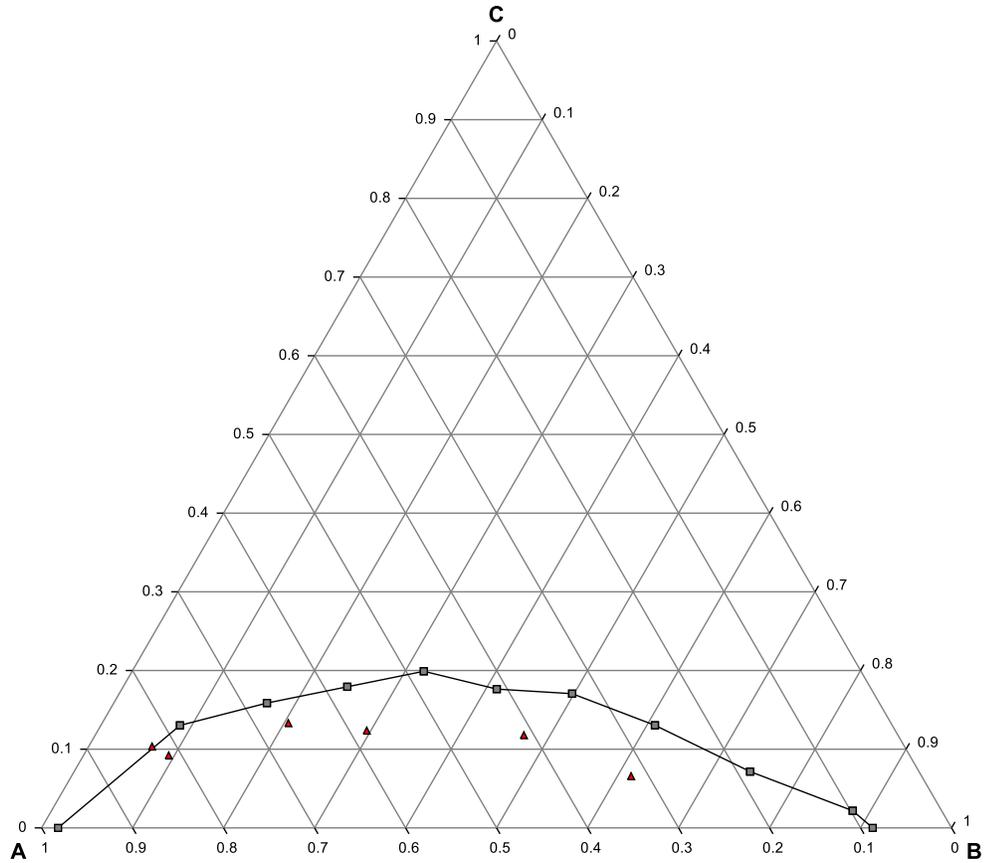


Letra	Especie	Incertidumbre máxima	Rango de validez
A	Agua destilada	0.1309	[0.0, 1.0]
B	Acetato de etilo	0.1156	[0.0, 1.0]
C	Etanol absoluto	0.0999	[0.0, 1.0]

Fuente: elaboración propia.

### 3.3.4. Equilibrio de fases ternario. Líquido-líquido. Agregando agua destilada en exceso para generar dos fases

Figura 3. Equilibrio ternario. Agregando agua destilada en exceso

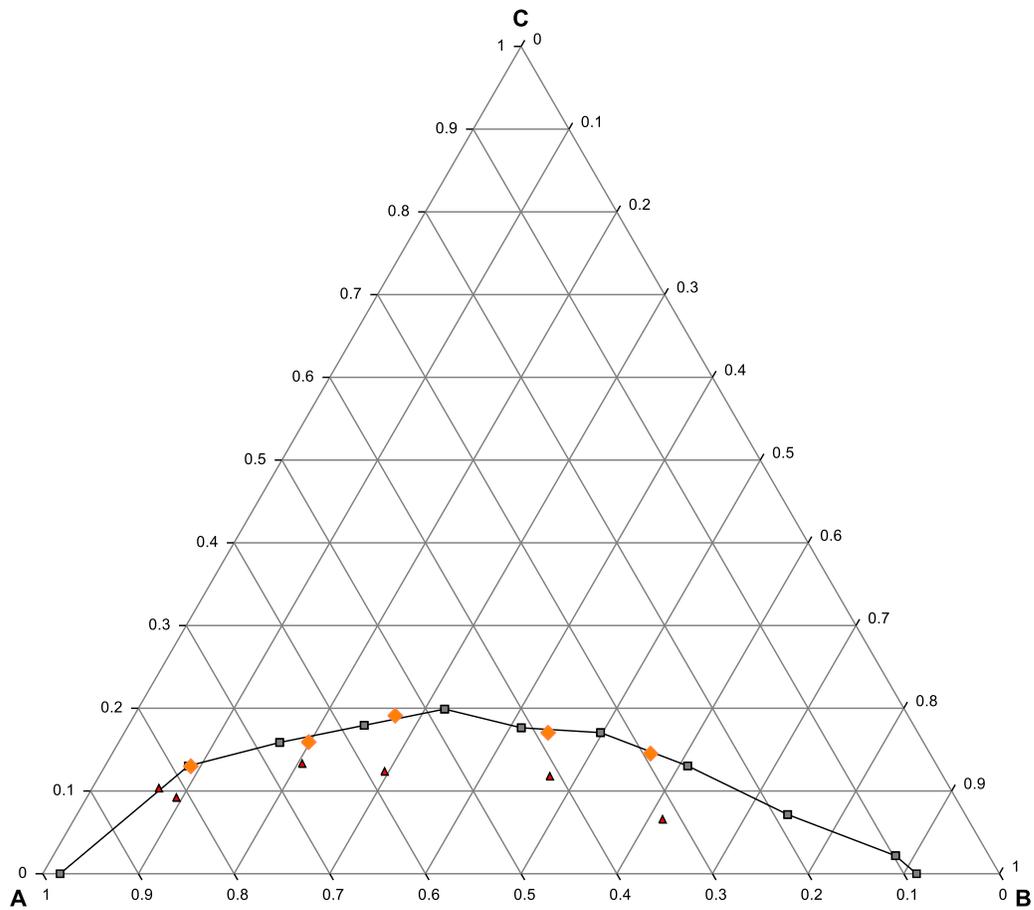


Letra	Especie	Incertidumbre máxima	Rango de validez
A	Agua destilada	0.1309	[0.0, 1.0]
B	Acetato de etilo	0.1156	[0.0, 1.0]
C	Etanol absoluto	0.0999	[0.0, 1.0]

Fuente: elaboración propia.

### 3.3.5. Equilibrio de fases ternario. Líquido-líquido. Agregando etanol absoluto para generar curva de solubilidad

Figura 4. Equilibrio ternario. Agregando etanol absoluto

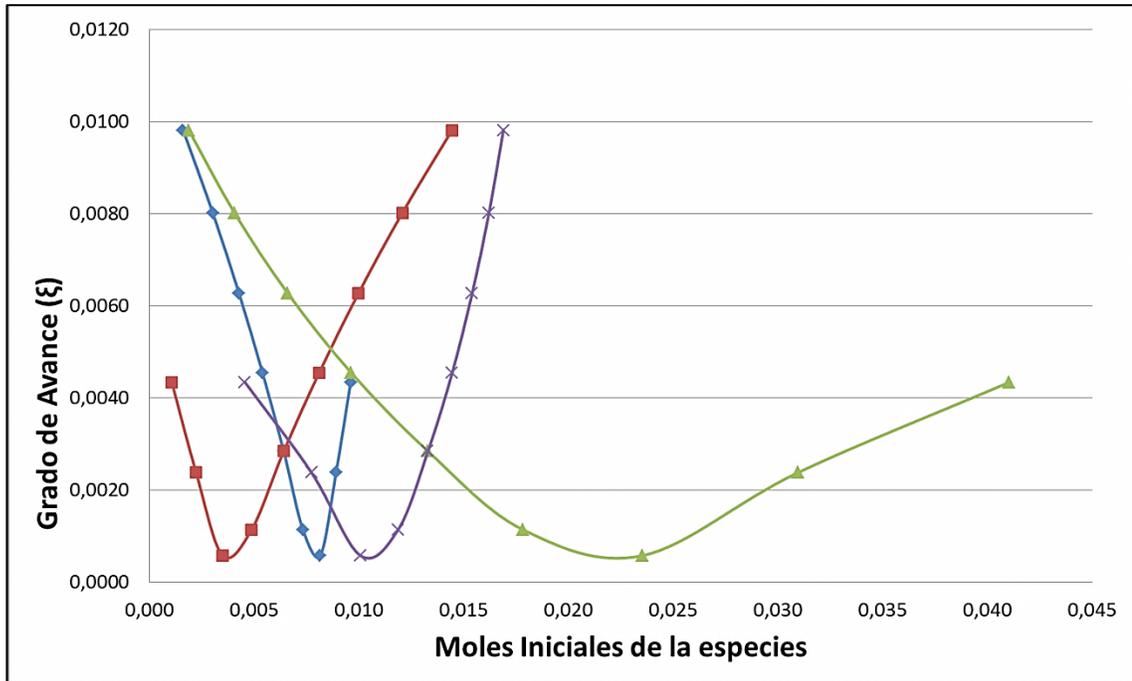


Letra	Especie	Incertidumbre máxima	Rango de validez
A	Agua destilada	0.1309	[0.0, 1.0]
B	Acetato de etilo	0.1156	[0.0, 1.0]
C	Etanol absoluto	0.0999	[0.0, 1.0]

Fuente: elaboración propia.

### 3.3.6. Equilibrio químico en fase líquida. Grado de avance

Figura 5. Grado de avance en función de moles iniciales

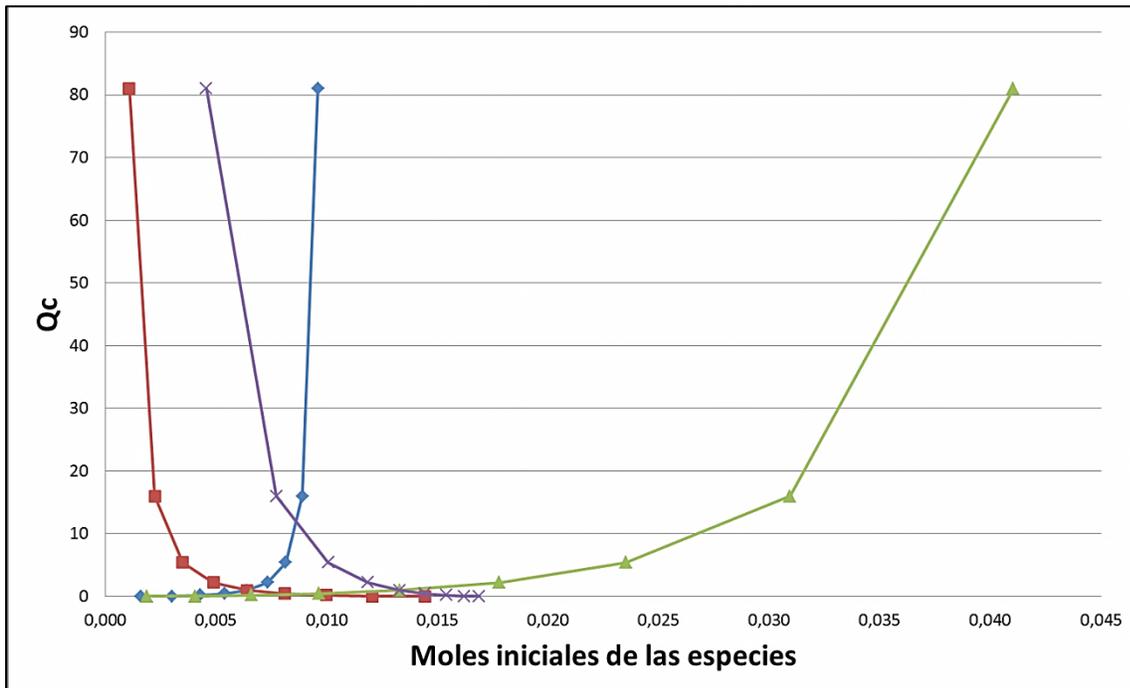


Color	Letra	Especie	Incertidumbre máxima	Rango de validez
	A	Agua destilada	0.0078	[0.0016, 0.0410]
	B	Acetato de etilo	0.0016	
	C	Etanol absoluto	0.0030	
	D	Ácido acético	0.0023	

Fuente: elaboración propia.

### 3.3.7. Equilibrio Químico. Qc

Figura 6. Qc en función de moles iniciales

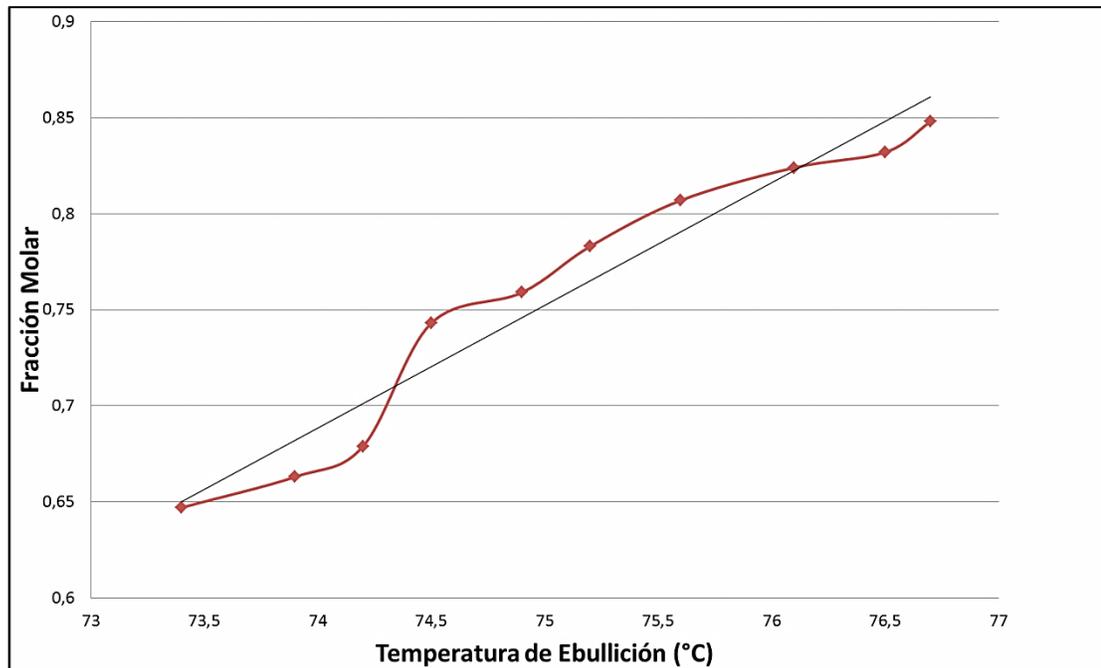


Color	Letra	Especie	Incertidumbre máxima	Rango de validez
	A	Agua destilada	0.0078	[0.0016, 0.0410]
	B	Acetato de etilo	0.0016	
	C	Etanol absoluto	0.0030	
	D	Ácido acético	0.0023	

Fuente: elaboración propia.

### 3.3.8. Destilación fraccionada. Purificación de orgánicos

Figura 7. Fracción molar de B en función de temperatura de ebullición

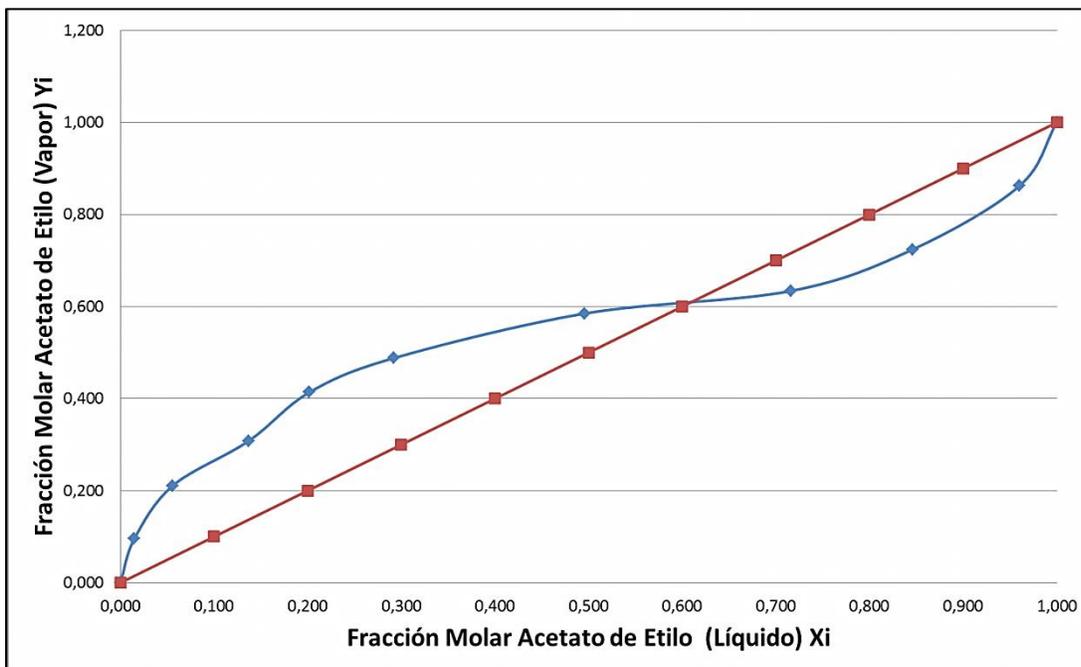


Color	Modelo matemático	Incertidumbre máxima	Rango de validez	R <sup>2</sup>
	$y = 0.0639 x - 4.0394$	0.4515	[73.3 – 76.6]	0.9474

Fuente: elaboración propia.

### 3.3.9. Equilibrio de fases binario. Líquido-vapor. Curva de distribución

Figura 8. Curva de distribución líquido-vapor

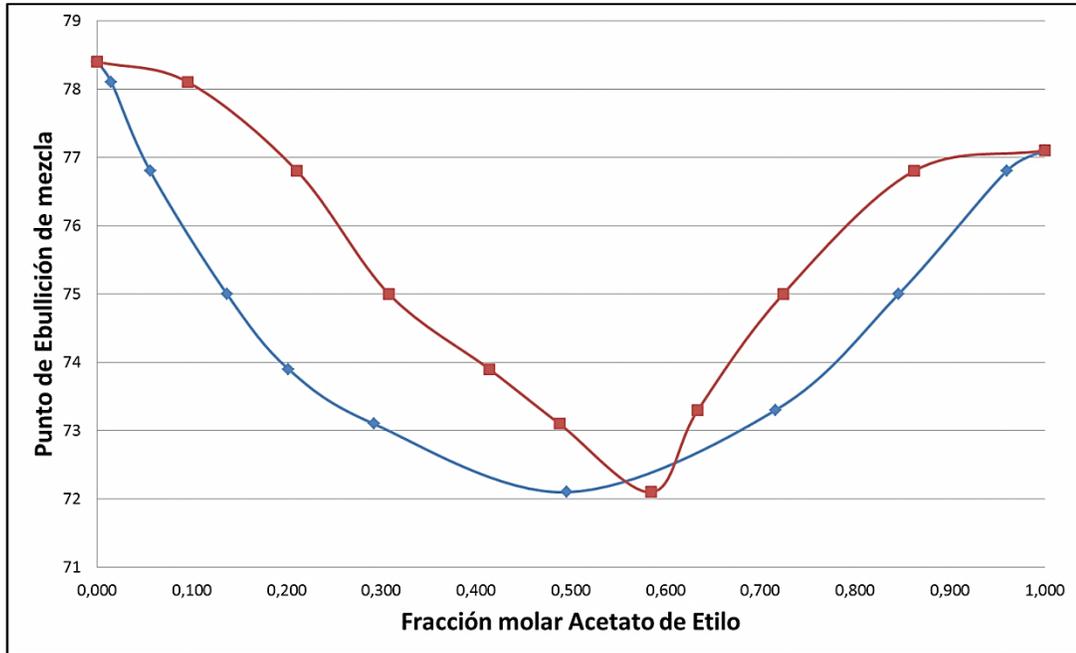


Color	Línea	Incertidumbre máxima	Rango de validez
	Curva de distribución experimental	0.4515	[0.0 – 1.0]
	Curva de distribución Ideal	0.4515	[0.0 – 1.0]

Fuente: elaboración propia.

### 3.3.10. Equilibrio binario. Líquido-vapor. Diagrama de fases

Figura 9. Diagrama de Fases

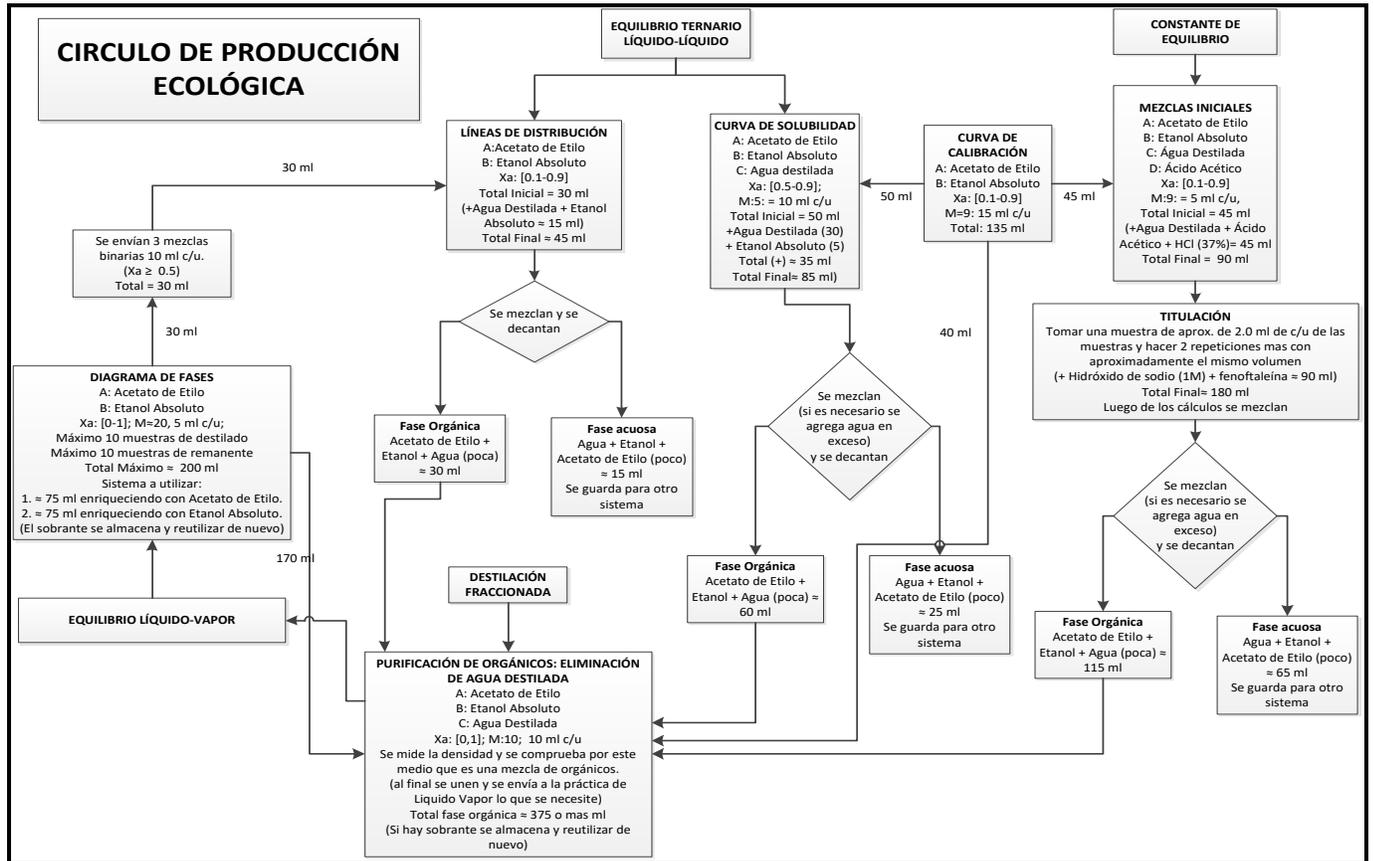


Color	Línea	Incertidumbre máxima	Rango de validez
	Curva del límite fase líquida	0.4515	[0.0 – 1.0]
	Curva del límite fase vapor	0.4515	[0.0 – 1.0]

Fuente: elaboración propia.

### 3.3.11. Círculo de producción ecológica (CPE) y rendimientos

Figura 10. Círculo de producción ecológica



Fuente: elaboración propia.

### 3.3.12. Ahorro monetario, energético y agua de enfriamiento

Tabla VI. **Ahorro. Monetario-energético**  
**Equilibrio de fases liquido-vapor y destilación fraccionada**

<b>Práctica</b>	<b>Monetario/semestre</b>
Anteriores	Q162.02
Modificadas	Q162.02
Porcentaje de ahorro	0.00 %

Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. **Ahorro. Agua de enfriamiento**

<b>Ahorro/semestre</b>	
<b>Litros</b>	<b>Quetzales</b>
57,600	361.16

Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. **Análisis estadístico ANOVA**

Experimento	F <sub>crítica</sub>	F <sub>calculada</sub>	Conclusión
Curva de calibración	2.5100	1,267.2400	Hay inferencia entre variables
Curva de solubilidad de referencia	2.0698	0.0664	No hay inferencia entre variables
Sobresaturación de agua destilada	3.1059	1,922.8414	Hay inferencia entre variables
Etanol absoluto agregado	3.4781	287.5000	Hay inferencia entre variables
Equilibrio químico. Moles finales	2.9011	18.3202	Hay inferencia entre variables
Equilibrio químico. Constante de equilibrio	2.2085	1.971E-5	No hay inferencia entre variables
Destilación fraccionada	2.3928	414.5278	Hay inferencia entre variables
Equilibrio binario. Líquido-vapor	3.2296	17.6589	Hay inferencia entre variables

Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Incertezas instrumentales**

Incerteza	Equipo	Porcentaje
$\Delta m$	0,0005 Balanza	4,50
$\Delta V$	0,0050 Pipeta 10 ml	45,50
$\Delta V$	0,0005 Pipeta 1 ml	4,50
$\Delta V$	0.0050 Probeta 10 ml	45,50
<b>Total</b>		<b>100,00</b>

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Linealidad**

Experimento	R <sup>2</sup>	Conclusión
Curva de calibración	0.9770	Linealmente aceptable
Destilación fraccionada	0.9470	Linealmente aceptable

Fuente: elaboración propia.

## **4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

### **4.1. Diagnóstico de la situación actual**

En la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala se imparten cursos generales de formación, compartidos con todas las carreras que tiene esta Facultad, estas áreas son: matemática, físicas, estadísticas y otras disciplinas relacionadas. Cada escuela de la Facultad de Ingeniería establece qué cursos generales son idóneos y necesarios como plataforma para la comprensión de los nuevos conceptos específicos para cada carrera, y formar adecuadamente los futuros profesionales.

La Escuela de Ingeniería Química está dividida por áreas, las cuales proporcionan una formación específica, que en su conjunto forman a un profesional de la Ingeniería Química. La Escuela está dividida en las siguientes áreas: Química, Fisicoquímica, Operaciones Unitarias y Complementarias. En cada una de estas se tienen cursos teóricos y prácticos, dependiendo de las necesidades de formación académica. En el caso particular del Área de Fisicoquímica cuenta, actualmente, con siete cursos, cinco de ellos son teóricos y dos experimentales.

Los cursos teóricos se imparten entre el quinto y noveno semestre, en orden cronológico se imparten de la siguiente forma: Fisicoquímica 1, Fisicoquímica 2, Termodinámica 3, Termodinámica 4 y Cinética de Procesos Químicos, todos con un cupo máximo de cuarenta alumnos.

Estos cursos pretenden formar al estudiante con bases sólidas sobre las propiedades de la materia, las leyes que gobiernan la termodinámica, el equilibrio dinámico y todas aquellas leyes que involucran la cinética de reacción, todos enfocados a la industria de la producción.

Los dos cursos experimentales del Área de Físicoquímica son: Laboratorio de Físicoquímica 1 y Laboratorio de Físicoquímica 2 con un cupo máximo por sección de dieciséis alumnos, y así formar cuatro grupos de cuatro estudiantes. En estos cursos experimentales se ha desarrollado un reordenamiento con base en los contenidos de los cursos teóricos.

Tanto los cursos teóricos como experimentales están regulados por la agencia acreditadora ACCAI (Agencia Centroamericana de Acreditación de programas de Arquitectura y de Ingeniería), tanto en contenidos con cupo máximo de alumnos por aula.

En la primera fase del laboratorio de Físicoquímica 1, se refiere a la formación del estudiante en cuanto al manejo e interpretación de datos, análisis estadístico, elaboración de proyectos, elaboración de informes o reportes y exposición de estos resultados, basado en dos prácticas sobre propiedades de la materia. Su estructura se basa en pre, durante y post laboratorio. Durante el pre se desarrolla un pre reporte que tiene una estructura para que el estudiante llegue preparado con información suficiente para la elaboración de su práctica, además de realizarse un examen corto antes de esta.

En la siguiente fase se desarrolla la práctica con todas las medidas de seguridad establecidas, acompañados de la supervisión de auxiliar y docente. En la fase del post se desarrolla la entrega por parte de los estudiantes de un

informe, este se entrega con características específicas de un informe sobre la práctica realizada.

En el caso de la segunda fase del Laboratorio de Físicoquímica 1 se desarrolla un ciclo de cuatro prácticas rotativas como se observa en la tabla XI, es decir, tomando como base el grupo uno, este desarrolla en su primera semana la práctica uno, en la segunda semana la práctica dos, y así sucesivamente hasta completar las cuatro prácticas programadas. Estos fenómenos están basados básicamente en equilibrios y propiedades físicas de las sustancias puras, estas prácticas son: comportamiento de los gases, calorimetría y transferencia de calor, equilibrio líquido-vapor en sustancias puras y viscosimetría.

Tabla XI. **Estructura de realización de prácticas**

<b>Semana</b>	<b>Grupo 1</b>	<b>Grupo 2</b>	<b>Grupo 3</b>	<b>Grupo 4</b>
1	Práctica 1	Práctica 2	Práctica 3	Práctica 4
2	Práctica 2	Práctica 3	Práctica 4	Práctica 1
3	Práctica 3	Práctica 4	Práctica 1	Práctica 2
4	Práctica 4	Práctica 1	Práctica 2	Práctica 3

Fuente: Laboratorio de Físicoquímica. *Manual del estudiante*, FIUSAC, 2018, p. 7

Luego de desarrollar en el curso de Laboratorio de Físicoquímica 1 la formación del estudiante en la preparación de documentos previa al desarrollo de las prácticas, desarrollo de buenas prácticas y de informes técnicos, se continúa con esta misma temática en el Laboratorio de Físicoquímica 2. Este curso cuenta con la elaboración de ocho prácticas divididas en dos fases de

cuatro prácticas cada una. En estas prácticas se desarrolla el estudio de fenómenos de sustancias combinadas, se basa el estudio en los equilibrios físicos de multicomponentes, reacciones químicas y equilibrio químico.

Actualmente se realiza un circuito rotativo de prácticas en cada una de las fases, estas se realizan análogamente a la segunda fase del curso de Laboratorio de Fisicoquímica 1, como se explicó con anterioridad. Desde hace algunos años se introdujo el Sistema de Gestión Ambiental ISO 14001:2006, en donde se tuvo un avance importante en el tema del ambiente y conservación de la energía, ya que las emisiones y utilización de recursos se redujeron significativamente. Por lo tanto, para darle continuidad a este proceso, su base fundamental es la mejora continua, por lo que es necesario implementar nuevas estrategias para darle seguimiento a este proyecto.

Dada esta primicia, el planteamiento de la presente investigación es la elaboración de un círculo de producción ecológica (CPE), en donde se plantea generar un circuito de cuatro prácticas, en las cuales los desechos de una práctica se utilizan como productos en la siguiente, y así sucesivamente hasta cerrar el circuito. Se pretende investigar si es posible desarrollar este circuito, verificar el rendimiento y la duración de estos productos.

#### **4.2. Modificación del orden y contenido de las prácticas**

Las prácticas expuestas en la tabla I (ver página 27) se dividen en dos fases, la primera es un grupo de cuatro prácticas que realizan cuatro grupos que está conformado por cuatro estudiantes. Todas las prácticas se realizan el mismo día, asignándosele una a cada grupo, la siguiente semana se mueven rotativamente las prácticas a cada grupo, y al cabo de cuatro semanas todos los grupos han realizado todas las practicas.

Aprovechando esto, se planteó que el reactivo que utilizó un grupo durante esta semana y generó desechos, para que estos se puedan utilizar después o almacenar una parte para ser utilizada por otros grupos diferentes o incluso, hasta en semestres diferentes. Además es conveniente para continuar con lo establecido en la norma ISO 14001:2006, que indica una mejora continua en cualquier rubro establecido por esta norma.

Esta estructura permite realizar este proyecto basado en un círculo de producción ecológica (CPE). Este cambio es posible debido a que el curso del Laboratorio de Físicoquímica 2 no está paralelo al curso teórico de Físicoquímica 2, los conocimientos se adquirieron en el semestre anterior, es decir, el Curso de Físicoquímica 2 se imparte en el sexto semestre y el Curso de Laboratorio de Físicoquímica 2 durante el séptimo semestre.

De las ocho prácticas mostradas en la tabla I, se toman tres, tomando en cuenta ambas fases y una cuarta práctica diseñada para la purificación de los compuestos, las cuales quedan estructuradas como se muestra en la Tabla No. II (ver página 28).

#### **4.2.1. Material previamente preparado**

Basado en lo expuesto anteriormente, se observa que las prácticas propuestas demuestran los fenómenos estudiados en el curso anterior, el orden se ha modificado con la finalidad de utilizar algunos de los reactivos en común en las diferentes prácticas, básicamente son cuatro fundamentales los que se utilizan, y los otros se utilizan para una prueba o hacer una medición indirecta de alguna cantidad de un reactivo conocido. Las cuatro sustancias que se utilizan son acetato de etilo, etanol absoluto, agua destilada y ácido acético. El acetato de etilo y etanol absoluto se encuentran presente en todas las prácticas,

solamente se le van agregando otros reactivos o se van transformando para obtener algún otro producto, pero básicamente es recuperar estos dos elementos, para su reutilización.

Dado que se pretende tener la menor cantidad de pérdida de reactivos o productos, estos se estarán almacenando dentro de contenedores, los cuales se clasificaron de la siguiente manera: desechos de fases orgánicas y acuosa, estos se encuentran en dos fases; ya que uno de los elementos, en este caso el agua destilada, no es completamente miscible en el acetato de etilo, por lo que se debe dejar un tiempo prudente en reposo para realizar la separación de estas dos fases. Luego se colocan en una ampolla de decantación o el instrumento pertinente para realizar la separación.

En el proceso de separación de las fases se puede llegar a tener un poco de pérdida de muestra; es conveniente hacer una separación limpia, es decir, no arriesgarse que en la fase acuosa, la que se encuentra en la parte inferior, debido a su densidad más alta, lleve residuos de la fase orgánica y de la misma manera la fase orgánica lleve trazas de la muestra acuosa, ya que de nuevo estaría contaminado.

Una vez que se han separado estas dos fases, se proceden a colocarlo en los siguientes frascos ámbar etiquetado, uno de ellos es el que contiene la fase orgánica no rectificadas. Esta muestra se dice que está no rectificada porque no se le ha eliminado la cantidad mínima de agua destilada que pueda tener, por lo tanto, este material es el que está preparado para purificarlo en la práctica correspondiente, la cual es la destilación fraccionada.

Luego etiqueta un frasco ámbar, que contendrá el material proveniente de la práctica de la destilación fraccionada, que es la que tiene la cantidad de

material orgánico que hace posible reutilizar los reactivos a su base principal. Por último, se tiene un frasco ámbar con el material orgánico sobrante, este frasco contiene agua destilada y etanol absoluto, con lo cual se puede trabajar el equilibrio líquido-vapor en el siguiente semestre o con otro grupo, dependiendo de las decisiones que se lleven a cabo de este material.

También se puede purificar y tener así etanol absoluto al utilizar la práctica de destilación fraccionada, que también hace posible la eliminación el sobrante de acetato de etilo, así como la purificación del etanol y su utilización y que no necesariamente sea absoluto, incluso se puede ir pensando en utilizar este sobrante para generar algún tipo de gel con base en etanol o cualquier otra utilidad que se le quiera dar, hasta poder utilizarlo para esterilizar en el mismo laboratorio.

#### **4.2.2. Modificación de las prácticas**

Como se describió anteriormente, se tomaron tres prácticas de las ocho que se tienen, las cuales pueden ser entrelazadas, como se pretende para desarrollar el círculo de producción ecológica (CPE). Se describe la implementación de una cuarta práctica que es la que hace posible que los materiales se puedan reutilizar. A continuación se describe paso a paso cada una de las prácticas a desarrolladas y cómo es que se van moviendo los reactivos a través de los diferentes experimentos, estableciendo el rendimiento que se tiene, así como las pocas pérdidas de material que presenta.

### **4.2.3. Curva de calibración (comportamiento volumétrico)**

El inicio de todo el procedimiento de las cuatro prácticas comienza en la creación de la curva de calibración, este es la relación que se tiene entre la fracción molar del acetato de etilo en conjunto con el etanol absoluto y la densidad de mezcla. Al realizar esta curva de calibración, con sus respectivas repeticiones, se observa que tiene un comportamiento lineal en el rango de interés. Este modelo matemático permite determinar las concentraciones en cada una de las prácticas trabajadas.

Esta curva de calibración la prepararan todos los grupos durante la primera práctica independientemente del experimento que realizarán. Esta curva de calibración se divide en dos partes, una se utilizará para realizar el equilibrio ternario en fase líquida y la otra en el equilibrio químico; dejando claramente establecido que no se perderá nada de material durante esta práctica, si existe algún sobrante este será agregada al frasco que contiene la mezcla rectificada.

#### **4.2.3.1. Datos**

Las muestras que se prepararon son de 15 ml en fracciones molares de acetato de etilo [0.1, 0.9], para un total de 135 ml. Con los datos obtenidos durante la experimentación se desarrolla el análisis estadístico respectivo que corresponde a la demostración de la influencia que tienen mezclas con respecto a la densidad encontrada, observándose que sí tienen una relación directa dado que el análisis de ANOVA proporciona una F calculada mayor a la F crítica de Fisher, y además tiene una tendencia lineal, ya que tiene un factor de regresión lineal cercano a uno.

#### **4.2.3.2. Modelo**

El modelo que se obtiene es lineal. Este permite determinar la concentración exacta utilizando un método indirecto, esto no implica que no se puedan utilizar métodos más sofisticados, dependiendo de los recursos que se tengan en cada laboratorio experimental. Este modelo es el que se utiliza en cada una de las prácticas para determinar la concentración utilizada a partir de la medida de la densidad de mezcla, tampoco en esta parte se tienen pérdidas debido a que es un método no destructivo. La muestra a la cual se le realizaron los ensayos necesarios se puede seguir utilizando en donde corresponda. Este modelo es una de las bases fundamentales en la realización del círculo de prácticas.

#### **4.2.3.3. Preparación para las siguientes prácticas**

Después de haber utilizado las muestras para generar el modelo de la curva de calibración, se procede a dividir las mezclas para utilizarlas en las prácticas correspondientes. Del total de mezcla que se tiene se toman 5 muestras de 10 ml, para un total de 50 ml, las cuales están en un intervalo de fracción molar de acetato de etilo [0.5, 0.9], para realizar la curva de solubilidad del equilibrio ternario, no se pueden utilizar muestras inferiores a 0.5 de fracción molar debido a que no es posible generar dos fases al agregarle agua, lo cual se explicará en detalle al discutir la práctica de equilibrio ternario en fase líquida.

Luego se toman 9 muestras de 5 ml de cada una de las concentraciones preparadas [0.1, 0.9] para la curva de calibración, en total se toman 45 ml, estas se mezclarán con ácido acético, ácido clorhídrico (al 37 %) y agua destilada, para desarrollar la práctica de equilibrio químico. Al realizar la suma de los

mililitros utilizados en la práctica del equilibrio ternario y equilibrio químico se observa que sobran mililitros, ya que no se utilizan con fracción molar de 0.1 a 0.4, este sobrante no se pierde, sino se traslada al reservorio del frasco que contiene la fase orgánica rectificada para su posterior utilización en la práctica correspondiente.

#### **4.2.4. Experimento 1. Equilibrio líquido-líquido en sistema ternario**

Este experimento se refiere al estudio de la extracción que se tendrá de una sustancia a partir de otras, con la finalidad de no gastar consumo energético, sino que las mismas propiedades de las sustancias permitan que la afinidad de sustancias permita la separación deseada. En este experimento se realizarán dos procedimientos, el primero será generar la curva de solubilidad en un diagrama ternario, y el segundo, para establecer el punto máximo de extracción utilizando las líneas de distribución.

##### **4.2.4.1. Se realiza como primer experimento**

Como se describió anteriormente, se divide este experimento en dos partes. La primera es la generación de la curva de solubilidad; se toman concentraciones de mezcla de acetato de etilo y etanol absoluto en una relación de fracción molar de 0.5 a 0.9 provenientes de la curva de calibración, se le agrega agua destilada en exceso, de tal manera, que se obtendrán dos fases como se muestra en los diagramas a discutir posteriormente. Luego se le agregará de nuevo etanol absoluto hasta que las dos fases desaparezcan y se convierta en una fase, logrando construir la curva de solubilidad. No se utiliza una concentración menor o igual a 0.4 de fracción molar, ya que no es posible llevar a dos fases y generar luego la curva de solubilidad. Este procedimiento se

realiza solo de una manera, la cual corresponde al utilizar las muestras de la curva de calibración, es decir, no se puede realizar para esta planificación con una metodología alterna.

El segundo procedimiento para construir las líneas de distribución, basado en que es como primer experimento, no se tienen muestras previas, entonces se toman puntos debajo de la curva de solubilidad y se replican para generar dos fases, las cuales luego serán separadas y se determinará la concentración de la cantidad de acetato de etilo en fase orgánica, suponiendo que no se tiene cantidad de agua destilada en esta fase, ubicando así el punto en el diagrama ternario y uniendo el punto planteado debajo del domo y el punto generado de la fase acuosa del eje correspondiente se obtiene la recta de distribución, y así sucesivamente para los puntos correspondientes.

Al terminar la experimentación se colocan los productos en donde corresponden, ya sea fase orgánica no rectificada, rectificada o fase acuosa, tomando en cuenta las suposiciones que se han establecido, para su posterior purificación o utilización.

#### **4.2.4.2. No se realiza como primer experimento**

Si se realiza como experimento posterior al equilibrio binario líquido-vapor, se toman las muestras provenientes de esta práctica, las mezclas deben de igual forma ser mayores o iguales a 0.5 de fracción molar de acetato de etilo-etanol absoluto, ya que de lo contrario, no se podrían producir las dos fases que se buscan. Estas mezclas se utilizan para la construcción de las líneas de distribución, con las cuales se encontrará el punto máximo de extracción posible, que es uno de los objetivos de esta práctica. Al haber utilizado las mezclas luego se colocan en el frasco de desechos con ambas fases no

separadas, para su posterior tratamiento, estableciéndose también, que no se tienen pérdidas de material, ya que se introducen dentro de los frascos de productos para su posterior reutilización.

#### **4.2.5. Experimento 2. Equilibrio químico en fase líquida**

Este experimento se basa en la primicia de desarrollar un conjunto de mezclas, las cuales permiten estudiar cómo se llega al equilibrio según el principio de Le Chatelier, en el cual establece que todas las reacciones químicas tienen al equilibrio, compensando la falta de un compuesto produciéndose a partir de las demás sustancias presentes.

##### **4.2.5.1. Se realiza como primer experimento**

Hacer las muestras de la curva de calibración con una semana de anticipación, ya que estas son las muestras a utilizar en la práctica y se deben dejar una semana de anticipación en reposo para que se llegue al equilibrio esperado. Se le agrega 5 ml de mezclas de ácido acético y agua destilada como se muestra en la tabla IV (ver página 31), además de utilizar como catalizador ácido clorhídrico al 37 %. Su forma de desecho se describe en el siguiente inciso.

##### **4.2.5.2. No se realiza como primer experimento**

Este experimento se realiza, por lo menos, una semana posterior a construir la curva de calibración, ya que esta será la materia prima para desarrollar el estudio de dicho fenómeno, a cada muestra proveniente de la curva antes mencionada se le agrega 5 ml de mezclas de ácido acético y agua destilada como se muestra en la tabla IV (ver página 31), además de utilizar

como catalizador ácido clorhídrico al 37 %. Dejándose reposar durante una semana, esperando que en este tiempo se llegue al equilibrio, encontrar así la constante de equilibrio, que para este tipo de reacción, por ser, una esterificación de Fisher, su valor es aproximadamente 4, para determinar el equilibrio se les agrega hidróxido de sodio (1M) y un poco de fenolftaleína en solución. Las muestras ya neutralizadas, se depositan en un frasco en donde se encuentran las dos fases presentes para su posterior tratamiento y reutilización.

Para las muestras provenientes de esta práctica, se debe realizar un procedimiento previo a enviarlo a los frascos de muestras no rectificadas, ya que es necesario eliminar las sales formadas, así como el poco de fenolftaleína presente. El procedimiento realizado fue llevar la muestra a sequedad por destilación simple, en el remanente se corroboró que se tenían sales de color blanco, que se asume una combinación de acetato de sodio, cloruro de sodio y fenolftaleína (en muy poca cantidad). Y del otro lado de la destilación se presume se recolectó agua destilada, acetato de etilo y etanol absoluto, esta mezcla se agrega al frasco en donde se encuentran las dos fases. Observándose así, que tampoco se presentan pérdidas en los reactivos y productos utilizados, solamente se han ido transformando para su posterior utilización.

#### **4.2.6. Experimento 3. Destilación fraccionada. Purificación de orgánicos**

Esta práctica se introduce como una nueva práctica dentro del curso de Laboratorio de Fisicoquímica 2, la cual, hace posible la utilización de todos los productos obtenidos y reactivos sobrantes. La práctica pretende purificar la fase orgánica para su reutilización en las demás prácticas, y como demostración de la utilización de otra técnica de separación, que es la destilación fraccionada,

que, aunque al ser un aumento en gasto energético, es compensado con el ahorro de materia prima a utilizar.

#### **4.2.6.1. Se realiza como primer experimento**

Realizarlo como primer experimento, supone que no se han hecho en ningún semestre, ni ninguna práctica anterior, por lo que es necesario construir una primera muestra que se asume contaminada para purificarla e ir ploteando el comportamiento del destilado obtenido a las diferentes temperaturas de ebullición, siendo una comprobación indirecta de la pureza de cada una de las muestras. Estos datos pueden ser comparados con el del equilibrio binario líquido-vapor, en la comprobación de las concentraciones con respecto al punto de ebullición.

Al final del proceso se colocarán los sobrantes de los productos purificados en el frasco de fase orgánica rectificada, para utilizarse estos reactivos en las prácticas posteriores. Por lo que se garantiza la reutilización de estos productos.

#### **4.2.6.2. No se realiza como primer experimento**

Si se está realizando esta práctica como experimento posterior a alguno o algunos se tendrán muestras provenientes de los demás experimentos, estas muestras se supone están contaminadas principalmente de agua destilada, la cual se debe eliminar para poder trabajar en el siguiente experimento al ser purificado que es el equilibrio binario líquido-vapor, en la construcción del diagrama de fases. Luego de terminar de purificar bajo la obtención de diferentes mezclas, todas se combinan para obtener una sola muestra para ser utilizada en el siguiente experimento, midiéndole su densidad para verificar el

comienzo de la destilación. Al igual que las muestras anteriores se colocan dentro del frasco de desechos rectificadas, que serán utilizados en el experimento posterior.

#### **4.2.7. Experimento 4. Equilibrio de fases binario. Líquido-vapor**

Esta práctica tiene como finalidad demostrar la desviación de la ley de Raoult, la cual establece que cuando se tienen mezclas ideales se comportan de una manera específica, en donde se puede realizar una separación exitosa de dos sustancias, pero en este caso se pretende demostrar que cuando las sustancias tienen puntos de ebullición similares o muy cercanos entonces producen una desviación positiva o negativa de la ley de Raoult que se llama azeótropo, demostrado en alguno de los resultados que se explicará posteriormente.

##### **4.2.7.1. Se realiza como primer experimento**

Si se maneja como primer experimento, se toma una cantidad de compuesto puro y se va enriqueciendo con el otro compuesto en este caso, ya sea acetato de etilo o etanol absoluto y como sobrantes se tendrán estas mezclas con diferentes composiciones de fracción molar, las cuales serán utilizadas en la práctica de equilibrio ternario o se colocaran en los desechos rectificadas, ya que es una mezcla pura de compuestos orgánicos. Los productos obtenidos al igual que el inciso anterior son utilizados en su totalidad, no teniendo pérdidas en este cambio.

#### **4.2.7.2. No se realiza como primer experimento**

Si este experimento no se realiza como primera práctica, se toma una muestra de los desechos provenientes de la práctica de destilación fraccionada, en donde se asume que se tiene un punto intermedio de mezcla en donde se toman partes iguales para ir enriqueciendo la muestra con compuesto puro hacia un lado o al otro. Se toman 75 ml para ir generando el diagrama de fases binario líquido-vapor, los sobrantes se utilizarán para el siguiente experimento, que es el equilibrio ternario o se regresan al frasco de desechos rectificadas para su reutilización. Como se puede observar nuevamente se recupera el reactivo utilizado, tomando en cuenta que solamente hay un cambio físico en este procedimiento.

### **4.3. Resultados experimentales**

Para cada uno de los experimentos propuestos es necesario realizar la comprobación de haber obtenido los resultados esperados, utilizando y reutilizando las materias primas iniciales. A continuación se analiza cada uno de los resultados experimentales, se realizaron las réplicas necesarias de cada experimento, y con ello realizando el análisis estadístico necesario. Se toma como inicio de la experimentación la obtención de la curva de calibración, la cual no será útil en todo el círculo desarrollado.

#### **4.3.1. Curva y modelo matemático de calibración**

En primer lugar, se tomaron nueve muestras de 15 ml a diferentes fracciones molares de acetato de etilo y etanol absoluto, como se muestra en la tabla III (ver página 29). A estas muestras se les midió la densidad con la finalidad de conocer la relación que existe entre las diferentes mezclas y la

fracción molar. Al realizar la gráfica como se muestra en la figura 1 (ver página 41), se corrobora que tiene una relación directamente proporcional entre la densidad y la fracción molar, obteniéndose un polinomio de grado uno, con un  $R^2$  de 0.9765, lo cual indica que es una buena correlación lineal para los fines buscados.

Cada una de las mezclas se dividen en dos partes, una de ellas que son 10 ml se utilizan en el experimento de la práctica 1, que es el desarrollo del equilibrio ternario en fase líquida. Estas mezclas se utilizan en el intervalo de [0.5 a 0.9] debido a que menor a esta relación de fracción molar no se puede obtener las dos fases que se necesitan, que a continuación se explicará. El sobrante de la mezclas de [0.1 a 0.4] de 10 ml se colocan en el frasco de desechos orgánicos rectificados, para su posterior utilización. Y la otra parte que corresponde a 5 ml se utilizará para realizar la experimentación de la práctica de equilibrio químico, para estas si se utilizan las mezclas con fracciones molares de [0.1 a 0.9]. Como se puede observar no se ha perdido nada de materia prima original utilizada.

#### **4.3.2. Equilibrio líquido-líquido en sistema ternario**

Para el estudio equilibrio ternario en fase líquida, se procede a desarrollar cuatro procedimientos, cada uno de ellos tiene la finalidad de demostrar una parte del experimento, con base en estos procedimientos es comprobado el fenómeno y que se puede reutilizar las materias primas originales.

#### **4.3.2.1. Curva de solubilidad de referencia**

La curva de solubilidad se construyó para tener una referencia, que a pesar de encontrarse en la bibliografía, es necesario construirla con el equipo y los materiales disponibles en el laboratorio y comprobar su funcionalidad, esta curva como bien se plantea es de referencia, no es la curva que se realizará durante el experimento. Como se puede observar en la figura 2 (ver página 42), se obtuvo una curva de solubilidad construida a partir de mezclas originales de acetato de etilo con agua destilada, estas mezclas presentan dos fases.

El principio de este experimento es eliminar las dos fases y obtener solamente una fase homogénea al ir agregando a la mezcla etanol absoluto, por lo que, se puede observar en el diagrama marcado con cuadros grises cada uno de los puntos obtenidos de la curva de solubilidad, los puntos de los extremos son teóricos, que son las mezclas que demuestran la solubilidad del agua destilada en el acetato de etilo y viceversa. Luego de obtener los datos para esta curva se mezclaron todas las soluciones y se colocaron en el frasco de donde se tienen ambas fases para su posterior separación. Como se puede observar esta cantidad de materia prima utilizada se puede reutilizar para los experimentos propuestos, claramente se verifica que no se tienen pérdidas, recuperando todo el material utilizado.

#### **4.3.2.2. Agregando agua destilada en exceso**

El experimento de equilibrio ternario comienza con tomar las muestras de la curva de calibración que van desde 0.1 hasta 0.9 de las mezclas originales de acetato de etilo y etanol absoluto, a estas mezclas se les agrega agua destilada en exceso con la finalidad de obtener dos fases, como se observa en la figura 3 (ver página 43), los puntos en forma de triángulos rojos indican los

puntos en donde se ubican las dos fases. Se observa claramente que en el primer punto de izquierda a derecha, cae sobre la curva de solubilidad debido a que es una recta, pero se asume que en esta posición no se puede tomar como referencia, ya que se complicarían su control al construir experimentalmente a partir de este punto una parte del domo. Los demás puntos si tienen una ubicación dentro del domo que pueden ser utilizados correctamente.

#### **4.3.2.3. Agregando etanol absoluto para curva de solubilidad**

Posteriormente, como se muestra en la figura 4 (ver página 44), se observa claramente que los puntos marcados como cuadros naranja se ubican sobre la curva de solubilidad al agregarle la cantidad necesaria de etanol absoluto, permitiendo de esta manera realizar experimentalmente la curva de solubilidad. la cantidad que se agrega de agua destilada, como de etanol absoluto es variable, depende del experimentador, ya que los puntos pueden caer más hacia la derecha o izquierda que está sobre la línea imaginaria que une el eje de mezclas de etanol absoluto y acetato de etilo y el punto A de agua destilada al cien por ciento. Sobre esta línea imaginaria caen los puntos al agregarle agua destilada en exceso y luego otra línea imaginaria entre la base del triángulo y el vértice de etanol absoluto al cien por ciento en el punto C.

#### **4.3.3. Equilibrio químico en fase líquida**

Tomando las 9 muestras de 5 ml de la curva de calibración, se procede a agregarle ácido acético y agua destilada en fracciones molares establecidas como se muestra en la tabla IV (ver página 31), de tal manera que se pretende comprobar el principio de Le Chatelier, que establece que todas las especies dentro de una reacción química tienden al equilibrio, es decir, que si hay exceso

de un reactivo este se desplaza al enriquecimiento de los compuestos que tienen cantidad en relación molar menor. La cantidad que se le agrega de mezcla es de 5 ml, asumiendo un total de 10 ml, pero esta primicia no es del todo real debido a que la mezcla de líquidos no es estrictamente aditivo en su totalidad, ya que la mezcla normalmente presenta una compresión entre las moléculas, disminuyendo la cantidad de volumen total.

Debido a que la reacción, a pesar de buscar el equilibrio, no lo realiza de una manera instantánea, incluso puede llegar al equilibrio en varios años, pero para evitar esa situación se le agrega un catalizador para que la reacción llegue al equilibrio en un tiempo reducido, como catalizador se le agrega ácido clorhídrico al 37 %, en una proporción de 0.7 ml a cada una de las mezclas y dejándose en reposo durante una semana, para que llegue al equilibrio dinámico.

#### **4.3.3.1. Grado de avance**

Luego de agregar la cantidad establecida de los demás reactivos y dejar por una semana en reposo, se procedió a medir la cantidad de ácido acético presente al final de la reacción, estableciendo la cantidad presente al final de proceso de reacción. Para contabilizar la cantidad final de ácido acético presente se neutralizó con una solución de hidróxido de sodio (1M), conociendo así su concentración final. Luego de esto se calculó el grado de avance realizando un balance de materiales y se obtienen las gráficas presentadas en la figura 5 (ver página 45), en donde se compara el grado de avance de cada especie en función de su concentración inicial, observándose que se tienen un grado de avance del mismo comportamiento para todas las especies.

#### **4.3.3.2. Qc y moles iniciales**

Después de realizar el análisis del grado de avance, con estos datos se procedió a calcular la cantidad de Qc, que es el previo a la constante de equilibrio, en este caso se tomaron las concentraciones iniciales para determinar hacia dónde se desplazará el equilibrio y realizar los cálculos correctos correspondientes, como se muestra en la sección de metodología de cálculo. La figura 6 (ver página 46) muestra el comportamiento de Qc a partir de los datos originales, se ve claramente un comportamiento específico, tanto para los reactivos como para los productos. Al terminar el procedimiento experimental, la titulación con hidróxido de sodio (1M), se procedió a mezclar todas las muestras y destilar hasta sequedad para eliminar las sales formadas y el indicador. Las sales formadas fueron acetato de sodio, cloruro de sodio y como indicador fenolftaleína. Al terminar de realizar la destilación simple se observó en el fondo del balón una pequeña cantidad de polvo, la cual se presume, eran las sales esperadas provenientes de la neutralización.

La cantidad sobrante del líquido destilado se procedió a agregarlo en el frasco en donde se encuentran ambas fases, y luego en el momento indicado separar la fase orgánica de la fase acuosa. Estos productos provenientes de la presente práctica se utilizan en la práctica de destilación fraccionada para su purificación y utilización posterior. De esta manera, se evidencia la conservación de las materias primas y su efectiva reutilización.

#### **4.3.4. Destilación fraccionada. Purificación de orgánicos**

Esta práctica, como se indicó con anterioridad, es implementada con la finalidad que se puedan utilizar los reactivos originales o mezcla de estos. Del frasco que contiene las dos fases no mezclas no rectificadas, se procede a

transferirlo a una ampolla de decantación o equipo pertinente, y se deja en reposo el tiempo necesario, hasta que se presenten dos fases homogéneas y totalmente visible su separación. Estas muestras se procederán a separar hasta obtener la parte inferior que es la fase acuosa, esta contiene, en mayor cantidad agua destilada, etanol y trazas de acetato de etilo, la cual será almacenada para su posterior uso.

La segunda fase, que es la superior, se separa, la cual contiene acetato de etilo, etanol absoluto y trazas de agua destilada; se procede a introducir una cantidad significativa en un balón y realizar el procedimiento pertinente que corresponde a la destilación fraccionada, esta práctica muestra cómo las diferentes muestras obtenidas de destilado se van comportando de una manera como una mezcla de orgánicos pura, como se puede observar en la figura 7 (ver página 47), el comportamiento que tiene la fracción molar en función de la temperatura de ebullición, la cual, cae dentro del rango establecido en las mezclas de acetato de etilo y etanol únicamente, por lo que, por ser un método indirecto puede llegar a tener un grado de incertidumbre alto.

Debido a que los valores se mantienen dentro del rango de densidad y temperatura de ebullición de un sistema binario líquido-vapor, se presume contener solamente estos compuestos. Con respecto a los productos obtenidos posterior a la destilación fraccionada, se utilizan en el experimento siguiente, que corresponde al equilibrio binario líquido-vapor, es decir de los desechos almacenados de fase orgánica se utilizan en su totalidad, optimizando el uso de los recursos e incluyendo una práctica didáctica que representa el buen uso de los productos y generar reactivos.

#### **4.3.5. Equilibrio de fases binario. Líquido-vapor**

Con los desechos obtenidos de las prácticas anteriores, se llega al final del círculo de producción ecológica (CPE), este equilibrio pretende presentar el comportamiento no ideal de una mezcla binaria, en donde sus puntos de ebullición están muy cercanos entre sí, produciendo en este caso, un comportamiento con desviación positiva, como se muestra en la figura 9 (ver página 49).

##### **4.3.5.1. Curva de distribución**

Primeramente se construye una curva de distribución, esta proporciona la información necesaria para determinar el posicionamiento aproximado del azeótropo que se produce, esta curva consiste en hacer una relación de la fracción molar del líquido comparado con la fracción molar del vapor, como se observa en la figura 8 (ver página 48), una línea 45 grados que representa el comportamiento ideal de mezcla, pero cuando se analiza la curva que se produce con los datos experimentales, se demuestra una desviación al inicio sobre la línea inclinada, y cuando llega arriba del 0.60 de fracción molar se observa una desviación; la curva se dirige debajo de la recta de 45 grados, en este cambio se presume un azeótropo en donde se tiene un mínimo, gráficamente hablando, en la construcción de la curva de solubilidad.

##### **4.3.5.2. Diagrama de fases**

Para finalizar la unión de las prácticas, se procedió a construir el diagrama de fases con dos fines, el primero, para demostrar experimentalmente la desviación de la ley de Raoult de las mezclas binarias, cuando los puntos de ebullición son muy cercanos; y segundo, es determinar si la mezcla proveniente

de la destilación fraccionada era posible utilizarla y se comprueba desarrollando el diagrama de fases que si es posible, ya que no tiene ninguna desviación o alteración en el comportamiento natural que podría provocarle si tuviese agua presente, ya que la mezcla de estos tres componentes producen un azeótropo diferente.

Luego de utilizar las mezclas para construir los diagramas necesarios se procedió a reutilizar las mezclas, tanto del destilado y remanente como del líquido sobrante en el balón original. Algunas mezclas del destilado y remanente se utilizan para realizar la curva de solubilidad del experimento posterior, que es el equilibrio ternario; las mezclas sobrantes se colocan en el frasco de fase orgánica rectificada, y el producto que queda dentro del balón que se encuentra en el sistema de destilación se conserva para reutilizarlo cuando lo necesite el siguiente grupo.

De tal manera que se comprueba que todos los reactivos y los productos son reutilizados, posiblemente se tenga algún tipo de pérdida en el momento de destapar los sistemas y se evapore parte de la mezclas, ya que se está trabajando con compuestos de alta volatilidad e incluso con calentamientos respectivos y pueden haber pérdidas al trasvasar las soluciones, pero en general, se está recuperando en su mayoría, entre un 90-95 % de las materias primas originales.

#### **4.3.6. Círculo de producción ecológica (CPE) y rendimientos**

En la figura 10 (ver página 50) se observa un conjunto de cuadros y flechas interconectados, este es un diagrama de flujo que describe gráficamente el funcionamiento del círculo de producción ecológica (CPE). En este círculo se entrelazan cuatro prácticas que permiten experimentalmente

describir el comportamiento de cuatro fenómenos fisicoquímicos. Los fenómenos estudiados son el equilibrio ternario en fase líquida, equilibrio binario líquido-vapor, constante de reacción química y destilación fraccionada. Cada uno de estos experimentos tiene como finalidad aclarar los conceptos teóricos estudiados en los cursos previos, principalmente en el de Fisicoquímica 2, por supuesto, que se deben tener conocimientos de otras disciplinas como: química, matemática, física y toda aquella materia relacionada.

Los diagramas de flujo, normalmente tienen una secuencia que tienen un comienzo y un final, en este caso no tiene definido un inicio, ya que por ser un círculo que desarrollarán cuatro grupos de estudiantes en cuatro semanas diferentes, como se explicó en su momento. Si se quiere definir un inicio, se permite marcarlo en el momento de la construcción de la curva de calibración; la cual permite desarrollar una relación de fracción molar entre el acetato de etilo y etanol absoluto. Como se puede observar en el cuadro específico de la figura 10 (ver página 50), se realizan 9 mezclas que va desde 0.1 hasta 0.9 de fracción molar de 15 ml cada una.

El manejo de estas mezclas permite la construcción de un modelo matemático, que relaciona directamente la fracción molar del acetato de etilo con la densidad de mezcla. Luego de tener los datos para reportar en su momento se procede a repartir, cada una de las mezclas construidas, en dos grupos, uno de ellos con una cantidad de 5 mezclas de 10 ml c/u, para construir la curva de solubilidad en el diagrama ternario, agregándole la cantidad necesaria de agua destilada y etanol absoluto en ese orden, para la construcción adecuada de la curva de solubilidad. Como se puede observar en el subcuadro del equilibrio ternario que se encuentra en el lado derecho el círculo de producción ecológica de la figura 10 (ver página 50), luego de agregarle las distintas cantidades mencionadas se trasladan los sobrantes al

frasco correspondiente para su separación en fase acuosa y orgánica. Evidenciando que no se tienen pérdidas materiales solamente acumulación de desechos a reutilizar.

La cantidad sobrante de mezcla de 5 ml que proviene de la curva de calibración se utiliza en la práctica del equilibrio químico, a estas 9 muestras se les agrega una cantidad de específica de ácido acético y agua destilada, 5 ml de mezcla, para llevar a cabo la reacción, esta muestra se debe dejar durante una semana como mínimo. Para que sea posible llegar al equilibrio se le agrega ácido clorhídrico al 37 % como catalizador. Como se puede observar en esta parte del diagrama de flujo, luego de hacer todas las mezclas bajo las condiciones específicas, se procede a corroborar qué cantidad de ácido acético hay presente, de tal manera que muestra el avance de reacción y los datos necesarios para llegar al equilibrio.

La cantidad de ácido acético presente se determina por medio de titulación, utilizando hidróxido de sodio (1M). Luego se tiene una mezcla de varias sustancias, que en teoría se desecharían, pero al contrario, como se observa hay un paso intermedio, entre el equilibrio químico y la destilación fraccionada, se mezclan todas las muestras y se desarrolla una destilación simple para la eliminación de las sales que no se pueden utilizar en ningún procedimiento, esta cantidad de sales es mínima y depende de la cantidad de hidróxido utilizado para la neutralización y la manipulación del experimentador; para este caso en particular, la cantidad recuperada de sales fue de 5.7 gramos de mezcla, las cuales desecha como sólidos.

El sobrante de mezclas de 10 ml, no utilizadas, que corresponde de fracción molar de 0.1 a 0.4, se coloca en el frasco de fase orgánica rectificada, ya que no están contaminadas las muestras con otros reactivos. Permitiendo

que todo el material utilizado para la generación de la curva de calibración sea utilizado en los experimentos antes expuestos.

Analizando la práctica de destilación fraccionada en la purificación de orgánicos, esta se encuentra diagramada en la parte inferior de la figura 10 (ver página 50).

Como se observa, a esta práctica llegan los sobrantes de fase orgánica utilizadas en las demás prácticas, las cuales llegan contaminadas con agua destilada como remanente, ya que las sales y ácidos utilizados ya han sido neutralizados y las sales eliminadas. En este paso se desarrolla la eliminación, aunque sea mínima, pero significativa cantidad de agua destilada, que puede permitir una alteración en la utilización de las materias primas mezcladas en la práctica posterior, que pretende usar solamente mezclas orgánicas puras, es decir, sin agua presente, ya que como se describió anteriormente, este tiene su propio azeótropo y alteraría el equilibrio de fases binario. Esta práctica es la que permite la recuperación, casi en su totalidad de los productos originales, principalmente el acetato de etilo, que es el reactivo con mayor valor económico y mayor fuente de contaminación al ambiente.

Posteriormente, estos compuestos ya destilados y sin el agua destilada sobrante se colocan en el frasco de fase orgánica rectificada, para su posterior utilización del equilibrio binario líquido-vapor. Al analizar esta práctica, como se puede observar, ha sufrido una modificación positiva, tanto para el estudiante como para el profesor y auxiliar, al convertir un sistema que se manipulaba constantemente para la dosificación de muestras, en un sistema en donde se agregan y se extraen muestras con mayor comodidad.

Además de disminuir la pérdida de material por evaporación, ya que por ser un equilibrio que se basa en calentamientos para evaporar las muestras y recuperarlas destiladas, al abrir el sistema pueden existir pérdidas significativas por evaporación. Con este procedimiento se termina el círculo, utilizando algunas mezclas recuperadas de destilado o remanente para construir las líneas de distribución del equilibrio ternario, con esto, queda cerrado todo el ciclo.

Se observa que el sistema está diseñado de tal manera, que no se pierden las materias primas primarias, sino al contrario, se transforman y se reutilizan nuevamente. Si no fuera por las pérdidas de material por evaporación y trasvasado, se podría decir que se recupera el 100 % de los materiales, ya que la pérdida que se tiene proviene de sales que se producen de materiales no primarios, como el ácido acético y ácido clorhídrico. Por lo que, se puede estar satisfecho de haber logrado generar el círculo de producción ecológica (CPE), que permite tener varios fines, entre ellos, la conservación de la materia, reducción del consumo energético y un factor didáctico que permite demostrar al estudiante, que sí se pueden desarrollar procesos interconectados para reducir los daños al medioambiente con la generación de desechos no utilizables.

#### **4.4. Ahorro monetario de agua y energético**

En lo que se refiere al ahorro de agua de enfriamiento, se reduce en 57,600 litros por semestre, que es equivalente a Q361.16, se considera este ahorro debido a que se modificó el sistema de enfriamiento, el agua se recibía directamente el grifo de servicio y se pasaba por los refrigerantes o condensadores y luego se desechaba el agua en el drenaje.

Debido al desperdicio de agua potable que se estaba lanzando al drenaje se cambió el sistema, se construyó un circuito cerrado de enfriamiento, este consiste en, colocar una hielera en forma cilíndrica con una bomba de pecera en su interior, con la finalidad de reutilizar el agua que se tiraba al drenaje, dentro de la hielera se coloca, aparte de la pecera, cantidad de agua suficiente y un conjunto de geles previamente congelados que se tiene en la refrigeradora del laboratorio, lo que hace posible utilizar, efectivamente, los condensadores sin necesidad de desperdiciar el agua.

En el caso del ahorro energético, este no presentó ninguna disminución, ni aumento, ya que algunos procedimientos fueron cambiados, de tal manera, que el consumo energético siguiera constante. Los cambios básicamente son el uso de planchas para la práctica nueva de destilación por rectificación, que es un tiempo de uso aproximadamente igual al del equilibrio binario líquido-vapor, por lo que, no hay un cambio significativo en el consumo energética. Este ahorro energético, ya se ha desarrollado con anterioridad basado en el sistema de gestión ambiental implementado dentro del laboratorio.



## CONCLUSIONES

1. Realizado el diseño y la experimentación de cuatro prácticas entrelazadas para la construcción de un círculo de producción ecológica (CPE), estas reflejan cuatro fenómenos fisicoquímicos estudiados en los cursos previos. Las cuatro prácticas entrelazadas son el equilibrio ternario en fase líquida, equilibrio químico, destilación fraccionada y equilibrio binario líquido-vapor.
2. Dentro de las prácticas entrelazadas se logró realizar la reutilización de los productos de una práctica, como materia prima o reactivo de la práctica siguiente. Los compuestos que se reutilizan son tres: acetato de etilo, etanol absoluto y agua destilada; siendo los más importantes por su costo e impacto ambiental los dos primeros, los cuales se utilizan en todas las prácticas diseñadas.
3. Basado en la generación del círculo esperado, se analiza la reutilización de la materia prima base, como se pudo observar, comenzando desde la curva de calibración, el acetato de etilo y el etanol absoluto se movilizan en las prácticas descritas, cada una con su fase experimental; definiendo que la materia prima se utilizó para realizar experimentos del tipo físico en donde las propiedades intrínsecas de esta no es alterada.
4. Por otra parte, el experimento de equilibrio químico sí hace que haya un cambio en la materia, pero al final se recupera de nuevo la materia orgánica base, al finalizar el experimento, y por medio de un método químico de neutralización y uno físico de destilación, se logra de nuevo la purificación de los compuestos orgánicos a reutilizar.

5. Se estima que la recuperación total de materia prima va desde 90 al 95 % de la materia original, teniendo pérdidas por el trasvasado de materiales y, principalmente, al destapar los sistemas al ambiente en donde se consideran pérdidas por evaporación.
6. Las pérdidas de material sólido que se presentan es debido a la transformación de la materia en la práctica de equilibrio químico y se obtienen sales sobrantes que corresponde aproximadamente a 5.7 gramos, que se presume contiene acetato de sodio, cloruro de sodio y fenoltaleína, mostrándose como un polvo blanco.
7. En cuanto al ahorro de agua potable, es significativo durante el semestre como volumen de cuerpo de agua, no así como ahorro económico debido a que la compra de agua en Guatemala su precio es bajo. El ahorro en volumen que se tiene es de 57,600 litros de agua potable, es decir, 57.6 m<sup>3</sup>, que representa en dinero aproximadamente Q361.16, durante todo el semestre.
8. No se presentó ahorro energético debido a que los sistemas ya se encontraban adaptados para el ahorro, pero sí, a pesar de agregar una práctica que tiene un gasto de consumo energético, este fue compensado con la utilización programada y organizada de las prácticas.
9. Basado en el cambio completo de la utilización de las materias primas, se tuvo una reducción significativa de los desechos generados comparando las prácticas previamente utilizadas, en donde los desechos se manejan de una manera tradicional. Al readecuar las prácticas se presume que no se tendrán que eliminar o tirar todos esos desechos al medio ambiente,

únicamente, aquellos reactivos que se pierden por evaporación o por trasvasado.

10. En los procedimientos experimentales en donde se realizaron repeticiones, se desarrolló el análisis de varianzas en los cuales, a los datos calculados de curva de calibración, sobresaturación de agua destilada, etanol absoluto agregado, equilibrio químico y moles finales, destilación fraccionada, equilibrio binario líquido-vapor, se obtuvo una F de Fisher superior a la F crítica; por lo que se concluye que las variables independientes sí tienen inferencia directa sobre las variables dependientes, en caso contrario, para los datos calculados de la curva de solubilidad y constante de equilibrio se obtuvo la F de Fisher menor a la F crítica, por lo que, se considera que las variables independientes no tienen inferencia sobre las dependientes.
  
11. Para el caso del cálculo del error por incertidumbre, se tiene que el mayor valor de error se presenta en el uso de la pipeta y probeta de 10 ml con un 45,50 % cada uno y con menor error de incertidumbre la balanza analítica y la pipeta de 1ml con un 4,50 % cada uno. Con base en el cálculo de la linealidad en donde lo ameritaba se obtuvo un  $R^2$  mayor al 0,9, por lo que, se considera que sí tienen un comportamiento lineal para el uso que se le da.



## RECOMENDACIONES

1. Utilizar un espectrofotómetro con rango de infrarrojo se puede tener mejor exactitud de los elementos presentes, ya que este identifica grupos funcionales, por lo que se puede determinar si se tienen elementos no deseados.
2. Replicar esta metodología en los laboratorios con fines didácticos de tal manera que se pueda desarrollar otros círculos de producción ecológica (CPE) en otros laboratorios de la Escuela de Ingeniería Química.
3. Buscar en el área de fisicoquímica otro tipo de reactivos que puedan representar fenómenos fisicoquímicos con la temática de recuperar algún o algunos productos para poder utilizar de nuevo como reactivos.
4. Desarrollar procedimientos más tecnificados para la mejor medición y reducción de pérdida de materiales debido a la manipulación de los mismos, por ejemplo, el uso de un HPLC.
5. Realizar las prácticas necesarias para ir agrandando el círculo de producción ecológica (CPE), es decir, prácticas adicionales a las cuatro propuestas que están enlazadas.
6. Comprar una chaqueta de calentamiento, con la finalidad de mantener un mejor control de la temperatura en el sistema de equilibrio binario líquido-vapor y en la destilación fraccionada.



## BIBLIOGRAFÍA

1. Aldana, J. (2015). *Estudio experimental del equilibrio líquido-vapor de una mezcla de Propan-2-ol y tolueno a 101.32 kpa*. Tesis de pregrado. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Perú.
2. Aldana, P. (2014). *Evaluación de la cinética de reacción del azul de metileno-ácido ascórbico mediante una técnica espectrofotométrica implementada en la práctica del curso de Laboratorio de Fisicoquímica de la Escuela de Ingeniería Química*. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala.
3. Atkins, P. (1999), *Química física*. Barcelona: Ediciones Omega.
4. Avendaño, R., Galindo, A., Ángulo, A. (2012) *Ecología y educación ambiental*. México. Universidad Autónoma de Sinaloa.
5. Brown, T., LeMay, E., Bursten, B. y otros. (2004) *Química la ciencia central*. México. Editoriales Pearson.
6. Cancinos, B. (2017). *Diseño, montaje e instalación de un sistema de refrigeración con un circuito cerrado de agua de enfriamiento aplicado a los equipos de destilación del Laboratorio de Fisicoquímica*. Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala.

7. Castellan, G. (1987), *Fisicoquímica*. México: Addison Wesley Iberoamericana.
8. Cengel, Y. (2009), *Termodinámica*. México, Editorial McGraw-Hill.
9. Chang, R. (2010). *Química*. México: Editorial McGraw-Hill.
10. Campagna, (2018). *Destilación. Ejemplo de un proceso simple*. Recuperado de <https://sites.google.com/site/profcampagnasistdeproduccion/destilacion>.
11. Córdova, M. (2009). *Optimización de los recursos en las pequeñas empresas distribuidoras de libros, a través de la subcontratación de servicios caso ilustrativo*. Universidad de El Salvador. El Salvador.
12. Díaz, R. (2006). *Implementación de un simulador de computadora de modelos del comportamiento de equilibrio vapor-líquido de sistemas binarios*. Tesis de pregrado. Facultad de Ingeniería. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala.
13. Fréitz, J., González, Y. y Verruschi E. (2015). Predicción del equilibrio líquido-vapor de mezclas de hidrogeno y diésel usado Peng Robinson. *REDIP.UNEXPO.VRB*. 5(3). 835-850.

14. Fulgan, N. (2010). *Generación de datos experimentales a nivel de laboratorio, que permitan caracterizar el sistema ternario Metanol-Biodiesel-Agua en Equilibrio Líquido-Líquido a temperatura ambiente y 640 mm Hg.* (Tesis de pregrado). Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala.
15. Geankoplis, C. (1998), *Procesos de transporte y operaciones unitarias.* México: Compañía Editorial Continental. México. Editorial McGraw-Hill.
16. Gómez F. (1995). *Contabilidad de costos I.* México. Ediciones Frigor.
17. González, A. (2012). *Desarrollo de una propuesta de sistema de gestión ambiental de acuerdo a la norma ISO 14001:2004 como herramienta de educación ambiental en el Laboratorio de Fisicoquímica.* Escuela de Ingeniería Química. Universidad de San Carlos de Guatemala. Tesis de pregrado. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala.
18. Levine, A. (2004). *Fisicoquímica.* España. McGraw-Hill.
19. Levine, A. (2014). *Fisicoquímica.* México. McGraw-Hill.
20. McCabe, W. (1998), *Operaciones unitarias en ingeniería química.* España: Editorial McGraw-Hill.
21. Rodríguez, J., González, L. y otros. *Energía y ambiente.* (2013). Colombia: Ediciones Palmira.

22. Rustom J. Estadística descriptiva, probabilidad e inferencia. (2012). Universidad de Chile.
23. Sáez, A. (2012). *Apuntes de estadística para ingenieros*. Jaén, España: Editorial Universidad de Jaén.
24. Serrano. W. (2011). *Estudio experimental para la obtención de datos a nivel laboratorio del sistema ternario Isopropanol-biodiesel-agua en equilibrio líquido-líquido a temperatura ambiente y 640 mm Hg*. Tesis de pregrado Facultad de Ingeniería. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala.
25. Smith, J., Van Ness. y Abbott. (2007). *Introducción a la termodinámica en ingeniería química*. México. Editorial McGraw-Hill.
26. Smith, R. (2001), *Ecología*. Madrid. Addison Wesley.
27. Solís, Z. (2016). *Aplicación de la metodología seis sigma en la empresa impulsadora lechera guatemalteca, S. A.* Facultad de Ingeniería. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala.
28. Vallejo, E. (2016). *Caracterización del equilibrio termodinámico y la cinética de la descomposición térmica del clorato de potasio catalizada con dióxido de manganeso en un sistema heterogéneo*. Facultad de Ingeniería. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala.
29. Veiga, S. (2016). *Actividad experimental para introducir el concepto de azeotropía*. Revista QuímicaViva. 3(15). 47-54.

30. Zapata, S. (2015). *Buenas prácticas aplicadas al laboratorio de bromatología de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, USAC*. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala.



# APÉNDICES

## Apéndice A. Datos originales

### A.1. Propiedades de los compuestos

Tabla de propiedades de los compuestos

Propiedades/ Compuesto	Acetato de Etilo	Etanol Absoluto	Ácido Acético	Agua	Ácido Clorhídrico (37%)	Hidróxido de Sodio (1 M)
Peso molecular (gramo/mol)	88,1100	46,0700	60,0520	18,0150	36,4600	40,0100
Densidad (gramos/mililitro)	0,9020	0,7890	1,0500	1,0000	1,1900	1,0300
Presión de vapor (mm de Hg)	76,0000	43,9000	11,0000	17,5000	100,0000	17,0000
Temperatura de Ebullición (°C)	77,1000	78,4000	118,1000	100,0000	108,6000	100,3000

Fuente: elaboración propia.

**Tabla de curva de calibración**

	Mezcla	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Xb	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
	Xc	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
Corrida 1	Masa (g)	11,91	12,14	12,42	12,60	12,68	13,01	13,07	13,20	13,32
	Volumen (ml)	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00
Corrida 2	Masa (g)	11,85	12,09	12,39	12,62	12,72	12,96	13,10	13,17	13,35
	Volumen (ml)	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00
Corrida 3	Masa (g)	11,88	12,10	12,38	12,65	12,71	12,97	13,09	13,14	13,37
	Volumen (ml)	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00

Fuente: elaboración propia.

## A.2. Equilibrio ternario, líquido-líquido

**Curva de solubilidad de referencia**

Xa	Xb	CORRIDA 1			CORRIDA 2			CORRIDA 3		
		ml A	ml B	ml C	ml A	ml B	ml C	ml A	ml B	ml C
0,0	1,0	1,05	60	0	1,3	60	0	1,2	60	0
0,1	0,9	0,72	35,17	0,50	0,72	35,17	0,40	0,72	35,17	0,52
0,2	0,8	1,44	31,26	2,00	1,44	31,26	2,20	1,44	31,26	1,80
0,3	0,7	2,16	27,35	3,70	2,16	27,35	3,70	2,16	27,35	3,50
0,4	0,6	2,88	23,44	4,60	2,88	23,44	4,80	2,88	23,44	4,80
0,5	0,5	3,60	19,54	4,80	3,6	19,54	4,80	3,6	19,54	5,00
0,6	0,4	4,32	15,63	5,90	4,32	15,63	6,00	4,32	15,63	5,80
0,7	0,3	5,04	11,72	5,30	5,04	11,72	5,30	5,04	11,72	5,10
0,8	0,2	5,76	7,81	4,30	5,76	7,81	4,20	5,76	7,81	4,40
0,9	0,1	6,49	3,91	3,70	6,49	3,91	3,50	6,49	3,91	3,50
		10,00	1,00	0,00	10	1,00	0,00	10	1,00	0,00

Fuente: elaboración propia.

**A.2.2. Curva de solubilidad. Mililitros agregados de agua destilada para la generación de dos fases**

**Mililitros agregados de agua destilada en exceso**

Corrida 1						
Xa	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
ml A	11,60	10,10	4,30	2,90	1,40	0,90
ml B	5,30	6,30	7,20	8,00	8,70	9,40
ml C	4,70	3,70	2,80	2,00	1,30	0,60

Fuente: elaboración propia.

**Mililitros agregados de agua destilada en exceso**

Corrida 2						
Xa	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	1,0
ml A	11,70	9,80	4,50	3,10	1,60	0,90
ml B	5,30	6,30	7,20	8,00	8,70	9,40
ml C	4,70	3,70	2,80	2,00	1,30	0,60

Fuente: elaboración propia.

**Mililitros agregados de agua destilada en exceso**

Corrida 3						
Xa	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
ml A	11,40	10,30	4,60	2,70	1,20	0,80
ml B	5,30	6,30	7,20	8,00	8,70	9,40
ml C	4,70	3,70	2,80	2,00	1,30	0,60

Fuente: elaboración propia.

**A.3.3. Curva de solubilidad. Mililitros agregados de etanol absoluto para la generación de dos fases**

**Mililitros agregados de etanol absoluto**

<b>Corrida 1</b>					
Xa	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
ml A	10,10	4,30	2,90	1,40	0,90
ml B	6,30	7,20	8,00	8,70	9,40
ml C	3,70	2,80	2,00	1,30	0,60
ml C	1,75	0,65	1,35	0,70	0,85

Fuente: elaboración propia.

**Mililitros agregados de etanol absoluto**

<b>Corrida 2</b>					
Xa	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
ml A	10,10	4,30	2,90	1,40	0,90
ml B	6,30	7,20	8,00	8,70	9,40
ml C	3,70	2,80	2,00	1,30	0,60
ml C	1,70	0,70	1,30	0,75	0,80

Fuente: elaboración propia.

**Mililitros agregados de etanol absoluto**

<b>Corrida 3</b>					
Xa	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
ml A	10,10	4,30	2,90	1,40	0,90
ml B	6,30	7,20	8,00	8,70	9,40
ml C	3,70	2,80	2,00	1,30	0,60
ml C	1,75	0,75	1,40	0,80	0,75

Fuente: elaboración propia.

#### A.4. Constante de equilibrio

##### Mililitros para la constante de equilibrio

Mezcla Fracción mol	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Xb	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
ml B	0,16	0,29	0,42	0,53	0,63	0,72	0,80	0,87	0,94
ml C	0,84	0,71	0,58	0,47	0,37	0,28	0,20	0,13	0,06
ml A	0,03	0,07	0,12	0,17	0,24	0,32	0,42	0,56	0,74
ml D	0,97	0,93	0,88	0,83	0,76	0,68	0,58	0,44	0,26
ml E	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
ml F	11,50	9,70	8,00	6,20	4,50	2,80	2,30	4,10	6,00

Fuente: elaboración propia.

#### A.5. Destilación fraccionada

##### Datos de destilación fraccionada

Corrida 1										
Mezcla orgánica	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tebullición	73,4	73,9	74,2	74,5	74,9	75,2	75,6	76,1	76,5	76,7
Volumen (ml)	9,20	9,50	8,60	11,10	8,50	10,20	10,50	7,40	8,60	9,00
Masa (g)	7,97	8,24	7,49	9,75	7,48	9,00	9,30	6,57	7,65	8,02

Fuente: elaboración propia.

### Datos de destilación Fraccionada

Corrida 2										
Mezcla orgánica	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tebullición	73,2	73,9	74,1	74,3	75	75,2	75,7	76,3	76,4	76,6
Volumen (ml)	10,00	10,40	8,80	8,50	9,10	8,60	10,50	9,00	6,00	9,00
Masa (g)	8,67	9,03	7,65	7,45	8,01	7,60	9,30	7,98	5,35	8,02

Fuente: elaboración propia.

### Datos de destilación fraccionada

Corrida 3										
Mezcla orgánica	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tebullición	73,3	74,0	74,3	74,5	75,1	75,4	75,8	76,2	76,3	76,7
Volumen (ml)	10,50	7,30	5,20	9,30	10,20	9,50	5,40	6,50	7,70	8,50
Masa (g)	9,09	6,33	4,53	8,11	8,98	8,40	4,78	5,78	6,87	7,61

Fuente: elaboración propia.

## A.6. Equilibrio binario. Líquido-vapor

### Datos para el diagrama de fases

	T (°C)	76,8	75	73,3	72,1	73,1	73,9	75	76,8	78,1
VOLUMEN	LÍQUIDO	3,800	4,250	5,870	5,810	5,250	5,150	5,600	5,300	4,700
	VAPOR	6,500	5,460	4,420	5,180	3,720	3,760	3,250	3,720	5,000
MASA	LÍQUIDO	3,430	3,780	5,122	4,915	4,312	4,170	4,492	4,196	3,701
	VAPOR	5,790	4,771	3,815	4,441	3,143	3,144	2,674	3,018	3,985

Fuente: elaboración propia.

## Apéndice B. Metodología de cálculo

### B.1. Curva de calibración

#### B.1.1. Encontrando ml de cada compuesto con base en la fracción molar

1. Mililitros de acetato de etilo ( $X_B = 0.1$ ) para 1 mol de mezcla

$$0.1 \text{ moles } B * \frac{88.11 \text{ g } B}{1 \text{ mol } B} * \frac{1 \text{ ml } B}{0.902 \text{ g } B} = 9.77 \text{ ml } B$$

2. Mililitros de acetato de etilo ( $X_B = 0.1$ ) para 1 mol de mezcla

$$0.9 \text{ moles } C * \frac{46.07 \text{ g } C}{1 \text{ mol } C} * \frac{1 \text{ ml } C}{0.789 \text{ g } C} = 52.55 \text{ ml } C$$

3. Mililitros totales de mezcla

$$\text{ml totales mezcla} = 9.77 \text{ ml} + 52.55 \text{ ml} = 62.32 \text{ ml}$$

4. Mililitros de acetato de etilo para 15 ml de mezcla

$$\begin{array}{l} 62.32 \text{ ml} \text{ ----- } 15 \text{ ml} \\ 9.77 \text{ ml} \text{ ----- } V_B \end{array} \quad V_B = \frac{9.77 * 15}{62.32} = 2.35 \text{ ml de acetato de etilo}$$

5. Mililitros de etanol absoluto para 15 ml de mezcla

$$\begin{array}{l} 62.32 \text{ ml} \text{ ----- } 15 \text{ ml} \\ 52.55 \text{ ml} \text{ ----- } V_C \end{array} \quad V_C = \frac{52.55 * 15}{62.32} = 12.65 \text{ ml de etanol absoluto}$$

### B.1.2. Encontrando densidad de mezcla a partir de datos experimentales

1. Volumen 15 ml y masa 11.91 g

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{11.91 \text{ g}}{15.00 \text{ ml}} = 0.798 \text{ g/ml}$$

2. Densidad promedio

$$\rho_{prom} = \frac{\rho_1 + \rho_2 + \rho_3}{3} = \frac{0.794 + 0.790 + 0.792}{3} = 0.792 \text{ g/ml}$$

### B.1.3. Modelo matemático para la curva de calibración

Realizando regresión lineal densidad en función de fracción molar utilizando hoja de cálculo se obtuvo el modelo siguiente:

$$X_B = 8.1485\rho - 6.3979$$

## B.2. Equilibrio ternario. Líquido-líquido

B.2.1. Curva de solubilidad a partir de las mezclas binarias de acetato de etilo y agua destilada como componentes primarios.

Este domo no se hace experimentalmente en la práctica propuesta, este diagrama se usó para comprobar si las muestras experimentales de la secuencia de prácticas coincidían.

1. Tomando como base 0.4 moles de mezcla binaria, debido a la cantidad baja en algunas mezclas de agua destilada, acetato de etilo y etanol absoluto (revisar datos originales).

Para  $X_A = 0.1$

$$0.1 * 0.4 \text{ moles } A * \frac{18.015 \text{ g } A}{1 \text{ mol } A} * \frac{1 \text{ ml } A}{1 \text{ g } A} = 0.72 \text{ ml } A$$

Para  $X_B = 0.9$

$$0.9 * 0.4 \text{ moles } B * \frac{88.11 \text{ g } B}{1 \text{ mol } B} * \frac{1 \text{ ml } B}{0.902 \text{ g } B} = 35.17 \text{ ml } B$$

2. Titulación con etanol absoluto para obtener una sola fase, encontrando las fracciones molares para plotear los puntos en el diagrama triangular ternario.

Moles A:

$$0.72 \text{ ml } A * \frac{1 \text{ g } A}{1 \text{ ml } A} * \frac{1 \text{ mol } A}{18.015 \text{ g } A} = 0.03997 \text{ moles } A$$

Moles B:

$$35.17 \text{ ml } B * \frac{0.902 \text{ g } B}{1 \text{ ml } B} * \frac{1 \text{ mol } B}{88.11 \text{ g } B} = 0.036004 \text{ moles } B$$

Moles C:

$$0.50 \text{ ml } C * \frac{0.789 \text{ g } C}{1 \text{ ml } C} * \frac{1 \text{ mol } C}{46.07 \text{ g } C} = 0.00856 \text{ moles } C$$

Moles total:

$$M_T = \text{Moles A} + \text{moles B} + \text{moles C}$$

$$M_T = 0.03997 + 0.36004 + 0.00856 = 0.40857$$

3. Fracciones molares de la tres especies

$$X_A = \frac{\text{moles de A}}{\text{moles total}} = \frac{0.03997}{0.40857} = 0.09782$$

$$X_B = \frac{\text{moles de B}}{\text{moles total}} = \frac{0.36004}{0.40857} = 0.88122$$

$$X_C = \frac{\text{moles de C}}{\text{moles total}} = \frac{0.00856}{0.40857} = 0.02096$$

B.2.2. Cantidad de agua destilada agregada para llevar a un punto dentro del domo.

Y luego agregarle etanol absoluto para construir la curva de solubilidad en la práctica. Estas muestras vienen de la curva de calibración acetato de etilo y etanol absoluto. Se ejemplifica cuando  $X_b = 0.5$ .

Moles de B:

$$6.3 \text{ ml } B * \frac{0.902 \text{ g } B}{1 \text{ ml } B} * \frac{1 \text{ mol } B}{88.11 \text{ g } B} = 0.06449 \text{ moles de B}$$

Moles de C:

$$3.7 \text{ ml C} * \frac{0.789 \text{ g C}}{1 \text{ ml C}} * \frac{1 \text{ mol C}}{46.07 \text{ g C}} = 0.06337 \text{ moles de C}$$

Moles de A:

$$10.1 \text{ ml A} * \frac{1 \text{ g A}}{1 \text{ ml A}} * \frac{1 \text{ mol A}}{18.015 \text{ g A}} = 0.56064 \text{ moles de A}$$

Moles totales = moles de A + moles de B + moles de C

$$\text{Moles totales} = 0.56064 + 0.6337 + 0.06449 = 0.6885$$

Fracción molar para ubicar el punto debajo de la curva de solubilidad

$$X_A = \frac{\text{moles de A}}{\text{moles total}} = \frac{0.56064}{0.6885} = 0.8143$$

$$X_B = \frac{\text{moles de B}}{\text{moles total}} = \frac{0.06449}{0.6885} = 0.0937$$

$$X_C = \frac{\text{moles de C}}{\text{moles total}} = \frac{0.09334}{0.6885} = 0.092$$

B.2.3. Agregando la cantidad necesaria de etanol absoluto para generar la curva de solubilidad.

A partir de las muestras del inciso anterior. Teniendo los moles de cada componente, agregando el etanol necesario, se obtienen las fracciones siguientes:

Moles de A = 0.056064, moles de B = 0.06449 y moles de C = 0.06337

Moles de C agregados para llegar al equilibrio:

$$1.75 \text{ ml C} * \frac{0.789 \text{ g C}}{1 \text{ ml C}} * \frac{1 \text{ mol C}}{47.06 \text{ g C}} = 0.02997 \text{ moles de C}$$

Moles totales de C = 0.06337 + 0.02997 = 0.09334

Moles totales = moles de A + moles de B + moles de C

Moles totales = 0.56064 + 0.06449 + 0.09334 = 0.71847

Fracciones molares en el equilibrio:

$$X_A = \frac{\text{moles de A}}{\text{moles total}} = \frac{0.56064}{0.71847} = 0.7803$$

$$X_B = \frac{\text{moles de B}}{\text{moles total}} = \frac{0.06449}{0.71847} = 0.0898$$

$$X_C = \frac{\text{moles de C}}{\text{moles total}} = \frac{0.09334}{0.71847} = 0.1299$$

Con estos datos y los de toda la tabla presentada en datos calculados, se construyen los datos de la curva de solubilidad práctica, comparada con la curva de solubilidad de muestra original utilizando el programa libre ProSim Ternary Diagram.

### B.3. Equilibrio químico en fase líquida

#### B.3.1. Cálculo de la fracción molar base 1 mol.

$$X_B = 0.1$$

$$0.1 \text{ moles } B * \frac{88.11 \text{ g } B}{1 \text{ mol } B} * \frac{1 \text{ ml } B}{0.902 \text{ g } B} = 9.77 \text{ ml de } B$$

$$X_C = 0.9$$

$$0.9 \text{ moles } C * \frac{46.07 \text{ g } C}{1 \text{ mol } C} * \frac{1 \text{ ml } C}{0.789 \text{ g } C} = 52.55 \text{ ml de } C$$

$$\text{Mililitros totales} = \text{ml } B + \text{ml } C = 9.77 + 55.52 = 62.32$$

Trasladando a base de 1 ml (para el acetato de etilo y el etanol absoluto), ya que se tomará en total 5 muestras de 2 ml c/u que contenga todas las especies.

Acetato de etilo (B):

$$62.32 \text{ ml} \text{ ----- } 9.77 \text{ ml}$$

$$V_B = \frac{1.00 * 9.77}{62.32} = 0.16 \text{ ml de } B$$

$$1.00 \text{ ml} \text{ ----- } V_B$$

$$62.32 \text{ ml} \text{ ----- } 52.55 \text{ ml}$$

$$V_C = \frac{1.00 * 52.55}{62.32} = 0.84 \text{ ml de } C$$

$$1.00 \text{ ml} \text{ ----- } V_C$$

De la misma manera se calcularon los mililitros a utilizar de agua destilada y ácido acético.

### B.3.2. Moles de B y C en 1 ml de mezcla

$$0.16 \text{ ml B} * \frac{0.902 \text{ g B}}{1 \text{ ml B}} * \frac{1 \text{ mol B}}{88.11 \text{ g B}} = 0.001605 \text{ moles de B}$$

$$0.84 \text{ ml C} * \frac{0.789 \text{ g C}}{1 \text{ ml C}} * \frac{1 \text{ mol C}}{46.07 \text{ g C}} = 0.014442 \text{ moles de C}$$

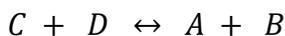
De igual forma se calculan los moles de agua destilada y ácido acético.

B.3.3. Calculo de  $Q_c$  a partir de los moles iniciales de A, B, C y D presentes, para determinar hacia dónde se moverá el equilibrio.

Moles inicial:

$$A = 0.001877, B = 0.001605, C = 0.01442 \text{ y } D = 0.016894$$

Como los coeficientes estequiométricos son 1 para todas las especies, entonces se puede trabajar con moles, en caso contrario se deben utilizar concentraciones (molaridad).



$$Q_c = \frac{A * B}{C * D} = \frac{(0.001877)(0.001605)}{(0.01442)(0.016894)} = 0.012345$$

$K_{eq}$  de las esterificaciones es aproximadamente 4, por lo tanto:

$K_{eq} > Q_c$ , el desplazamiento se da hacia la derecha

#### B.3.4. Cálculo de $\xi$ :

Mililitros agregados como catalizador de ácido clorhídrico (37%) (E) 0.7 ml, por lo que, se debe de quitar esa cantidad para conocer el gasto o formación de  $H^+$  que se le agrega o quita al ácido acético.

Por ser 2 ml utilizado de mezcla, entonces los 0.7 ml de E se dividen dentro de 5 que son el número de mezclas a utilizar, entonces son 0.14 ml de ácido clorhídrico (37%).

Moles de ácido clorhídrico (E):

$$0.14 \text{ ml } E * \frac{1.19 \text{ g } E}{1 \text{ ml } E} * \frac{1 \text{ mol } E}{34.46 \text{ g } E} * 0.37 = 0.001691 \text{ moles de } E$$

Moles de hidróxido de sodio (F):

$$11.5 \text{ ml } F * \frac{1 \text{ mol } F}{1000 \text{ ml solución}} = 0.0115 \text{ moles de } F$$

$$\xi = \text{moles de } F - \text{moles de } E$$

$$\xi = 0.0115 - 0.001691 = 0.009809$$

Calculando la constante de equilibrio experimental.

$$K_{eq} = \frac{(0.011414)(0.011686)}{(0.004632)(0.007085)} = 4.064$$

### B.3.5. Moles finales de cada especie

#### Grado de avance

Especie	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>A</b>	<b>B</b>
Moles iniciales	0.0144	0.0169	0.0019	0.0016
$\pm \xi$	$-\xi$	$-\xi$	$+\xi$	$+\xi$
Moles iniciales $\pm \xi$	0.0046	0.0071	0.011686	0.0011

Fuente: elaboración propia.

En este caso se resta a los reactivos y se suma a los productos el grado de avance ( $\xi$ ), ya que  $K_{eq} > Q_c$

#### B.4. Destilación fraccionada, purificación de orgánicos

Encontrando la fracción molar de destilado a una temperatura de ebullición de 77.4 °C, masa = 7.965 gramos y volumen = 9.2 ml.

$$\rho_{mezcla} = \frac{m}{V} = \frac{7.965 \text{ g}}{9.2 \text{ ml}} = 0.866 \text{ g/ml}$$

$$X_B = 8.1435\rho - 6.3979 = 8.1435(0.866) - 6.3979 = 0.654$$

De la misma manera se encuentran los demás puntos para realizar las gráficas de:

$$T_{eb} = f(x_B) \text{ y } x_B = f(x_a)$$

## B.5. Equilibrio binario. Líquido-vapor

B.5.1. Encontrando la fracción molar de remanente (líquido) a una temperatura de ebullición de 77 °C, masa = 3.381 gramos y volumen = 3.8 ml.

$$\rho_{mezcla} = \frac{m}{V} = \frac{3.381 \text{ g}}{3.8 \text{ ml}} = 0.890 \text{ g/ml}$$

$$X_B = 8.1435\rho - 6.3979 = 8.1435(0.890) - 6.3979 = 0.850$$

Encontrando la fracción molar de destilado (vapor) a una temperatura de ebullición de 77 °C, masa = 5.731 gramos y volumen = 6.5 ml.

$$\rho_{mezcla} = \frac{m}{V} = \frac{5.731 \text{ g}}{6.5 \text{ ml}} = 0.882 \text{ g/ml}$$

$$X_B = 8.1435\rho - 6.3979 = 8.1435(0.882) - 6.3979 = 0.785$$

Encontrando los demás puntos se construye el diagrama de fases líquido-vapor.

Con las fracciones molares de destilado y remanente que les corresponde se encuentra el diagrama para determinar el intervalo en donde se encuentra el azeótropo de la mezcla.

## B.6. Ahorro energético

### B.6.1. Equilibrio líquido-vapor:

Fórmula utilizada para el consumo

$$C_{EE} = t * \left(\frac{Pot}{1000}\right) * T_{arE}$$

Ejemplo de consumo energético del equipo:

$$C_{EE} = (3) * \left(\frac{1000}{1000}\right) * \left(\frac{1.139 GTQ}{kWh}\right) = 3.417$$

Consumo total:

$$Q3.417 * 3 \text{ repeticiones} * 4 \text{ semanas} * 4 \text{ secciones} = Q 164.02$$

De las tres horas por calentamiento se redujo a hora y media, por lo tanto, se redujo a Q 82.01 por semestre.

### B.6.2. Destilación fraccionada

Ejemplo de consumo energético del equipo:

$$C_{EE} = (1.5) * \left(\frac{1000}{1000}\right) * \left(\frac{1.139 GTQ}{kWh}\right) = Q 1.7085$$

Consumo total:

$$Q1.7085 * 3 \text{ repeticiones} * 4 \text{ semanas} * 4 \text{ secciones} = Q 82.01$$

No existía esta práctica, con la cual es posible reutilizar las materias primas principales.

B.6.3. total ahorro energético

$$Total = Q 82.01 - Q 82.012 = Q 0.00 \text{ por semestre}$$

## B.7. Ahorro de agua de enfriamiento

$$C_A = t \cdot v \cdot \text{semanas} \cdot \text{repeticiones} \cdot \text{secciones}$$

### B.7.1. Ahorro de agua de enfriamiento

$$C_A = 120 \text{ minutos} * 5 \frac{\text{Litros}}{\text{Minuto}} * 4 \text{ semanas} * 3 \text{ repeticiones} * 4 \text{ secciones} \\ * 2 \text{ practicas} = 57,600 \text{ litros por semestre}$$

### B.7.2. Ahorro económico en consumo de agua de destilación

$$C_A = t \left( \frac{v}{1000} \right) (T_{ar_A})$$

Ejemplo de ahorro económico de agua de destilación

$$C_A = 120 \text{ minutos} \left( \frac{5 \frac{L}{\text{minuto}}}{1000} \right) \left( \frac{6.27 GTQ}{m^3} \right) = Q3.762$$

Total ahorro económico del semestre:

$$C_A = Q 3.762 * 4 \text{ semanas} * 3 \text{ repeticiones} * 4 \text{ secciones} * 2 \text{ prácticas} \\ = Q 361.16 \text{ por semestre}$$



## Apéndice C. Datos calculados

### C.1. Curva de calibración

#### Curva de calibración

Mezcla	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Xb	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
Xc	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
Total	15,000	15,000	15,000	15,000	15,000	15,000	15,000	15,000	15,000
Corrida 1	0,794	0,809	0,828	0,840	0,845	0,867	0,871	0,880	0,888
Corrida 2	0,790	0,806	0,826	0,841	0,848	0,864	0,873	0,878	0,890
Corrida 3	0,792	0,807	0,825	0,843	0,847	0,865	0,873	0,876	0,891
Promedio	0,792	0,807	0,826	0,841	0,847	0,865	0,872	0,878	0,890

Fuente: elaboración propia.

## C.2. Equilibrio ternario. Líquido-líquido

### C.2.1. Curva de solubilidad de referencia

#### Curva de solubilidad de referencia

Corrida1		moles				Fracción molar		
Xa	Xb	A	B	C	Totales	A	B	C
0,0	1,0	0,05828	0,61423	0,00000	0,67252	0,08667	0,91333	0,00000
0,1	0,9	0,03997	0,36004	0,00856	0,40857	0,09782	0,88122	0,02096
0,2	0,8	0,07993	0,32001	0,03425	0,43420	0,18409	0,73702	0,07889
0,3	0,7	0,11990	0,27999	0,06337	0,46325	0,25882	0,60439	0,13679
0,4	0,6	0,15987	0,23996	0,07878	0,47861	0,33403	0,50137	0,16460
0,5	0,5	0,19983	0,20003	0,08221	0,48207	0,41453	0,41495	0,17052
0,6	0,4	0,23980	0,16001	0,10104	0,50085	0,47878	0,31947	0,20174
0,7	0,3	0,27977	0,11998	0,09077	0,49052	0,57035	0,24460	0,18505
0,8	0,2	0,31973	0,07995	0,07364	0,47333	0,67550	0,16892	0,15558
0,9	0,1	0,36026	0,04003	0,06337	0,46365	0,77700	0,08633	0,13667
1,0	0,0	0,55509	0,01024	0,00000	0,56533	0,98189	0,01811	0,00000

Fuente: elaboración propia.

### Curva de solubilidad de referencia

CORRIDA 2		moles				Fracción molar		
Xa	Xb	A	B	C	Totales	A	B	C
0,0	1,0	0,07216	0,61423	0,00000	0,68639	0,10513	0,89487	0,00000
0,1	0,9	0,03997	0,36004	0,00685	0,40686	0,09823	0,88493	0,01684
0,2	0,8	0,07993	0,32001	0,03768	0,43763	0,18265	0,73125	0,08610
0,3	0,7	0,11990	0,27999	0,06337	0,46325	0,25882	0,60439	0,13679
0,4	0,6	0,15987	0,23996	0,08221	0,48203	0,33165	0,49781	0,17054
0,5	0,5	0,19983	0,20003	0,08221	0,48207	0,41453	0,41495	0,17052
0,6	0,4	0,23980	0,16001	0,10276	0,50256	0,47715	0,31838	0,20446
0,7	0,3	0,27977	0,11998	0,09077	0,49052	0,57035	0,24460	0,18505
0,8	0,2	0,31973	0,07995	0,07193	0,47162	0,67795	0,16953	0,15252
0,9	0,1	0,36026	0,04003	0,05994	0,46022	0,78278	0,08697	0,13024
1,0	0,0	0,55509	0,01024	0,00000	0,56533	0,98189	0,01811	0,00000

Fuente: elaboración propia.

### Curva de solubilidad de referencia

CORRIDA 3		moles				Fracción molar		
Xa	Xb	A	B	C	Totales	A	B	C
0,0	1,0	0,06661	0,61423	0,00000	0,68084	0,09784	0,90216	0,00000
0,1	0,9	0,03997	0,36004	0,00891	0,40891	0,09774	0,88048	0,02178
0,2	0,8	0,07993	0,32001	0,03083	0,43078	0,18556	0,74288	0,07156
0,3	0,7	0,11990	0,27999	0,05994	0,45983	0,26075	0,60889	0,13036
0,4	0,6	0,15987	0,23996	0,08221	0,48203	0,33165	0,49781	0,17054
0,5	0,5	0,19983	0,20003	0,08563	0,48550	0,41160	0,41202	0,17638
0,6	0,4	0,23980	0,16001	0,09933	0,49914	0,48043	0,32057	0,19901
0,7	0,3	0,27977	0,11998	0,08734	0,48709	0,57436	0,24632	0,17932
0,8	0,2	0,31973	0,07995	0,07535	0,47504	0,67307	0,16831	0,15863
0,9	0,1	0,36026	0,04003	0,05994	0,46022	0,78278	0,08697	0,13024
1,0	0,0	0,55509	0,01024	0,00000	0,56533	0,98189	0,01811	0,00000

Fuente: elaboración propia.

C.2.2. Curva de solubilidad. Mililitros agregados de agua destilada para la generación de dos fases.

**Mililitros agregados de agua destilada**

<b>Corrida 1</b>						
Xa	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
moles A	0,64391	0,56064	0,23869	0,16098	0,07771	0,04996
moles B	0,05426	0,06449	0,07371	0,0819	0,08906	0,09623
moles C	0,08049	0,06337	0,04795	0,03425	0,02226	0,01028
moles total	0,77866	0,6885	0,36035	0,27713	0,18903	0,15647
Xa	0,8269	0,8143	0,6624	0,5809	0,4111	0,3193
Xb	0,0697	0,0937	0,2046	0,2955	0,4711	0,6150
Xc	0,1034	0,0920	0,1331	0,1236	0,1178	0,0657

Fuente: elaboración propia.

**Mililitros agregados de agua destilada**

<b>Corrida 2</b>						
Xa	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	1,0
moles A	0,6495	0,5440	0,2498	0,1721	0,0888	0,0500
moles B	0,0543	0,0645	0,0737	0,0819	0,0891	0,0962
moles C	0,0805	0,0634	0,0480	0,0343	0,0223	0,0103
moles total	0,7842	0,6719	0,3714	0,2882	0,2001	0,1565
Xa	0,8282	0,8097	0,6725	0,597	0,4438	0,3193
Xb	0,0692	0,0960	0,1984	0,2841	0,4450	0,6150
Xc	0,1026	0,0943	0,1291	0,1188	0,1112	0,0657

Fuente: elaboración propia.

**Mililitros agregados de agua destilada**

<b>Corrida 3</b>						
Xa	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
moles A	0,6328	0,5718	0,2553	0,1499	0,0666	0,0444
moles B	0,0543	0,0645	0,0737	0,0819	0,0891	0,0962
moles C	0,0805	0,0634	0,0479	0,0343	0,0223	0,0103
moles total	0,7676	0,6996	0,3770	0,2660	0,1779	0,1510
Xa	0,8244	0,8172	0,6773	0,5634	0,3744	0,2943
Xb	0,0707	0,0922	0,1955	0,3079	0,5005	0,6376
Xc	0,1049	0,0906	0,1272	0,1287	0,1251	0,0681

Fuente: elaboración propia.

C.2.3. Curva de solubilidad. Mililitros agregados de etanol absoluto para la generación de dos fases.

**Mililitros agregados de etanol absoluto.**

<b>Corrida 1</b>					
Xa	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
moles A	0,5606	0,2387	0,1610	0,0777	0,0500
moles B	0,0645	0,0737	0,0819	0,0891	0,0962
moles C	0,0933	0,0591	0,0574	0,0343	0,0248
moles totales	0,7184	0,3715	0,3003	0,2010	0,1710
Xa	0,7803	0,6425	0,5362	0,3866	0,2921
Xb	0,0898	0,1984	0,2728	0,4430	0,5627
Xc	0,1299	0,1591	0,1911	0,1704	0,1452

Fuente: elaboración propia.

### Mililitros agregados de etanol absoluto.

<b>Corrida 2</b>					
Xa	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
moles A	0,5606	0,2387	0,1610	0,0777	0,0500
moles B	0,0645	0,0737	0,0819	0,0891	0,0962
moles C	0,0925	0,0599	0,0565	0,0351	0,0240
moles totales	0,7176	0,3723	0,2994	0,2019	0,1702
Xa	0,7813	0,6411	0,5377	0,3849	0,2936
Xb	0,0899	0,1980	0,2735	0,4412	0,5655
Xc	0,1289	0,1610	0,1888	0,1739	0,1409

Fuente: elaboración propia.

### Mililitros agregados de etanol absoluto.

<b>Corrida 3</b>					
Xa	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
moles A	0,5606	0,2387	0,1610	0,0777	0,0500
moles B	0,0650	0,0737	0,0819	0,0890	0,0962
moles C	0,0933	0,0608	0,0582	0,0360	0,0231
moles totales	0,7185	0,3732	0,3011	0,2027	0,1693
Xa	0,7803	0,6396	0,5346	0,3833	0,2951
Xb	0,0898	0,1975	0,2720	0,4393	0,5684
Xc	0,1299	0,1629	0,1934	0,1774	0,1366

Fuente: elaboración propia.

### C.3. Constante de equilibrio

#### Constante de equilibrio

Xb	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
moles B	0,0016	0,0030	0,0043	0,0054	0,0064	0,0073	0,0081	0,0089	0,0096
moles C	0,0144	0,0121	0,0100	0,0081	0,0064	0,0049	0,0035	0,0022	0,0011
moles A	0,0019	0,0041	0,0066	0,0096	0,0133	0,0178	0,0235	0,0309	0,0410
moles D	0,0169	0,0162	0,0154	0,0145	0,0133	0,0119	0,0101	0,0077	0,0046
moles E	0,0017	0,0017	0,0017	0,0017	0,0017	0,0017	0,0017	0,0017	0,0017
<b>Qinicial</b>	<b>0,0123</b>	<b>0,0625</b>	<b>0,1837</b>	<b>0,4444</b>	<b>1,0000</b>	<b>2,2499</b>	<b>5,4443</b>	<b>15,9995</b>	<b>80,9973</b>
ml NaOH (1M)	11,5000	9,7100	7,9600	6,2400	4,5400	2,8400	2,2700	4,0700	6,0300
$\xi$	0,0098	0,0080	0,0063	0,0045	0,0028	0,0011	0,0006	0,0024	0,0043
moles B	0,0114	0,0110	0,0105	0,0099	0,0093	0,0085	0,0076	0,0065	0,0053
moles C	0,0046	0,0041	0,0037	0,0036	0,0036	0,0037	0,0041	0,0046	0,0054
moles A	0,0117	0,0121	0,0129	0,0142	0,0161	0,0190	0,0229	0,0286	0,0367
moles D	0,0071	0,0082	0,0091	0,0099	0,0105	0,0107	0,0107	0,0101	0,0089
<b>keq</b>	<b>4,0643</b>	<b>4,0110</b>	<b>4,0091</b>	<b>4,0080</b>	<b>4,0097</b>	<b>4,0090</b>	<b>4,0009</b>	<b>4,0017</b>	<b>4,0125</b>

Fuente: elaboración propia.

#### C.4. Destilación fraccionada

##### Destilación fraccionada

Corrida 1										
Mezcla orgánica	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tebullición	73,4	73,9	74,2	74,5	74,9	75,2	75,6	76,1	76,5	76,7
Volumen (ml)	9,200	9,500	8,600	11,100	8,500	10,2000	10,500	7,400	8,600	9,000
Masa (g)	7,965	8,242	7,486	9,75	7,476	9,002	9,302	6,568	7,648	8,015
Densidad (g/ml)	0,866	0,868	0,87	0,878	0,88	0,883	0,886	0,888	0,889	0,891
Xa	0,647	0,663	0,679	0,743	0,759	0,783	0,807	0,824	0,832	0,848

Fuente: elaboración propia.

### Destilación fraccionada

Corrida 2										
Mezcla orgánica	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tebullición	73,2	73,9	74,1	74,3	75	75,2	75,7	76,3	76,4	76,6
Volumen (ml)	10,000	10,400	8,800	8,500	9,100	8,600	10,500	9,000	6,000	9,000
Masa (g)	8,670	9,025	7,649	7,452	8,014	7,601	9,302	7,981	5,349	8,015
Densidad (g/ml)	0,867	0,868	0,869	0,877	0,881	0,884	0,886	0,887	0,892	0,891
Xa	0,655	0,663	0,671	0,735	0,767	0,791	0,807	0,816	0,856	0,848

Fuente: elaboración propia.

### Destilación fraccionada

Corrida 3										
Mezcla orgánica	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tebullición	73,3	74	74,3	74,5	75,1	75,4	75,8	76,2	76,3	76,7
Volumen (ml)	10,500	7,300	5,200	9,300	10,200	9,500	5,400	6,500	7,700	8,500
Masa (g)	9,086	6,331	4,526	8,109	8,982	8,402	4,781	5,781	6,872	7,608
Densidad (g/ml)	0,865	0,867	0,87	0,872	0,881	0,884	0,885	0,889	0,892	0,895
Xa	0,639	0,655	0,679	0,695	0,767	0,791	0,799	0,832	0,856	0,880

Fuente: elaboración propia.

## C.5. Equilibrio binario. Líquido-vapor

### Datos calculados. Equilibrio binario. Líquido-vapor

	T (°C)	77,1	76,8	75	73,3	72,1	73,1	73,9	75	76,8	78,1	78,4
DENSIDAD	LÍQUIDO		0,903	0,889	0,873	0,846	0,821	0,810	0,802	0,792	0,787	
	VAPOR		0,891	0,874	0,863	0,857	0,845	0,836	0,823	0,811	0,797	
FRACCIÓN MOLAR	LÍQUIDO	1,000	0,960	0,846	0,716	0,496	0,292	0,202	0,137	0,056	0,015	0,000
	VAPOR	1,000	0,862	0,724	0,634	0,585	0,488	0,414	0,308	0,211	0,096	0,000

Fuente: elaboración propia.

## Apéndice D. Análisis de error

### D.1. Metodología de cálculo

#### D.1.1. Análisis de varianzas (ANOVA). Calculando F:

- Calcular la sumatoria de todos los datos:

$$\bar{y}_{..} = \frac{\sum_{ij} y_{ij}}{N}$$

N= repeticiones x tratamientos= unidades experimentales

- Calcular suma total de cuadrados (TSS):

$$TSS = \sum_{ij} (y_{ij} - \bar{y}_{..})^2$$

- Suma de cuadrados de los tratamientos (SST):

n= número de repeticiones

$$SST = n \sum_i (\bar{y}_i - \bar{y}_{..})^2$$

- Suma de cuadrados del error (SSE):

$$SSE = \sum_{ij} (y_{ij} - \bar{y}_i.)^2$$

#### D.1.2. Análisis de incertidumbre

Y que su incertidumbre será:

$$\Delta y = \left| \frac{\delta y}{\delta x_1} \right| \Delta x_1 + \left| \frac{\delta y}{\delta x_2} \right| \Delta x_2 + \left| \frac{\delta y}{\delta x_3} \right| \Delta x_3 + \dots + \left| \frac{\delta y}{\delta x_{1n}} \right| \Delta x_n$$

Corrida 1: Calculando la incertidumbre de la densidad a partir de las medidas de masa y volumen.

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Encontrando el diferencial total para la incertidumbre de la densidad:

$$\Delta \rho = \left( \frac{\partial \rho}{\partial m} \right) \Delta m + \left( \frac{\partial \rho}{\partial V} \right) \Delta V$$

$$\Delta \rho = \left( \frac{1}{V} \right) \Delta m + \left( \frac{m}{V^2} \right) \Delta V$$

$$\Delta \rho = \left( \frac{1}{10} \right) (0.001) + \left( \frac{7.9810}{(10)^2} \right) (0.01)$$

$$\Delta \rho = 0.07991$$

### D.1.3. Número de repeticiones

$$n = \left[ \frac{z_{\alpha/2} \sigma}{E} \right]^2$$

Donde:

$n$  = número de tratamientos = número de muestras = número de repeticiones

$z_{\alpha/2}$  = valor tabla de la distribución  $z$

$E$  = error por estimación (incertidumbre del dato)

$\sigma$  = desviación estandar poblacional

$z_{\alpha/2} = 1.96$  (encontrado en la tabla siguiente),  $\sigma = 0.0101533$ ,  $E = 0.07991$

$$n = \left[ \frac{(1.96)(0.008544)}{(0.008981)} \right]^2 = 3.47 \approx 4 \text{ repeticiones}$$

Comparar el número de repeticiones sugeridas por esta ecuación con la estipulada en el procedimiento experimental.

## D.2. Datos calculados del análisis de error

### D.2.1. Curva de calibración

#### ANOVA Curva de calibración

ANÁLISIS DE VARIANZA						
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	0,02647	8	0,003309	1267,240	3,7785E-23	2,510
Dentro de los grupos	4,70E-05	18	2,6111E-06			
<b>Total</b>	0,02652	26				

Fuente: elaboración propia.

### D.2.2. Equilibrio ternario. Líquido-líquido

#### D.2.2.1. Curva de solubilidad de referencia

#### ANOVA. Curva de solubilidad de referencia

ANÁLISIS DE VARIANZA						
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	0,006731	8	0,0008414	0,066389	0,9998073	2,069832
Dentro de los grupos	0,912511	72	0,0126738			
<b>Total</b>	0,919242	80				

Fuente: elaboración propia.

### D.2.2.2. Sobresaturación de agua destilada

#### ANOVA. Sobresaturación de agua destilada

ANÁLISIS DE VARIANZA						
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	309,791111	5	61,95822	1922,84138	5,49396E-17	3,10588
Dentro de los grupos	0,38666667	12	0,03222			
Total	310,177778	17				

Fuente: elaboración propia.

### D.2.2.3. Etanol absoluto agregado hasta generar una fase

#### ANOVA. Etanol absoluto agregado

ANÁLISIS DE VARIANZA						
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	2,49166667	4	0,62291667	287,5	2,83616E-10	3,47804969
Dentro de los grupos	0,02166667	10	0,00216667			
Total	2,51333333	14				

Fuente: elaboración propia.

### D.2.3. Equilibrio químico

#### D.2.3.1. Moles finales agregados de todas las especies

#### ANOVA. Equilibrio químico. Moles finales

ANÁLISIS DE VARIANZA						
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	0,0011003	3	0,00036677	18,320215	4,22034E-07	2,90111958
Dentro de los grupos	0,00064063	32	2,002E-05			
Total	0,00174093	35				

Fuente: elaboración propia.

#### D.2.3.2. Moles finales agregados de todas las especies y la Keq generada

#### ANOVA. Equilibrio químico Keq

ANÁLISIS DE VARIANZA						
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	0,00050548	8	6,3185E-05	1,971E-05	1	2,20851807
Dentro de los grupos	115,409367	36	3,20581574			
Total	115,409872	44				

Fuente: elaboración propia.

D.2.4. Destilación fraccionada

**ANOVA. Destilación fraccionada**

<b>ANÁLISIS DE VARIANZA</b>						
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	34,8203333	9	3,86892593	414,527778	9,99524E-21	2,39281411
Dentro de los grupos	0,18666667	20	0,00933333			
Total	35,007	29				

Fuente: elaboración propia.

D.2.5. Equilibrio binario. Líquido-vapor

**ANOVA. Equilibrio binario. Líquido-vapor**

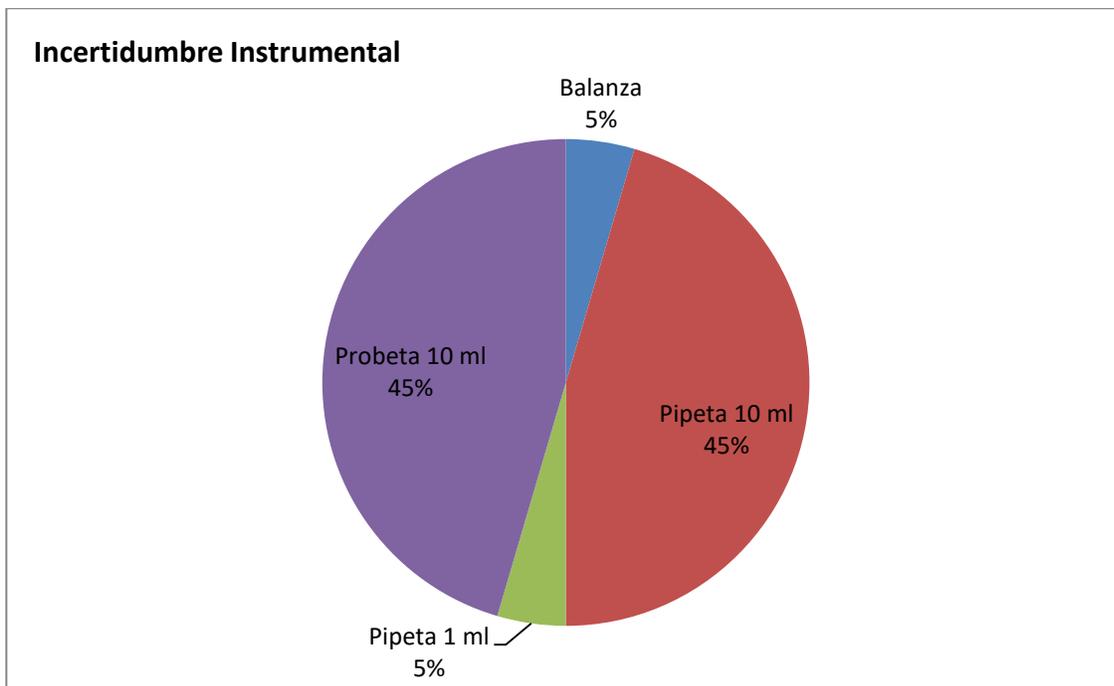
<b>ANÁLISIS DE VARIANZA</b>						
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	0,021536	8	0,002692	17,6588921	0,00012106	3,22958261
Dentro de los grupos	0,001372	9	0,00015244			
Total	0,022908	17				

Fuente: elaboración propia.

## D.2.6. Incertidumbre instrumental

Se desarrollará el pastel correspondiente a la incertidumbre basado en su porcentaje específico.

**Gráfico de incerteza instrumental**



Fuente: elaboración propia.

## D.2.7. Error por incertidumbre

D.2.7.1. Incertidumbre para aquellos procesos que impliquen equilibrio binario líquido-vapor.

### **Incertidumbre. Equilibrio binario. Líquido-vapor**

<b>Xb</b>	<b>0,1</b>	<b>0,2</b>	<b>0,3</b>	<b>0,4</b>	<b>0,5</b>	<b>0,6</b>	<b>0,7</b>	<b>0,8</b>	<b>0,9</b>
<b>dp</b>	0,04045	0,04120	0,04215	0,04275	0,04300	0,04410	0,04430	0,04475	0,04515
<b>dXb</b>	0,32961	0,33572	0,34346	0,34835	0,35039	0,35935	0,36098	0,36465	0,36790

Fuente: elaboración propia.

D.2.7.2. Incertidumbre para equilibrio ternario. Líquido-líquido

### **Incertidumbre. Equilibrio ternario. Líquido-líquido**

<b>Xa</b>	<b>Xb</b>	<b>dna</b>	<b>dnb</b>	<b>dnc</b>	<b>dXa</b>	<b>dXb</b>	<b>dXc</b>
<b>0,1</b>	<b>0,9</b>	0,00458	0,01859	0,00158	0,130911	0,04228	0,049801
<b>0,2</b>	<b>0,8</b>	0,00638	0,01659	0,00305	0,116125	0,06006	0,056911
<b>0,3</b>	<b>0,7</b>	0,00819	0,01458	0,00471	0,103006	0,07257	0,06152
<b>0,4</b>	<b>0,6</b>	0,00999	0,01258	0,00559	0,093238	0,08115	0,065969
<b>0,5</b>	<b>0,5</b>	0,01180	0,01058	0,00579	0,084768	0,08852	0,071309
<b>0,6</b>	<b>0,4</b>	0,01360	0,00858	0,00687	0,075722	0,09326	0,073747
<b>0,7</b>	<b>0,3</b>	0,01541	0,00657	0,00628	0,066913	0,10026	0,08104
<b>0,8</b>	<b>0,2</b>	0,01721	0,00457	0,00530	0,05585	0,10850	0,090847
<b>0,9</b>	<b>0,1</b>	0,01904	0,00257	0,00471	0,043035	0,11556	0,099919

Fuente: elaboración propia.

### D.2.7.3. Incertidumbre para equilibrio químico

#### **Incertidumbre equilibrio químico**

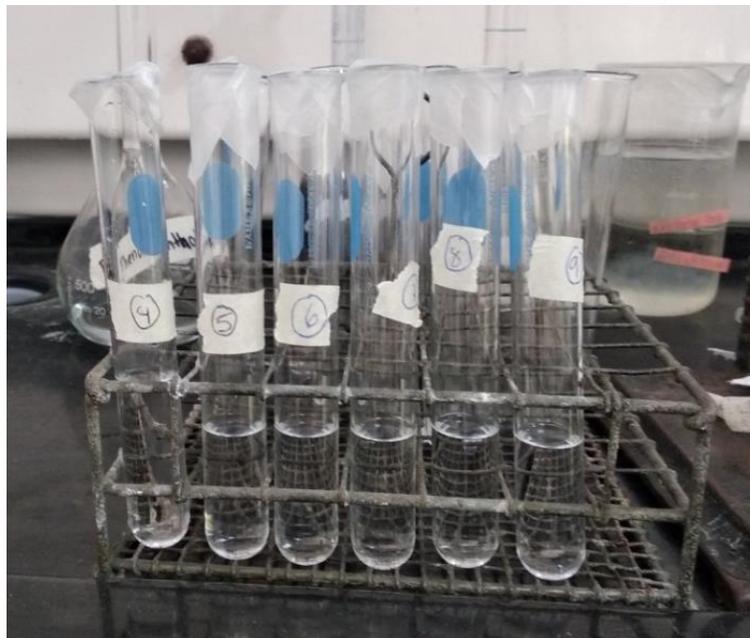
<b>Xb</b>	<b>0,1</b>	<b>0,2</b>	<b>0,3</b>	<b>0,4</b>	<b>0,5</b>	<b>0,6</b>	<b>0,7</b>	<b>0,8</b>	<b>0,9</b>
<b>dna</b>	0,007788	0,007788	0,007788	0,007788	0,007788	0,007788	0,007788	0,007788	0,007788
<b>dnb</b>	0,001592	0,001592	0,001592	0,001592	0,001592	0,001592	0,001592	0,001592	0,001592
<b>dnc</b>	0,002981	0,002981	0,002981	0,002981	0,002981	0,002981	0,002981	0,002981	0,002981
<b>dcd</b>	0,002336	0,002336	0,002336	0,002336	0,002336	0,002336	0,002336	0,002336	0,002336
<b>dQc</b>	0,067727	0,17752	0,367817	0,725901	1,475191	3,290365	8,776176	33,141	296,706

Fuente: elaboración propia.

## Apéndice E. **Imágenes de experimentación**

Fotografías tomada en el Laboratorio de Físicoquímica de la Escuela de Ingeniería Química. Facultad de Ingeniería. Universidad de San Carlos de Guatemala. Ubicado en el tercer nivel del edificio T-5.

### **Curva de calibración**



Fuente: elaboración propia.

## Equilibrio ternario. Líquido-líquido



Fuente: elaboración propia.

## Equilibrio químico en fase líquida



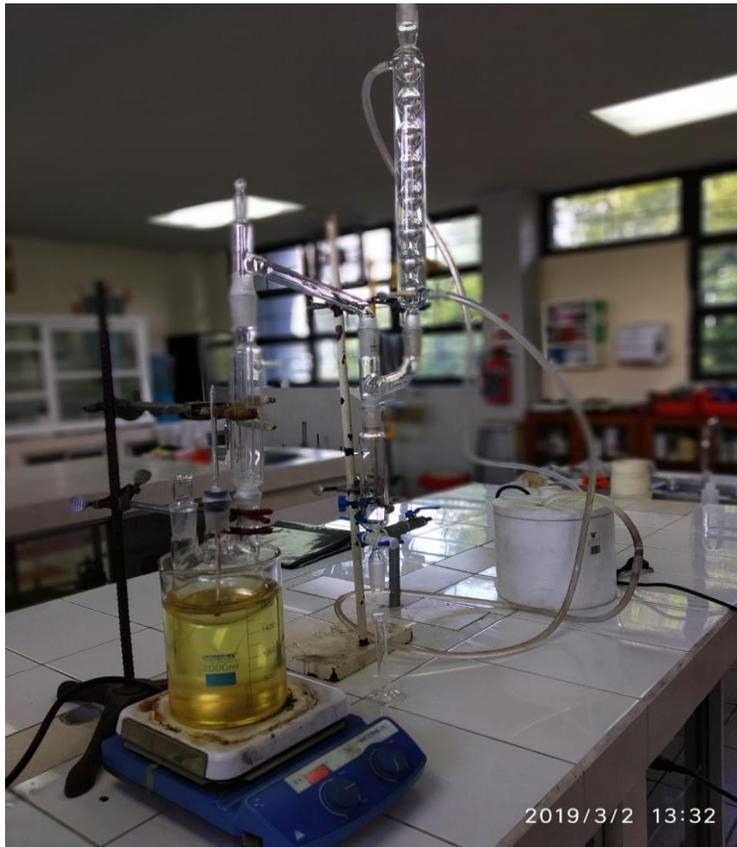
Fuente: elaboración propia.

## Destilación fraccionada. Purificación de orgánicos



Fuente: elaboración propia.

## Equilibrio binario. Líquido-vapor



Fuente: elaboración propia.

## ANEXOS

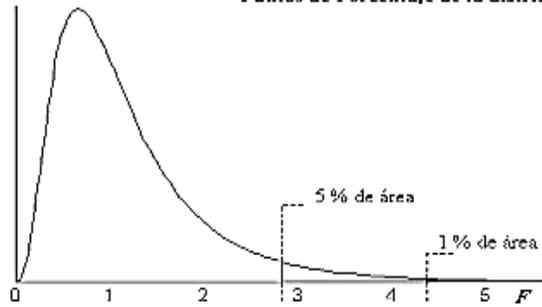
### Cálculo de ANOVA

	SS	Grados de libertad	Medias	F	F <sub>crítica</sub>
Tratamientos	SST	t-1	$MST = \frac{SST}{t-1}$	$F = \frac{MST}{MSE}$	Si $\alpha = 0.05$
Error	SSE	N-t	$MSE = \frac{SSE}{N-t}$		Izquierda error
Total	TSS	N-1			Superior Tratamientos

Fuente: Sáez. *Apuntes de estadística para ingenieros*, 2012, p.168.

## Distribución F de Fisher

**Puntos de Porcentaje de la distribución F**



**Ejemplo:**

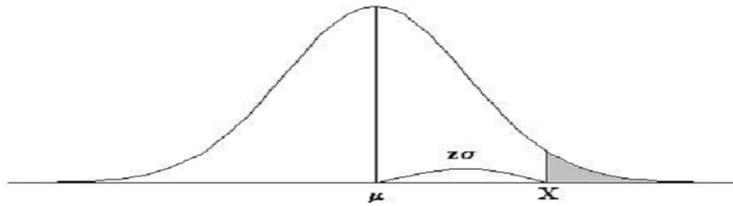
Para  $n_1 = 9, n_2 = 12$  grados de libertad:  
 $P\{F > 2.80\} = 0.05$   
 $P\{F > 4.39\} = 0.01$

$n_2$	5 % (normal) y 1 % (negritas) puntos para la distribución de F																										$n_2$
	n1 grados de libertad (para el mayor cuadrado medio)																										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14	16	20	24	30	40	50	75	100	200	500	$\infty$			
1	161	199	216	225	230	234	237	239	241	242	243	244	245	246	248	249	250	251	252	253	253	254	254	254	1		
2	<b>4052</b>	<b>4999</b>	<b>5404</b>	<b>5624</b>	<b>5764</b>	<b>5859</b>	<b>5928</b>	<b>5981</b>	<b>6022</b>	<b>6056</b>	<b>6083</b>	<b>6107</b>	<b>6143</b>	<b>6170</b>	<b>6209</b>	<b>6234</b>	<b>6260</b>	<b>6288</b>	<b>6302</b>	<b>6324</b>	<b>6334</b>	<b>6350</b>	<b>6360</b>	<b>6366</b>	2		
3	18.51	19.00	19.16	19.25	19.30	19.33	19.35	19.37	19.38	19.40	19.40	19.41	19.42	19.43	19.45	19.45	19.46	19.47	19.48	19.48	19.49	19.49	19.49	19.50	3		
4	<b>98.50</b>	<b>99.00</b>	<b>99.16</b>	<b>99.25</b>	<b>99.30</b>	<b>99.33</b>	<b>99.36</b>	<b>99.38</b>	<b>99.39</b>	<b>99.40</b>	<b>99.41</b>	<b>99.42</b>	<b>99.43</b>	<b>99.44</b>	<b>99.45</b>	<b>99.46</b>	<b>99.47</b>	<b>99.48</b>	<b>99.48</b>	<b>99.49</b>	<b>99.49</b>	<b>99.49</b>	<b>99.50</b>	<b>99.50</b>	4		
5	10.13	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.81	8.79	8.78	8.74	8.71	8.69	8.66	8.64	8.62	8.59	8.58	8.56	8.55	8.54	8.53	8.53	5		
6	<b>34.12</b>	<b>30.82</b>	<b>29.46</b>	<b>28.71</b>	<b>28.24</b>	<b>27.91</b>	<b>27.67</b>	<b>27.49</b>	<b>27.34</b>	<b>27.23</b>	<b>27.13</b>	<b>27.05</b>	<b>26.92</b>	<b>26.83</b>	<b>26.69</b>	<b>26.60</b>	<b>26.50</b>	<b>26.41</b>	<b>26.35</b>	<b>26.28</b>	<b>26.24</b>	<b>26.18</b>	<b>26.15</b>	<b>26.13</b>	6		
7	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6.00	5.96	5.94	5.91	5.87	5.84	5.80	5.77	5.75	5.72	5.70	5.68	5.66	5.65	5.64	5.63	7		
8	<b>21.20</b>	<b>18.00</b>	<b>16.89</b>	<b>15.98</b>	<b>15.52</b>	<b>15.21</b>	<b>14.98</b>	<b>14.80</b>	<b>14.66</b>	<b>14.55</b>	<b>14.45</b>	<b>14.37</b>	<b>14.25</b>	<b>14.15</b>	<b>14.02</b>	<b>13.93</b>	<b>13.84</b>	<b>13.75</b>	<b>13.69</b>	<b>13.61</b>	<b>13.58</b>	<b>13.49</b>	<b>13.46</b>	<b>13.46</b>	8		
9	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77	4.74	4.70	4.68	4.64	4.60	4.56	4.53	4.50	4.48	4.44	4.42	4.41	4.39	4.37	4.37	9		
10	<b>16.26</b>	<b>13.27</b>	<b>12.06</b>	<b>11.39</b>	<b>10.97</b>	<b>10.67</b>	<b>10.46</b>	<b>10.29</b>	<b>10.16</b>	<b>10.05</b>	<b>9.96</b>	<b>9.89</b>	<b>9.77</b>	<b>9.68</b>	<b>9.55</b>	<b>9.47</b>	<b>9.38</b>	<b>9.29</b>	<b>9.24</b>	<b>9.17</b>	<b>9.13</b>	<b>9.08</b>	<b>9.04</b>	<b>9.02</b>	10		
11	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.10	4.06	4.03	4.00	3.96	3.92	3.87	3.84	3.81	3.77	3.75	3.73	3.71	3.69	3.68	3.67	11		
12	<b>13.75</b>	<b>10.92</b>	<b>9.78</b>	<b>9.15</b>	<b>8.75</b>	<b>8.47</b>	<b>8.26</b>	<b>8.10</b>	<b>7.98</b>	<b>7.87</b>	<b>7.79</b>	<b>7.72</b>	<b>7.60</b>	<b>7.52</b>	<b>7.40</b>	<b>7.31</b>	<b>7.23</b>	<b>7.14</b>	<b>7.09</b>	<b>7.02</b>	<b>6.99</b>	<b>6.93</b>	<b>6.90</b>	<b>6.88</b>	12		
13	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.68	3.64	3.60	3.57	3.53	3.49	3.44	3.41	3.38	3.34	3.32	3.29	3.27	3.25	3.24	3.23	13		
14	<b>12.25</b>	<b>9.55</b>	<b>8.45</b>	<b>7.85</b>	<b>7.46</b>	<b>7.19</b>	<b>6.99</b>	<b>6.84</b>	<b>6.72</b>	<b>6.62</b>	<b>6.54</b>	<b>6.47</b>	<b>6.36</b>	<b>6.28</b>	<b>6.16</b>	<b>6.07</b>	<b>5.99</b>	<b>5.91</b>	<b>5.86</b>	<b>5.79</b>	<b>5.75</b>	<b>5.70</b>	<b>5.67</b>	<b>5.65</b>	14		
15	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.39	3.35	3.31	3.28	3.24	3.20	3.15	3.12	3.08	3.04	3.02	2.99	2.97	2.95	2.94	2.93	15		
16	<b>11.26</b>	<b>8.65</b>	<b>7.59</b>	<b>7.01</b>	<b>6.63</b>	<b>6.37</b>	<b>6.18</b>	<b>6.03</b>	<b>5.91</b>	<b>5.81</b>	<b>5.73</b>	<b>5.67</b>	<b>5.56</b>	<b>5.48</b>	<b>5.36</b>	<b>5.28</b>	<b>5.20</b>	<b>5.12</b>	<b>5.07</b>	<b>5.00</b>	<b>4.96</b>	<b>4.91</b>	<b>4.88</b>	<b>4.86</b>	16		
17	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.18	3.14	3.10	3.07	3.03	2.99	2.94	2.90	2.86	2.83	2.80	2.77	2.76	2.73	2.72	2.71	17		
18	<b>10.56</b>	<b>8.02</b>	<b>6.99</b>	<b>6.42</b>	<b>6.06</b>	<b>5.80</b>	<b>5.61</b>	<b>5.47</b>	<b>5.35</b>	<b>5.26</b>	<b>5.18</b>	<b>5.11</b>	<b>5.01</b>	<b>4.92</b>	<b>4.81</b>	<b>4.73</b>	<b>4.65</b>	<b>4.57</b>	<b>4.52</b>	<b>4.45</b>	<b>4.41</b>	<b>4.36</b>	<b>4.33</b>	<b>4.31</b>	18		
19	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	3.02	2.98	2.94	2.91	2.86	2.83	2.77	2.74	2.70	2.66	2.64	2.60	2.59	2.56	2.55	2.54	19		
20	<b>10.04</b>	<b>7.56</b>	<b>6.55</b>	<b>5.99</b>	<b>5.64</b>	<b>5.39</b>	<b>5.20</b>	<b>5.06</b>	<b>4.94</b>	<b>4.85</b>	<b>4.77</b>	<b>4.71</b>	<b>4.60</b>	<b>4.52</b>	<b>4.41</b>	<b>4.33</b>	<b>4.25</b>	<b>4.17</b>	<b>4.12</b>	<b>4.05</b>	<b>4.01</b>	<b>3.96</b>	<b>3.93</b>	<b>3.91</b>	20		

Fuente: Rustom, J. *Estadística descriptiva, probabilidad e inferencia*, 2012, p. 194

## Distribución normal

Áreas bajo la curva normal



**Ejemplo:**

$$Z = \frac{X - \mu}{\sigma}$$

$$P[Z > 1] = 0.1587$$

$$P[Z > 1.96] = 0.0250$$

Desv. normal x	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.0	0.5000	0.4960	0.4920	0.4880	0.4840	0.4801	0.4761	0.4721	0.4681	0.4641
0.1	0.4602	0.4562	0.4522	0.4483	0.4443	0.4404	0.4364	0.4325	0.4286	0.4247
0.2	0.4207	0.4168	0.4129	0.4090	0.4052	0.4013	0.3974	0.3936	0.3897	0.3859
0.3	0.3821	0.3783	0.3745	0.3707	0.3669	0.3632	0.3594	0.3557	0.3520	0.3483
0.4	0.3446	0.3409	0.3372	0.3336	0.3300	0.3264	0.3228	0.3192	0.3156	0.3121
0.5	0.3085	0.3050	0.3015	0.2981	0.2946	0.2912	0.2877	0.2843	0.2810	0.2776
0.6	0.2743	0.2709	0.2676	0.2643	0.2611	0.2578	0.2546	0.2514	0.2483	0.2451
0.7	0.2420	0.2389	0.2358	0.2327	0.2296	0.2266	0.2236	0.2206	0.2177	0.2148
0.8	0.2119	0.2090	0.2061	0.2033	0.2005	0.1977	0.1949	0.1922	0.1894	0.1867
0.9	0.1841	0.1814	0.1788	0.1762	0.1736	0.1711	0.1685	0.1660	0.1635	0.1611
1.0	0.1587	0.1562	0.1539	0.1515	0.1492	0.1469	0.1446	0.1423	0.1401	0.1379
1.1	0.1357	0.1335	0.1314	0.1292	0.1271	0.1251	0.1230	0.1210	0.1190	0.1170
1.2	0.1151	0.1131	0.1112	0.1093	0.1075	0.1056	0.1038	0.1020	0.1003	0.0985
1.3	0.0968	0.0951	0.0934	0.0918	0.0901	0.0885	0.0869	0.0853	0.0838	0.0823
1.4	0.0808	0.0793	0.0778	0.0764	0.0749	0.0735	0.0721	0.0708	0.0694	0.0681
1.5	0.0668	0.0655	0.0643	0.0630	0.0618	0.0606	0.0594	0.0582	0.0571	0.0559
1.6	0.0548	0.0537	0.0526	0.0516	0.0505	0.0495	0.0485	0.0475	0.0465	0.0455
1.7	0.0446	0.0436	0.0427	0.0418	0.0409	0.0401	0.0392	0.0384	0.0375	0.0367
1.8	0.0359	0.0351	0.0344	0.0336	0.0329	0.0322	0.0314	0.0307	0.0301	0.0294
1.9	0.0287	0.0281	0.0274	0.0268	0.0262	0.0256	0.0250	0.0244	0.0239	0.0233
2.0	0.0228	0.0222	0.0217	0.0212	0.0207	0.0202	0.0197	0.0192	0.0188	0.0183
2.1	0.0179	0.0174	0.0170	0.0166	0.0162	0.0158	0.0154	0.0150	0.0146	0.0143
2.2	0.0139	0.0136	0.0132	0.0129	0.0125	0.0122	0.0119	0.0116	0.0113	0.0110
2.3	0.0107	0.0104	0.0102	0.0099	0.0096	0.0094	0.0091	0.0089	0.0087	0.0084
2.4	0.0082	0.0080	0.0078	0.0075	0.0073	0.0071	0.0069	0.0068	0.0066	0.0064
2.5	0.0062	0.0060	0.0059	0.0057	0.0055	0.0054	0.0052	0.0051	0.0049	0.0048
2.6	0.0047	0.0045	0.0044	0.0043	0.0041	0.0040	0.0039	0.0038	0.0037	0.0036
2.7	0.0035	0.0034	0.0033	0.0032	0.0031	0.0030	0.0029	0.0028	0.0027	0.0026
2.8	0.0026	0.0025	0.0024	0.0023	0.0023	0.0022	0.0021	0.0021	0.0020	0.0019
2.9	0.0019	0.0018	0.0018	0.0017	0.0016	0.0016	0.0015	0.0015	0.0014	0.0014
3.0	0.0013	0.0013	0.0013	0.0012	0.0012	0.0011	0.0011	0.0011	0.0010	0.0010

Fuente: Sáez. *Apuntes de estadística para ingenieros*, 2012, p. 90.