



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**ESTUDIO PARA LA GENERACIÓN DE DATOS A NIVEL DE LABORATORIO
DEL SISTEMA TERNARIO GLICEROL -BIODIESEL-AGUA EN EQUILIBRIO
LÍQUIDO-LÍQUIDO A DOS TEMPERATURAS Y 640 mm Hg, PARA UNA
MUESTRA DE BIODIESEL ELABORADO CON ACEITES USADOS DE
RESTAURANTES DE COMIDA RÁPIDA**

Maria Gabriela Hernández Castellanos

Asesorado por el Ing. Qco. César Alfonso García Guerra

Guatemala, mayo de 2009

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESTUDIO PARA LA GENERACIÓN DE DATOS A NIVEL DE LABORATORIO
DEL SISTEMA TERNARIO GLICEROL -BIODIESEL-AGUA EN EQUILIBRIO
LÍQUIDO-LÍQUIDO A DOS TEMPERATURAS Y 640 mm Hg, PARA UNA
MUESTRA DE BIODIESEL ELABORADO CON ACEITES USADOS DE
RESTAURANTES DE COMIDA RÁPIDA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR:

MARÍA GABRIELA HERNÁNDEZ CASTELLANOS

ASESORADO POR EL INGENIERO CÉSAR ALFONSO GARCÍA GUERRA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA QUÍMICA

GUATEMALA, MAYO DE 2009

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE LA JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II	Inga. Alba Maritza Guerrero de López
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. José Milton De León Bran
VOCAL V	Br. Isaac Sultán Mejía
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Carlos Salvador Wong Davi
EXAMINADOR	Ing. Manuel Gilberto Galván Estrada
EXAMINADOR	Ing. Jaime Domingo Carranza Gonzáles
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

ESTUDIO PARA LA GENERACIÓN DE DATOS A NIVEL DE LABORATORIO DEL SISTEMA TERNARIO GLICEROL -BIODIESEL-AGUA EN EQUILIBRIO LÍQUIDO-LÍQUIDO A DOS TEMPERATURAS Y 640 mm Hg, PARA UNA MUESTRA DE BIODIESEL ELABORADO CON ACEITES USADOS DE RESTAURANTES DE COMIDA RÁPIDA,

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, el 24 de septiembre de 2008.

María Gabriela Hernández Castellanos

ACTO QUE DEDICO A:

DIOS	Por acompañarme siempre en momentos de dificultad, por brindarme salud, bienestar físico y espiritual.
Mis padres	Lisette y Raúl Porque gracias a su cariño, guía y apoyo incondicional he llegado a culminar mi carrera profesional.
Mis hermanas	Any y Andrea Por su cariño y apoyo.
Mis sobrinas	Shannon y Susan
La Universidad de San Carlos de Guatemala	Por la formación académica recibida.

AGRADECIMIENTOS A:

Mis abuelos	Por su cariño y apoyo.
Oscar Méndez	Por apoyarme y comprenderme, por ayudarme a crecer como persona y llenar mi vida de alegría.
Mis amigos	Natalia, Jeaneth, Carmencita, Tere, Karen, Cecilia, Wendy, Beatriz, Mario, Alexis, Erik, Pablo, Ricardo, Macario, José Carlos, Eddy. Gracias por su amistad y por compartir buenos y malos momentos durante el transcurso de la carrera.
Sección de metales	Ing. Pablo, Claudia, Abner, Emerson. Gracias por su apoyo y amistad.
Ing. César García	Por su guía y sabiduría durante el desarrollo de este trabajo.
Inga. Telma Cano	Gracias por su apoyo y amistad.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	XVII
GLOSARIO	XIX
RESUMEN	XXIII
OBJETIVOS	XXV
HIPÓTESIS	XXVII
INTRODUCCIÓN	XXIX
1. MARCO TEÓRICO	1
1.1 Extracción líquido-líquido	1
1.1.1 Relaciones de equilibrio en la extracción	2
1.1.1.1 Regla de las fases	2
1.1.1.2 Equilibrio de fases	2
1.1.1.3 Coeficientes de distribución	3
1.1.2 Equilibrio líquido	3
1.1.3 Métodos de representación gráfica del equilibrio ternario	3
1.1.3.1 Coordenadas triangulares equiláteras	4
1.1.4 Sistemas ternarios de interés en la extracción en fase líquida	6
1.1.4.1 Tipo I. Formación de un par de líquidos parcialmente miscibles	7
1.1.4.2 Tipo II. Formación de dos pares de líquidos parcialmente miscibles	8

1.1.4.3	Tipo III. Formación de tres pares de líquidos parcialmente miscibles	9
1.1.4.4	Tipo IV. Formación de fases sólidas	10
1.1.5	Efecto de la temperatura sobre el sistema ternario	10
1.1.6	Efecto de la presión	11
1.1.7	Curvas de distribución	12
1.1.8	Propiedades deseables del disolvente	13
1.1.8.1	Selectividad	13
1.1.8.2	Recuperabilidad	13
1.1.8.3	Coefficiente de distribución	14
1.1.8.4	Capacidad	14
1.1.8.5	Solubilidad del disolvente	14
1.1.8.6	Densidad	14
1.1.8.7	Tensión interfacial	15
1.1.8.8	Toxicidad	15
1.1.9	Ejemplos de diagramas ternarios	16
1.2	Biodiesel	17
1.2.1	Definición de biodiesel	17
1.2.2	Materias primas para la obtención de biodiesel	17
1.2.2.1	Características químicas de aceites vegetales y Biodiesel	17
1.2.2.2	Alcoholes	20
1.2.2.3	Las reacciones de transesterificación	21
1.2.3	Proceso de obtención de biodiesel	23
1.2.3.1	Los co-productos y sub-productos de la producción de biodiesel	26
1.2.4	Teoría de lavado de biodiesel	27
1.2.4.1	Métodos de lavado	28
1.2.5	Propiedades de caracterización de biodiesel	30

1.2.5.1	Punto de inflamación	30
1.2.5.2	Viscosidad	30
1.2.5.3	Densidad	31
1.2.5.4	Cenizas sulfatadas	31
1.2.5.5	Azufre	31
1.2.5.6	Número de cetano	31
1.2.5.7	Índice de yodo	32
1.2.5.8	Punto de nube	32
1.2.5.9	Agua y sedimentos	32
1.2.5.10	Residuo carbonoso	32
1.2.5.11	Número ácido, TAN	33
1.2.5.12	Contenido en metales (Na, K, P,..) y ácidos grasos	33
1.2.5.13	Glicerina libre	33
1.2.5.14	Glicerina total	33
1.2.5.15	Contenido de alcohol	34
1.2.5.16	Balance hidrófilo-lipófilo (BHL)	34
1.2.6	La calidad del biodiesel	35
1.3	Refractometría	37
1.3.1	Teoría básica	37
1.3.2	Leyes de refracción	38
1.3.3	Índice de refracción	39
1.4	Características físicas y químicas generales de los solventes puros a utilizar	40
2.	METODOLOGÍA	43
2.1	Recursos y materiales	43
2.1.1	Localización	43
2.1.2	Recursos Humanos	43
2.1.3	Recursos materiales	43

2.1.3.1	Reactivos	43
2.1.3.2	Equipo y cristalería	43
2.1.3.3	Material de escritorio	45
2.2	Metodología experimental	45
2.2.1	Procedimiento para el lavado de biodiesel	47
2.2.2	Procedimiento experimental para el sistema líquido- líquido glicerol-biodiesel-agua.	47
2.2.3	Método para la elaboración de la curva de solubilidad	49
2.2.3.1	Determinación de densidad	49
2.2.3.2	Determinación del índice de refracción	49
2.2.4	Método para la determinación del balance hidrófilo-lipófilo	50
2.2.4.1	Índice de acidez basado en el método oficial AOC S 5a – 40	50
2.2.4.2	Índice de saponificación basado en el método oficial AOC S Cd 8-53	50
2.2.5	Análisis Estadístico	51
2.2.6	Generación de datos	51
2.2.7	Manejo de desechos líquidos	51
3.	RESULTADOS	55
4.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	73
	CONCLUSIONES	83
	RECOMENDACIONES	85
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87
	REFERENCIAS ELECTRÓNICAS	91
	APÉNDICE 1: Datos originales	93
	APÉNDICE 2: Datos calculados	103
	APÉNDICE 3: Muestra de cálculo	121
	APÉNDICE 4: Calibración del picnómetro	131

APÉNDICE 5: Presupuesto de la investigación	133
APÉNDICE 6: Impactos ambientales que pueden ser generados durante la investigación	137
APÉNDICE 7: Diagrama de requerimiento académico para la elaboración de tesis de extracción líquido-líquido en la carrera de Ingeniería Química	141
Diagrama de causa y efecto para determinar las variables en un proceso de extracción	142
Fotografías de la investigación	143

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1	Operación de extracción líquido-líquido	2
2	Diagrama de equilibrio ternario	4
3	Coordenadas para un diagrama triangular	5
4	Diagrama de fases líquido – líquido en el que los componentes A y B son parcialmente miscibles	6
5	Sistema de tres líquidos, A y B parcialmente miscibles	8
6	Sistema de tres líquidos, A-B y B-C parcialmente miscibles	9
7	Diagramas de sistemas ternarios con tres pares parcialmente miscibles	10
8	Efecto de la temperatura en los equilibrios ternarios	11
9	Curvas de distribución	12
10	Diagrama de fases ternario Etilenglicol-Furfal-Agua a 25°C	16
11	Diagrama de fases ternario Alcohol-Benceno-Agua a 25°C	16
12	Proceso Lurgi de producción continua	24
13	El proceso Axens	26
14	Flujograma de la metodología para un proceso de extracción líquido-líquido	46
15	Curva de correlación para los índices de refracción en función de la concentración de la mezcla binaria glicerol-agua a 23 °C	55
16	Curva de correlación para los índices de refracción en función de	56

	la concentración de la mezcla binaria glicerol-agua a 10 °C	
17	Curva de correlación para los índices de refracción en función de la concentración de la mezcla binaria glicerol-biodiesel a 23 °C	57
18	Curva de correlación para los índices de refracción en función de la concentración de la mezcla binaria glicerol-biodiesel a 10 °C	58
19	Distribución de los datos experimentales de equilibrio de inmiscibilidad obtenidos para el sistema glicerol-biodiesel-agua, a partir de soluciones de glicerol en agua, mediante la adición del solvente biodiesel a 25 ± 5 °C	59
20	Distribución de los datos experimentales de equilibrio de inmiscibilidad, obtenidos para el sistema glicerol-biodiesel-agua, a partir de soluciones de glicerol en biodiesel, mediante la adición del solvente biodiesel a 25 ± 5 °C	60
21	Distribución de los datos experimentales de equilibrio de inmiscibilidad, obtenidos para el sistema glicerol-biodiesel-agua a 25 ± 5 °C	61
22	Distribución de los datos experimentales de equilibrio de inmiscibilidad, obtenidos para el sistema glicerol-biodiesel-agua, a partir de soluciones de glicerol en agua, mediante la adición del solvente biodiesel a 10 ± 5 °C	62
23	Distribución de los datos experimentales de equilibrio de inmiscibilidad, obtenidos para el sistema glicerol-biodiesel-agua, a partir de soluciones de glicerol en biodiesel, mediante la adición del solvente biodiesel a 10 ± 5 °C	63
24	Distribución de los datos experimentales de equilibrio de inmiscibilidad, obtenidos para el sistema glicerol-biodiesel-agua a 10 ± 5 °C	64
25	Comparación de datos experimentales del equilibrio de inmiscibilidad, para el sistema glicerol-biodiesel-agua a las dos	65

	temperaturas de estudio	
26	Curva de distribución de los datos experimentales en el sistema glicerol-biodiesel-agua a la temperatura de 25 ± 5 °C	66
27	Curva de distribución de los datos experimentales en el sistema glicerol-biodiesel-agua a la temperatura de 10 ± 5 °C	67
28	Línea de amarre en el sistema ternario glicerol-biodiesel-agua, para la especificación de 0.24 % en peso máximo de glicerol en biodiesel, según la norma ASTM 6751 a la temperatura de 25 ± 5 °C	68
29	Línea de amarre en el sistema ternario glicerol-biodiesel-agua, para la especificación de 0.24 % en peso máximo de glicerol en biodiesel, según la norma ASTM 6751 a la temperatura de 10 ± 5 °C	69
30	Líneas de amarre para distintas relaciones de biodiesel:agua en el sistema ternario glicerol-biodiesel-agua, para la especificación de 0.24 % en peso máximo de glicerol en biodiesel, según la norma ASTM 6751, para una muestra de 40 ml de biodiesel al 10 %, con agitación constante a 300 rpm durante 15 minutos y a la temperatura de 25 ± 5 °C	70
31	Sensibilidad del parámetro de monitoreo del refractómetro (índice de refracción) para las soluciones binarias glicerol-agua y glicerol-biodiesel	75
32	Curva de calibración del picnómetro	131
33	Requerimiento académico para la elaboración de trabajo de graduación de extracción líquido-líquido en la carrera de Ingeniería Química	141
34	Diagrama de causa y efecto para determinar las variables en un proceso de extracción	142
35	Detalle de la unidad de lavado de biodiesel	143

36	Detalle de la unidad de separación del agua de lavado del biodiesel	143
37	Detalle de la unidad de secado de biodiesel	144
38	Detalle de la unidad de calibración del picnómetro	144
39	Detalle de la unidad de medición de índices de refracción a la temperatura de 23 °C	145
40	Detalle de la unidad de medición de índices de refracción a la temperatura de 10 °C	145
41	Detalle de la unidad utilizada para la titulación de las mezclas binarias a la temperatura de 23 °C	146
42	Detalle de la unidad utilizada para la titulación de las mezclas binarias a la temperatura de 10 °C	146
42	Detalle de la unidad de separación de las fases de las mezclas ternarias luego de la agitación	147
	Detalle de las fases de extracto y refinado durante el proceso de separación	147

TABLAS

I	Principales ácidos grasos conocidos en la naturaleza.	18
II	Proporciones de ácidos grasos en aceites vegetales y grasas animales.	19
III	Especificaciones de Biodiesel del RTCA.	36
IV	Propiedades físicas del agua desmineralizada.	40
V	Propiedades físicas del biodiesel.	40
VI	Propiedades físicas y químicas del glicerol.	41
VII	Manejo de desechos líquidos.	53
VIII	Valores de los coeficientes de distribución obtenidos a partir del porcentaje de glicerol distribuido en la fase de biodiesel, dividido el porcentaje de glicerol distribuido en la fase agua.	71
VIX	Resultado del análisis de varianza de dos factores, con varios grupos para la evaluación del grado de diferenciación significativa en el sistema glicerol-biodiesel-agua, a partir de soluciones de glicerol en biodiesel, a las dos temperaturas de estudio.	72
X	Resultado del análisis de varianza de dos factores, con varios grupos para la evaluación del grado de diferenciación significativa en el sistema glicerol-biodiesel-agua, a partir de soluciones de glicerol en agua, a las dos temperaturas de estudio.	72
XI	Comparación del grado de respuesta de variación del parámetro de monitoreo (índice de refracción), para los sistemas ternarios de trabajos de graduación estudiados anteriormente.	

XII	Pesos de las soluciones de glicerol-agua, obtenidos para las dos temperaturas analizadas.	93
XIII	Pesos de las soluciones de glicerol-biodiesel, obtenidos para las dos temperaturas analizadas.	94
XIV	Valores de los índices de refracción, obtenidos para las soluciones de glicerol-agua a las dos temperaturas analizadas.	95
XV	Valores de los índices de refracción, obtenidos para las soluciones de glicerol-biodiesel a las dos temperaturas analizadas.	96
XVI	Datos de los volúmenes de biodiesel adicionados para titular alícuotas de 3 ml de las soluciones de glicerol-agua a las dos temperaturas analizadas.	97
XVII	Datos de los volúmenes de biodiesel adicionados para titular alícuotas de 3 ml de las soluciones de glicerol-biodiesel a las dos temperaturas analizadas.	98
XVIII	Índices de refracción obtenidos para cada par de soluciones conjugadas (fase biodiesel y fase agua) obtenidas para cada mezcla ternaria producida a 23 °C.	99
XIX	Índices de refracción obtenidos para cada par de soluciones conjugadas (fase biodiesel y fase agua) obtenidas para cada mezcla ternaria producida a 10 °C.	100
XX	Índices de refracción obtenidos para las distintas relaciones biodiesel/agua para una muestra de 40 ml de biodiesel con 10 % de glicerol, con agitación constante a 300 rpm y durante un tiempo de 25 minutos a la temperatura de 25 ± 5°C.	101
XXI	Índices de refracción obtenidos para los distintos ciclos de lavado de biodiesel para una muestra de 100 ml de biodiesel con 10 % de glicerol, con agitación constante a 300 rpm y	101

	durante un tiempo de 25 minutos a la temperatura de $25 \pm 5^{\circ}\text{C}$.	
XXII	Pesos del picnómetro, índices de refracción y volúmenes de titulación promedio, para las soluciones de glicerol en agua a temperatura de $25 \pm 5^{\circ}\text{C}$.	103
XXIII	Pesos del picnómetro, índices de refracción y volúmenes de titulación promedio, para las soluciones de glicerol en agua a temperatura de $10 \pm 5^{\circ}\text{C}$.	104
XXIV	Pesos del picnómetro, índices de refracción y volúmenes de titulación promedio, para las soluciones de glicerol en biodiesel a temperatura de $25 \pm 5^{\circ}\text{C}$.	105
XXV	Pesos del picnómetro, índices de refracción y volúmenes de titulación promedio, para las soluciones de glicerol en biodiesel a temperatura de $10 \pm 5^{\circ}\text{C}$.	106
XXVI	Datos de las densidades promedio de las soluciones binarias de glicerol-agua a las dos temperaturas analizadas.	107
XXVII	Datos de las densidades promedio de las soluciones binarias de glicerol-biodiesel a las dos temperaturas analizadas.	108
XXVIII	Datos de las concentraciones reales de las soluciones binarias de glicerol-agua a las dos temperaturas analizadas.	109
XXIX	Datos de las concentraciones reales de las soluciones binarias de glicerol-biodiesel a las dos temperaturas analizadas.	110
XXX	Datos de la composición porcentual de las mezclas ternarias formadas a partir de las soluciones de glicerol-agua a temperatura de $25 \pm 5^{\circ}\text{C}$ necesarios para graficar la curva binodal.	111
XXXI	Datos de la composición porcentual de las mezclas ternarias formadas a partir de las soluciones de glicerol-agua a temperatura de $10 \pm 5^{\circ}\text{C}$ necesarios para graficar la curva	112

	binodal.	
XXXII	Datos de la composición porcentual de las mezclas ternarias formadas a partir de las soluciones de glicerol-biodiesel a temperatura de 25 ± 5 °C necesarios para graficar la curva binodal.	113
XXXIII	Datos de la composición porcentual de las mezclas ternarias formadas a partir de las soluciones de glicerol-biodiesel a temperatura de 10 ± 5 °C necesarios para graficar la curva binodal.	114
XXXIV	Índices de refracción promedio de las fases biodiesel y fase agua, para los puntos seleccionados por debajo del domo de solubilidad a la temperatura de 25 ± 5 °C.	115
XXXV	Índices de refracción promedio de las fases biodiesel y fase agua, para los puntos seleccionados por debajo del domo de solubilidad a la temperatura de 10 ± 5 °C.	116
XXXVI	Datos de las concentraciones de los pares de equilibrio (soluciones conjugadas) para el establecimiento de las líneas de unión, obtenidas para cada mezcla reproducida, a la temperatura de 25 ± 5 °C.	117
XXXVII	Datos de las concentraciones de los pares de equilibrio (soluciones conjugadas) para el establecimiento de las líneas de unión, obtenidas para cada mezcla reproducida, a la temperatura de 10 ± 5 °C.	118
XXXVIII	Datos del coeficiente de distribución para las mezclas ternarias glicerol-biodiesel-agua a las dos temperaturas analizadas.	119
XXXIX	Datos de las concentraciones para el establecimiento de las líneas de unión, obtenidas para cada relación biodiesel:agua, para una muestra de 40 ml de biodiesel al 10 % de glicerol	120

con agitación constante a 300 rpm y durante un tiempo de 25 minutos a $25 \pm 5^{\circ}\text{C}$.

XL	Datos de las concentraciones de glicerol en agua para determinar la cantidad de ciclos de lavado, para una muestra de 100 ml de biodiesel al 10 % de glicerol con agitación constante a 300 rpm y durante un tiempo de 25 minutos a la temperatura de $25 \pm 5^{\circ}\text{C}$.	120
XLI	Volúmenes medidos para la calibración del picnómetro.	131
XLII	Costo de reactivos.	133
XLIII	Costo de equipo.	133
XLIV	Costo de cristalería.	134
XLV	Costo de accesorios.	135
XLVI	Costo de energía eléctrica.	135
XLVII	Costo de otros.	136
XLVIII	Costos totales de la investigación.	136
XLIX	Impactos ambientales que pueden ser generados por la investigación.	137

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descripción
°C	Grados Celsius
%	Porcentaje
\bar{X}	Media aritmética
X_i	Dato de la i-ésima observación
N	Número de observación
Sol	Solución
ρ	Densidad de la solución (g/ml)
V	Volumen (ml)
P	Peso (g)
C	Concentración (porcentaje en peso)
M_t	Masa total de la mezcla ternaria
x	Fracción volumen de la solución (% en peso nominal)
N	Índice de refracción
K	Coefficiente de distribución (adimensional)

GLOSARIO

Ácidos grasos	Grupo de ácidos orgánicos, con un único grupo carboxilo (-COOH), entre los que se encuentran los ácidos saturados (hidrogenados) de cadena lineal producidos por la hidrólisis de las grasas.
Biocombustible	Cualquier combustible sólido, líquido o gaseoso producido a partir de materia orgánica.
Coefficiente de distribución	Relación entre la proporción de soluto en el extracto y en el refinado.
Composición porcentual	El porcentaje de masa de cada elemento en el sistema.
Concentración	Cantidad de soluto por unidad de volumen o masa de disolvente o de solución.
Densidad	Peso específico.
Éster	Compuesto formado (junto con agua) por la reacción de un ácido y un alcohol.
Esterificación	Proceso unitario que consiste en la producción de un éster por la reacción de un alcohol con un ácido.

Extracción	Operación unitaria en la que uno de los constituyentes de una sustancia sólida o líquida es transferido a un líquido, denominado disolvente.
Extracto	Producto final de la extracción, rico en soluto.
Índice de refracción	Razón entre las velocidades de la luz en el vacío y en el medio estudiado.
Lípido	Grupo heterogéneo de sustancias orgánicas que se encuentran en los organismos vivos. Los lípidos están formados por carbono, hidrógeno y oxígeno, aunque en proporciones distintas a como estos componentes aparecen en los azúcares. Se distinguen de otros tipos de compuestos orgánicos porque no son solubles en agua (hidrosolubles) sino en disolventes orgánicos (alcohol, éter).
Miscibilidad	Capacidad de un líquido para mezclarse con otro líquido (o disolverse en él).
Picnometría	Método para determinar la densidad de una sustancia líquida por medio del uso de un picnómetro.
Punto de pliegue	Es un punto de la curva en la cual la composición del soluto tanto en la fase de alimentación como en la fase de extracto es la misma.

Refinado	Líquido residual del cual fue separado el soluto.
Refractómetro	Equipo con el cual se mide el índice de refracción.
Soluto	La fase dispersa (disuelta) de una solución.
Solvente	Líquido capaz de disolver otros materiales, (sólidos, líquidos o gases), para formar una solución.

RESUMEN

El siguiente trabajo de graduación se realizó con el objetivo de caracterizar el equilibrio ternario del sistema glicerol-biodiesel-agua a dos temperaturas ($25 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ y $10 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$). Además, la determinación de la línea de amarre en el sistema para la especificación de 0.24 % en peso máximo de glicerol en biodiesel según la norma ASTM 6751.

Se determinaron las curvas de correlación entre el índice de refracción en función de la composición porcentual en peso, para cada serie de soluciones de glicerol en agua y glicerol en biodiesel, a cada temperatura analizada por medio de los métodos de picnometría y refractometría. Luego se determinó el equilibrio de inmiscibilidad del sistema a cada temperatura, a partir de soluciones de glicerol en agua tituladas con biodiesel y glicerol en biodiesel tituladas con agua hasta la observación de dos fases. Por medio de estos datos se graficó la curva binodal del sistema a cada temperatura.

Después se procedió a la obtención de las líneas de unión a cada temperatura, para ocho mezclas ternarias de diferente composición situadas por debajo de la curva binodal. Luego se obtuvo la correspondiente curva de distribución del sistema a cada temperatura evaluada, a partir de la cual fue posible la determinación de la composición porcentual de la mezcla ternaria correspondiente al punto de pliegue.

Como resultado de esta investigación, se llegó a determinar estadísticamente que no existe diferencia significativa de los datos experimentales obtenidos a ambas temperaturas analizadas.

Para la temperatura de 23 °C, se determinó que la concentración en el punto de pliegue es de 10 % de glicerol, 83 % de biodiesel y 7 % de agua.

Para la temperatura de 10 °C, se determinó que la concentración en el punto de pliegue es de 11 % de glicerol, 76 % de biodiesel y 5 % de agua.

Para la temperatura de 23 °C, se determinó la línea de amarre en el sistema para la especificación de 0.24 % en peso máximo de glicerol en biodiesel, según la norma ASTM 6751, la cual es de 95 % de agua.

Para la temperatura de 10 °C, se determinó la línea de amarre en el sistema para la especificación de 0.24 % en peso máximo de glicerol en biodiesel, según la norma ASTM 6751, la cual es de 96 % de agua.

El procedimiento experimental se realizó en el laboratorio de química del edificio T-5, Facultad de Ingeniería de la USAC, que se encuentra a una presión atmosférica de 640 mmHg.

OBJETIVOS

General

Generar datos experimentales a nivel de laboratorio para determinar la distribución de la solubilidad del sistema ternario glicerol-biodiesel-agua en equilibrio líquido-líquido.

Específicos

1. Realizar una correlación entre los valores experimentales de índice de refracción y porcentajes de concentración en peso de glicerol-biodiesel, a dos temperaturas diferentes.
2. Realizar una correlación entre los valores experimentales de índice de refracción y porcentajes de concentración en peso de glicerol-agua, a dos temperaturas diferentes.
3. Determinar los valores experimentales de concentraciones en equilibrio de inmiscibilidad para el sistema ternario glicerol-biodiesel-agua, a partir de soluciones de glicerol en agua por adición del solvente biodiesel.
4. Determinar los valores experimentales de concentraciones en equilibrio de inmiscibilidad para el sistema ternario glicerol-biodiesel-agua, a partir de soluciones de glicerol en biodiesel por adición del solvente agua.

5. Representar el equilibrio líquido-líquido a partir de los datos experimentales generados del sistema glicerol-biodiesel-agua, realizando un diagrama en coordenadas triangulares.

6. Determinar la línea de amarre en el sistema ternario glicerol-biodiesel-agua para la especificación de 0.24 % en peso máximo de glicerol en biodiesel, según la norma ASTM 6751.

HIPÓTESIS

Es posible realizar una evaluación experimental a nivel de laboratorio para la generación de datos de equilibrio de inmiscibilidad en el estudio del sistema ternario glicerol-biodiesel-agua a dos temperaturas y 640 mmHg.

HIPÓTESIS ESTADÍSTICA

Para variable respuesta distribución porcentual en equilibrio de inmiscibilidad:

Hipótesis Nula

Ho: no existe diferencia significativa en los datos experimentales correlacionados para la construcción del domo de distribución al equilibrio de inmiscibilidad del sistema entre las temperaturas de estudio.

Hipótesis Alterna

Ha: Existe diferencia significativa en los datos experimentales correlacionados para la construcción del domo de distribución al equilibrio de inmiscibilidad del sistema, entre las temperaturas de estudio.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo tiene como objetivo generar datos experimentales a nivel de laboratorio para determinar la distribución de la solubilidad del sistema ternario glicerol-biodiesel-agua en equilibrio líquido-líquido a dos temperaturas y 640 mmHg.

La extracción líquido-líquido es, junto a la destilación, la operación básica más importante en la separación de mezclas homogéneas líquidas. Consiste en separar una o varias sustancias disueltas en un disolvente, mediante su transferencia a otro disolvente insoluble, o parcialmente insoluble, en el primero. La transferencia de materia se consigue mediante el contacto directo entre las dos fases líquidas. Una de las fases es dispersada en la otra para aumentar la superficie interfacial y aumentar el caudal de materia transferida.

Una de las formas más habituales de representar los datos de equilibrio en sistemas ternarios son los diagramas triangulares.

Con el presente trabajo se pretende continuar con las caracterizaciones de sistemas ternarios, empleados comúnmente en las extracciones líquido-líquido.

La caracterización del equilibrio ternario se basa en la interpretación del contenido de soluto al equilibrio, mediante técnicas de picnometría y refractometría, y así determinar las concentraciones al equilibrio del sistema ternario.

Además, determinar la línea de amarre del sistema para la especificación de 0.24 % en peso máximo de glicerol en biodiesel, según la norma ASTM 6751.

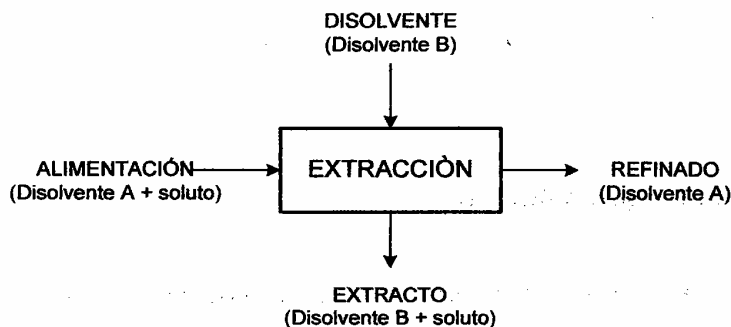
1. MARCO TEÓRICO

1.1 Extracción líquido-líquido

La extracción líquido-líquido es, junto a la destilación, la operación básica más importante en la separación de mezclas homogéneas líquidas. Consiste en separar una o varias sustancias disueltas en un disolvente, mediante su transferencia a otro disolvente insoluble, o parcialmente insoluble, en el primero. La transferencia de materia se consigue mediante el contacto directo entre las dos fases líquidas. Una de las fases es dispersada en la otra para aumentar la superficie interfacial y aumentar el caudal de materia transferida.

En una operación de extracción líquido-líquido se denomina alimentación a la disolución cuyos componentes se pretende separar, disolvente de extracción al líquido que se va a utilizar para separar el componente deseado, refinado a la alimentación ya tratada y extracto a la disolución con el soluto recuperado. En la Figura 1 se muestra un esquema de las corrientes implicadas en la operación. (*Ref. 24*)

Figura 1 Operación de extracción líquido-líquido



Fuente: Universidad Autónoma de Madrid. Extracción líquido-líquido.

http://www.uam.es/personal_pdi/ciencias/mgilarra/experimentacionI/II/ExtraccLiqLiq2006.pdf

1.1.1 Relaciones de equilibrio en la extracción

1.1.1.1 Regla de las fases

El equilibrio entre dos fases en cualquier caso, está restringido por la regla de las fases:

$$F = C - P + 2$$

donde P es el número de fases en equilibrio, C es el número de componentes totales en las dos fases (cuando no se verifican reacciones químicas), y F es el número de variantes o grados de libertad del sistema. (Ref. 6)

1.1.1.2 Equilibrio de fases

La separación de los componentes por medio de la extracción líquido-líquido depende básicamente de la distribución del equilibrio termodinámico de los componentes en las dos fases líquidas. (Ref. 12)

1.1.1.3 Coeficientes de distribución

En el equilibrio se conoce como coeficiente de distribución o reparto K al cociente de la fracción en peso del soluto en la fase del extracto y , dividida por la fracción en peso del soluto en la fase de refinado x (Ref. 12):

$$K = \frac{y}{x}$$

1.1.2 Equilibrio líquido

La extracción supone el uso de sistemas compuestos por tres sustancias cuando menos; aunque las fases insolubles son predominantemente muy distintas desde el punto de vista químico, en la mayoría de los casos los tres componentes aparecen en cierto grado en las dos fases. (Ref. 17)

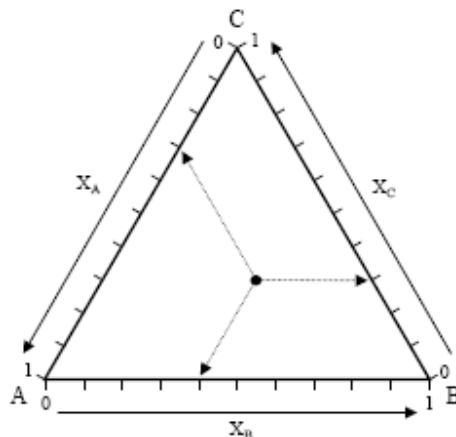
1.1.3 Métodos de Representación gráfica del equilibrio ternario

En el diseño de una operación de extracción líquido-líquido suele considerarse que el refinado y el extracto se encuentran en equilibrio. Los datos de equilibrio que deberán manejarse serán como mínimo los correspondientes a un sistema ternario (dos disolventes y un soluto), con dos de los componentes inmiscibles o parcialmente inmiscibles entre sí.

Una de las formas más habituales de recoger los datos de equilibrio en sistemas ternarios son los diagramas triangulares. En la Figura 2 se muestra un diagrama triangular equilátero. Los vértices del triángulo representan compuestos puros, un punto sobre un lado correspondería a una mezcla binaria y un punto en el interior del triángulo representaría una mezcla ternaria. La

composición de una mezcla puede determinarse por lectura directa en el diagrama, tal como muestra la Figura 2. La concentración de los componentes en el diagrama se muestra como fracción molar o fracción másica. (Ref. 24)

Figura 2 Diagrama de equilibrio ternario



Fuente: Universidad Autónoma de Madrid. Extracción líquido-líquido.

http://www.uam.es/personal_pdi/ciencias/mgilarra/experimentacionIQII/ExtracLiqLiq2006.pdf

Los diagramas líquidos ternarios son de valor considerable en los problemas referentes a procesos de separación por extracción líquida. Al estudiar dichos diagramas es posible deducir si la separación buscada puede realizarse y definir las mejores condiciones de operación para lograr resultados óptimos. (Ref. 12)

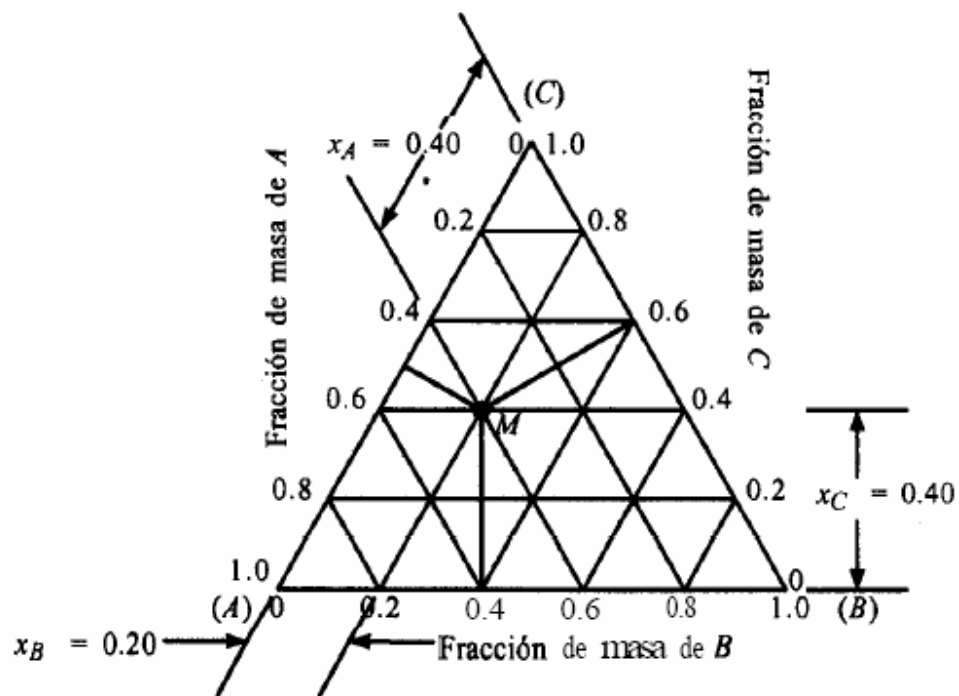
1.1.3.1 Coordenadas triangulares equiláteras

Las coordenadas triangulares equiláteras se usan con mucha frecuencia para representar los datos de equilibrio de un sistema de tres componentes, puesto que se tienen tres ejes. Esto se muestra en la figura 3. Cada uno de los tres vértices representa un componente puro, A, B o C. El punto M representa una mezcla de A, B y C, la distancia perpendicular desde el punto M

hasta la base AB representa a la fracción de masa x_C de C en la mezcla en el punto M; la distancia a la base CB es la fracción de masa x_A de A, y la distancia a la base AC es la fracción de masa x_B de B. De esta forma,

$$x_A + x_B + x_C = 1$$

Figura 3 Coordenadas para un diagrama triangular

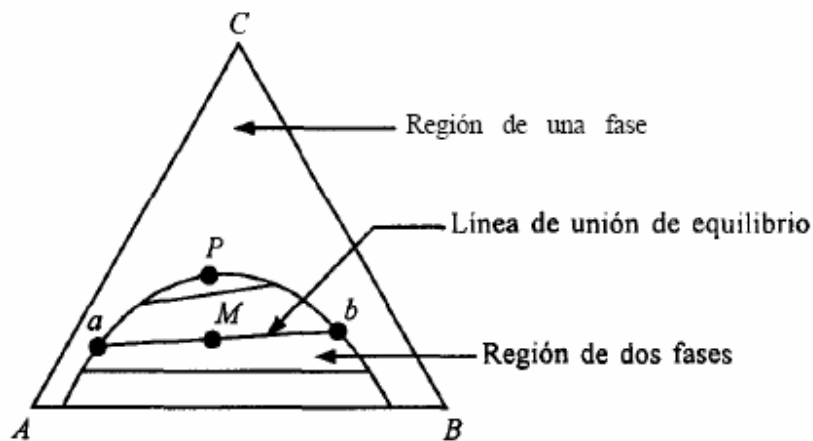


Fuente: C. J. Geankoplis. Proceso de transporte y operaciones unitarias.

En la figura 4 se muestra un diagrama de fases común de un par de componentes A y B parcialmente miscibles. Con respecto a la figura 4, el líquido C se disuelve por completo en A o B. El líquido A es muy poco soluble en B y B es un poco soluble en A. La región de dos fases corresponde a la zona delineada por la curva envolvente. Una mezcla original de composición M se separa en dos fases a y b que están en la línea de unión de equilibrio que

pasa a través del punto M. (Se muestran también otras de líneas de unión.)
Ambas fases son idénticas en el punto P, que se llama *punto de Plait*.

Figura 4 Diagrama de fases líquido – líquido en el que los componentes A y B son parcialmente miscibles.



Fuente: C. J. Geankoplis. Proceso de transporte y operaciones unitarias.

1.1.4 Sistemas ternarios de interés en la extracción en fase líquida

Si los tres componentes se mezclan en todas proporciones con formación de soluciones homogéneas, el sistema carece de importancia para la extracción en fase líquida. Los sistemas en que ocurre inmiscibilidad, se clasifican de la siguiente manera (Ref. 16):

- | | | |
|-----------|--|--|
| Tipo I. | Formación de un par de líquidos parcialmente miscibles. | } Los tres componentes son líquidos a temperatura prevaeciente |
| Tipo II. | Formación de dos pares de líquidos parcialmente miscibles. | |
| Tipo III. | Formación de tres pares de líquidos | |

parcialmente miscibles.

Tipo IV. Formación de fases sólidas.

1.1.4.1 Tipo I. Formación de un par de líquidos parcialmente miscibles

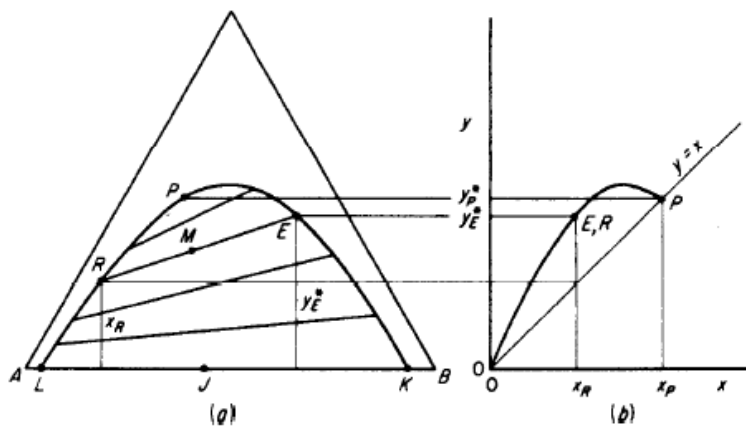
Para un sistema ternario con un par parcialmente soluble, puede decirse que es el tipo de sistema que se encuentra más comúnmente en la extracción. En este tipo de sistemas, es costumbre trabajar con coordenadas triangulares utilizadas como isotermas. De la figura 5, se observa, que el líquido C se disuelve completamente en A y B, pero A y B sólo se disuelven entre sí, hasta cierto grado, para dar lugar a las soluciones líquidas saturadas en L (rica en A) y en K (rica en B).

Una mezcla binaria en J, se separará en dos fases líquidas insolubles de composiciones en L y K, ya que las cantidades relativas de las fases dependen de la posición J. La curva LRPEK es la curva binodal de solubilidad, que indica el cambio en la solubilidad de las fases ricas en A y B al agregar C. Una mezcla fuera de esta curva será una solución homogénea de una fase líquida. Una mezcla ternaria por debajo de la curva, como M, forma dos fases líquidas insolubles saturadas de composiciones en el equilibrio, indicadas por R (rico en A) y E (rico en B). La línea RE que une estas composiciones en el equilibrio es una línea de unión, que necesariamente debe pasar a través del punto M que representa la mezcla como un todo. Hay un número finito de líneas de unión en la región de dos fases, pero sólo se muestran unas cuantas. Rara vez son paralelas; por lo general, su pendiente cambia lentamente en una dirección, como se muestra. La dirección de la pendiente de la línea de unión cambia en relativamente pocos sistemas; una línea de unión será horizontal. Se dice que estos sistemas son "solutrópicos". El punto P, punto de pliegue, la última de las

líneas de unión y el punto en donde se encuentran las curvas de solubilidad del rico en A y rico en B, generalmente no se encuentra en el valor máximo de C sobre la curva de solubilidad.

El porcentaje de C en la solución E es claramente mayor que en R; se dice que en este caso la distribución de C favorece la fase rica en B. Esto se muestra convenientemente en el diagrama de distribución. (Ref. 17)

Figura 5 Sistema de tres líquidos, A y B parcialmente miscibles



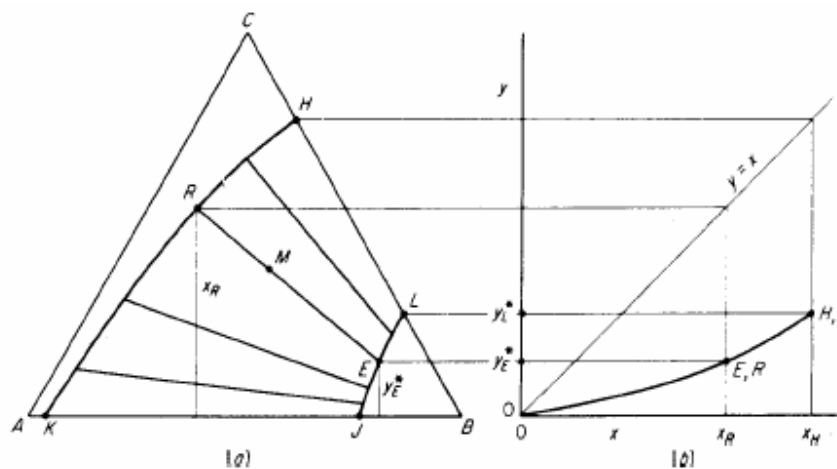
Fuente: Robert Treybal. Operaciones de transferencia de masa.

1.1.4.2 Tipo II. Formación de dos pares de líquidos parcialmente miscibles

Un ejemplo de este tipo es el sistema clorobenceno(A)-agua(B)-metil-etil-cetona(C), en donde A y C son completamente solubles, mientras que los pares A-B y B-C presentan únicamente una solubilidad limitada. Obsérvese la figura 6 (a), una isoterma típica. A la temperatura predominante, los puntos K y J representan las solubilidades mutuas de A y B, y los puntos H y L, las de B y C. Las curvas KRH (rica en A) y JEL (rica en B) son las curvas de solubilidad

ternarias; las mezclas fuera de la banda entre estas curvas forman soluciones líquidas homogéneas de una sola fase. Las mezclas como M, dentro del área heterogénea, forman dos fases líquidas en el equilibrio, en E y R, unidas mediante líneas de unión. (Ref. 17)

Figura 6 Sistema de tres líquidos, A-B y B-C parcialmente miscibles



Fuente: Robert Treybal. Operaciones de transferencia de masa.

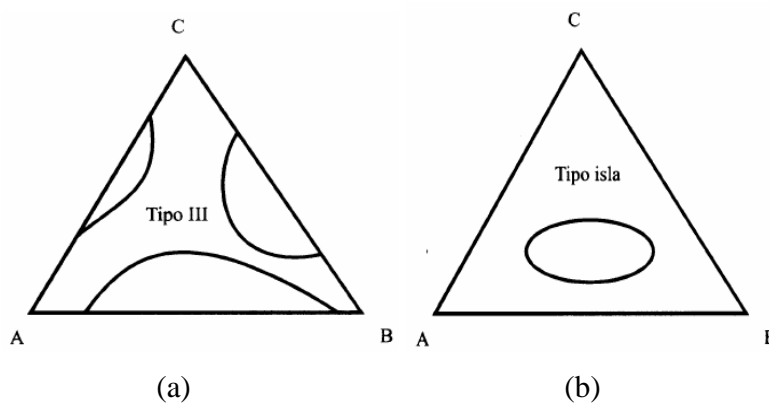
1.1.4.3 Tipo III. Formación de tres pares de líquidos parcialmente miscibles

Estos sistemas son inusuales y pueden llegar a ser muy complejos en las relaciones variables que surgen al cambiar la temperatura.

Cuando los tres líquidos son parcialmente solubles entre sí, se producen tres curvas binodales (figura 7a), a temperaturas lo suficientemente elevadas, como para que no existan intersecciones entre dichas curvas. Aquí, de nuevo, las áreas dentro de las curvas indican regiones líquidas bifásicas, mientras que en las áreas externas sólo existe una fase presente. Sin embargo, a

temperaturas más bajas puede suceder que, como en la figura 7b, las curvas se intercepten, haciendo que el diagrama adopte la forma mostrada. (Ref. 16)

Figura 7 Diagramas de sistemas ternarios con tres pares parcialmente miscibles



Fuente: John H. Perry. Manual del ingeniero químico

1.1.4.4 Tipo IV. Formación de fases sólidas

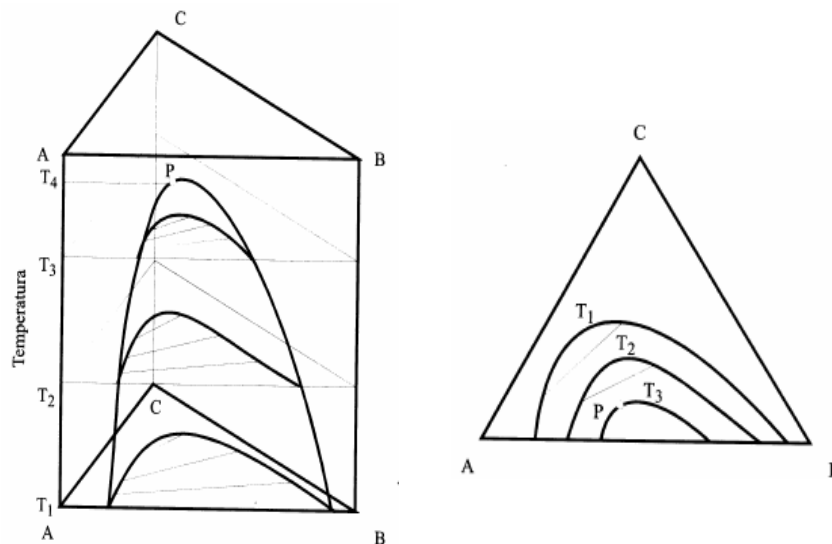
Estos sistemas pueden ser muy complejos en cuanto al número de equilibrios existentes.

1.1.5 Efecto de la temperatura sobre el sistema ternario

Para mostrar en detalle el efecto de la temperatura, se requiere una figura tridimensional, como en la figura 8. En este diagrama la temperatura está graficada verticalmente; se ve que los triángulos isotérmicos son secciones a través del prisma. Para muchos sistemas de este tipo, la solubilidad mutua de A y B aumenta al aumentar la temperatura; arriba de cierta temperatura t_4 , a temperatura crítica de solución, A y B se disuelven completamente. El aumento de la solubilidad a temperaturas más altas influye considerablemente sobre el equilibrio ternario; esto se muestra mejor proyectando las isoterms

hasta la base del triángulo, como se muestra en la figura 8. No sólo decrece el área de heterogeneidad a temperaturas más altas, sino que también cambian las pendientes de las líneas de unión. Las operaciones de extracción líquida, que dependen de la formación de fases líquidas insolubles, deben llevarse a cabo a temperaturas inferiores a t_4 . (Ref. 17)

Figura 8 Efecto de la temperatura en los equilibrios ternarios



Fuente: Robert Treybal. Operaciones de transferencia de masa.

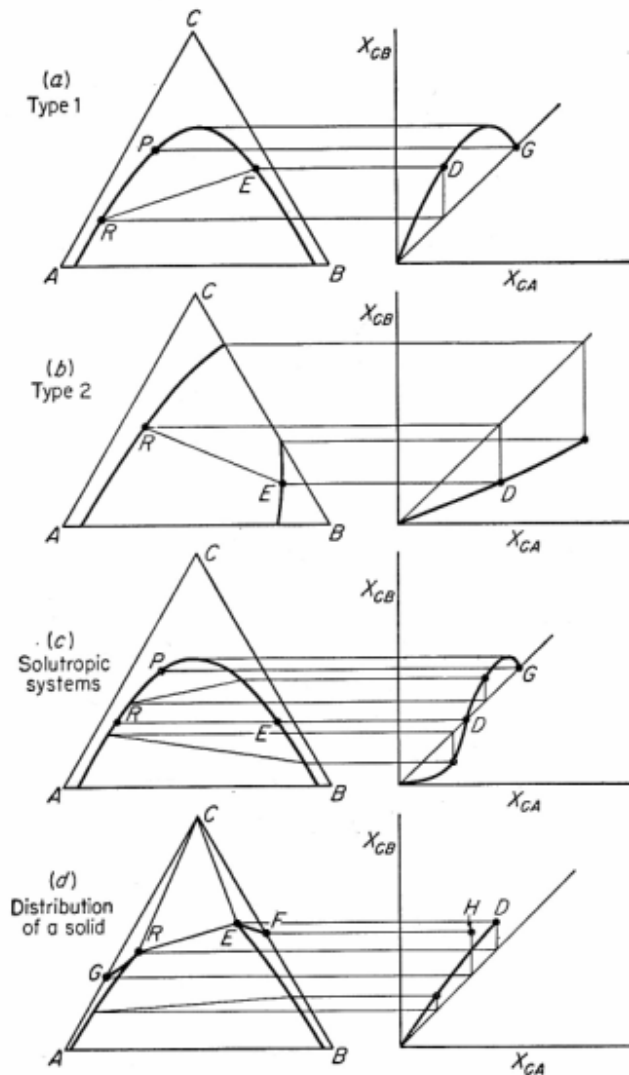
1.1.6 Efecto de la presión

Excepto a presiones muy elevadas, el efecto de la presión sobre el equilibrio líquido es tan pequeño que generalmente puede ignorarse. Por lo tanto, todos los diagramas que se muestran deben considerarse como si se hubiesen graficado a presiones lo suficientemente altas como para mantener un sistema completamente condensado, es decir, arriba de las presiones de vapor de las soluciones. Sin embargo, si la presión se redujese lo suficiente para que fuera menor que la presión de vapor de las soluciones, aparecería una fase vapor, y el equilibrio líquido se interrumpiría. (Ref. 17)

1.1.7 Curvas de distribución

La curva de distribución más simple consiste en un punto de la concentración de C en la fase rica en A (X_{CA}) contra la concentración al equilibrio de C en la fase rica en B (X_{CB}) en coordenadas aritméticas. La figura 9 muestra varias curvas de distribución típicas con relación a su correspondiente tipo de diagrama de fases. (Ref.16)

Figura 9 Curvas de distribución



Fuente: Robert Treybal. Liquid Extraction.

1.1.8 Propiedades deseables del disolvente

Las propiedades de un disolvente potencial se deben considerar antes de su utilización en un proceso de extracción líquido-líquido.

1.1.8.1 Selectividad

La separación relativa o selectiva α de un disolvente es el cociente de la razón de los dos componentes en la fase del disolvente de extracción, dividida por la razón de los mismos componentes en la fase del disolvente de alimentación. El poder de la separación de un sistema líquido-líquido está regulado por la desviación de α con respecto a la unidad, de forma similar a la volatilidad relativa en destilación. Una separación relativa con $\alpha = 1.0$ no proporciona separación de los componentes entre las dos fases líquidas. Por lo general, las concentraciones diluidas de soluto proporcionan los factores más elevados de separación relativa.

1.1.8.2 Recuperabilidad

Por lo general, el disolvente de extracción debe recuperarse de la corriente de extracto y de la de refinado, en un proceso de extracción. Ya que a menudo se utiliza la destilación, la volatilidad relativa del disolvente de extracción respecto a los componentes no disolventes debe ser significativamente mayor o menor a la unidad. Para un disolvente volátil es deseable un bajo calor latente de evaporación.

1.1.8.3 Coeficiente de distribución

El coeficiente de distribución de un soluto debe ser grande, para que se pueda utilizar una baja cantidad de disolvente de extracción respecto a la alimentación.

1.1.8.4 Capacidad

Esta propiedad se refiere a la carga del soluto por peso del disolvente de extracción que se puede lograr en una capa de extracto, en el punto triple de un sistema Tipo I o en el límite de solubilidad de un sistema Tipo II.

1.1.8.5 Solubilidad del disolvente

Una baja solubilidad del solvente de extracción en el refinado suele dar como resultado una alta volatilidad relativa en la separación del refinado o una baja pérdida de disolvente si el refinado no se desolventiza. Una baja solubilidad del disolvente de alimentación en el extracto conduce a una gran separación relativa y, generalmente, a unos bajos costos en la recuperación del soluto.

1.1.8.6 Densidad

La diferencia de densidad entre las dos fases líquidas en el equilibrio afecta no sólo a los caudales de los fluidos que circulando en contracorriente pueden alcanzarse en el equipo de extracción, sino también a las velocidades de coalescencia. La diferencia de las densidades disminuye a cero en el punto triple, pero en algunos sistemas puede llegar a ser igual a cero en una concentración intermedia del soluto (línea de reparto isopícnica o de doble

densidad) y puede invertir las fases a concentraciones más elevadas. Los extractores de tipo diferencial no pueden cruzar dicha concentración del soluto, pero los mezcladores-sedimentadores sí pueden hacerlo.

1.1.8.7 Tensión interfacial

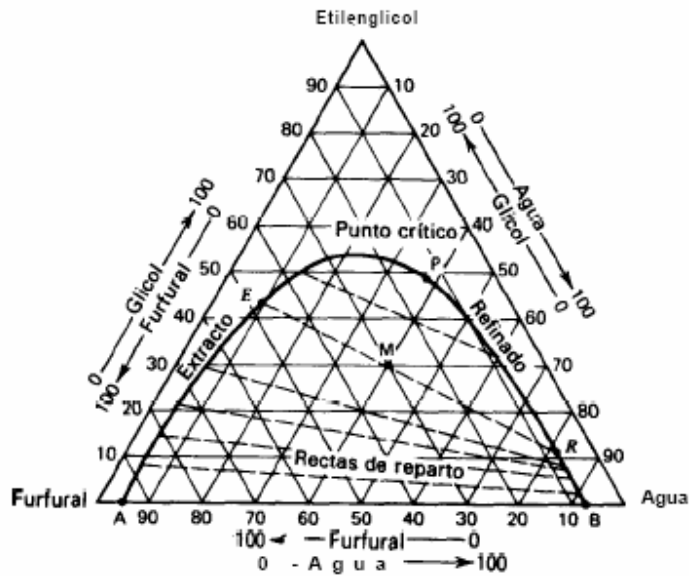
Una tensión superficial elevada en la interfase promueve una coalescencia rápida y, por lo general, requiere una agitación mecánica elevada para producir gotas muy pequeñas. Una tensión superficial pequeña en la interfase permite la rotura de la gota con agitación de poca intensidad, pero también conduce a bajas velocidades de coalescencia. La tensión superficial de la interfase disminuye por lo general a medida que se incrementan la solubilidad y la concentración del soluto; asimismo, se reduce a cero en el punto triple.

1.1.8.8 Toxicidad

Debido a la exposición potencial durante las reparaciones del equipo o mientras se desconecta el aparato después de la transferencia del disolvente, se prefiere una baja toxicidad en la inhalación de los vapores del disolvente o en el contacto con la piel. También es deseable una toxicidad baja a la vida acuática y a los bioorganismos cuando la extracción se emplea para el pretratamiento del agua residual, antes de entrara a la planta de tratamiento biológico, y que descarga el efluente a un río o lago. A menudo, la toxicidad del disolvente es baja si su solubilidad en agua es elevada. (*Ref. 12*)

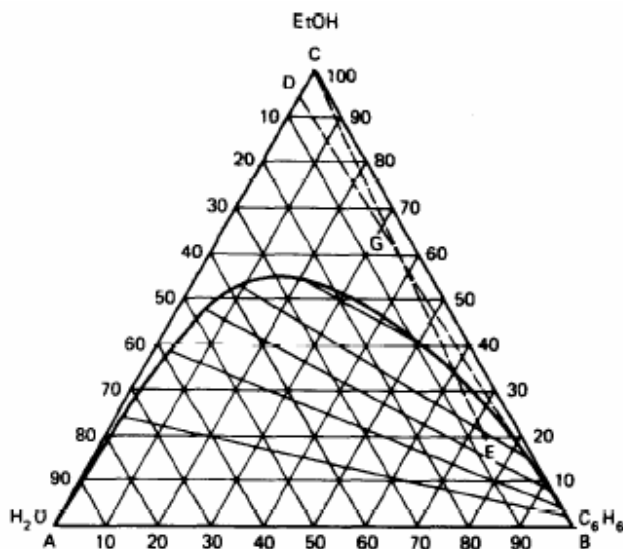
1.1.9 Ejemplos de diagramas ternarios

Figura 10 Diagrama de fases ternario Etilenglicol-Furfural-Agua a 25 °C



Fuente: Henley, E.J. Operaciones de separación por etapas de equilibrio en ingeniería química.

Figura 11 Diagrama de fases ternario Alcohol-Benceno-Agua a 25 °C



Fuente: Henley, E.J. Operaciones de separación por etapas de equilibrio en ingeniería química.

1.2 Biodiesel

1.2.1 ¿Qué es el biodiesel?

El biodiesel es un biocombustible líquido, que se obtiene químicamente a partir de aceites vegetales o grasas animales y un alcohol y se puede utilizar en motores diesel, solo o mezclado con gasoil.

La ASTM (American Society for Testing Materials) define al biodiesel como éster monoalquílico de cadena larga de ácidos grasos derivados de recursos renovables para ser utilizados en motores diesel. (*Ref. 15*)

1.2.2 Materias primas para la obtención de biodiesel

Las materias primas para la obtención de biodiesel son aceites vegetales o grasas animales y alcoholes de cadena corta. Los aceites más ampliamente utilizados son aceite de colza (fundamentalmente en países de la Unión Europea), soja y girasol, aunque también se emplean, entre otros, los aceites de maní, palma, lino, nabo, aceites comestibles usados o grasas animales.

1.2.2.1 Características químicas de aceites vegetales y biodiesel

Los aceites vegetales y grasas son lípidos. Los lípidos son constituidos básicamente por mezclas de diferentes triglicéridos (tri-ésteres de ácidos grasos) pero contienen otros compuestos como los fosfatídeos, diglicéridos, monoglicéridos y ácidos grasos libres en pequeñas cantidades. Los ácidos grasos que componen un triglicérido pueden ser diversos. Mono, di o triglicéridos son ésteres de uno, dos o tres ácidos grasos, iguales o no, unidos

por un puente de glicerina. El biodiesel es una mezcla de alquil-ésteres de ácidos grasos.

Los diversos aceites o grasas se caracterizan por diferentes proporciones de los ácidos grasos descritos arriba. Como ejemplo, la tabla II muestra la composición de algunos que otros aceites vegetales y grasas animales, en términos de sus principales ácidos grasos.

Otros aceites poseen otras composiciones, pero es de notarse que los aceites más empleados para producir el biodiesel están fuertemente concentrados en ácidos con 16 ó 18 átomos de carbón en sus cadenas, sean ellas saturadas o insaturadas (ácidos palmítico, esteárico, oléico, linoléico o ricinoléico). Llama la atención el caso del aceite de higüerillo, que posee fuerte concentración de ácido ricinoléico. Este ácido es muy particular, pues posee un grupo hidroxilo en su cadena, que le confiere propiedades muy distintas de todos los demás, especialmente por su alto poder lubricante y alta viscosidad. (Ref. 20)

Tabla I Principales ácidos grasos conocidos en la naturaleza

Nombre usual	Nombre IUPAC	Símbolo	Fórmula Mínima
Butírico	Butanóico	C4:0	$C_4H_8O_2$
Capróico	Hexanóico	C6:0	$C_6H_{12}O_2$
Caprílico	Octanóico	C8:0	$C_8H_{16}O_2$
Caprícho	Decanóico	C10:0	$C_{10}H_{20}O_2$
Otusílico	Cis-4-decenóico	C10:1(n4)	$C_{10}H_{18}O_2$
Caproleico	Cis-9-decenóico	C10:1(n9)	$C_{10}H_{18}O_2$
Láurico	Dodecanóico	C12:0	$C_{12}H_{24}O_2$
Lauroleico	Cis-5-dodecenóico	C12:1(n5)	$C_{12}H_{22}O_2$
Lindérico	Cis-4-dodecenóico	C12:1(n4)	$C_{12}H_{22}O_2$
Mirístico	Tetradecanóico	C14:0	$C_{14}H_{28}O_2$

Miristoleico	Cis-9-tetradecenóico	C14:1(n9)	$C_{14}H_{26}O_2$
Tsuzuico	Cis-4-tetradecenóico	C14:1(n4)	$C_{14}H_{26}O_2$
Palmítico	Hexadecanóico	C16:0	$C_{16}H_{32}O_2$
Palmitoleico	Cis-9-tetradecenóico	C16:1(n9)	$C_{16}H_{30}O_2$
Estearíco	Octadecanóico	C18:0	$C_{18}H_{36}O_2$
Petroselínico	Cis-6-octadecenóico	C18:1(n6)	$C_{18}H_{34}O_2$
Oléico	Cis-9-octadecenóico	C18:1(n9)	$C_{18}H_{34}O_2$
Eládico	Trans-9-octadecenóico	C18:1(tn9)	$C_{18}H_{34}O_2$
Vaccénico	Cis-11-octadecenóico	C18:1(n11)	$C_{18}H_{34}O_2$
Linoleico	Cis-9-cis-12-octadecadienóico	C18:2(n9,n12)	$C_{18}H_{32}O_2$
Linolénico	Cis-9-cis-12-cis-15-octadecatrienóico	C18:3(n9,n12,n15)	$C_{18}H_{30}O_2$
Ricinoleico	12-hidroxi-cis-9-octadecenóico	C18:1(n9):OH(n12)	$C_{18}H_{34}O_3$
Araquídico	Icosanóico	C20:0	$C_{20}H_{40}O_2$
Gadoleico	Cis-9-icosenóico	C20:1(n9)	$C_{20}H_{38}O_2$

Fuente: CEPAL. <http://www.eclac.org/publicaciones/xml/3/29423/L791-1.pdf>

Tabla II Proporciones de ácidos grasos en aceites vegetales y grasas animales

Aceite	Ácidos grasos – símbolos conforme Tabla 1					
	C16 %	C18 %	C18:1(n9) %	C18:2(n9,12) %	C18:1(n9): OH(n12) %	Otros %
Algodón	17-23	1-3	23-41	34-55	---	0-5
Maní	8-10	1-4	30-50	34-56	---	0-4
Canola	5	2	58	21	---	14
Colza	2-5	1-2	10-15	10-20	---	55-70
Palma	32-47	1-6	40-52	2-11	---	1-6
Girasol	6	4	19	69	---	2
Higüerillo	2	1	3	5	88	1
Coco	7-10	1-4	5-8	1-3	---	75-86
Soya	7-11	3-6	22-34	50-60	---	11-22
Oliva	14	---	76	10	---	---
Maíz	8-10	1-4	30-50	34-56	---	1-4
Jatropha	16	10	41	32	---	1
Grasa ganado	23-29	21-26	39-42	2	---	4-11
Grasa cerdo	25-30	12-16	41-51	4-22	---	5-18
Aceite usado	17	12	55	8	---	8

Fuente: CEPAL. <http://www.eclac.org/publicaciones/xml/3/29423/L791-1.pdf>

No todos los aceites son adecuados para producción de biodiesel: los llamados aceites esenciales constituyen una familia de productos volátiles que no se prestan como materias primas para biodiesel, pertenecen a otras familias químicas (de los terpenos, fenoles y otras sustancias aromáticas) y poseen muy alto valor económico por sus propiedades aromáticas. Ejemplos son el aceite de la cáscara de naranja y el aceite de pino.

Muchas especies de oleaginosas no son empleadas para la producción de aceite y son usadas exclusivamente para la alimentación. El alto valor de estas oleaginosas en granos vuelve poco económica la extracción del aceite; como es el caso de varios tipos de semillas, como las nueces, las avellanas, el pistacho, la macadamia, el marañón, etc. En algunos casos, el aceite producido tiene también alto valor para fines farmacéuticos o cosméticos, como ocurre con el aceite de almendra. (Ref. 20)

1.2.2.2 Alcoholes

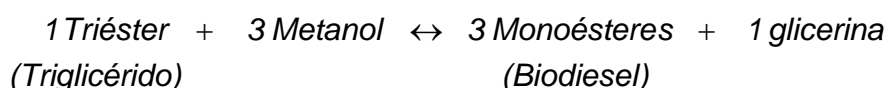
Los alcoholes que se pueden utilizar para la producción de biodiesel son los de cadena corta. Entre ellos, metanol, etanol, propanol, butanol y alcohol amílico.

El metanol (CH_3OH) y el etanol ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) son los más usados debido fundamentalmente al bajo costo y a sus propiedades. (Ref. 15) Aunque el etanol es mucho menos tóxico que el metanol, tiene que ser usado en su forma pura, totalmente deshidratada, la cual es más cara de obtener. Generalmente, el etanol es solamente 95% puro; el cinco por ciento restante tiene que ser destilado por un proceso químico. Adicionalmente, cuando se usa el etanol, el aceite tiene que estar totalmente seco. Ambas condiciones son muy difíciles de conseguir, especialmente con el aceite de restaurantes, el cual es usado para

freír vegetales, carne, pescado etc. La reacción con el metanol no requiere tanto secado; siempre es mejor usar el aceite más seco posible, pero un poco de agua no arruinará la reacción; tal vez resulte en una mayor producción de jabón, y puede que retarde la reacción un poco, pero aún es posible producir biodiesel de buena calidad. (Ref. 24)

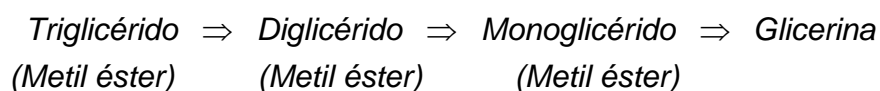
1.2.2.3 Las reacciones de transesterificación

La reacción química que produce el biodiesel a partir de los triglicéridos se llama transesterificación y su representación esquemática global está dada por:



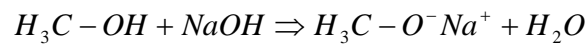
Cada molécula de biodiesel es un monoéster metílico, del tipo $R-COO-CH_3$, donde R es un radical de ácido graso y el grupo CH_3 proviene del metanol. En el caso de uso de etanol para la reacción, las moléculas de biodiesel serán monoésteres etílicos del tipo $R-COO-C_2H_5$.

La reacción real ocurre en etapas y puede ser representada esquemáticamente:

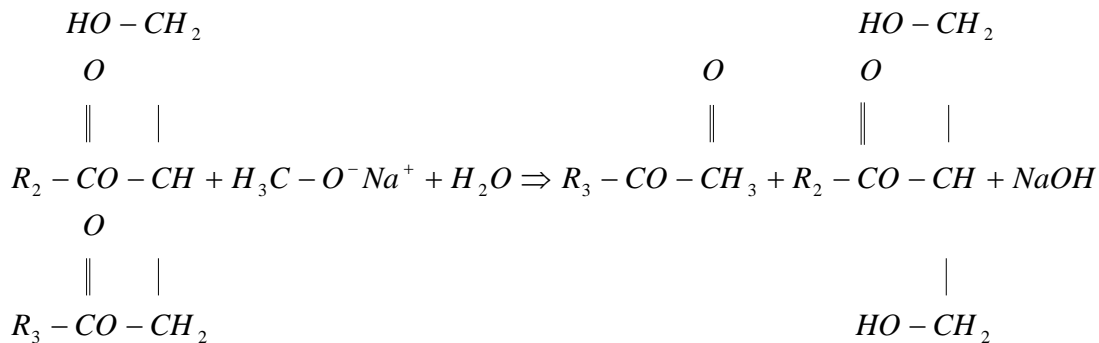


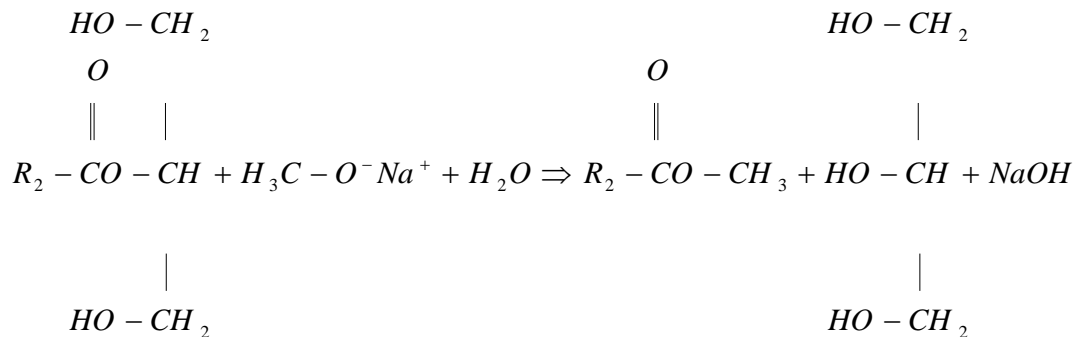
La descripción detallada de las etapas con participación del catalizador alcalino (NaOH o KOH) se da a continuación. En primer lugar, ocurre la

formación de metóxido de sodio o de potasio cuando se mezclan el metanol y el catalizador:



Es decir, el grupo metil del metóxido se une a uno de los ácidos grasos, produciendo una molécula de metil – éster (biodiesel) y transformando el triglicérido en un diglicérido. Es de notarse que el catalizador es restituido (NaOH). La reacción del diglicérido para monoglicérido es similar a la reacción de arriba empleando una molécula más de metóxido y agua con la formación de una nueva molécula de biodiesel, un monoglicerido y NaOH. Lo mismo ocurre entonces para el monoglicérido que se transforma finalmente en glicerina liberando la tercera molécula de biodiesel y de NaOH.





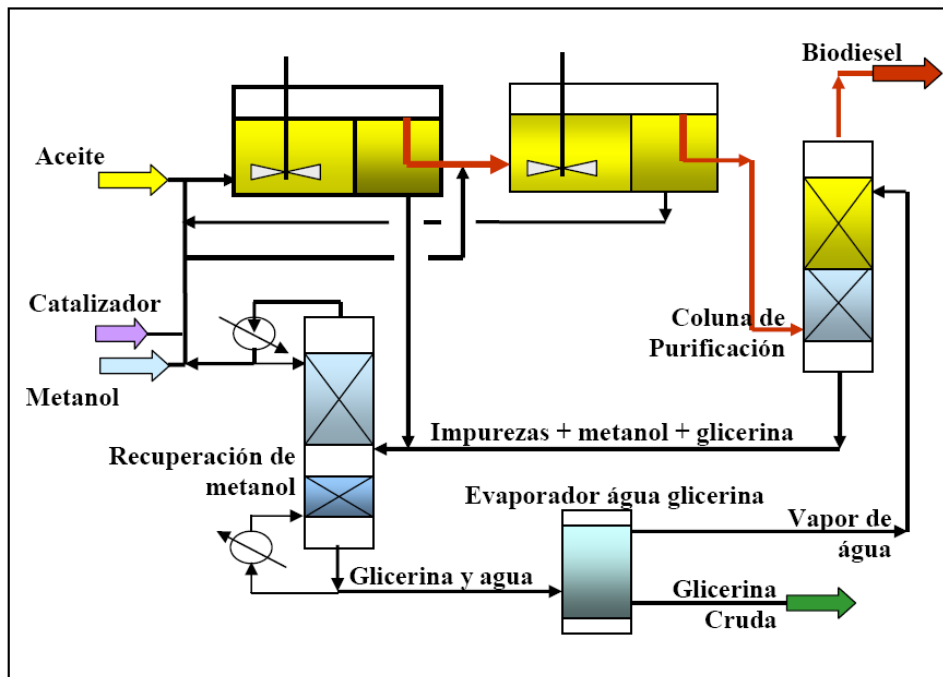
La reacción de transesterificación es reversible por lo que es necesario trabajar con exceso de metanol (o etanol) para lograr altos porcentajes de conversión de triglicéridos en glicerina con la consecuente producción de biodiesel. La conversión de los triglicéridos en glicerina nunca es del 100% y siempre restan productos intermediarios o laterales de la reacción, tales como diglicéridos, monoglicéridos y ácidos grasos libres (FFA). Esta es la razón para la necesidad de hacer siempre la purificación del biodiesel antes de su liberación para uso final. Como se trabaja con exceso de metanol, es importante separar el metanol del agua y reutilizarlo en el proceso. (Ref. 20)

1.2.3 Proceso de obtención de biodiesel

En la figura 12 se muestra el proceso Lurgi de producción en flujo continuo de biodiesel, el más empleado. Aceite, metanol y catalizador alimentan el reactor 1, donde son mezclados; con la reacción de transesterificación, ocurre una separación de dos fases. La fase más ligera, constituida por ésteres y aceite, es drenada para el segundo reactor, donde recibe metanol y catalizador adicionales. Esta segunda etapa de reacción maximiza la eficiencia de uso del aceite, reduce la cantidad de mono y diglicéridos y mejora la calidad del biodiesel. También en este reactor ocurre la separación de fases, en donde la fase ligera (biodiesel) es conducida por una columna de purificación donde el

biodiesel es lavado con agua, que remueve la glicerina y metanol residuales, así como otras impurezas. El producto final debe ser seco.

Figura 12 Proceso Lurgi de producción continua



Fuente: CEPAL. <http://www.eclac.org/publicaciones/xml/3/29423/L791-1.pdf>

La fase más pesada del reactor 2 contiene glicerina y aún mucho metanol y catalizador, por lo que es reciclada para el reactor 1. La fase más pesada del reactor 1 contiene glicerina, mucho metanol y otras impurezas y es conducida a un destilador que hace la recuperación del metanol, para reciclarlo. El agua empleada para lavar el biodiesel es conducida también para el recuperador de metanol. En la destilación, el metanol a ser reciclado sale en la parte de arriba y en el fondo sale una mezcla de agua, glicerina e impurezas. Para reducir el consumo de agua y hacer la concentración de la glicerina, esta mezcla va a un evaporador, donde el agua se evapora y es reconducida para la columna de purificación. La glicerina cruda posee una concentración alrededor

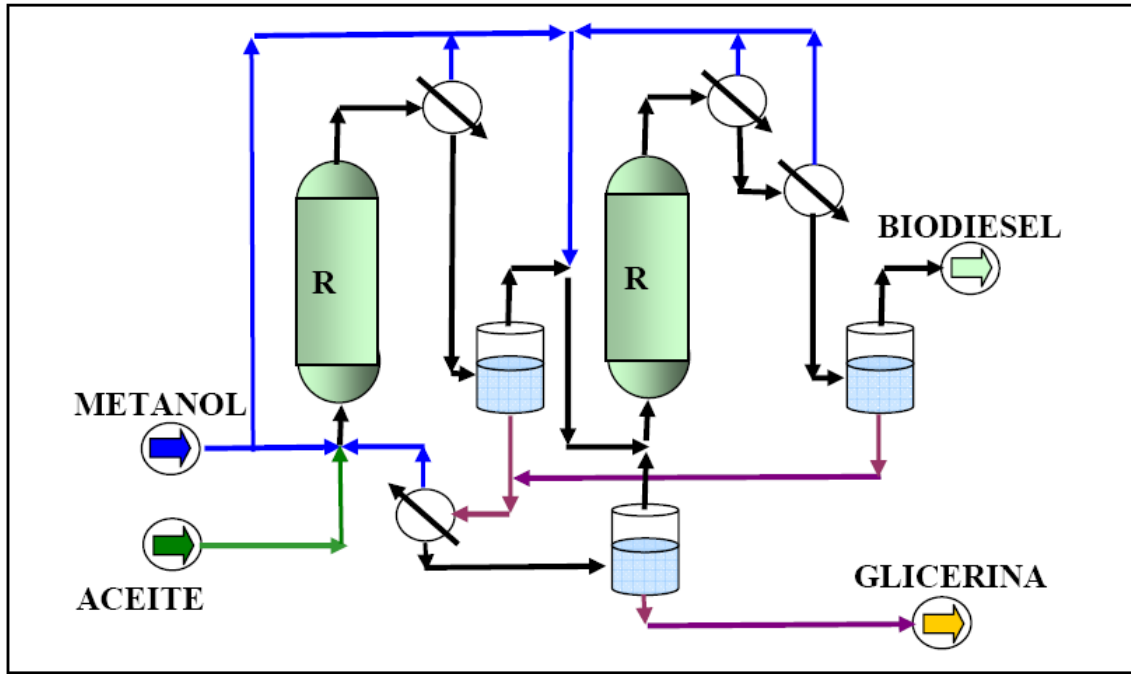
del 80% y contiene las impurezas retenidas en el proceso. Para obtener mejores precios, la glicerina debe ser purificada por destilación.

Las características más interesantes del proceso Lurgi son que puede ser adoptado para muchas materias primas diferentes, opera a presión atmosférica y con temperatura alrededor de 60°C, recupera metanol en exceso y el agua, la separación de fases ocurre por gravedad (no emplea centrifugas). Su eficiencia de conversión del aceite es de alrededor del 98%.

La empresa Axens, que desarrolla comercialmente los proyectos del Instituto Francés del Petróleo, hizo la propuesta de un sistema de producción de biodiesel también con dos reactores en serie, pero con catalizadores sólidos fijos, por lo que no es necesario alimentar el proceso con catalizador y la separación del biodiesel y glicerina se vuelve más simple. La figura 13 presenta esquemáticamente el proceso que se presta a grandes volúmenes de producción.

Las ventajas anunciadas del proceso con catalizador sólido son la alta pureza de la glicerina (98% min.), la gran eficacia de conversión de aceite en biodiesel ($\approx 100\%$), la inexistencia de sub-productos a tratar (ni FFA, ni aguas de proceso), y que no hay consumo de sustancias químicas ni se maneja el catalizador. (Ref. 20)

Figura 13 El proceso Axens



Fuente: CEPAL. <http://www.eclac.org/publicaciones/xml/3/29423/L791-1.pdf>

1.2.3.1 Los co-productos y subproductos de la producción de biodiesel

Los principales co-productos de producción del biodiesel son la glicerina y el alcohol en exceso.

El aprovechamiento del alcohol en exceso y recuperado es fundamental ya que se recomiendan desde 50% (metanol) hasta 300% (etanol) de exceso de alcohol en la reacción de transesterificación. La recuperación y deshidratación del alcohol permite su reutilización en la reacción, disminuyendo la necesidad de alcohol nuevo para reposición de las cantidades efectivamente usadas en la reacción y eventuales pérdidas.

La producción de glicerina ya sea bruta (alrededor de 65% glicerina) o destilada (arriba de 95%) también es muy importante por varias razones: no se puede descartar esta fase por motivos ambientales y los precios de la glicerina ayudan a viabilizar económicamente el proyecto. Las principales impurezas presentes en la glicerina bruta producida en la transesterificación son agua, catalizador, trazos de ésteres, y propanodiol.

El mercado de glicerina es sensible a la penetración del biodiesel en grandes cantidades. Por otro lado, con la caída de los precios de la glicerina, las posibilidades de su empleo en otras aplicaciones hasta ahora no atractivas se pueden materializar, movimiento que puede evitar depreciación elevada de los precios en el mercado de la química de la glicerina. Los subproductos del procesamiento de la glicerina deben ser tratados de forma conveniente. (Ref. 20)

1.2.4 Teoría de lavado del biodiesel

Después de la reacción y del asentamiento inicial, algunas impurezas solubles en agua quedan en el biodiesel. Estas impurezas se encuentran en todo biodiesel fabricado artesanalmente, independientemente de la calidad de la reacción o del aceite. La mayoría de los contaminantes son jabones, una pequeña cantidad de residuos de metanol, una pequeña cantidad de residuos de lejía y glicerina libre. Lavar el combustible con agua remueve algunas de estas impurezas, pero no remueve mono y di glicéridos (los contaminantes que resultan de una reacción incompleta).

El lavado también tiene otras dos ventajas: detiene el resto de la reacción lenta que algunas veces ocurre (en el biodiesel no lavado a veces puede observarse la glicerina asentándose durante un periodo de meses o semanas,

lo cual puede detenerse lavando el combustible y removiendo el metanol o el catalizador) y provee información para el control de calidad.

La temperatura es otro factor importante que se debe tener en mente al lavar. Es más fácil trabajar con agua y biodiesel tibios. Existe una menor probabilidad de causar una emulsión que si utiliza estas sustancias frías. Si se está teniendo dificultades al lavar, agregar calor de primera instancia es una buena solución. Generalmente no es necesario calentar el agua y el biodiesel, lo cual puede resultar costoso a largo plazo.

Entre más tiempo deja que su biodiesel se asiente después de la reacción, más fácil será el proceso de lavado.

1.2.4.1 Métodos de Lavado

Existen cuatro maneras principales de lavar el biodiesel: lavado con burbujas, lavado mediante atomización, lavado con agitación y lavado estático. Estos diversos lavados pueden ser utilizados juntos o separados, pero deben formar una estrategia de lavado cohesiva.

- **Lavado con burbujas:** consiste en añadir agua gentilmente al biodiesel, agregar una piedra de aire de acuario y colocar una bomba de aire en la porción de agua (localizada bajo una capa flotante de biodiesel) que burbujee el aire a través del agua. Las burbujas de aire recogen una diminuta cantidad de agua y la transportan a través del biodiesel, creando una agitación indirecta de los dos líquidos y recogiendo jabones y otros contaminantes en el camino. Cuando la burbuja explota en la superficie, deja caer el agua recogida, la cual absorbe más jabones y otros contaminantes a medida que se hunde. El tiempo de saturación dependerá de la cantidad de agua que se

utilice, de cuántos lavados se han hecho y del sistema de burbujeo. Debes continuar lavando con burbujas hasta que el agua de lavado se mantenga transparente durante un lavado. También se puede medir pH del agua antes y después de un lavado. Si el pH del agua se queda igual antes y después del lavado, significa que no hay más contaminantes siendo extraídos, así que el proceso de lavado está completo.

- **Lavado mediante atomización:** este sistema utiliza más agua y un equipo más complicado. Se usa un atomizador (generalmente de una tienda de suministros para jardines) suspendido sobre un recipiente de biodiesel. Las minúsculas gotas de agua que rocía el atomizador caen y pasan lentamente por el biodiesel, agitando el combustible menos que el lavado con burbujas y removiendo los contaminantes gradualmente. Una agitación más gentil da menos lugar a que los jabones y los monos- y di-glicéridos formen una emulsión.
- **Lavado estático:** el lavado estático es la forma de lavado más gentil, no requiere equipo y necesita muy poco trabajo. Consiste en verter agua (preferiblemente caliente) en un tanque de biodiesel y dejar que los líquidos reposen juntos. El contacto entre la capa de agua en la base y la capa de biodiesel arriba crea un efecto de limpieza lento y gentil debido a la polaridad del agua y a las gentiles corrientes de convección creadas a medida que la temperatura se equilibra. Por ello, el lavado estático es un lavado inicial excelente. El tiempo que tomará para que el agua se sature depende principalmente de su temperatura, la cantidad de agua y el tipo de tanque de lavado que se utilice (el área de la superficie de contacto entre el agua y el

biodiesel). El lavado estático puede lavar totalmente un lote de biodiesel, pero esto quizás tomaría varias semanas por cada lote.

- **Lavado con agitación:** este es el lavado más efectivo, aunque al mezclar mecánicamente el biodiesel con agua se formará una emulsión si se intenta lavar combustible que no ha terminado de reaccionar. El tiempo de agitación necesario variará dependiendo del clima y la estrategia de mezclar. Además, entre más violenta y más larga es tu agitación, es más probable que cause una emulsión. (Ref.24)

1.2.5 Propiedades de caracterización de biodiesel

Las propiedades del biodiesel comerciales dependen tanto del proceso de fabricación como de la naturaleza de los lípidos a partir de los cuales se ha producido. El biodiesel en función de la naturaleza de la fuente, animal o vegetal, proporcionará unas características particulares:

1.2.5.1 Punto de Inflamación

Este parámetro generalmente se determina para satisfacer temas legales de seguridad. También es útil para conocer si existe una cantidad excesiva de alcohol no reaccionado en el proceso de obtención en el caso del biodiesel.

1.2.5.2 Viscosidad

Debe poseer una viscosidad mínima para evitar pérdidas de potencia debidas a las fugas en la bomba de inyección y en el inyector. Además, le da características de lubricidad al sistema de combustible. Por la otra parte

también se limita la viscosidad máxima por consideraciones de diseño y tamaño de los motores, y en las características del sistema de inyección.

1.2.5.3 Densidad

Da idea del contenido en energía del combustible. Mayores densidades indican mayor energía térmica y una economía de combustible mejor.

1.2.5.4 Cenizas sulfatadas

Los materiales que forman cenizas en un biodiesel se pueden presentar de tres formas:

- Sólidos abrasivos
- Jabones metálicos solubles
- Catalizadores no eliminados en el proceso.

1.2.5.5 Azufre

Contribuye al desgaste del motor y a la aparición de depósitos que varían considerablemente en importancia dependiendo en gran medida de las condiciones de funcionamiento del motor. También pueden afectar al funcionamiento del sistema de control de emisiones y a límites medioambientales.

1.2.5.6 Número de cetano

Es una medida de la calidad de ignición de un combustible e influye en las emisiones de humo y en la calidad de la combustión. El número de cetano

depende del diseño y tamaño del motor, de las variaciones de la carga de velocidad y condiciones de arranque y atmosféricas.

1.2.5.7 Índice de yodo

Indica la tendencia a la oxidación de un biodiesel, porque da idea del grado de insaturaciones que poseen sus ésteres.

1.2.5.8 Punto de nube

Indica la temperatura a la cual empiezan a precipitar ciertos compuestos del combustible (parafinas, materia insaponificable, etc.). Es una medida muy importante a tener en cuenta cuando se usa el motor en climas fríos. El valor debe ser definido por el usuario, ya que depende del clima en el cual el motor se utilice.

1.2.5.9 Agua y sedimentos

El agua se puede formar por condensación en el tanque de almacenamiento. La presencia de agua y sólidos de desgaste normalmente pueden colmatar filtros y darle al combustible unas propiedades de lubricidad menores. El biodiesel puede absorber hasta 40 veces más agua que el diesel.

1.2.5.10 Residuo carbonoso

Da una idea de la tendencia del combustible a formar depósitos carbonosos.

1.2.5.11 Número ácido, TAN

Determina el nivel de ácidos grasos, o generados por degradación, que se presentan en el combustible. Si posee un alto grado de acidez se forman una cantidad importante de depósitos y también se producirá mayor corrosión en el sistema.

1.2.5.12 Contenido en metales (Na, K, P,..) y ácidos grasos

Contribuyen al aumento del residuo carbonoso de manera notable y también a las cenizas, generando residuos inorgánicos parcialmente quemados. Además, también pueden formar jabones que colmatan los filtros de combustible.

1.2.5.13 Glicerina libre

Determina el nivel de glicerina no enlazada presente en el biodiesel. Su presencia normalmente se debe a una mala purificación del biodiesel. Niveles altos pueden causar problemas de depósitos en el inyector, así como colmatación de filtros. Pueden dañar los sistemas de inyección debido a los compuestos inorgánicos y jabones que se acumulan en la glicerina.

1.2.5.14 Glicerina total

Determina el nivel de glicerina enlazada y no enlazada presente en el combustible. Niveles bajos significan que se ha producido un alto grado de conversión en el aceite o grasa, y se han formado gran cantidad de monoésteres. Niveles altos de mono, di y triglicéridos pueden provocar la colmatación de los filtros, depósitos carbonosos en los inyectores y pueden

afectar adversamente a las propiedades a bajas temperaturas. Esto es debido a que al poseer temperaturas de ebullición superiores provocan que la combustión sea bastante peor. Además, aumentan la viscosidad del biodiesel.

1.2.5.15 Contenido de alcohol

Puede provocar problemas de lubricidad y en el número de cetano. Desde el punto de vista de la seguridad el punto de inflamación disminuye. Por otro lado, junto a la presencia de alcohol puede venir asociada glicerina disuelta en este con los consiguientes problemas antes comentados. (*Ref. 18*)

1.2.5.16 Balance hidrófilo-lipófilo (BHL)

El balance hidrófilo-lipófilo (BHL) es una medida de la solubilidad en agua o en lípidos de un compuesto, y varía aproximadamente de 2 a 21: aquellos emulsionantes con valores de BHL de 2 a 6 son más solubles en aceites, mientras que los de 8 o más son más hidrosolubles: los primeros favorecen las emulsiones de agua en aceite, y los segundos, las de aceite en agua. El BHL de los diferentes emulsionantes se conoce, pero en caso de no ser así, se puede calcular por comparación con compuestos de referencia.

En la literatura existen algunas ecuaciones matemáticas que relacionan el BHL con algún factor o característica típica de un determinado tipo de emulsionante: éste es el caso de los mono y di glicéridos y otros ésteres de ácidos grasos, cuyos índices de yodo (A) y de saponificación (S) se relacionan así:

$$BHL = 20 \left(1 - \frac{S}{A} \right)$$

Igualmente, existe otra relación como:

$$BHL = \frac{E + P}{5}$$

Donde E es igual al porcentaje en peso del polioxietileno del emulsionante y P, el porcentaje en peso del poliol empleado, ya sea sorbitol o glicerina.

1.2.6 La calidad del biodiesel

Es muy importante fijar estándares de calidad para el biodiesel, teniendo en cuenta que las propiedades del biodiesel varían de acuerdo con su origen (materia prima). Además, en el proceso de fabricación del biodiesel se pueden formar contaminantes en el producto final que deben ser eliminados para que el biodiesel producido tenga las características adecuadas a su uso en motores diesel.

Los principales estándares de calidad son las normas ASTM D6751-03 empleada en los Estados Unidos y la norma EN 14214 usada en la Unión Europea. A pesar de tener muchos puntos en común, estas dos normas también presentan algunas diferencias importantes.

En la tabla III se especifican las características físico-químicas ASTM exigidas para el Biodiesel (B100) en el Reglamento Técnico Centro Americano.

Tabla III Especificaciones de Biodiesel del RTCA

Especificaciones ASTM D 6751 para Biodiesel			
CARACTERÍSTICAS	UNIDADES	MÉTODO DE ANÁLISIS	VALORES
Aditivos	-----	-----	Reportar
Contenido de ésteres	*(% masa)	EN 14103	96.5 mín.
Contenido de metanol o etanol	*(% masa)	EN 14110	0.20 máx.
Gravedad API a 15,56 °C (60 °F) o Densidad a 15 °C	°API kg/m ³	ASTM D-287 ASTM D-1298	Reportar
Estabilidad a la oxidación, 110 °C	h	EN 14112	6.0 mín.
Punto de inflamación ("Flash point")	°C	ASTM D 93	130.0 mín.
Agua y sedimentos	**(% volumen)	ASTM D 2709	0.050 máx.
Viscosidad cinemática a 40 °C.	mm ² /s	ASTMD 445	1.9 – 6.5
Ceniza sulfatada	*(% masa)	ASTM D 874	0.020 máx.
Contenido de azufre total	mg/kg	ASTM D 5453	15 máx.
Corrosión tira de cobre, 3 h, 50 °C	-----	ASTM D 130	N° 3 máx.
Número de Cetano	-----	ASTM D 613	47 mín.
Punto de Enturbiamiento	°C	ASTM D 2500	Reportar
Residuo de carbón	*(% masa)	ASTM D 4530	0.050 máx.
Número Ácido	mg KOH / g	ASTM D 664	0.50 máx.
Glicerina libre	*(% masa)	ASTM D 6584	0.020 máx.
Glicerina total	*(% masa)	ASTM D 6584	0.240 máx.
Contenido de fósforo	*(% masa)	ASTM D 4951	0.001 máx.
Temperatura de destilación, temperatura equivalente atmosférica, 90% recuperado	°C	ASTM D 1160	360 máx.
Sodio (Na) y potasio (K) combinados	mg/kg	UOP 391	5 máx.
Calcio (Ca) y magnesio (Mg) combinados	mg/kg	EN 14538	5 máx.

*fracción de masa (% masa)

**fracción de volumen (% volumen)

Fuente: Reglamento Técnico Centro Americano RTCA 75.02.43:06

1.3 Refractometría

Es una técnica analítica que consiste en la medida del índice de refracción de un líquido con objeto de investigar su composición si se trata de una disolución o de su pureza si es un compuesto único.

1.3.1 Teoría básica

La refracción es la desviación que experimentan los rayos luminosos al pasar de un medio transparente de densidad determinada a otro cuya densidad es distinta de la del anterior. Si bien este fenómeno se presenta generalmente al paso de un medio a otro, existe un caso en el que dicho paso no implica refracción, que es cuando la incidencia se produce perpendicularmente a la superficie de separación de ambos medios. La refracción es fundamental para la explicación de los procesos que experimenta la luz en prismas y lentes de todo tipo. Mientras que la luz se propaga con velocidades diferentes dependiendo de la densidad del medio por el que lo hace (cuanto mayor es la densidad de éste tanto más lenta es la propagación de la luz), la intensidad del fenómeno de la refracción depende del grado de la variación de la velocidad de propagación (cuanto mayor es éste tanto mayor es la refracción que experimenta el rayo y en consecuencia tanto mayor es el poder de refracción del medio).

El fenómeno de la refracción está basado en el cambio de velocidad que experimenta la radiación electromagnética al pasar de un medio a otro, como consecuencia de su interacción con los átomos y moléculas del otro medio. Dicho cambio de velocidad se manifiesta en una variación en la dirección de propagación.

La medida relativa de la variación entre dos medios tomando uno fijo como referencia se le conoce como índice de refracción n y en general está expresado con respecto al aire. El instrumento para medir n , es básicamente un sistema óptico que busca medir el ángulo que se ha desviado la radiación, utilizando para ello dos prismas: uno fijo de iluminación sobre el cual se deposita la muestra y uno móvil de refracción. Los prismas están rodeados de una corriente de agua termostatzada, ya que la temperatura es una de las variables que afecta a la medida.

En la actualidad la determinación directa para análisis, ha sido superada por la información obtenida por otras técnicas, no obstante es ampliamente utilizada como herramienta de los detectores de muchos aparatos modernos como cromatógrafos, etc.

En toda las técnicas refractometricas es necesario realizar calibraciones periódicas del instrumento. Como patrones para este fin se utiliza líquidos puros como el agua ($n = 1.3334$), tolueno ($n = 1.4969$) y metil ciclohexano ($n = 1.4231$); estos dos últimos compuestos pueden emplearse también como referencia una pieza de vidrio de prueba, proporcionada con muchos refractómetros. El índice de refracción del patrón y la lectura de la escala del instrumento se aplica como una corrección aritmética en las determinaciones posteriores. Alternativamente con el refractómetro de abbe puede ajustarse mecánicamente el objetivo del telescopio, de modo que el instrumento indique el índice de refracción apropiado para el patrón.

1.3.2 Leyes de la refracción

El fenómeno de la refracción se rige de acuerdo con dos leyes de las cuales la primera afirma que tanto el rayo incidente como el refractado y la

normal a la superficie de refracción están contenidos en un mismo plano. La segunda ley, llamada también ley de Snell, afirma que para una luz con una frecuencia determinada, el cociente entre el seno del ángulo de incidencia y el seno del ángulo de refracción es constante e igual al índice relativo de ambos medios. Esta ley constituye el fundamento del funcionamiento de los instrumentos llamados refractómetros empleados para la determinación de los índices de refracción de los diversos materiales a partir de la medición precisa de los ángulos de incidencia y refracción.

1.3.3 Índice de refracción

Es la relación entre la velocidad de la luz en el vacío y su velocidad en un medio. Numéricamente se define como la relación entre el seno del ángulo de incidencia y el seno del ángulo de la onda refractada; esta relación se denomina ley de Snell.

En general, para todos los materiales la velocidad de la luz que los atraviesa es menor que la velocidad de la luz en el vacío, por lo que sus índices de refracción son superiores o iguales a la unidad. La luz tiene una velocidad dada por el producto entre la longitud de onda y su frecuencia, por lo cual un medio tendrá diferentes índices de refracción para las diferentes longitudes de onda de la luz que lo atraviesa. Este fenómeno se conoce como dispersión de los índices de refracción.

Un medio isótropo es aquél para el cual existe un único índice de refracción, es decir, que el índice de refracción es el mismo independientemente de la dirección en que la luz lo cruce atravesado. Un medio con más de un índice de refracción permite el paso de la luz según unas direcciones determinadas, recibiendo el nombre de medio anisótropo. (*Ref. 19*)

1.4 Características físicas y químicas generales de los solventes puros a utilizar

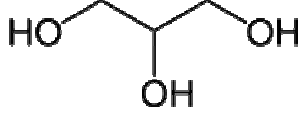
Tabla IV Propiedades físicas del agua desmineralizada

Nombre común	Agua
Apariencia y olor	Líquido transparente sin olor
Punto de ebullición	100 °C
Punto de fusión	0 °C
Densidad relativa	1.00 g/cc a 4 °C
Constante dieléctrica a 25 °C	81.22
Índice de refracción	1.33
Viscosidad dinámica a 20 °C	0.952 mPa s
Masa molecular	18.0148 g/mol
Fórmula estructural	H ₂ O

Tabla V Propiedades físicas del biodiesel

Glicerina total	0.221 ± 0.001 %
Glicerina libre	0.019 ± 0.003 %
Humedad	1,090 ppm

Tabla VI Propiedades físicas y químicas del glicerol

General	
Nomenclatura IUPAC	1,2,3-Propanotriol
Otros nombres	Glicerol, Glicerina, Propanotriol, Propan-1,2,3-triol, 1,2,3-Trihidroxipropano
Fórmula molecular	
Fórmula semidesarrollada	HOCH ₂ -CHOH-CH ₂ OH
Fórmula estructural	C ₃ H ₈ O ₃
Número CAS	56-81-5
Propiedades físicas	
Estado de agregación	Líquido
Apariencia	Incoloro
Masa molecular	92.09382 uma
Densidad a 25 °C	1.26 g/ml
Punto de fusión	291 K (18 °C)
Punto de ebullición	563 K (290 °C)
Peligrosidad	
Punto de inflamabilidad	433 K (160 °C)
Temperatura de autoignición	623 K (350 °C)

2. METODOLOGÍA

2.1 Recursos y materiales

2.1.1 Localización

La parte experimental de la investigación se llevará a cabo en la Universidad de San Carlos de Guatemala, en el laboratorio de química de la Escuela de Ingeniería Química.

2.1.2 Recursos Humanos

Investigador: María Gabriela Hernández Castellanos

Asesor: Ing. Qco. César Alfonso García Guerra.

2.1.3 Recursos materiales

2.1.3.1 Reactivos

- Biodiesel (proporcionado por Lic. Pedro Ordoñez)
- Glicerol grado reactivo 95.5% (comprado en Química Técnica)
- Agua destilada

2.1.3.2 Equipo y cristalería

- Balanza analítica: Marca: OHAUS
Modelo: Adventurer, AR1530
Máxima capacidad: 150 g

Mínimo valor de medición: 0.001 g

Voltaje: 8 – 14.5 v

Potencia: 6 w

- Plancha de calentamiento con agitación:

Marca: SYBRON/Thermolyne

Modelo: Nuova II, SP18425

Voltaje: 120 v

Amperios: 7.5 A

Potencia: 80 w

- Refractómetro:

Marca: Abbe

Modelo: 32200

Rango de temperatura: 0 a 70 °C

Precisión: ± 0.0002

Rango de medición: 1.3000 – 1.7000

- Equipo de enfriamiento
- Earlenmeyers tipo pirex de 250 ml
- Pizetas de polietileno de 125 ml
- Pipetas serológicas de 1, 5 y 10 ml
- Buretas de 25 y 10 ml
- Soportes Universales
- Anillos metálicos para ampollas de decantación
- Pinzas metálicas para buretas
- Beakers tipo pirex de 25, 50, 250 y 1000 ml
- Probetas de 10, 25, 50 y 100 ml
- Tubos de ensayo de 5 y 10 ml
- Agitador magnético

- Picnómetro de 10 ml
- Termómetro [0-150 °C]
- Ampolla de decantación de 250 y 1000 ml

2.1.3.3 Material de escritorio

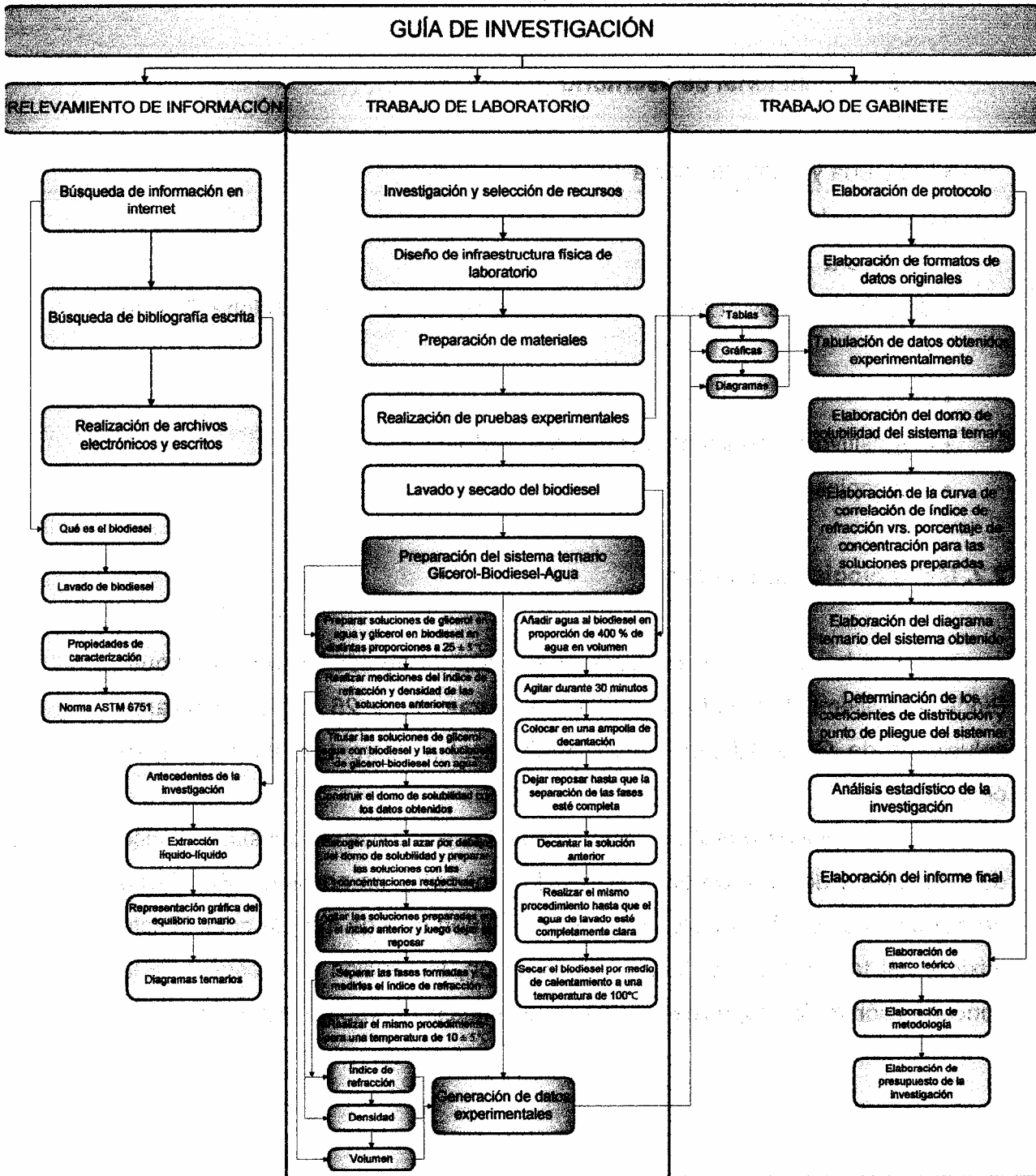
- Papelería y útiles de oficina
- Computadora
- Impresora
- Software: Microsoft Word, Microsoft Excel, TriDraw 4.5, Adobe Reader 7.0.
- CD's
- Dispositivo de almacenamiento masivo USB
- Fotocopias

2.2. Metodología Experimental

Para determinar el equilibrio del sistema líquido-líquido de Agua-Biodiesel-Glicerol, trabajado a dos temperaturas, 10 y 25 °C, se realizarán soluciones de Glicerol-Agua y Glicerol-Biodiesel a diferentes porcentajes en peso.

Las soluciones a realizar serán expuestas a análisis de densidad, índice de refracción y distribución de soluto en los solventes en equilibrio. El método de picnometría se utilizará para evaluar el volumen total de mezcla del solvente mixto y así también con el índice de refracción, la relación con respecto a la concentración de las especies químicas presentes en el trabajo experimental.

Figura 14 Flujograma de la metodología para un proceso de extracción líquido – líquido



2.2.1 Procedimiento experimental para el lavado del biodiesel

El lavado de biodiesel se debe realizar para obtener un componente puro sin glicerol por medio del siguiente procedimiento:

- a) Añadir agua la biodiesel en proporción de 400 % de agua en volumen.
- b) Agitar durante 30 minutos.
- c) Colocar la solución anterior en una ampolla de decantación.
- d) Dejar reposar hasta que la separación de las fases esté completa.
- e) Decantar la solución del inciso anterior.
- f) Realizar el mismo procedimiento hasta que el agua de lavado esté completamente clara.
- g) Secar el biodiesel por medio de calentamiento a una temperatura de 100 °C durante 10 minutos agitando constantemente.

2.2.2 Procedimiento experimental para el sistema líquido-líquido glicerol-biodiesel-agua

A una temperatura constante de 25 ± 5 °C.

- a) Preparar soluciones de glicerol en agua en proporciones de 1, 5, 10, 20, 35, 40, 50, 75, 85, 90 % en volumen.
- b) Tomar tres alícuotas de cada solución y medir el índice de refracción.
- c) Tomar tres alícuotas de cada solución y medir la densidad por medio de un picnómetro.
- d) Tomar tres alícuotas de 3 ml de cada solución y agregar biodiesel lentamente, manteniendo temperatura y agitación constante, hasta completar dos fases. Anotar el volumen requerido.

- e) Construir el domo de solubilidad para los datos obtenidos en los incisos anteriores.
- f) Escoger 8 puntos al azar por debajo del domo de solubilidad y preparar las soluciones con las concentraciones respectivas.
- g) Las soluciones preparadas en el inciso (f) se agitan aproximadamente por 25 minutos, luego dejar reposar por 30 min.
- h) Separar las dos fases formadas en el inciso (g) de cada solución y medirle índice de refracción.
- i) Los pasos anteriores se realizarán para la temperatura de 10 ± 5 °C.

A una temperatura constante de 25 ± 5 °C.

- a) Preparar soluciones de Glicerol en Biodiesel en proporciones de 0.10, 0.25, 0.30, 0.5, 1, 2, 3, 5, 6, 8 % en volumen.
- b) Tomar tres alícuotas de cada solución y medir el índice de refracción.
- c) Tomar tres alícuotas de cada solución y medir la densidad por medio de un picnómetro.
- d) Tomar tres alícuotas de 3 ml de cada solución y agregar agua lentamente, manteniendo temperatura y agitación constante, hasta completar dos fases. Anotar el volumen requerido.
- e) Construir el domo de solubilidad para los datos obtenidos en los incisos anteriores.
- f) Escoger 8 puntos al azar por debajo del domo de solubilidad y preparar las soluciones con las concentraciones respectivas.
- g) Las soluciones preparadas en el inciso (f) se agitan aproximadamente por 25 minutos, luego dejar reposar por 30 min.
- h) Separar las dos fases formadas en el inciso (g) de cada solución y medirle índice de refracción.
- i) Los pasos anteriores se realizan para la temperatura de 10 ± 5 °C.

2.2.3 Método para la elaboración de la curva de solubilidad

2.2.3.1 Determinación de densidad

La densidad se determinará aplicando el método experimental de picnometría según la norma ASTM D-45.

2.2.3.2 Determinación del índice de refracción

Para medir el índice de refracción se utilizará un refractómetro Abbe modelo 32200, por medio del siguiente procedimiento:

- a) Ajustar la escala del refractómetro.
- b) Comprobar que el prisma este limpio. Utilizar una pipeta para aplicar su muestra líquida al prisma. Tener cuidado de no tocar el prisma con el extremo de la pipeta, esto puede rasguñar el cristal suave del prisma.
- c) Colocar de 2 a 3 gotas de solución en el centro de la superficie del prisma.
- d) Cerrar cuidadosamente el prisma secundario.
- e) Encender la lámpara usando el interruptor en el lado izquierdo. Ajustar la lámpara para asegurar el brillo adecuado en el prisma de medición.
- f) Observar por el ocular, girar la perilla de compensación de color hasta que aparezca una línea clara y definida en el campo de visión.
- g) Girar la perilla de medición alineando la línea delimitadora con las líneas de intersección (ajuste claro y oscuro al centro)
- h) Mover la palanca de la parte inferior izquierda y leer en la escala superior el índice de refracción y repetir la operación en función del número de soluciones a usar.

- i) Registrar el índice de refracción. Después leer el termómetro y registrar la temperatura.
- j) Después de terminar, limpiar el refractómetro.

2.2.4 Método para la determinación del balance hidrófilo-lipófilo (BHL)

2.2.4.1 Índice de acidez basado en el método oficial AOCS Ca 5a – 40

El número ácido caracteriza la presencia de ácidos grasos libres en la grasa. El número ácido se expresa en cantidad de miligramos de hidróxido potásico necesarios para neutralizar los ácidos grasos libres en 1 g de grasa. Se determina por medio del siguiente procedimiento:

- a) Pesar aproximadamente de 5 a 10 g de muestra.
- b) Adicionar 75 ml de alcohol etílico (95 % en volumen) caliente neutralizado y 2 ml de fenolftaleína como indicador.
- c) Titular la solución estándar de hidróxido de sodio 0.25 N, agitando vigorosamente hasta que aparezca el primer color rosado permanente, el color debe persistir por 30 segundos.

2.2.4.2 Índice de saponificación basado en el método oficial AOCS Cd 8-53

Número de saponificación se denomina el número de miligramos de hidróxido de potasio que se necesita para neutralizar todos los ácidos grasos (libres y ligados en forma de glicéridos) que se contienen en 1 g de grasa. Se determina por medio del siguiente procedimiento:

- a) Pesar 5 g de muestra y agregar 50 ml de solución de hidróxido de potasio alcohólica (0.1 N) con una pipeta.
- b) Preparar un blanco de forma simultánea a la muestra.
- c) Colocar los balones (blanco y muestra) en el condensador hasta que la saponificación sea completa (aproximadamente 60 minutos).
- d) Después obtener la muestra colectada, lavar el condensador con una cantidad mínima de agua destilada (1 a 2 ml)
- e) Titular con la solución de ácido clorhídrico (0.5 N) utilizando como indicador fenolftaleína.
- f) Calcular el índice de saponificación.

2.2.5 Análisis Estadístico

Se aplicó un análisis estadístico a los datos obtenidos del experimento y se determinaron los resultados bajo las pruebas de Fisher y Duncan.

2.2.6 Generación de datos

Las tablas y gráficas se realizaron en base a lo especificado en el protocolo de trabajo de graduación.

2.2.7 Manejo de desechos líquidos

Los agentes residuales en la investigación básicamente son soluciones acuosas de glicerol y biodiesel.

Tabla VII Manejo de desechos líquidos

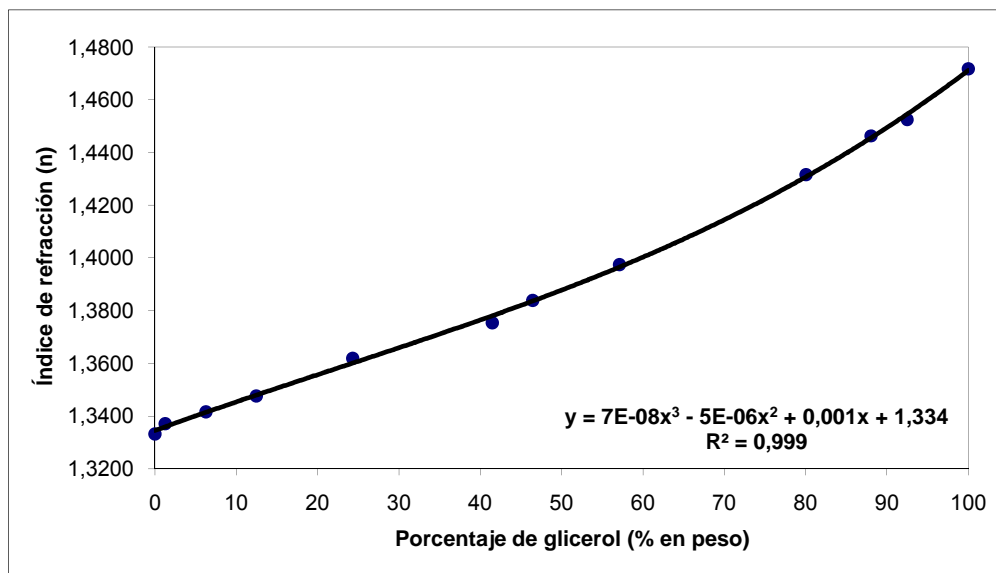
Desecho	Método	Tratamiento
Restos acuosos de soluciones de biodiesel	Método de extracción de Soxhlet	<ol style="list-style-type: none"> 1. Acidular la muestra con HCl concentrado hasta un $\text{pH} \leq 2$. 2. Preparar dos discos de tela de muselina del mismo diámetro que el papel de filtro. 3. Colocar el papel de filtro entre los dos discos de tela, y usando el vacío pasar por el filtro 100 ml de tierra de diatomea; luego, se lava con tres volúmenes de 100 ml de agua destilada. Se prosigue el vacío hasta que no pase más agua a través del filtro. 4. Se filtra la muestra acidificada por la compresa filtrante preparada, mediante vacío, que se continúa hasta que no pase más agua por el filtro. 5. Confeccionar un cartucho de papel de filtro. Introducir en él algodón con suficiente hexano. 6. Se introducen en este cartucho los filtros utilizados doblándolos con ayuda de unas pinzas en una especie de rollitos. 7. Limpiar el interior y la tapa de la botella de muestra y el interior del embudo de Buchner con algodón impregnado en hexano para quitar toda la película de aceite e introducirlo en el cartucho. Una vez realizada esta operación, cerrar bien el cartucho. 8. Desecar el cartucho en estufa a 103°C durante 30 min exactamente. 9. Tarar un matraz de fondo redondo previamente

		<p>limpiado con mezcla crómica, para eliminar todo resto de grasas, desecado en estufa durante 30 min y enfriado a temperatura ambiente en un desecador.</p> <p>10. Colocar el cartucho desecado en el cuerpo de extracción de Soxhlet. Montar el dispositivo para la extracción, añadiendo la cantidad de hexano suficiente (unos 250 ml.).</p> <p>11. La extracción debe hacerse con una frecuencia de 20 ciclos/h durante 4 horas que se miden desde el primer ciclo. La temperatura debe mantenerse a unos 70 °C.</p> <p>12. Concluida la extracción, eliminar el disolvente por destilación (en un rotoevaporador).</p>
Restos acuosos de soluciones de glicerol	Concentración	<p>1. En un evaporador concentrar la glicerina hasta un 80 % para su reutilización.</p>

Fuente: Referencia 22.

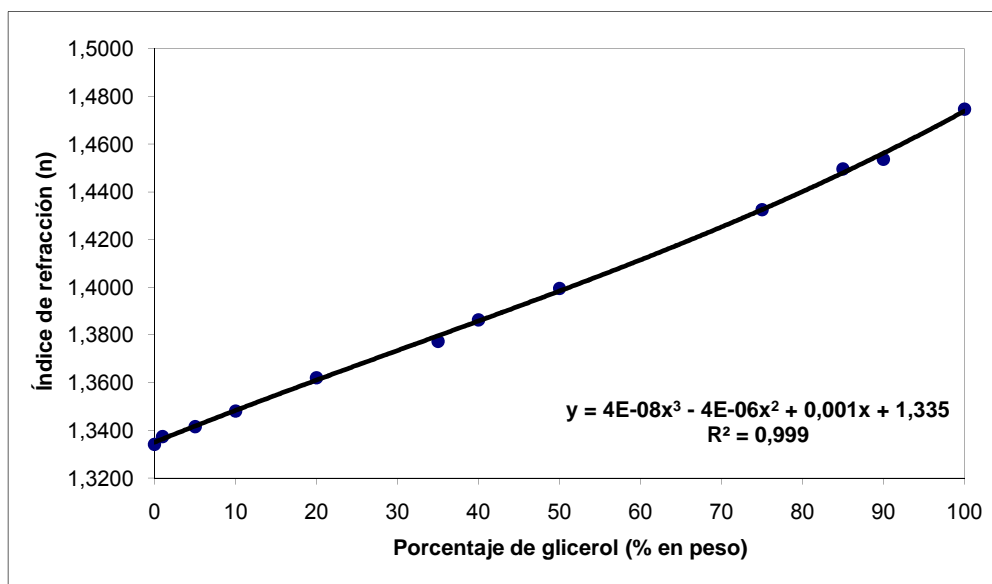
4. RESULTADOS

Figura 15 Curva de correlación para los índices de refracción en función de la concentración de la mezcla binaria glicerol-agua a 23 ° C



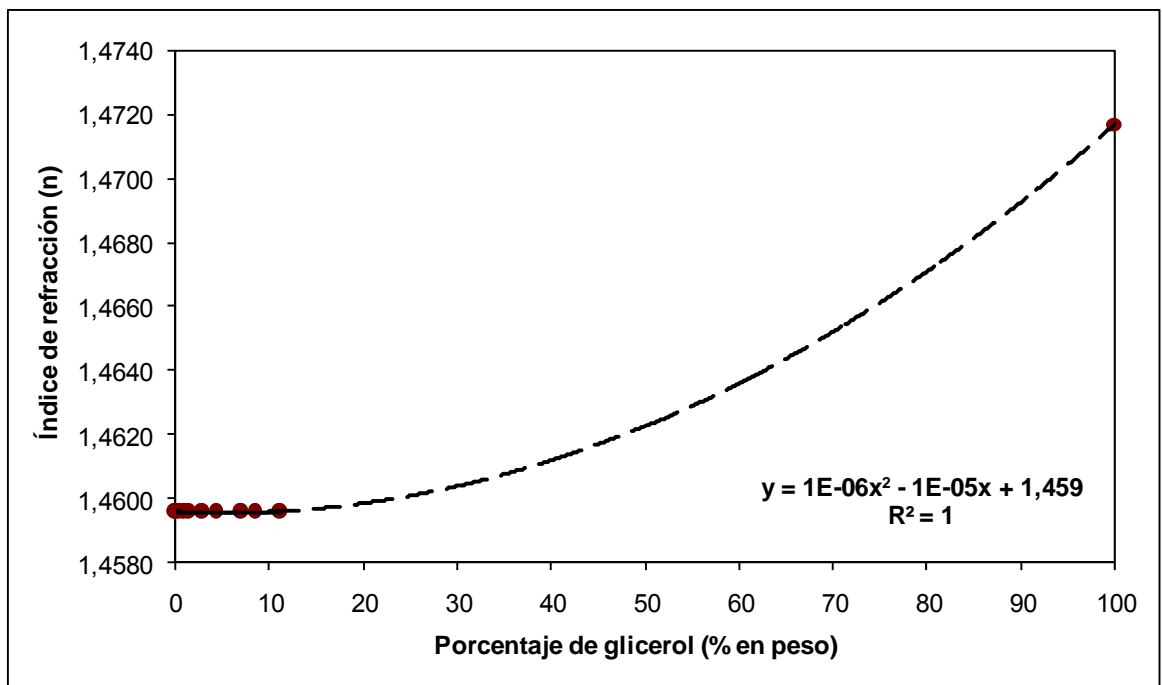
Fuente: Datos calculados. Apéndice 2.

Figura 16 Curva de correlación para los índices de refracción en función de la concentración de la mezcla binaria glicerol-agua a 10 ° C



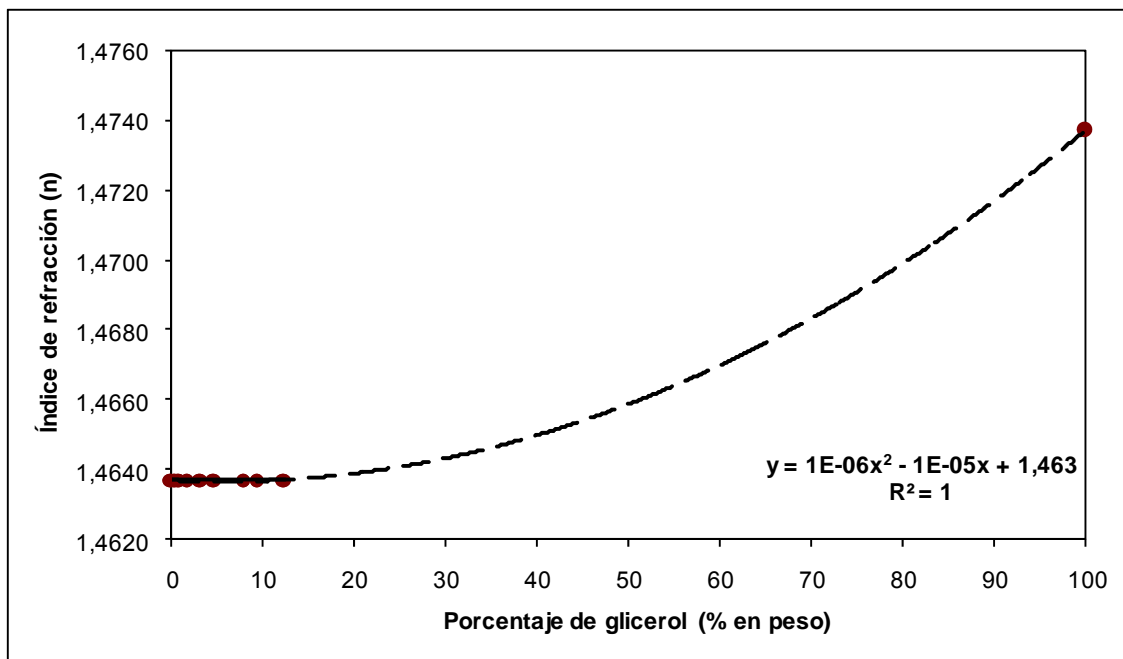
Fuente: Datos calculados. Apéndice 2.

Figura 17 Curva de correlación para los índices de refracción en función de la concentración de la mezcla binaria glicerol-biodiesel a 25 ° C



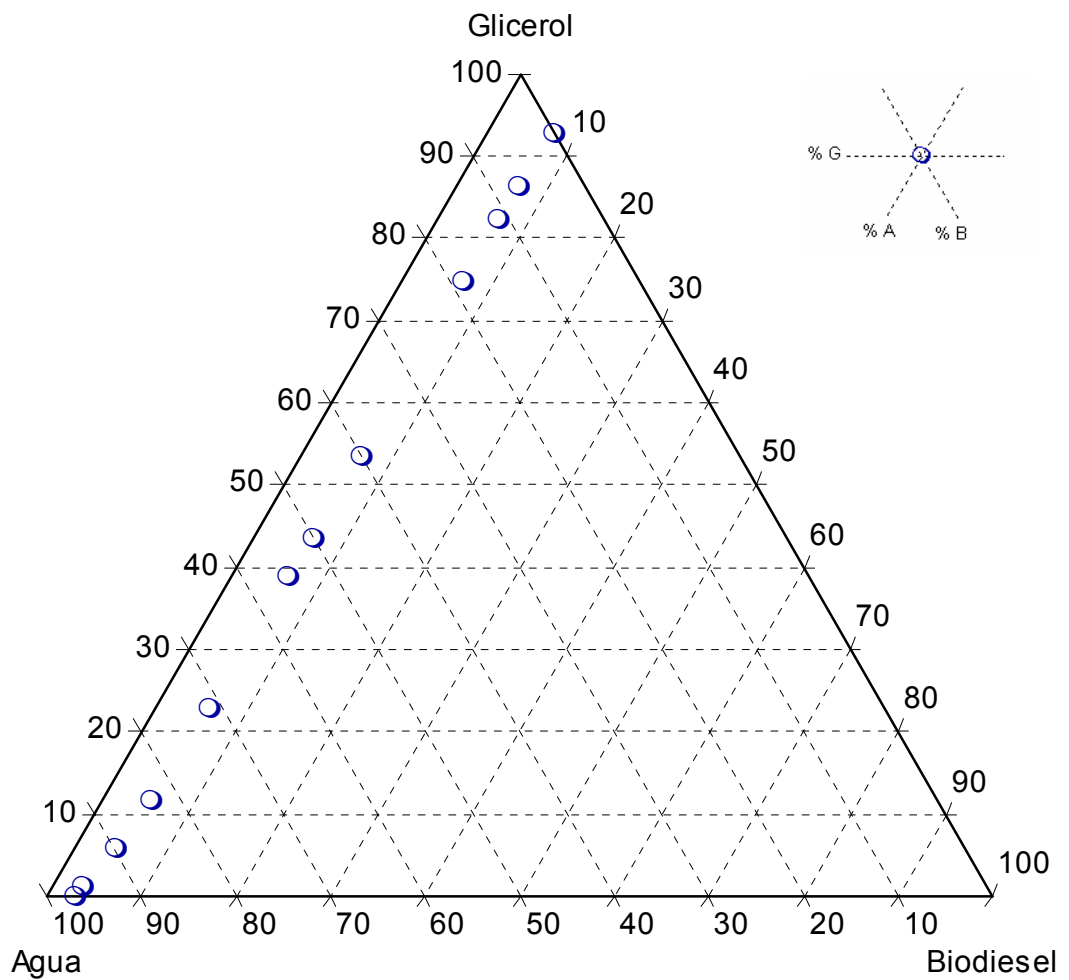
Fuente: Datos calculados. Apéndice 2.

Figura 18 Curva de correlación para los índices de refracción en función de la concentración de la mezcla binaria glicerol-biodiesel a 10 ° C



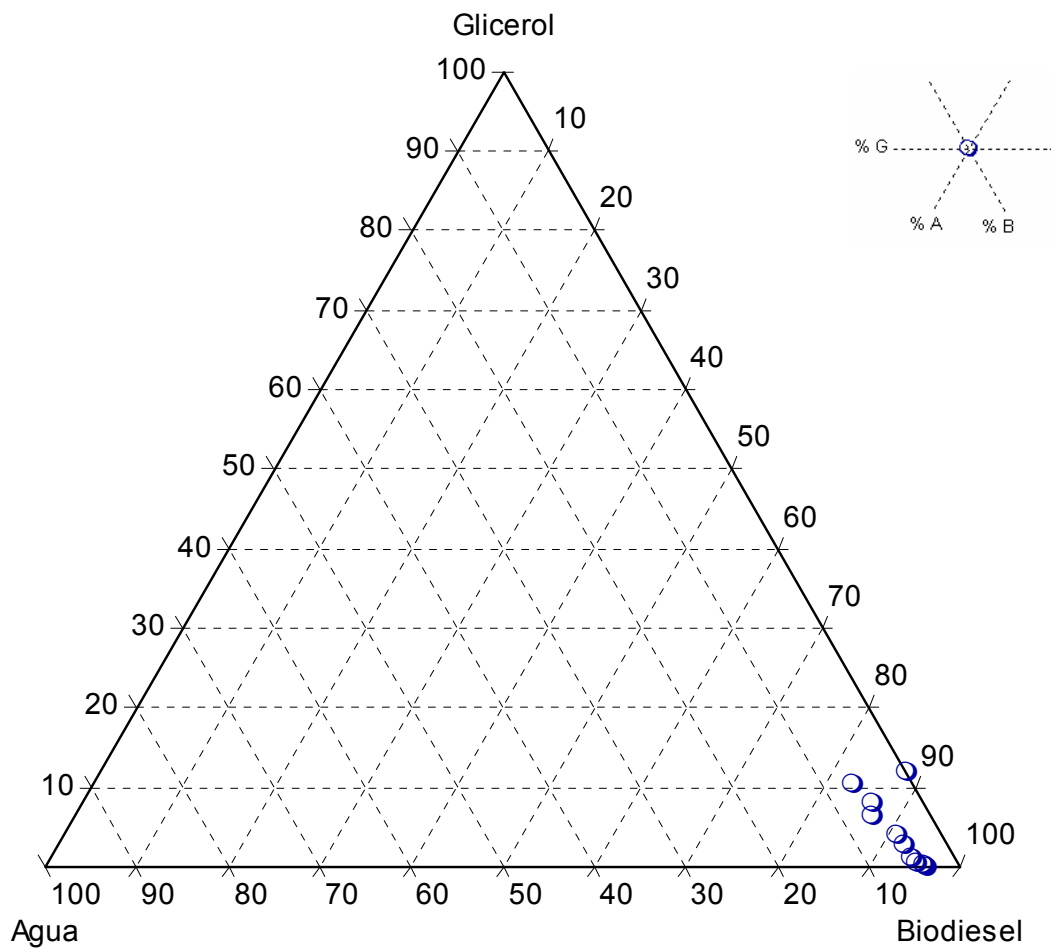
Fuente: Datos calculados. Apéndice 2.

Figura 19 Distribución de los datos experimentales de equilibrio de inmiscibilidad, obtenidos para el sistema glicerol-biodiesel-agua, a partir de soluciones de glicerol en agua, mediante la adición del solvente biodiesel a $25 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$



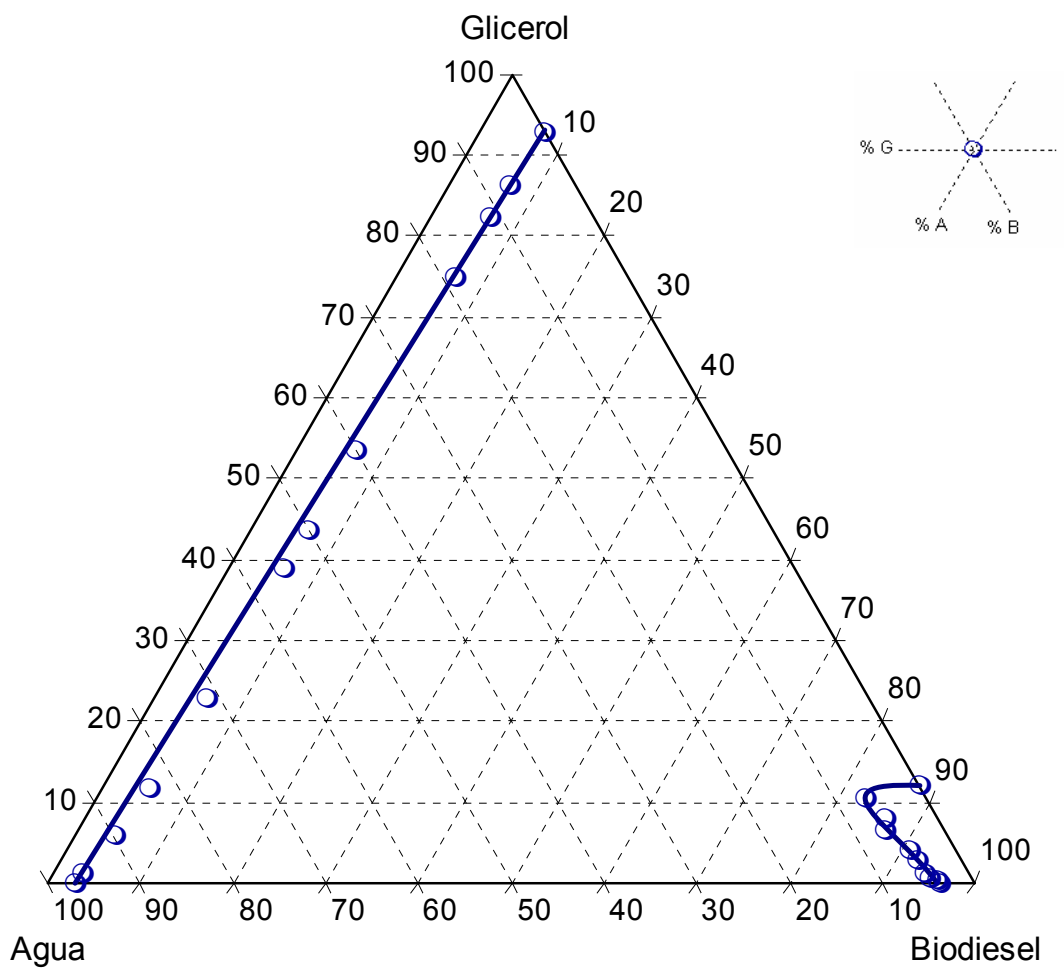
Fuente: Datos calculados. Apéndice 2.

Figura 20 Distribución de los datos experimentales de equilibrio de inmiscibilidad, obtenidos para el sistema glicerol-biodiesel-agua, a partir de soluciones de glicerol en biodiesel, mediante la adición del solvente agua a $25 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$



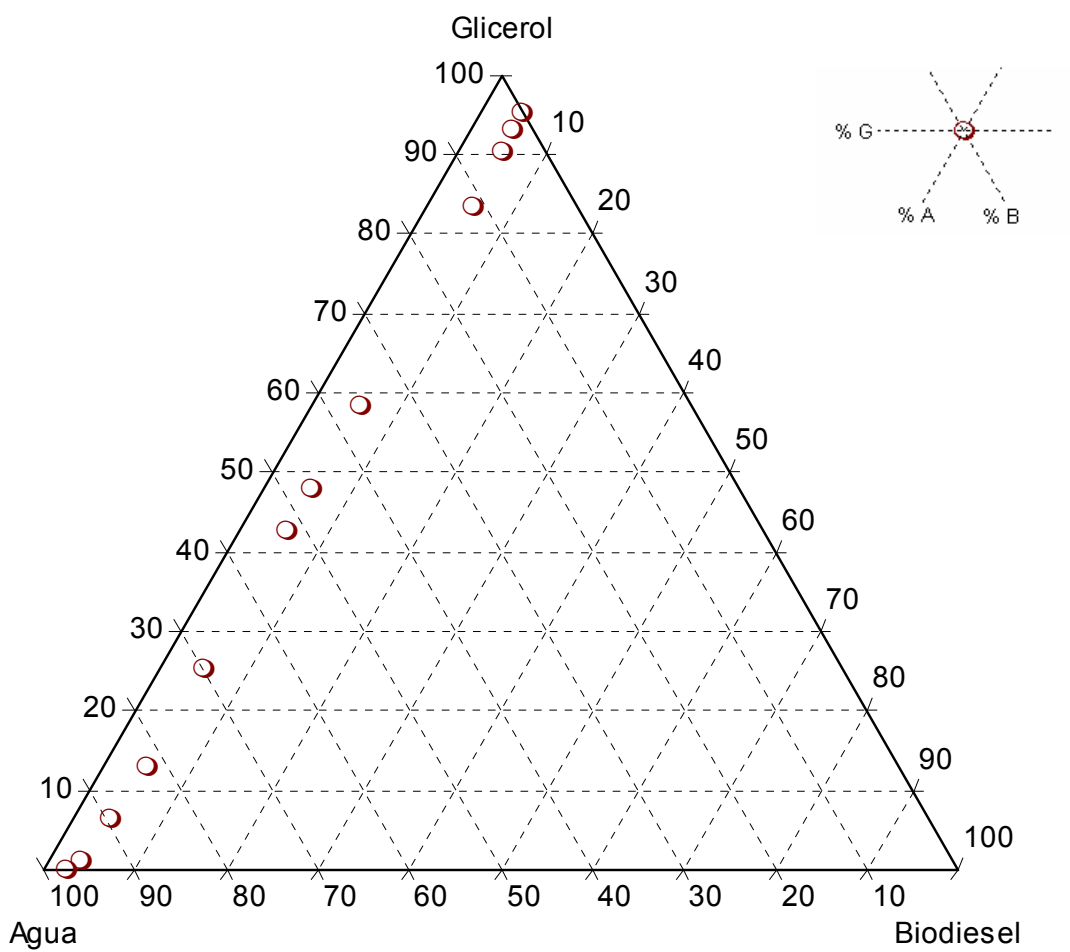
Fuente: Datos calculados. Apéndice 2.

Figura 21 Distribución de los datos experimentales de equilibrio de inmiscibilidad, obtenidos para el sistema glicerol-biodiesel-agua a $25 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$



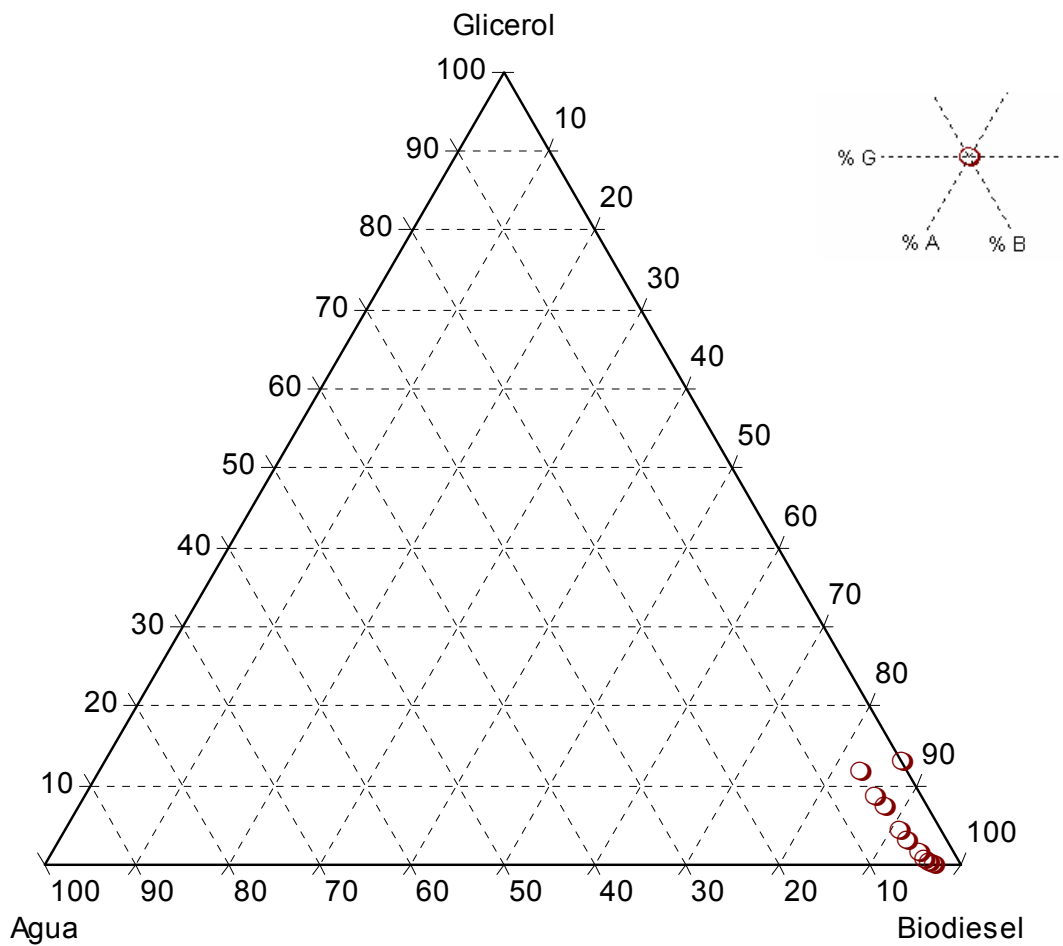
Fuente: Datos calculados. Apéndice 2.

Figura 22 Distribución de los datos experimentales de equilibrio de inmiscibilidad, obtenidos para el sistema glicerol-biodiesel-agua, a partir de soluciones de glicerol en agua, mediante la adición del solvente biodiesel a $10 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$



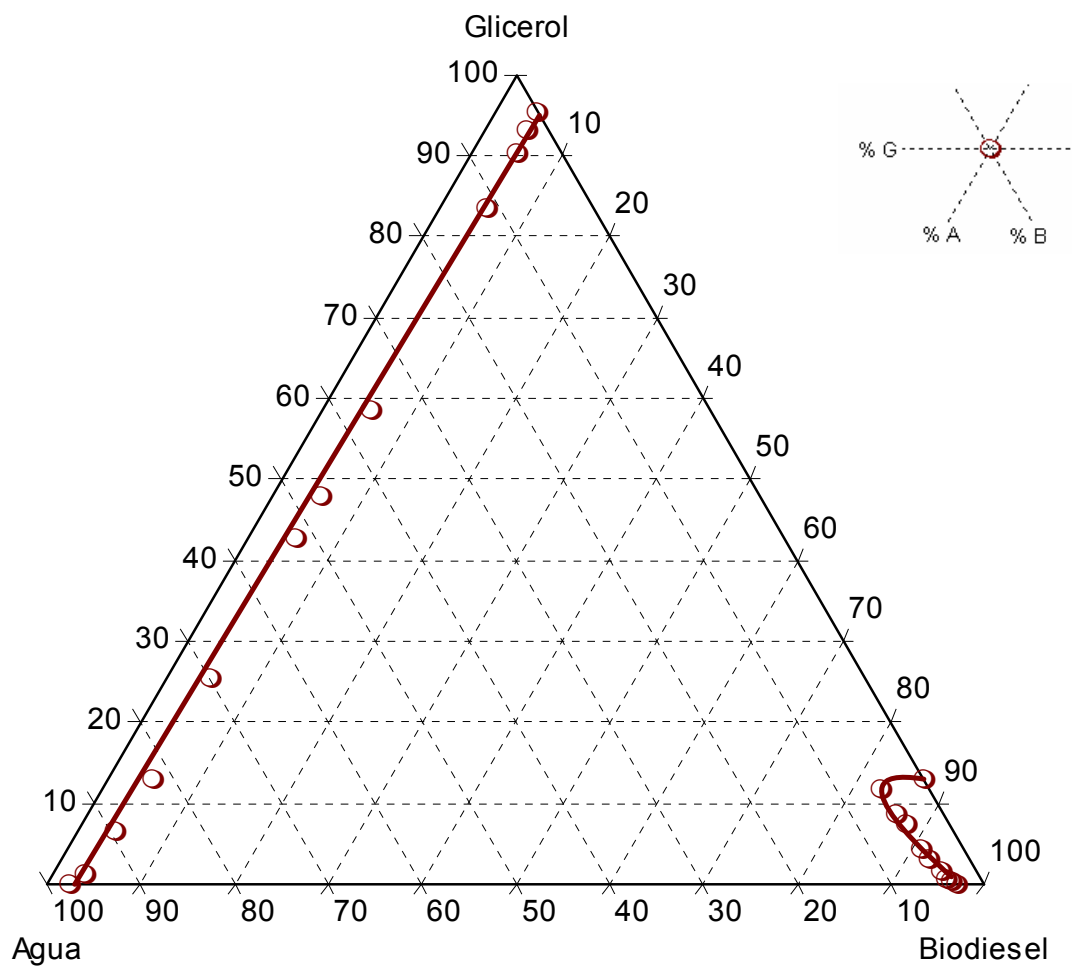
Fuente: Datos calculados. Apéndice 2.

Figura 23 Distribución de los datos experimentales de equilibrio de inmiscibilidad, obtenidos para el sistema glicerol-biodiesel-agua, a partir de soluciones de glicerol en biodiesel, mediante la adición del solvente agua a $10 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$



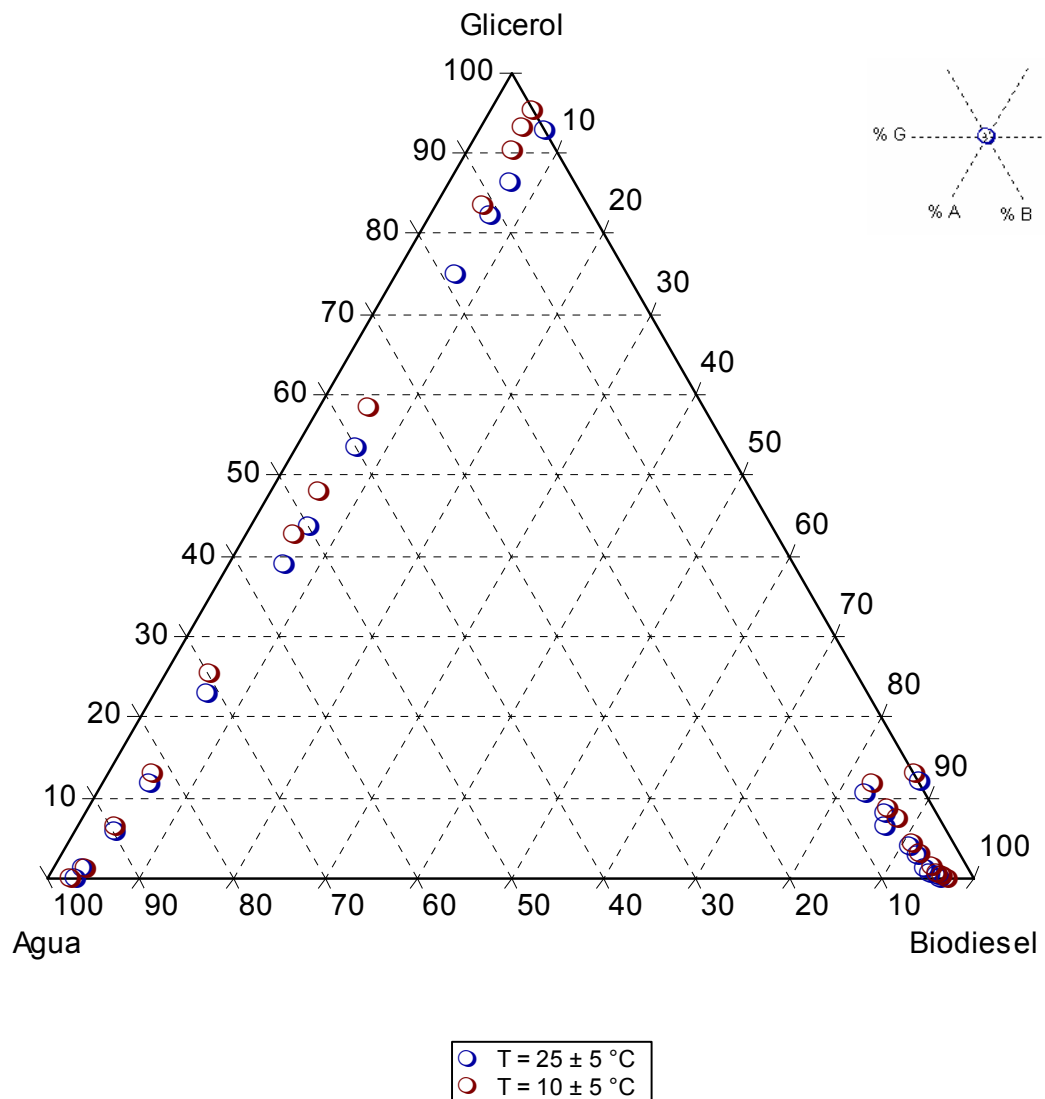
Fuente: Datos calculados. Apéndice 2.

Figura 24 Distribución de los datos experimentales de equilibrio de inmiscibilidad obtenidos para el sistema glicerol-biodiesel-agua a $10 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$



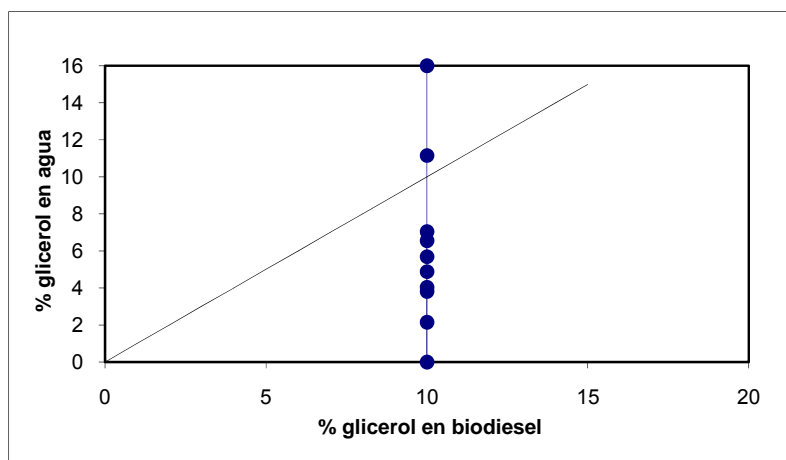
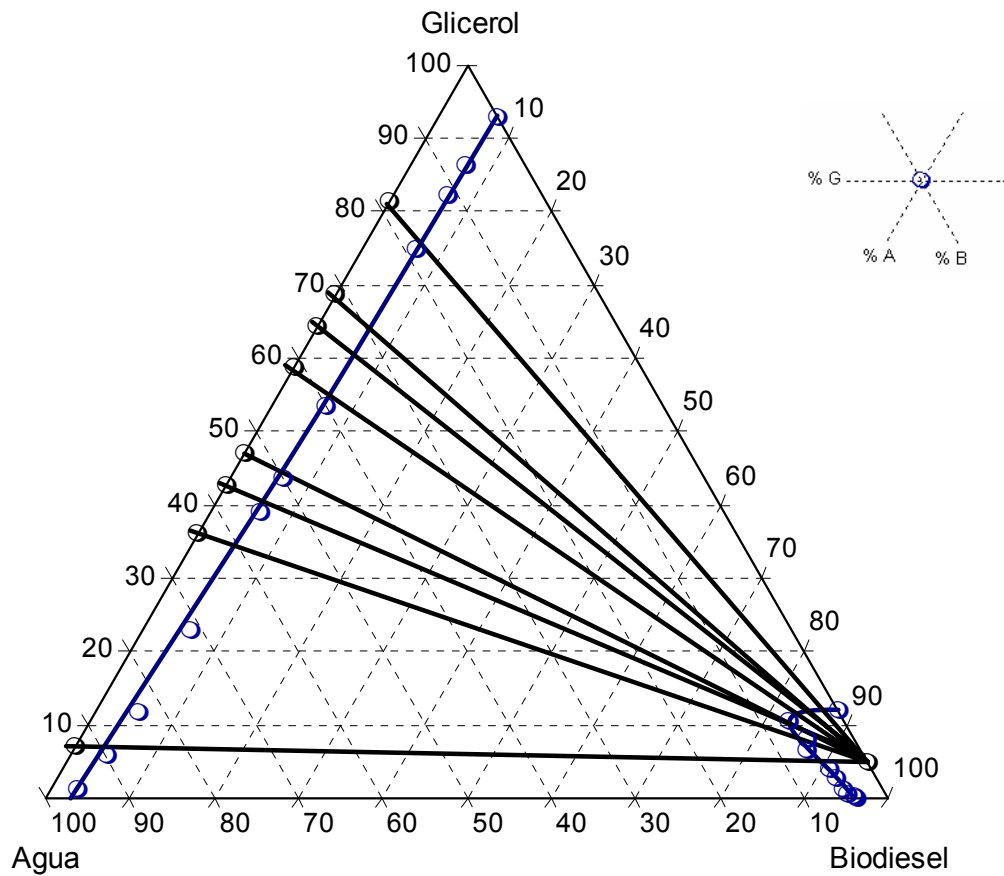
Fuente: Datos calculados. Apéndice 2.

Figura 25 Comparación de datos experimentales del equilibrio de inmiscibilidad para el sistema glicerol-biodiesel-agua a las dos temperaturas de estudio



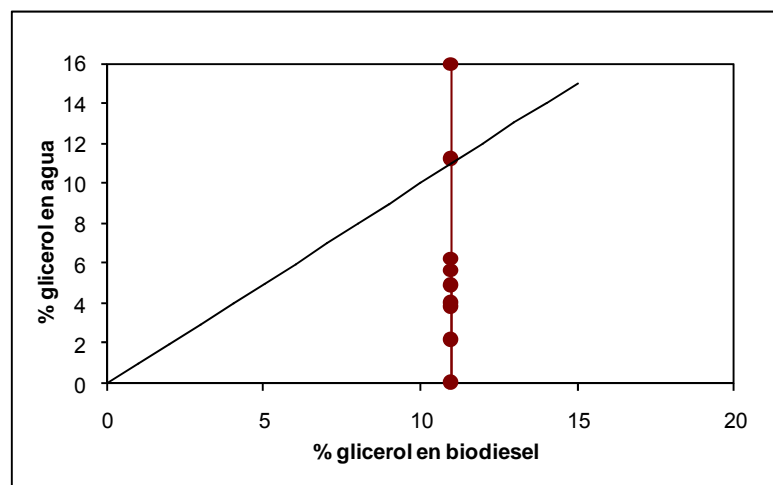
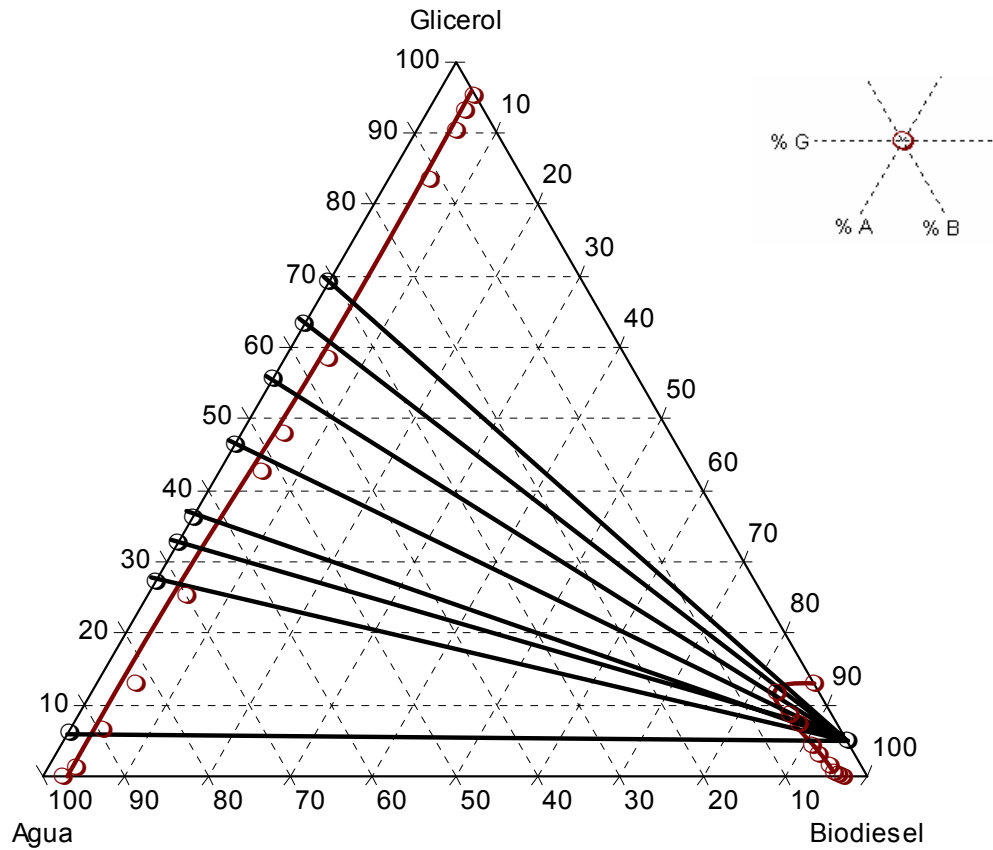
Fuente: Datos calculados. Apéndice 2.

Figura 26 Curvas de distribución de los datos experimentales en el sistema glicerol-biodiesel-agua a la temperatura de $25 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$



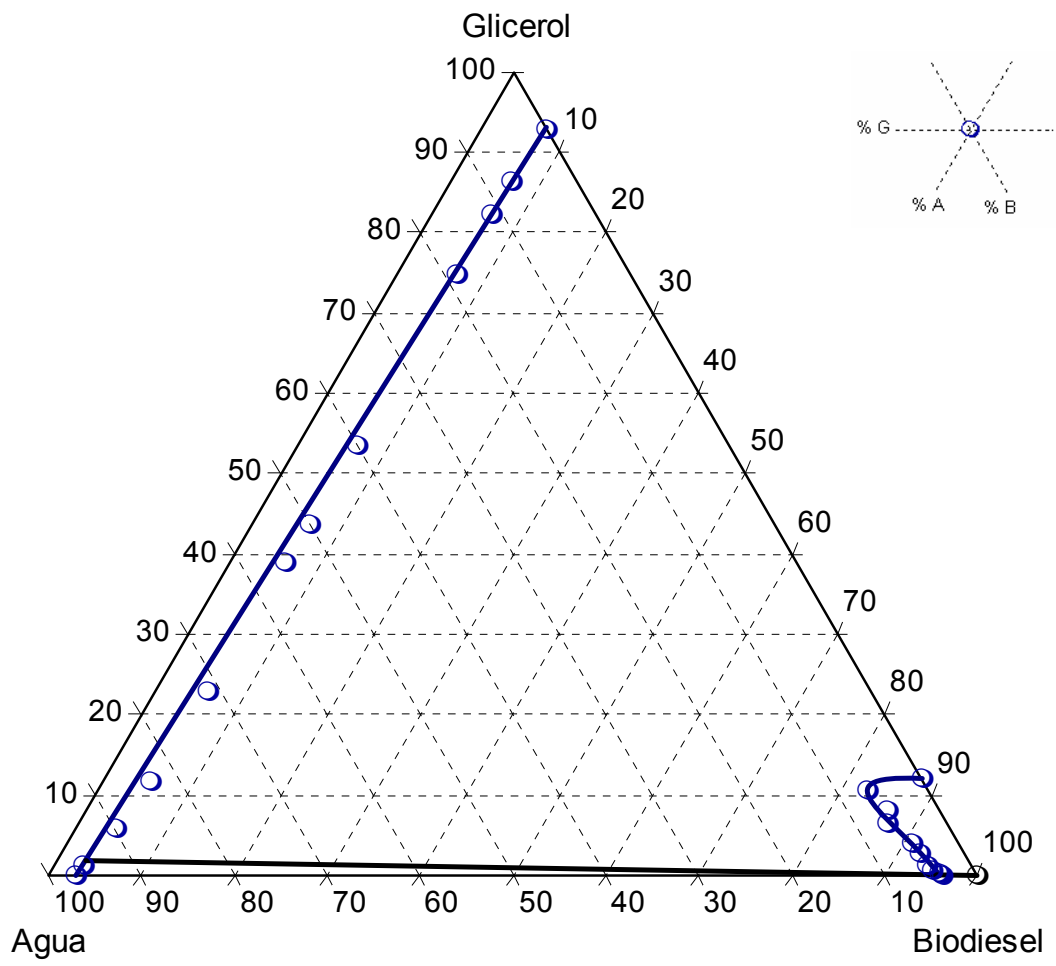
Fuente: Datos calculados. Apéndice 2.

Figura 27 Curvas de distribución de los datos experimentales en el sistema glicerol-biodiesel-agua a la temperatura de $10 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$



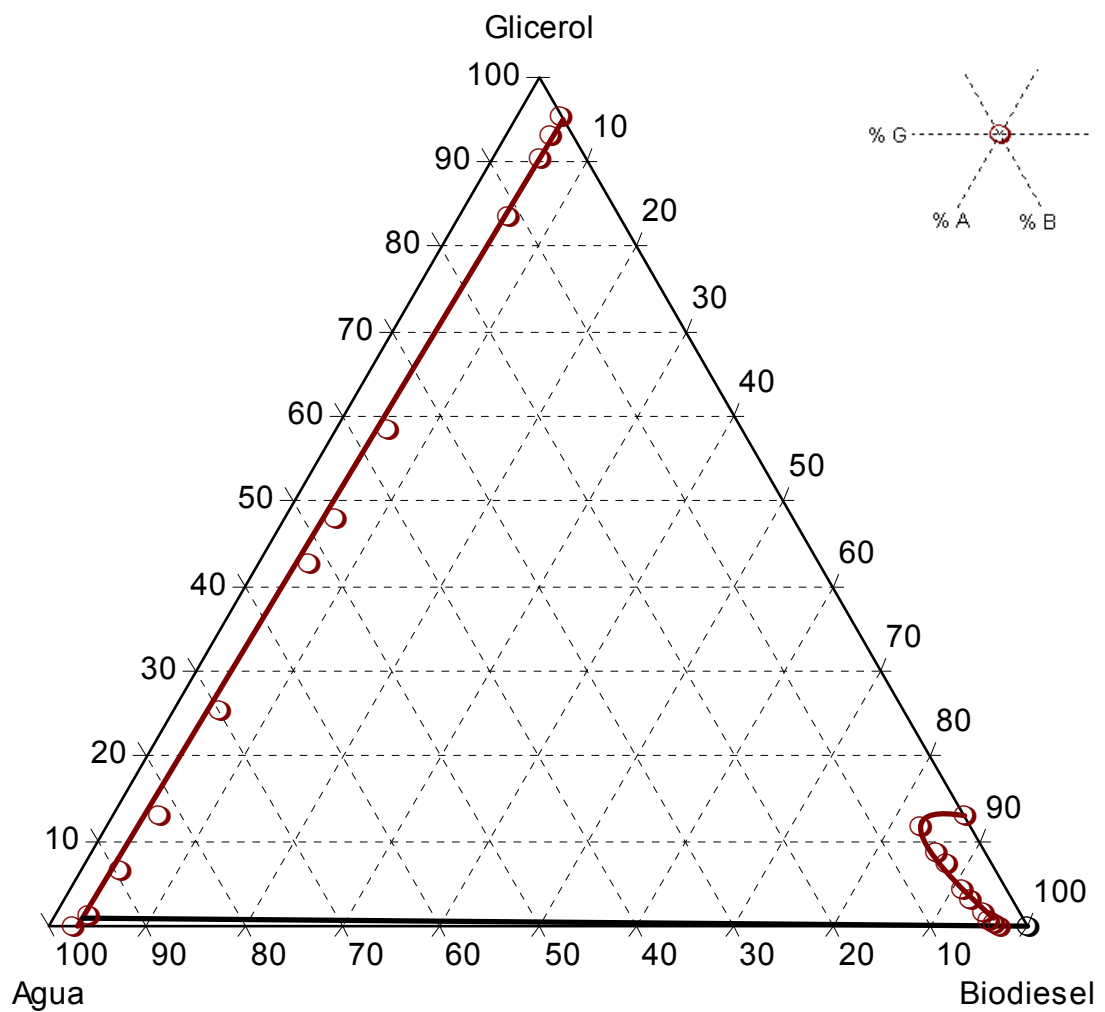
Fuente: Datos calculados. Apéndice 2.

Figura 28 Línea de amarre en el sistema ternario glicerol-biodiesel-agua para la especificación de 0.24 % en peso máximo de glicerol en biodiesel, según la norma ASTM 6751 a la temperatura de $25 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$



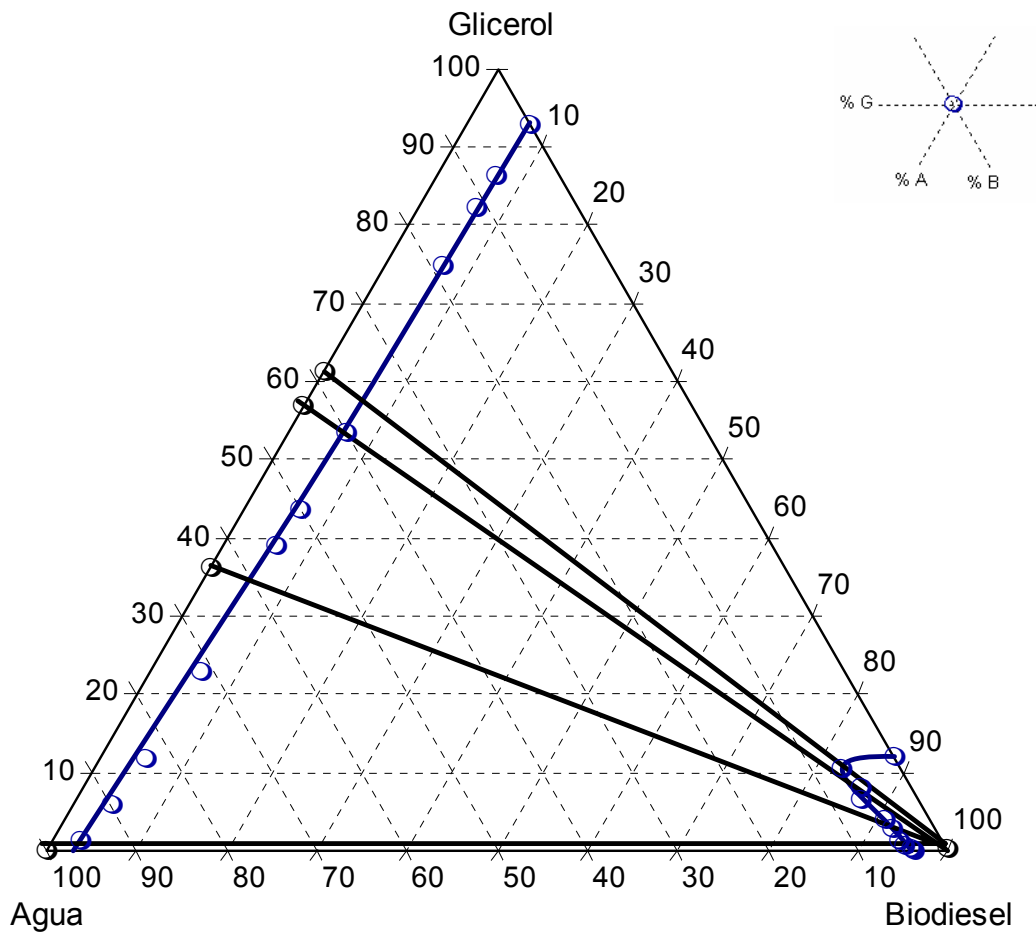
Fuente: Datos calculados. Apéndice 2.

Figura 29 Línea de amarre en el sistema ternario glicerol-biodiesel-agua para la especificación de 0.24 % en peso máximo de glicerol en biodiesel, según la norma ASTM 6751 a la temperatura de $10 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$



Fuente: Datos calculados. Apéndice 2.

Figura 30 Líneas de amarre para distintas relaciones de biodiesel:agua en el sistema ternario glicerol-biodiesel-agua, para la especificación de 0.24 % en peso máximo de glicerol en biodiesel, según la norma ASTM 6751, para una muestra de 40 ml de biodiesel al 10 %, con agitación constante a 300 rpm durante 15 minutos y a la temperatura de $25 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$



Fuente: Datos calculados. Apéndice 2.

Tabla VIII Valores de los coeficientes de distribución obtenidos a partir del porcentaje de glicerol distribuido en la fase de biodiesel, dividido el porcentaje de glicerol distribuido en la fase agua

Muestra	% Glicerol	% Biodiesel	% Agua	K T = 23 °C	K T = 10 °C
1	10	70	20	0.1704	0.2150
2	20	40	40	0.2337	0.3063
3	30	20	50	0.2129	0.2758
4	30	50	20	0.1458	0.1799
5	50	10	40	0.1554	0.1579
6	20	30	50	0.2773	0.3672
7	40	30	30	0.1228	0.1443
8	5	20	75	1.4209	1.5873

Fuente: Datos calculados. Apéndice 2.

Punto de pliegue para el rango de temperatura de 25 ± 5 ° C

% Glicerol = 10 %

% Biodiesel = 83 %

% Agua = 7 %

Punto de pliegue para el rango de temperatura de 10 ± 5 ° C

% Glicerol = 11 %

% Biodiesel = 76 %

% Agua = 5 %

Tabla IX Resultado del análisis de varianza de dos factores, con varios grupos, para la evaluación del grado de diferenciación significativa en el sistema glicerol-biodiesel-agua, a partir de soluciones de glicerol en biodiesel, a las dos temperaturas de estudio.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Temperatura	0,0002	9	2,4421E-05	2,8839	3,915E-08	3,1788
Repeticiones	7,566E-05	1	7,566E-05			
Error	1,9845E-06	9	2,205E-07			
Total	0,0002	19				

Fuente: Datos calculados. Apéndice 2.

Tabla X Resultado del análisis de varianza de dos factores, con varios grupos, para la evaluación del grado de diferenciación significativa en el sistema glicerol-biodiesel-agua, a partir de soluciones de glicerol en agua, a las dos temperaturas de estudio.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Temperatura	0,0865	11	0,0078	2,6341	6,8251E-05	2,8179
Repeticiones	8,1783	1	8,1783			
Error	0,0062	11	0,0005			
Total	8,2712	23				

Fuente: Datos calculados. Apéndice 2. Tabla

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En el presente trabajo de graduación, se obtuvieron datos para la caracterización del equilibrio ternario del sistema glicerol-biodiesel-agua a dos temperaturas, de tal manera que con base en los resultados obtenidos fuera posible la predicción de la distribución de un soluto (glicerol), entre los dos solventes agua y biodiesel. Así como determinar si existe diferencia significativa en los datos experimentales correlacionados para la construcción del domo de distribución del sistema a las temperaturas estudiadas. Además, determinar la línea de amarre del sistema para la especificación de 0.24 % en peso máximo de glicerol en biodiesel, según la norma ASTM 6751.

Para la obtención de la curva binodal del sistema ternario glicerol-biodiesel-agua, se procedió a realizar mezclas para cada sistema binario glicerol-agua (1, 5, 10, 20, 35, 40, 50, 75, 85, 90 % de glicerol) y glicerol-biodiesel (0.25, 0.5, 1, 2, 3, 5, 6, 8 % de glicerol) a las cuales se determinaron densidad, índices de refracción y distribución del soluto (glicerol), a las distintas concentraciones de los solventes.

Se escogieron dos diferentes rangos de temperatura para cada sistema binario; 25 ± 5 °C y 10 ± 5 °C, con el objeto de determinar el comportamiento de la curva de solubilidad entre los dos rangos de temperatura.

Se determinaron las curvas de correlación entre el índice de refracción vrs la composición porcentual en peso para cada serie de soluciones de glicerol-agua y glicerol-biodiesel a cada temperatura analizada.

Para ello, con los datos de los pesos de las soluciones de glicerol-agua y glicerol-biodiesel obtenidos experimentalmente a cada temperatura por medio del método de picnometría, se realizó la determinación de las densidades de las soluciones respectivas las cuales sirvieron para la obtención de las concentraciones reales de porcentaje en peso de las soluciones. A partir de las concentraciones reales obtenidas y los índices de refracción medidos experimentalmente por medio del método de refractometría se construyó la curva de correlación mencionada anteriormente.

De la sección de resultados, se pueden observar las primeras cuatro figuras (15, 16, 17 y 18) que determinan la variación del parámetro índice de refracción respecto a la composición porcentual en peso de glicerol, para las soluciones glicerol-agua y glicerol-biodiesel a cada temperatura analizada.

En el caso de las figuras quince y dieciséis, se observa que para las soluciones de glicerol-agua, a las dos temperaturas analizadas, el índice de refracción aumenta al incrementar la composición porcentual en peso de dichas soluciones, en una manera que se ajusta a una tendencia polinomial de tercer grado, *lo cual muestra una relación directamente proporcional entre el porcentaje en peso y el índice de refracción.* (Conclusión 1) Sin embargo, se observa al comparar las dos temperaturas, que el índice de refracción disminuye en la medida que la temperatura aumenta, puesto que los índices de refracción medidos a la temperatura de 23 °C fueron menores que los obtenidos a la temperatura de 10 °C.

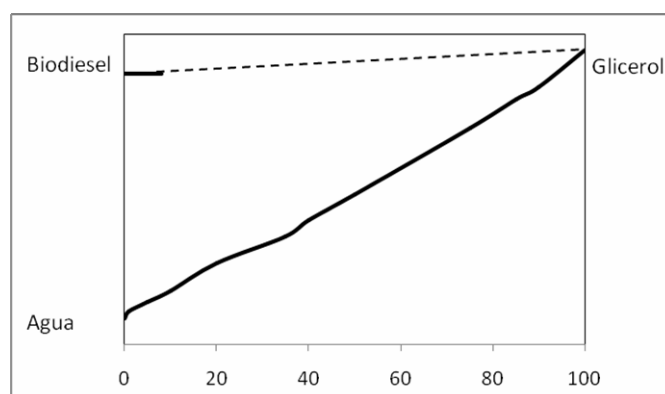
En el caso de las figuras diecisiete y dieciocho, se observa que para las soluciones de glicerol-biodiesel, a las dos temperaturas analizadas, el índice de refracción permanece constante, debido a la baja sensibilidad del refractómetro con dichas soluciones binarias, *lo cual muestra una relación directamente*

proporcional entre el porcentaje en peso y el índice de refracción. (Conclusión 2) Del mismo modo, se observa al comparar las dos temperaturas, que el índice de refracción disminuye en la medida que la temperatura aumenta, puesto que los índices de refracción medidos a la temperatura de 23 °C fueron menores que los obtenidos a la temperatura de 10 °C.

Además, en dichas figuras se puede observar el límite de solubilidad del glicerol en biodiesel, siendo de un 12.5 % para la temperatura de 23 °C y 13.6 % para la temperatura de 10 °C.

Para el sistema glicerol-biodiesel-agua el parámetro de monitoreo del refractómetro (índice de refracción) para las soluciones binarias glicerol-agua presenta bastante sensibilidad. Por el contrario, para las soluciones binarias glicerol-biodiesel el índice de refracción se mantuvo constante, ya que el refractómetro no presenta sensibilidad por los residuos del biodiesel utilizado.

Figura 31 Sensibilidad del parámetro de monitoreo del refractómetro (índice de refracción) para las soluciones binarias glicerol-agua y glicerol-biodiesel



Fuente: Resultados, figuras 15-18.

Para todos los sistemas ternarios de trabajos de graduación estudiados anteriormente se puede realizar una comparación del grado de respuesta de variación del parámetro de monitoreo (índice de refracción) medido con el refractómetro y se puede observar en la tabla siguiente que aquellas soluciones que presentaron mayor sensibilidad son las preparadas con agua, siendo la solución de glicerol-agua quien presentó mayor sensibilidad en la medición del índice de refracción que los demás sistemas estudiados.

Tabla XI Comparación del grado de respuesta de variación del parámetro de monitoreo (índice de refracción) para los sistemas ternarios de trabajos de graduación estudiados anteriormente.

ΔIR	Acetona / agua	IPA / agua	Limoneno / etanol	Cardamomo / benceno	Glicerol / agua
acetona / hexano	+ + +				
IPA / hexano		+ +			
Limoneno / hexano			- - -		
Cardamomo / benceno				- - + +	
Glicerol / biodiesel					+ + + - - -

+ + +	Sensibilidad alta	- - -	Sin sensibilidad
++	Sensibilidad media	--	Sensibilidad muy baja
+	Sensibilidad notable	-	Sensibilidad baja

Fuente: Ref.1, 2, 9 y 11.

La distribución de los datos experimentales de equilibrio de inmiscibilidad obtenidos para el sistema glicerol-biodiesel-agua, se determinó a partir de soluciones de glicerol-agua tituladas con biodiesel y de soluciones de glicerol-biodiesel tituladas con agua, hasta la formación de dos fases.

Para ello, con los datos obtenidos experimentalmente del volumen adicionado en la titulación de las distintas soluciones se realizó la determinación de la composición porcentual de las mezclas ternarias. Con la obtención de los resultados anteriores, se realizó la representación de la curva binodal del sistema a cada temperatura.

La figura diecinueve muestra la “alta” sensibilidad del glicerol en agua a la temperatura de 23 °C y se observa que esta abarca la solubilidad en toda proporción.

La figura veinte muestra la “baja” sensibilidad del biodiesel en agua a la temperatura de 23 °C y se observa que la distribución es inversa.

La curva de equilibrio de inmiscibilidad del sistema ternario glicerol-biodiesel-agua (figura 21) se alcanzó uniendo la figura diecinueve y veinte. El domo de solubilidad presenta un punto máximo estimado en 10 % de glicerol, 7 % de agua y 83 % de biodiesel. Este punto indica que son éstas las proporciones de glicerol, biodiesel y agua que se deben utilizar para alcanzar la solubilidad máxima a 23 °C.

Por lo cual, se observa que existe mayor afinidad entre el glicerol y el agua, que entre el glicerol y el biodiesel (Conclusión 3), debido a esto, existe un gasto mayor de biodiesel necesario para romper las fuerzas intermoleculares que existen entre el glicerol y el agua.

La distribución de los datos de glicerol en agua a temperatura de 10 °C se muestra en la figura veintidós, la cual tiene el mismo comportamiento que la realizada a la temperatura de 23 °C. La figura veintitrés muestra los datos obtenidos a partir de las soluciones binarias de glicerol en biodiesel y adición del solvente agua. Esta figura de la misma forma que la anterior no muestra una diferencia significativa. La figura veinticuatro es la unión de las figuras veintidós y veintitrés, la cual representa la caracterización del sistema ternario analizado a la temperatura de 10 °C.

En la figura veinticinco se observa la comparación de las curvas de equilibrio obtenidas a las dos temperaturas analizadas, en donde se muestra que la curva de menor temperatura (10 °C), se caracteriza por un domo de solubilidad más pronunciado que la curva de mayor temperatura (25 °C), es decir, *se demuestra que a mayor temperatura, disminuye la región de dos fases debajo de la curva binodal* (Conclusión 4)

Con la distribución de los datos experimentales al equilibrio de inmiscibilidad para el sistema glicerol-biodiesel-agua, se procedió a determinar el punto de pliegue para cada temperatura analizada, para ello fue necesario seleccionar puntos dentro de la curva binodal para posteriormente analizarlos y obtener datos experimentales de índices de refracción; con dichos resultados se obtuvieron porcentajes de glicerol en fase agua y en fase biodiesel.

Al determinar dichos porcentajes, se procedió a graficar los datos de porcentaje de glicerol en fase biodiesel contra el porcentaje de glicerol en fase agua, junto con una línea de pendiente 1, esta se realiza para obtener la curva de distribución para el sistema glicerol-biodiesel-agua a las dos temperaturas analizadas.

Luego, se proyectaron los puntos de cada línea de unión en cada fase desde el diagrama triangular, hacia la curva de distribución obtenida. Para los porcentajes de glicerol en agua se localizan en la curva de distribución; los porcentajes de glicerol en biodiesel, en la línea de pendiente 1. El punto de pliegue se calculó cuando la curva de distribución intercepta la línea de pendiente 1, ya que en este punto el porcentaje de glicerol en biodiesel es igual al porcentaje de glicerol en agua. Este punto se proyecta a la gráfica triangular, lo cual permite leer la composición de la mezcla ternaria en este punto de solubilidad límite.

El punto de pliegue experimental obtenido para el sistema ternario trabajado a la temperatura de 25 ± 5 °C fue de 10 % de glicerol, 83 % de biodiesel y 7 % de agua (Conclusión 5); mientras que el punto de pliegue experimental obtenido para el sistema ternario trabajado a la temperatura de 10 ± 5 °C fue de 11 % de glicerol, 84 % de biodiesel y 5 % de agua (Conclusión 6). En las figuras veintiséis y veintisiete se observan las curvas de distribución para las temperaturas de 25 ± 5 °C y 10 ± 5 °C respectivamente.

El sistema glicerol-biodiesel-agua, según las figuras veintiuno y veinticuatro a las dos temperaturas analizadas *pertenece a la clasificación de sistemas ternarios tipo II, según la clasificación de Treybal (Conclusión 7)*, en donde hay dos pares de componentes parcialmente miscibles.

Se determinó el coeficiente de distribución para cada punto reproducido, el cual se obtuvo al dividir el porcentaje de glicerol en fase biodiesel en el porcentaje de glicerol en fase agua, los valores obtenidos son menores que 1, lo cual indica que la curva de distribución se representa en la parte inferior de la curva de pendiente 1, tal como se representa en las figuras veintiséis y veintisiete.

Para comparar las dos curvas binodales para ambas temperaturas, fue necesario realizar una evaluación estadística por medio de un análisis de varianza de dos tratamientos con varios grupos. Se realizaron dos análisis, uno para las soluciones binarias glicerol-biodiesel tituladas con agua y otro para soluciones binarias de glicerol-agua tituladas con biodiesel. Para el caso del primer análisis se obtuvo un valor de F calculada de 2.8839, y para el segundo caso se obtuvo un valor de F calculada de 2.6341.

El valor teórico de F es de 3.1788 para el primer caso, debido a que F calculada (2.8839) es menor que F teórica se dice que cuando se trata *con soluciones binarias de glicerol-biodiesel tituladas con agua, no existe diferencia significativa cuando se varía la temperatura.* (Conclusión 8)

Del mismo modo, para el segundo caso el valor teórico de F es de 2.8179, debido a que F calculada (2.6341) es menor que F teórica se dice que cuando se trata *con soluciones binarias de glicerol-agua tituladas con biodiesel, no existe diferencia significativa cuando se varía la temperatura.* (Conclusión 9)

En las figuras veintiocho y veintinueve se observa la línea de amarre correspondiente a la especificación del 0.24 % en peso máximo del glicerol en agua según la norma ASTM 6751 para la temperatura de 23 °C y 10 °C respectivamente; en donde se determinó gráficamente que *la concentración al equilibrio de agua para dicha especificación a la temperatura de 23 °C fue de 50 % en peso* (Conclusión 10) *y a la temperatura de 10 °C fue de 52 % en peso.* (Conclusión 11)

La figura treinta muestra las líneas de amarre para distintas relaciones de biodiesel:agua correspondientes a la especificación de la norma ASTM 6751 mencionada anteriormente; demostrando que *es factible utilizar una relación*

10:1 de biodiesel:agua para el lavado del biodiesel (Conclusión 12), ya que el agua es un buen solvente extractor del glicerol en el biodiesel, minimizando los costos del proceso.

Del mismo modo, se determinó que la cantidad óptima de ciclos de lavado son de dos a tres ciclos (Tabla XL), siendo suficientes para la eliminación del glicerol (relación 10:1) para que cumpla con la especificación establecida; siempre y cuando se realice un lavado con agitación constante (300 – 400 rpm) durante un corto período de tiempo (10 – 15 minutos).

Se determinó el balance hidrófilo-lipófilo (BHL, medida de la solubilidad en agua o en lípidos de un compuesto) del biodiesel utilizado para el estudio del equilibrio ternario; por medio de la determinación del índice de saponificación y el índice de acidez. El índice de saponificación se determinó por medio del método oficial AOCS Cd 3-25, el cual consiste en pesar cinco gramos de la muestra de biodiesel y luego agregar 50 ml de la solución de hidróxido de potasio alcohólica 0.1 N; a la vez se preparó un blanco. Se procedió a la saponificación por medio de la ebullición de la muestra por 60 minutos, después se tituló con la solución de ácido clorhídrico 0.5 N utilizando como indicador fenolftaleína, tanto para la muestra como para el blanco.

El índice de acidez se determinó por medio del método oficial AOCS Ca 5a - 40 que consiste en pesar diez gramos de la muestra de biodiesel y luego agregar 75 ml de alcohol caliente neutralizado y 2 ml de fenolftaleína; después se tituló con una solución estándar de hidróxido de sodio 0.25 N.

El BHL se puede representar por medio de la relación entre el índice de saponificación (S) y el índice de acidez (A) determinada por la siguiente

ecuación: $BHL = 20\left(1 - \frac{S}{A}\right)$.

Se determinó que el biodiesel utilizado tiene un BHL de 16.406, el cual indica que en el biodiesel favorecen las emulsiones de aceite en agua, es decir, que los ácidos grasos propios del biodiesel tienen mayor afinidad con el aceite (lipófilo) que con el agua (hidrófilo).

CONCLUSIONES

1. El sistema glicerol-biodiesel-agua pertenece a la clasificación de sistemas ternarios tipo II, según la clasificación de Treybal.
2. Para las soluciones binarias de glicerol en agua existe una relación directamente proporcional con el índice de refracción, del mismo modo para las soluciones binarios de glicerol en biodiesel.
3. Las gráficas del sistema ternario glicerol-biodiesel-agua muestran la alta solubilidad del glicerol en el agua y lo contrario con el biodiesel.
4. Con base al análisis de varianza, no existe diferencia significativa en la curva binodal de solubilidad del glicerol en función de la temperatura.
5. La línea de amarre para el sistema ternario glicerol-biodiesel-agua para la especificación de 0.24 % en peso máximo de glicerol en biodiesel, según la norma ASTM 6751 fue de 95.5 % de agua.
6. Es factible utilizar una relación 10:1 de biodiesel:agua con dos ciclos de lavado para que cumpla la especificación de la norma ASTM 6751, con agitación constante durante 15 minutos y a una velocidad de 300 rpm.

RECOMENDACIONES

1. Realizar un estudio de la distribución de solubilidad del etanol/metanol en agua y biodiesel.
2. Realizar un estudio del efecto del salado "*Salting out*" para separar el jabón del agua en el lavado del biodiesel.
3. Realizar un estudio del equilibrio ternario del sistema glicerol-biodiesel-agua, a temperaturas superiores a la estudiada.
4. Realizar un estudio de los sistemas de lavado del biodiesel con soluciones salinas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Aguilar Ovando, Krista Ivonne y García Guerra, César Alfonso. Evaluación de un método experimental de generación de datos a nivel de laboratorio para el estudio del sistema ternario aceite esencial de cardamomo (*Elletaria cardamomun*)-(alcohol isopropílico/agua)_{50%}-benceno en equilibrio a dos temperaturas diferentes y 640 mmHg. Trabajo de Graduación Ing. Química. Guatemala, USAC, Facultad de Ingeniería, 2006, pág: 5 – 16.
2. Amado Rodas, Marisol y García Guerra, César Alfonso. Evaluación de un método experimental de generación de datos a nivel de laboratorio para el estudio del sistema ternario aceite esencial de terpenos del fruto de naranja (limoneno) – etanol - hexano en equilibrio líquido a dos temperaturas y 640 mm hg. Trabajo de Graduación Ing. Química. Guatemala, USAC, Facultad de Ingeniería, 2005, pág: 3 – 11.
3. Amézquita Maldonado, Marcos David y García Prado, Romel Alaric. Potencial que tiene Guatemala para producir biodiesel. Trabajo de Graduación Ing. Química. Guatemala, USAC, Facultad de Ingeniería, 2005, pág: 105 – 112.
4. Cordero López, Jorge Alejandro y Villacinda Maldonado, Julio. Evaluación de las propiedades físico-químicas del biodiesel obtenido a partir de aceite de palma y etanol, como combustible alternativo del diesel 2D. Trabajo de Graduación Ing. Química. Guatemala, Usac, Facultad de Ingeniería, 2003, pág: 21 – 28.

5. Díaz Borrás, Andrés José y Pérez, Mario Alfonso. Utilización del biodiesel como combustible alternativo para motores de combustión interna en Guatemala. Trabajo de Graduación Ing. Mecánica Industrial. Guatemala, Usac, Facultad de Ingeniería, 2004, pág: 27 – 42.
6. Geankoplis, Christie J. **Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias**. Tercera Edición. Editorial Continental. México, 1998, pág: 785 – 787.
7. Kirk, Raymond E. **Enciclopedia de Tecnología Química, Tomo VII**. Primera Edición. Editorial Hispano - Americana. México, pág: 746-770.
8. Laidler, Keith y Meiser, John. **Fisicoquímica**. Segunda Edición. Editorial Continental. México, 1998, pág: 247-248.
9. López Velásquez, Olinda Margarita y García Guerra, César Alfonso. Evaluación de un método experimental de generación de datos para el estudio del sistema ternario etanol-hexano-agua a dos temperaturas diferentes. Trabajo de Graduación Ing. Química. Guatemala, USAC, Facultad de Ingeniería, 2003, pág: 1-20.
10. Miller, J.C. **Estadística para Química Analítica**. Segunda Edición. Editorial Addison – Wesley Iberoamericana.
11. Pajarito Angel, Marco Vinicio y García Guerra, César Alfonso. Evaluación de un método experimental de generación de datos para el estudio del sistema ternario isopropanol-hexano-agua en equilibrio líquido de inmiscibilidad, a tres temperaturas y a 640 mm de Hg. Trabajo de Graduación Ing. Química. Guatemala, USAC, Facultad de Ingeniería, 2003, pág: 1-6.

12. Perry, Robert. **Manual del Ingeniero Químico, Tomo III.** Séptima Edición. Editorial McGraw-Hill. México, 1993, pág: 15-1 al 15-26.
13. Piló Poz, Angélica del Carmen y García Guerra, César Alfonso. Evaluación de un método experimental de generación de datos a nivel de laboratorio para el estudio del sistema ternario aceite esencial de terpenos del fruto de naranja (Limoneno) - Benceno – IPA/Agua (75%) en equilibrio líquido a dos temperaturas y 640 mmHg. Trabajo de Protocolo Ing. Química. Guatemala, USAC, Facultad de Ingeniería, 2007.
14. Rivas Méndez, Ligia Marilú y García Guerra, César Alfonso. Evaluación de un método experimental de obtención de datos que permitan caracterizar el equilibrio ternario agua-hexano-acetona a dos temperaturas. Trabajo de Graduación Ing. Química. Guatemala, USAC, Facultad de Ingeniería, 2003, pág: 1-27.
15. Romano, Silvia Daniela. **Combustibles Alternativos.** Primera Edición. Editorial Ediciones Cooperativas. Buenos Aires, Argentina, 2005. pág: 11-88.
16. Treybal, Robert E. **Liquid Extraction.** Segunda Edición. Editorial McGraw-Hill. 1963, pág: 1-28.
17. Treybal, Robert E. **Operaciones de Transferencia de Masa.** Segunda Edición. Editorial McGraw-Hill. México, 2000, pág: 529-542.
18. Zorrilla A. Santiago y Torres X. Miguel. **Guía para elaborar la Tesis.** Segunda edición. Editorial McGraw-Hill. México, 2005, pág: 4-87.

REFERENCIAS ELECTRÓNICAS

19. Almeida Robles, Christian Alessandro. **Refractometría**. 31 de marzo del 2008.
www.monografias.com/trabajos59/refractometria/refractometria.shtml
20. Acción Directa de Whitman. **Biodiesel: producción y aplicaciones**. 15 de marzo de 2008.
[http://www.whitmandirectaction.org/downloads/documents/biodieselguide\(espagnol\).pdf](http://www.whitmandirectaction.org/downloads/documents/biodieselguide(espagnol).pdf)
21. Comisión Económica de Naciones Unidas para América Latina y el Caribe – CEPAL. **Perspectivas para el biodiesel en Centroamérica: Costa Rica, El Salvador, Guatemala y Honduras**. 18 de marzo de 2008.
<http://www.eclac.org/publicaciones/xml/3/29423/L791-1.pdf>
22. Determinación de Aceites y Grasas en Agua. **Método de Extracción de Soxhlet**. 24 de febrero de 2009
<http://www.grupotar.org/master/analisis/protopdf/GRASAS.pdf>
23. Jaramillo García, Jaime. **Glosario del ingeniero químico**. 18 de marzo de 2008
<http://www.elprisma.com/apuntes/curso.asp?id=13917>
24. **Propiedades y características de combustibles diesel y biodiesel**. 15 de marzo de 2008.
<http://www.fiagro.org.sv/archivos/0/997.pdf>

25. Universidad Autónoma de Madrid. **Extracción líquido-líquido.** 18 de marzo de 2008.

http://www.uam.es/personal_pdi/ciencias/mgilarra/experimentacionIQUII/ExtraccLiqLiq2006.pdf

25. <http://www.grupotar.org/master/analisis/protopdf/GRASAS.pdf>

APÉNDICE 1

DATOS ORIGINALES

Tabla XII Pesos de las soluciones de glicerol-agua, obtenidos para las dos temperaturas analizadas

Concentración Nominal (% en peso)	Peso solución (g)					
	T = 25 ± 5 °C			T = 10 ± 5° C		
	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3
0	28.640	28.626	28.641	28.670	28.686	28.754
1	28.766	28.760	28.813	28.800	28.816	28.874
5	28.862	28.837	28.887	28.884	28.888	28.876
10	28.921	28.930	28.933	28.986	28.962	28.971
20	29.175	29.179	29.187	29.273	29.204	29.245
35	29.439	29.433	29.444	29.629	29.563	29.621
40	29.663	29.654	29.635	29.905	29.693	29.700
50	29.815	29.843	29.826	29.892	30.041	30.053
75	30.622	30.554	30.552	30.564	30.607	30.568
85	30.914	30.928	30.918	31.172	31.131	31.108
90	30.990	31.046	31.005	31.558	31.380	31.572
100	31.332	31.323	31.367	32.534	32.543	32.565

Fuente: Balanza analítica marca OHAUS. Laboratorio de química, Escuela de Ingeniería Química, USAC.

Tabla XIII Pesos de las soluciones de glicerol-biodiesel, obtenidos para las dos temperaturas analizadas

Concentración Nominal (% en peso)	Peso solución (g)					
	T = 25 ± 5 °			T = 10 ± 5° C		
	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3
0	27.667	27.692	27.671	27.760	27.745	27.740
0.25	27.681	27.693	27.699	27.765	27.759	27.766
0.50	27.703	27.713	27.706	27.779	27.780	27.774
1	27.717	27.711	27.728	27.795	27.800	27.780
2	27.740	27.760	27.752	27.822	27.808	27.832
3	27.797	27.783	27.771	27.835	27.857	27.860
5	27.816	27.836	27.827	27.861	27.859	27.866
6	27.861	27.860	27.869	27.866	27.882	27.864
8	27.878	27.873	27.879	27.891	27.898	27.892
100	31.332	31.323	31.627	32.534	32.543	32.565

Fuente: Balanza analítica marca OHAUS. Laboratorio de química, Escuela de Ingeniería Química, USAC.

Tabla XIV Valores de los índices de refracción, obtenidos para la solución de glicerol-agua a las dos temperaturas analizadas

Concentración Nominal (% en peso)	Índice de refracción (n)					
	T = 23 ° C			T = 10 ° C		
	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3
0	1.3331	1.3332	1.3332	1.3341	1.3341	1.3341
1	1.3369	1.3373	1.3370	1.3373	1.3374	1.3374
5	1.3416	1.3416	1.3415	1.3416	1.3416	1.3416
10	1.3475	1.3475	1.3476	1.3480	1.3480	1.3481
20	1.3618	1.3619	1.3619	1.3620	1.3621	1.3621
35	1.3753	1.3753	1.3753	1.3773	1.3773	1.3773
40	1.3838	1.3839	1.3838	1.3863	1.3863	1.3864
50	1.3974	1.3974	1.3974	1.3994	1.3995	1.3995
75	1.4315	1.4315	1.4315	1.4325	1.4325	1.4325
85	1.4462	1.4463	1.4462	1.4496	1.4496	1.4496
90	1.4524	1.4525	1.4524	1.4536	1.4536	1.4536
100	1.4717	1.4717	1.4717	1.4747	1.4747	1.4747

Fuente: Refractómetro marca Abbe. Laboratorio de química, Escuela de Ingeniería Química, USAC.

Tabla XV Valores de los índice de refracción, obtenidos para la solución de glicerol-biodiesel a las dos temperaturas analizadas

Concentración Nominal (% en peso)	Índice de refracción (n)					
	T = 23 ° C			T = 10 ° C		
	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3
0	1.4596	1.4596	1.4596	1.4637	1.4637	1.4637
0.25	1.4596	1.4596	1.4596	1.4637	1.4637	1.4637
0.50	1.4596	1.4596	1.4596	1.4637	1.4637	1.4637
1	1.4596	1.4596	1.4596	1.4637	1.4637	1.4637
2	1.4596	1.4596	1.4596	1.4637	1.4637	1.4637
3	1.4596	1.4596	1.4596	1.4637	1.4637	1.4637
5	1.4596	1.4596	1.4596	1.4637	1.4637	1.4637
6	1.4596	1.4596	1.4596	1.4637	1.4637	1.4637
8	1.4596	1.4596	1.4596	1.4637	1.4637	1.4637
100	1.4717	1.4717	1.4717	1.4737	1.4737	1.4737

Fuente: Refractómetro marca Abbe. Laboratorio de química, Escuela de Ingeniería Química, USAC.

Tabla XVI Datos de los volúmenes de biodiesel adicionados para titular alícuotas de 3 ml de las soluciones de glicerol-agua a las dos temperaturas analizadas

Concentración Nominal (% en peso)	Volumen de Biodiesel (ml)					
	T = 25 ± 5 °C			T = 10 ± 5° C		
	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3
0	0.100	0.100	0.100	0.080	0.100	0.080
1	0.100	0.120	0.100	0.100	0.120	0.140
5	0.140	0.160	0.140	0.120	0.160	0.140
10	0.180	0.200	0.160	0.160	0.180	0.160
20	0.200	0.200	0.220	0.180	0.180	0.180
35	0.240	0.220	0.220	0.200	0.200	0.200
40	0.240	0.260	0.240	0.220	0.200	0.200
50	0.260	0.260	0.260	0.220	0.220	0.200
75	0.280	0.300	0.280	0.240	0.200	0.220
85	0.280	0.300	0.300	0.240	0.200	0.220
90	0.300	0.300	0.320	0.220	0.220	0.200
100	0.320	0.340	0.320	0.240	0.220	0.220

Fuente: Unidad de titulación. Laboratorio de química, Escuela de Ingeniería Química, USAC.

Tabla XVII Datos de los volúmenes de agua adicionados para titular alícuotas de 3 ml de las soluciones de glicerol-biodiesel a las dos temperaturas analizadas

Concentración Nominal (% en peso)	Volumen de Agua (ml)					
	T = 25 ± 5 ° C			T = 10 ± 5° C		
	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3
0	0.100	0.120	0.100	0.100	0.080	0.080
0.25	0.100	0.120	0.120	0.100	0.080	0.100
0.50	0.120	0.120	0.140	0.100	0.100	0.120
1	0.140	0.120	0.140	0.120	0.120	0.100
2	0.140	0.140	0.140	0.140	0.120	0.120
3	0.140	0.160	0.140	0.140	0.120	0.140
5	0.160	0.240	0.160	0.140	0.140	0.140
6	0.160	0.160	0.180	0.140	0.160	0.140
8	0.180	0.200	0.200	0.160	0.160	0.140
100	0.400	0.440	0.420	0.380	0.360	0.400

Fuente: Unidad de titulación. Laboratorio de química, Escuela de Ingeniería Química, USAC.

Tabla XVIII Índices de refracción obtenidos para cada par de soluciones conjugadas (fase biodiesel y fase agua), obtenidas para cada mezcla ternaria producida a 23 °C

Muestra	Porcentaje Glicerol	Porcentaje Biodiesel	Porcentaje Agua	Índice de refracción (n)			
				Fase	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3
1	10	70	20	Biodiesel	1.4596	1.4596	1.4597
				Agua	1.3954	1.3953	1.3954
2	20	40	40	Biodiesel	1.4597	1.4597	1.4596
				Agua	1.3753	1.3753	1.3753
3	30	20	50	Biodiesel	1.4597	1.4596	1.4597
				Agua	1.3798	1.3803	1.3802
4	30	50	20	Biodiesel	1.4597	1.4597	1.4596
				Agua	1.4105	1.4109	1.4103
5	50	10	40	Biodiesel	1.4597	1.4597	1.4597
				Agua	1.4040	1.4045	1.4030
6	20	30	50	Biodiesel	1.4597	1.4597	1.4596
				Agua	1.3682	1.3683	1.3684
7	40	30	30	Biodiesel	1.4596	1.4596	1.4597
				Agua	1.4340	1.4343	1.4342
8	5	20	75	Biodiesel	1.4597	1.4596	1.4597
				Agua	1.3427	1.3429	1.3426

Fuente: Refractómetro marca Abbe. Laboratorio de química, Escuela de Ingeniería Química, USAC.

Tabla XIX Índices de refracción obtenidos para cada par de soluciones conjugadas (fase biodiesel y fase agua), obtenidas para cada mezcla ternaria producida a $10 \pm 5^\circ\text{C}$

Muestra	Porcentaje Glicerol	Porcentaje Biodiesel	Porcentaje Agua	Índice de refracción (n)			
				Fase	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3
1	10	70	20	Biodiesel	1.4637	1.4636	1.4637
				Agua	1.3964	1.3965	1.3968
2	20	40	40	Biodiesel	1.4637	1.4637	1.4636
				Agua	1.3763	1.3763	1.3764
3	30	20	50	Biodiesel	1.4637	1.4637	1.4637
				Agua	1.3813	1.3814	1.3811
4	30	50	20	Biodiesel	1.4637	1.4637	1.4636
				Agua	1.4115	1.4110	1.4112
5	50	10	40	Biodiesel	1.4636	1.4636	1.4637
				Agua	1.4240	1.4242	1.4240
6	20	30	50	Biodiesel	1.4637	1.4636	1.4637
				Agua	1.3692	1.3692	1.3693
7	40	30	30	Biodiesel	1.4637	1.4637	1.4637
				Agua	1.4340	1.4344	1.4341
8	5	20	75	Biodiesel	1.4636	1.4637	1.4637
				Agua	1.3437	1.3437	1.3436

Fuente: Refractómetro marca Abbe. Laboratorio de química, Escuela de Ingeniería Química, USAC.

Tabla XX Índices de refracción obtenidos para las distintas relaciones biodiesel/agua para una muestra de 40 ml de biodiesel con 10 % de glicerol, con agitación constante a 300 rpm y durante un tiempo de 25 minutos a la temperatura de $25 \pm 5^\circ\text{C}$

Volumen agua (ml)	Relación Biodiesel:Agua	Índice de refracción Fase agua	Índice de refracción Fase biodiesel
2	20:1	1.4595	1.4595
4	10:1	1.3785	1.4595
8	5:1	1.3447	1.4595
16	2.5:1	1.3362	1.4595
32	1.25:1	1.3361	1.4595
40	1:1	1.3360	1.4595

Fuente: Refractómetro marca Abbe. Laboratorio de química, Escuela de Ingeniería Química, USAC.

Tabla XXI Índices de refracción obtenidos para los distintos ciclos de lavado de biodiesel para una muestra de 100 ml de biodiesel con 10 % de glicerol, con agitación constante a 300 rpm y durante un tiempo de 25 minutos a la temperatura de $25 \pm 5^\circ\text{C}$

Ciclo	Índice de refracción Fase agua
1	1.4064
2	1.3404
3	1.3306
4	1.3305

Fuente: Refractómetro marca Abbe. Laboratorio de química, Escuela de Ingeniería Química, USAC.

APÉNDICE 2

DATOS CALCULADOS

Tabla XXII Pesos del picnómetro, índices de refracción y volúmenes de titulación promedio, para las soluciones de glicerol en agua a temperatura de 25 ± 5 °C

Concentración Nominal (% en peso)	Peso del picnómetro (g)		Índice de refracción (n)		Volumen de biodiesel adicionado (ml)	
	Media	Desviación	Media	Desviación	Media	Desviación
0	28.6357	0.0137	1.3332	0.0001	0.1000	0.0000
1	28.7797	0.0471	1.3371	0.0003	0.1067	0.0189
5	28.8620	0.0354	1.3416	0.0001	0.1467	0.0189
10	28.9280	0.0099	1.3475	0.0001	0.1800	0.0283
20	29.1803	0.0094	1.3619	0.0001	0.2067	0.0189
35	29.4387	0.0080	1.3753	0.0000	0.2267	0.0189
40	29.6507	0.0222	1.3838	0.0001	0.2467	0.0189
50	29.8280	0.0212	1.3974	0.0000	0.2600	0.0000
75	30.5760	0.0651	1.4315	0.0000	0.2867	0.0189
85	30.9200	0.0113	1.4462	0.0001	0.2933	0.0189
90	31.0137	0.0457	1.4524	0.0001	0.3067	0.0189
100	31.3407	0.0372	1.4717	0.0000	0.3267	0.0189

Fuente: Datos originales.

Tabla XXIII Pesos del picnómetro, índices de refracción y volúmenes de titulación promedio, para las soluciones de glicerol en agua a temperatura de 10 ± 5 °C

Concentración Nominal (% en peso)	Peso del picnómetro (g)		Índice de refracción (n)		Volumen de biodiesel adicionado (ml)	
	Media	Desviación	Media	Desviación	Media	Desviación
0	28.7033	0.0717	1.3341	0.0000	0.0867	0.0189
1	28.8300	0.0622	1.3374	0.0001	0.1200	0.0283
5	28.8827	0.0094	1.3416	0.0000	0.1400	0.0283
10	28.9730	0.0184	1.3480	0.0001	0.1667	0.0189
20	29.2407	0.0519	1.3621	0.0001	0.1800	0.0000
35	29.6043	0.0585	1.3773	0.0000	0.2000	0.0000
40	29.7660	0.1966	1.3863	0.0001	0.2067	0.0189
50	29.9953	0.1461	1.3995	0.0001	0.2133	0.0189
75	30.5797	0.0387	1.4325	0.0000	0.2200	0.0283
85	31.1370	0.0495	1.4496	0.0000	0.2200	0.0283
90	31.5033	0.1744	1.4536	0.0000	0.2133	0.0189
100	32.5473	0.0250	1.4747	0.0000	0.2267	0.0189

Fuente: Datos originales.

Tabla XXIV Pesos del picnómetro, índices de refracción y volúmenes de titulación promedio, para las soluciones de glicerol en biodiesel a temperatura de 25 ± 5 °C

Concentración Nominal (% en peso)	Peso del picnómetro (g)		Índice de refracción (n)		Volumen de agua adicionado (ml)	
	Media	Desviación	Media	Desviación	Media	Desviación
0	27.6767	0.0217	1.4596	0.0000	0.1067	0.0189
0.25	27.6910	0.0141	1.4596	0.0000	0.1133	0.0189
0.50	27.7073	0.0080	1.4596	0.0000	0.1267	0.0189
1	27.7187	0.0132	1.4596	0.0000	0.1333	0.0189
2	27.7507	0.0151	1.4596	0.0000	0.1400	0.0000
3	27.7837	0.0189	1.4596	0.0000	0.1467	0.0189
5	27.8263	0.0146	1.4596	0.0000	0.1867	0.0754
6	27.8633	0.0080	1.4596	0.0000	0.1667	0.0189
8	27.8767	0.0052	1.4596	0.0000	0.1933	0.0189
100	31.4273	0.2824	1.4717	0.0000	0.4200	0.0283

Fuente: Datos originales.

Tabla XXV Pesos del picnómetro, índices de refracción y volúmenes de titulación promedio, para las soluciones de glicerol en biodiesel a temperatura de 10 ± 5 °C

Concentración Nominal (% en peso)	Peso del picnómetro (g)		Índice de refracción (n)		Volumen de agua adicionado (ml)	
	Media	Desviación	Media	Desviación	Media	Desviación
0	27.7483	0.0165	1.4637	0.0000	0.0867	0.0189
0.25	27.7633	0.0061	1.4637	0.0000	0.0933	0.0189
0.50	27.7777	0.0052	1.4637	0.0000	0.1067	0.0189
1	27.7917	0.0165	1.4637	0.0000	0.1133	0.0189
2	27.8207	0.0179	1.4637	0.0000	0.1267	0.0189
3	27.8507	0.0222	1.4637	0.0000	0.1333	0.0189
5	27.8620	0.0057	1.4637	0.0000	0.1400	0.0000
6	27.8707	0.0160	1.4637	0.0000	0.1467	0.0189
8	27.8937	0.0061	1.4637	0.0000	0.1533	0.0189
100	32.5473	0.0250	1.4737	0.0000	0.3800	0.0283

Fuente: Datos originales.

Tabla XXVI Datos de las densidades promedio de las soluciones binarias de glicerol-agua a las dos temperaturas analizadas

Concentración Nominal (% en peso)	Densidad (g/ml)	
	T = 10 ± 5 °C	T = 25 ± 5 °C
0	1.0109	1.0037
1	1.0243	1.0190
5	1.0299	1.0277
10	1.0395	1.0347
20	1.0679	1.0615
35	1.1065	1.0889
40	1.1237	1.1114
50	1.1480	1.1303
75	1.2100	1.2097
85	1.2692	1.2462
90	1.3081	1.2561
100	1.4189	1.2908

Fuente: Datos originales.

Tabla XXVII Datos de las densidades promedio de las soluciones binarias de glicerol-biodiesel a las dos temperaturas analizadas

Concentración Nominal (% en peso)	Densidad (g/ml)	
	T = 10 ± 5 °C	T = 25 ± 5 °C
0	0.9095	0.9019
0.25	0.9111	0.9034
0.50	0.9126	0.9051
1	0.9141	0.9063
2	0.9172	0.9097
3	0.9203	0.9132
5	0.9215	0.9178
6	0.9225	0.9217
8	0.9249	0.9231
100	1.4189	1.3000

Fuente: Datos originales.

Tabla XXVIII Datos de las concentraciones reales de las soluciones binarias de glicerol-agua a las dos temperaturas analizadas

Concentración Nominal (% en peso)	Concentración real (% en peso)	
	T = 10 ± 5 °C	T = 25 ± 5 °C
0	0.0000	0.0000
1	1.3853	1.2668
5	6.8887	6.2802
10	13.6503	12.4753
20	26.5741	24.3210
35	44.8822	41.4898
40	50.5105	46.4567
50	61.7992	57.1037
75	87.9467	80.0329
85	95.0266	88.0460
90	97.6252	92.4872
100	100.0000	100.0000

Fuente: Datos originales.

Tabla XXIX Datos de las concentraciones reales de las soluciones binarias de glicerol-biodiesel a las dos temperaturas analizadas

Concentración Nominal (% en peso)	Concentración real (% en peso)	
	T = 10 ± 5 °C	T = 25 ± 5 °C
0	0.0000	0.0000
0.25	0.3894	0.3572
0.50	0.7774	0.7131
1	1.5523	1.4242
2	3.0942	2.8378
3	4.6252	4.2404
5	7.6986	7.0325
6	9.2291	8.4030
8	12.2730	11.1869
100	100.0000	100.0000

Fuente: Datos originales.

Tabla XXX Datos de la composición porcentual de las mezclas ternarias formadas a partir de las soluciones de glicerol-agua a temperatura de 25 ± 5 °C necesarios para graficar la curva binodal

Concentración Nominal (% en peso)	Volumen de biodiesel (ml)	Masa total (g)	% Glicerol	% Biodiesel	% Agua
0	0.1000	3.1012	0.0000	2.9081	97.0919
1	0.1067	3.1531	1.2282	3.0510	95.7209
5	0.1467	3.2154	6.0218	4.1138	89.8644
10	0.1800	3.2665	11.8553	4.9698	83.1749
20	0.2067	3.3709	22.9762	5.5293	71.4945
35	0.2267	3.4712	39.0464	5.8892	55.0644
40	0.2467	3.5568	43.5510	6.2547	50.1943
50	0.2600	3.6253	53.4102	6.4682	40.1217
75	0.2867	3.8875	74.7104	6.6505	18.6392
85	0.2933	4.0031	82.2273	6.6087	11.1640
90	0.3067	4.0449	86.1633	6.8376	6.9991
100	0.3267	4.1671	92.9301	7.0699	0.0000

Fuente: Datos originales.

Tabla XXXI Datos de la composición porcentual de las mezclas ternarias formadas a partir de las soluciones de glicerol-agua a temperatura de 10 ± 5 °C necesarios para graficar la curva binodal

Concentración Nominal (% en peso)	Volumen de biodiesel (ml)	Masa total (g)	% Glicerol	% Biodiesel	% Agua
0	0.0867	3.1108	0.0000	2.5127	97.4873
1	0.1200	3.1812	1.3381	3.4021	95.2598
5	0.1400	3.2160	6.6182	3.9261	89.4557
10	0.1667	3.2688	13.0226	4.5984	82.3790
20	0.1800	3.3661	25.2925	4.8228	69.8847
35	0.2000	3.4999	42.5691	5.1537	52.2772
40	0.2067	3.5574	47.8640	5.2394	46.8966
50	0.2133	3.6365	58.5294	5.2909	36.1797
75	0.2200	3.8286	83.3889	5.1824	11.4287
85	0.2200	4.0061	90.3201	4.9528	4.7271
90	0.2133	4.1167	93.0625	4.6736	2.2638
100	0.2267	4.4612	95.4177	4.5823	0.0000

Fuente: Datos originales.

Tabla XXXII Datos de la composición porcentual de las mezclas ternarias formadas a partir de las soluciones de glicerol-biodiesel a temperatura de 25 ± 5 °C necesarios para graficar la curva binodal

Concentración Nominal (% en peso)	Volumen de biodiesel (ml)	Masa total (g)	% Glicerol	% Biodiesel	% Agua
0	0.1067	2.8127	0.0000	96.1937	3.8063
0.25	0.1133	2.8239	0.3453	95.6267	4.0281
0.50	0.1267	2.8425	0.6860	94.8414	4.4725
1	0.1333	2.8528	1.3671	93.9420	4.6909
2	0.1400	2.8697	2.7181	92.3854	4.8965
3	0.1467	2.8869	4.0529	90.8480	5.0991
5	0.1867	2.9406	6.6314	86.9974	6.3712
6	0.1667	2.9324	7.9802	86.3152	5.7046
8	0.1933	2.9634	10.5289	82.9230	6.5481
100	0.4200	4.3217	90.2457	0.0000	9.7543

Fuente: Datos originales.

Tabla XXXIII Datos de la composición porcentual de las mezclas ternarias formadas a partir de las soluciones de glicerol-biodiesel a temperatura de 10 ± 5 °C necesarios para graficar la curva binodal

Concentración Nominal (% en peso)	Volumen de biodiesel (ml)	Masa total (g)	% Glicerol	% Biodiesel	% Agua
0	0.0867	2.8161	0.0000	96.8890	3.1110
0.25	0.0933	2.8276	0.3764	96.2870	3.3367
0.50	0.1067	2.8456	0.7480	95.4629	3.7892
1	0.1133	2.8568	1.4900	94.4997	4.0102
2	0.1267	2.8795	2.9566	92.5968	4.4467
3	0.1333	2.8958	4.4099	90.9357	4.6544
5	0.1400	2.9062	7.3237	87.8066	4.8697
6	0.1467	2.9157	8.7598	86.1552	5.0849
8	0.1533	2.9297	11.6237	83.0857	5.2906
100	0.3800	4.6409	91.7230	0.0000	8.2770

Fuente: Datos originales.

Tabla XXXIV Índices de refracción promedio de las fases biodiesel y fase agua, para los puntos seleccionados por debajo del domo de solubilidad a la temperatura de 25 ± 5 °C

Muestra	% Glicerol	% Biodiesel	% Agua	Fase Biodiesel		Fase Agua	
				Media	Desviación	Media	Desviación
1	10	70	20	1.4596	0.0001	1.3954	0.0001
2	20	40	40	1.4597	0.0001	1.3753	0.0000
3	30	20	50	1.4597	0.0001	1.3801	0.0004
4	30	50	20	1.4597	0.0001	1.4106	0.0005
5	50	10	40	1.4597	0.0000	1.4038	0.0012
6	20	30	50	1.4597	0.0001	1.3683	0.0001
7	40	30	30	1.4596	0.0001	1.4342	0.0002
8	5	20	75	1.4597	0.0001	1.3427	0.0002

Fuente: Datos originales.

Tabla XXXV Índices de refracción promedio de las fases biodiesel y fase agua, para los puntos seleccionados por debajo del domo de solubilidad a la temperatura de 10 ± 5 °C

Muestra	% Glicerol	% Biodiesel	% Agua	Fase Biodiesel		Fase Agua	
				Media	Desviación	Media	Desviación
1	10	70	20	1.4637	0.0001	1.3966	0.0003
2	20	40	40	1.4637	0.0001	1.3763	0.0001
3	30	20	50	1.4637	0.0000	1.3813	0.0002
4	30	50	20	1.4637	0.0001	1.4112	0.0004
5	50	10	40	1.4636	0.0001	1.4241	0.0002
6	20	30	50	1.4637	0.0001	1.3692	0.0001
7	40	30	30	1.4637	0.0000	1.4342	0.0003
8	5	20	75	1.4637	0.0001	1.3437	0.0001

Fuente: Datos originales.

Tabla XXXVI Datos de las concentraciones de los pares de equilibrio (soluciones conjugadas) para el establecimiento de las líneas de unión, obtenidas para cada mezcla reproducida, a la temperatura de 25 ± 5 °C

Muestra	% Glicerol	% Biodiesel	% Agua	Concentración de glicerol (% en peso)	
				Fase Biodiesel	Fase Agua
1	10	70	20	10	58.6762
2	20	40	40	10	42.7841
3	30	20	50	10	46.9664
4	30	50	20	10	68.6008
5	50	10	40	10	64.3364
6	20	30	50	10	36.0629
7	40	30	30	10	81.4335
8	5	20	75	10	7.0376

Fuente: Datos originales.

Tabla XXXVII Datos de las concentraciones de los pares de equilibrio (soluciones conjugadas) para el establecimiento de las líneas de unión, obtenidas para cada mezcla reproducida, a la temperatura de 10 ± 5 °C

Muestra	% Glicerol	% Biodiesel	% Agua	Concentración de glicerol (% en peso)	
				Fase Biodiesel	Fase Agua
1	10	70	20	11	46.5221
2	20	40	40	11	32.6467
3	30	20	50	11	36.2602
4	30	50	20	11	55.6003
5	50	10	40	11	63.3321
6	20	30	50	11	27.2331
7	40	30	30	11	69.2821
8	5	20	75	11	6.3001

Fuente: Datos originales.

Tabla XXXVIII Datos del coeficiente de distribución para las mezclas ternarias glicerol-biodiesel-agua a las dos temperaturas analizadas

Muestra	% Glicerol	% Biodiesel	% Agua	K T = 23 °C	K T = 10 °C
1	10	70	20	0.1704	0.2150
2	20	40	40	0.2337	0.3063
3	30	20	50	0.2129	0.2758
4	30	50	20	0.1458	0.1799
5	50	10	40	0.1554	0.1579
6	20	30	50	0.2773	0.3672
7	40	30	30	0.1228	0.1443
8	5	20	75	1.4209	1.5873

Fuente: Datos originales.

Tabla XXXIX Datos de las concentraciones para el establecimiento de las líneas de unión, obtenidas para cada relación biodiesel:agua, para una muestra de 40 ml de biodiesel al 10 % de glicerol con agitación constante a 300 rpm y durante un tiempo de 25 minutos a $25 \pm 5^{\circ}\text{C}$

Relación Biodiesel:Agua	Glicerol en agua (% en peso)	Glicerol en biodiesel (% en peso)
20:1	0.1535	10
10:1	36.2543	10
5:1	56.8606	10
2.5:1	61.3878	10
1.25:1	61.4383	10
1:1	61.4899	10

Fuente: Datos originales.

Tabla XL Datos de las concentraciones de glicerol en agua para determinar la cantidad de ciclos de lavado, para una muestra de 100 ml de biodiesel al 10 % de glicerol con agitación constante a 300 rpm y durante un tiempo de 25 minutos a la temperatura de $25 \pm 5^{\circ}\text{C}$

Ciclo	Índice de refracción Fase agua	Glicerol en agua (% en peso)	Glicerol extraído (% en peso)	Glicerol residual (% en peso)
1	1.4064	72.1406	9.3782	0.6218
2	1.3404	6.5975	0.4750	0.1468
3	1.3306	3.3415	0.0317	0.1150
4	1.3305	3.4380	0.0312	0.0838

Fuente: Datos originales.

APÉNDICE 3

MUESTRA DE CÁLCULO

1. Cálculo de la media aritmética

$$\bar{X} = \frac{\sum X_i}{N} \quad (1)$$

Donde

\bar{X} : media aritmética

X_i : dato de la i-ésima observación

N : número de observación

1.1 Cálculo de la media aritmética de los pesos de las soluciones binarias de glicerol-agua al 1% (peso de solución + peso del picnómetro) a la temperatura de 25 ± 5 °C.

$$\bar{X} = \frac{28.766 \text{ g} + 28.760 \text{ g} + 28.813 \text{ g}}{3} = 28.7797 \text{ g}$$

1.2 Cálculo de la media aritmética de los índices de refracción medidos para solución binaria de glicerol-agua al 1 % a la temperatura de 23 °C.

$$\bar{X} = \frac{1.3369 + 1.3373 + 1.3370}{3} = 1.3371$$

- 1.3 Cálculo de la media aritmética de los volúmenes de biodiesel adicionados a la solución binaria de glicerol-agua al 1% a la temperatura de 25 ± 5 °C.

$$\bar{X} = \frac{0.100 \text{ ml} + 0.120 \text{ ml} + 0.100 \text{ ml}}{3} = 0.1067 \text{ ml}$$

Los resultados para las siguientes corridas de los pesos de las soluciones binarias, volúmenes de adición de los solventes y los índices de refracción se presentan en la sección de datos calculados.

2. Cálculo de las densidades de las soluciones

$$\rho = \frac{(P_2 - P_1)}{V_1} \quad (2)$$

Donde:

ρ : densidad de la solución (g/ml)

P_1 : peso del picnómetro (g)

P_2 : peso de la solución, más el peso inicial del picnómetro (g)

V_1 : volumen del picnómetro (9.42 ml)

- 2.1 Cálculo de la densidad de la solución binaria glicerol-agua al 1 % a la temperatura de 25 ± 5 °C.

$$\rho = \frac{28.7797 \text{ g} - 1.181 \text{ g}}{9.42 \text{ ml}} = 1.0243 \text{ g / ml}$$

Los resultados para las siguientes corridas de las soluciones binarias glicerol-agua y glicerol-biodiesel a las dos temperatura analizadas, se presentan en la sección de datos calculados.

3. Cálculo de las concentraciones reales de porcentaje en peso de las soluciones

$$C = \frac{\rho_{glic} V_{sol} x}{\rho_{sol} V_{sol}} * 100 \quad (3)$$

Donde:

ρ_{glic} : densidad del glicerol a la temperatura analizada (g/ml)

V_{sol} : volumen de la solución preparado (50 ml)

ρ_{sol} : densidad de la solución (g/ml)

x : fracción volumen del glicerol en la solución (% en peso nominal)

- 3.1 Cálculo de la concentración real de la solución binaria glicerol-agua al 1 % a la temperatura de 25 ± 5 °C.

$$C = \frac{(1.2908 \text{ g / ml})(50 \text{ ml})(0.01)}{(1.0190 \text{ g / ml})(50 \text{ ml})} * 100 = 11.2668 \%$$

Los resultados para las siguientes corridas de las soluciones binarias glicerol-agua y glicerol-biodiesel a las dos temperatura analizadas, se presentan en la sección de datos calculados.

4. Determinación de las curvas de correlación de los parámetros índice de refracción vrs. concentración

Se determinaron plotando los índices de refracción contra las concentraciones de glicerol en los solventes utilizados por medio de una hoja de cálculo de Excel, con su respectiva ecuación matemática y coeficiente de correlación.

- 4.1 La ecuación de correlación del índice de refracción contra concentración (porcentaje en peso) con su coeficiente de correlación, para las soluciones de glicerol-biodiesel a la temperatura de 23 °C.

$$n = 1E - 06C^2 - 1E - 05C + 1.4596$$
$$R^2 = 1$$

- 4.2 La ecuación de correlación del índice de refracción contra concentración (porcentaje en peso) con su coeficiente de correlación, para las soluciones de glicerol-agua a la temperatura de 23 °C.

$$n = 4E - 8C^3 - 5E - 06C^2 + 0.001C + 1.334$$
$$R^2 = 0.999$$

Donde:

n : índice de refracción

C : concentración (% en peso)

Los resultados de las siguientes corridas de las ecuaciones de correlación y sus respectivos coeficientes de correlación para las soluciones binarias glicerol-biodiesel y glicerol-agua a las dos temperaturas analizadas, se presentan en la sección de resultados.

5. Cálculo de la composición porcentual de las mezclas ternarias para graficar la curva binodal.

$$M_t = V_2\rho_2 + V_1\rho_{sol} \quad (4)$$

$$\% \text{ Soluto} = \frac{xV_1\rho_{glic}}{M_t} \quad (5)$$

$$\% \text{ Solvente adicionado} = \frac{V_2 \rho_2}{M_t} \quad (6)$$

$$\% \text{ Solvente 1} = \frac{(V_1 \rho_{sol} - x V_1 \rho_{glic})}{M_t} \quad (7)$$

Donde:

M_t : masa total de la mezcla ternaria (g)

V_2 : volumen del solvente de adición (biodiesel o agua) (ml)

ρ_2 : densidad del solvente de adición (g/ml)

V_1 : volumen de alícuota de la solución a titular (ml)

ρ_{sol} : densidad de la solución a titular (g/ml)

x : fracción volumen de la solución (% en peso nominal)

ρ_{glic} : densidad del soluto (glicerol) (g/ml)

- 5.1 Cálculo de la composición porcentual en peso de la mezcla ternaria formada, para la solución glicerol-biodiesel al 0.25 %, titulada con agua, a temperatura de 25 ± 5 °C.

$$M_t = (0.1133 \text{ ml})(1.0037 \text{ g/ml}) + (3.0000 \text{ ml})(0.9034 \text{ g/ml}) = 2.8239 \text{ g}$$

$$\% \text{ glicerol} = \frac{(0.0025)(3.0000 \text{ ml})(1.3000 \text{ g/ml})}{(2.8239 \text{ g})} * 100 = 0.3453 \%$$

$$\% \text{ agua} = \frac{(0.1133 \text{ ml})(1.0037 \text{ g/ml})}{(2.8239 \text{ g})} * 100 = 4.0281 \%$$

$$\% \text{ biodiesel} = \frac{(3.0000 \text{ ml})(0.9034 \text{ g/ml}) - (0.0025)(3.0000 \text{ ml})(1.3000 \text{ g/ml})}{(2.8239 \text{ g})} * 100 = 95.6267 \%$$

5.2 Cálculo de la composición porcentual en peso de la mezcla ternaria formada, para la solución glicerol-agua al 1 %, titulada con biodiesel, a temperatura de 25 ± 5 °C.

$$M_t = (0.1067 \text{ ml})(0.9019 \text{ g/ml}) + (3.0000 \text{ ml})(1.0190 \text{ g/ml}) = 3.1531 \text{ g}$$

$$\% \text{ glicerol} = \frac{(0.01)(3.0000 \text{ ml})(1.2908 \text{ g/ml})}{(3.1531 \text{ g})} * 100 = 1.2282 \%$$

$$\% \text{ biodiesel} = \frac{(0.1067 \text{ ml})(0.9019 \text{ g/ml})}{(3.1531 \text{ g})} * 100 = 3.0510 \%$$

$$\% \text{ agua} = \frac{(3.0000 \text{ ml})(1.0190 \text{ g/ml}) - (0.01)(3.0000 \text{ ml})(1.2908 \text{ g/ml})}{3.1531 \text{ g}} * 100 = 95.7209 \%$$

Los resultados de las siguientes corridas de las composiciones porcentuales en peso de las mezclas ternarias formadas con cada solución, a las dos temperaturas analizadas se presentan en la sección de datos calculados.

6. Obtención de la curva binodal

Se graficaron las composiciones porcentuales en peso para las mezclas ternarias por medio del software TriDraw 4.5, en el cual se obtuvo la distribución de los datos experimentales de equilibrio de inmiscibilidad al equilibrio representado en un diagrama triangular.

7. Cálculo de la composición porcentual en peso de las capas conjugadas formadas a partir de mezclas ternarias, luego de agitar y reposar dichas mezclas.

- Fase biodiesel: al sustituir el índice de refracción leído para dicha fase, se sustituye el valor en la ecuación de correlación para soluciones binarias glicerol-biodiesel, a la temperatura analizada, así se obtiene la composición porcentual en peso.
- Fase agua: al sustituir el índice de refracción leído para esta fase, se sustituye el valor en la ecuación de correlación para soluciones binarias glicerol-agua, a la temperatura analizada, así se obtiene la composición porcentual en peso.

7.1 Cálculo de la composición de la fase de biodiesel formada para la mezcla ternaria 1 (10 % glicerol, 70 % biodiesel, 20 % agua) a 23 °C.

$$1.4596 = 1E - 06C^2 - 1E - 05C + 1.4596$$

Despejando C de la ecuación anterior, se obtiene:

$$C = 10 \%$$

7.2 Cálculo de la composición de la fase de agua formada para la mezcla ternaria 1 (10 % glicerol, 70 % biodiesel, 20 % agua) a 23 °C.

$$1.3954 = 4E - 08C^3 - 5E - 06C^2 + 0.001C + 1.334$$

Despejando C de la ecuación anterior, se obtiene:

$$C = 58.6762 \%$$

Los resultados de las siguientes muestras de las composiciones porcentuales en peso de las mezclas ternarias, a las dos temperaturas analizadas se presentan en la sección de datos calculados.

8. Obtención de las líneas de unión

Se graficaron los datos de las composiciones porcentuales en peso, obtenidas según el inciso anterior para cada fase en el diagrama triangular (inciso 6) y posteriormente, se unieron dichos puntos (para cada par de capas conjugadas) mediante líneas de unión.

9. Obtención del punto de pliegue

Por medio del método gráfico se procede a la obtención de la curva de distribución, graficando los datos de % de glicerol en fase biodiesel vrs % de glicerol en fase agua, juntamente con una línea de pendiente 1 en un sistema de coordenadas rectangulares. Luego, los puntos de cada línea de unión en cada fase se proyectan desde el diagrama triangular, hacia la curva de distribución obtenida; los de % de glicerol en biodiesel se localizan en la curva de distribución y los de % de glicerol en agua se localizan en la línea a 45 °. El punto de pliegue será la composición para la cual, la curva de distribución intercepte a la línea de 45 ° (% glicerol en extracto = % glicerol en refinado). Este punto proyectado a la gráfica triangular permite leer la composición de la mezcla ternaria en este punto de solubilidad límite.

10. Cálculo del coeficiente de distribución

$$k = \frac{y}{x} \quad (8)$$

Donde:

k : coeficiente de distribución

y : concentración al equilibrio de glicerol en fase biodiesel

x : concentración al equilibrio de glicerol en fase agua

- 10.1 Cálculo del coeficiente de distribución para los datos obtenidos de la mezcla 1 (10 % glicerol, 70 % biodiesel, 20 % agua), a la temperatura de 23 ° C.

$$k = \frac{10}{58.6762} = 0.1704$$

Los resultados de las siguientes corridas de las soluciones ternarias a las dos temperaturas analizadas, se presentan en la sección de datos calculados.

APÉNDICE 4

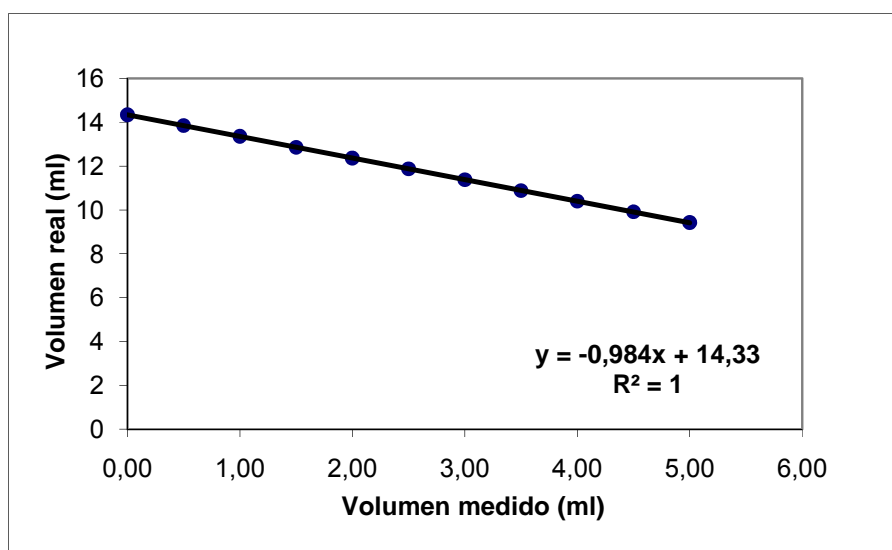
CALIBRACIÓN DEL PICNÓMETRO

Tabla XLI Volúmenes medidos para la calibración del picnómetro

No.	VOLUMEN REAL (ml)			VOLUMEN PROMEDIO (ml)	VOLUMEN MEDIDO (ml)
	CORRIDA 1	CORRIDA 2	CORRIDA 3		
1	9.40	9.46	9.40	9.42	5.00
2	9.90	9.94	9.90	9.91	4.50
3	10.40	10.40	10.38	10.39	4.00
4	10.90	10.86	10.88	10.88	3.50
5	11.40	11.34	11.38	11.37	3.00
6	11.90	11.84	11.88	11.87	2.50
7	12.40	12.32	12.36	12.36	2.00
8	12.90	12.80	12.86	12.85	1.50
9	13.40	13.30	13.36	13.35	1.00
10	13.90	13.80	13.84	13.85	0.50
11	14.40	14.28	14.34	14.34	0.00

Fuente: Laboratorio de química, Escuela de Ingeniería Química, USAC.

Figura 32 Curva de calibración del picnómetro



Fuente: Tabla XLI. Calibración del picnómetro.

APÉNDICE 5
PRESUPUESTO

Tabla XLII Costo de reactivos

1. REACTIVOS	UNIDAD	FUENTE	FECHA	COSTO UNITARIO (Q)	CANTIDAD	COSTO TOTAL (Q)
Biodiesel	2 galones	Lic. Pedro Ordoñez	30/05/2008	24.00	2	48.00
Glicerol grado reactivo 95.5 %	1 litro	Química Técnica	28/03/2008	1,488.00	1	1,488.00
Agua destilada	1 galón	Emb. Mariposa	27/09/2008	12.70	1	25.40
TOTAL						1,561.40

Tabla XLIII Costo de equipo

2. EQUIPO	DESCRIPCIÓN	FUENTE	FECHA	COSTO INICIAL (Q)	DEPRECIACIÓN (Q)	COSTO/ 2 MESES (Q)
Balanza analítica	marca OHAUS, modelo AR1530	KRON	01/03/2008	18,393.00	3,678.60	613.10
Plancha de calentamiento con agitación	SYBRON/Thermolyne, SP18425	KRON	21/03/2008	3,280.00	656.00	109.33
Refractómetro	marca ABBE, modelo 32200	INSBAL	23/05/2008	3,136.00	627.20	104.53
Campana de extracción	LABOTEC	INSBAL	23/05/2008	36,952.00	7,390.40	1,231.73
TOTAL						2,058.70

Tabla XLIV Costo de cristalería

3. CRISTALERÍA	DESCRIPCIÓN	FUENTE	FECHA	COSTO UNITARIO (Q)	CANTIDAD	COSTO TOTAL (Q)
Earlenmeyers	250 ml de borosilicato	DILAB	29/09/2008	42.56	4	170.24
Pipetas serológicas	1ml	DILAB	29/09/2008	16.80	1	16.80
Pipetas serológicas	5 ml	DILAB	29/09/2008	16.80	1	16.80
Pipetas serológicas	10 ml	DILAB	02/10/2008	18.20	1	18.20
Varilla de agitación	vidrio de 8 x 35 mm	PROINCA	08/05/2008	10.50	1	10.50
Bureta	25 ml	PROINCA	08/05/2008	323.75	2	323.75
Bureta	10 ml de boro clase B	DILAB	29/09/2008	411.04	2	822.08
Beakers	25 ml de borosilicato	DILAB	29/09/2008	41.11	2	82.22
Beakers	50 ml de borosilicato	DILAB	29/09/2008	41.44	2	82.88
Beakers	250 ml de borosilicato	DILAB	29/09/2008	41.44	2	82.88
Beakers	1000 ml de borosilicato	DILAB	29/09/2008	69.72	2	139.44
Ampolla de decantación	250 ml	DILAB	29/09/2008	600.21	2	1,200.42
Ampolla de decantación	1000 ml	DILAB	29/09/2008	1,440.50	1	1,440.50
Probeta	10 ml	DILAB	29/09/2008	37.35	1	37.35
Probeta	25 ml	DILAB	29/09/2008	38.64	1	38.64
Probeta	50 ml	DILAB	29/09/2008	41.44	1	41.44
Probeta	100 ml	DILAB	29/09/2008	51.52	1	51.52
Tubos de ensayo	10 ml	DILAB	29/09/2008	1.96	10	19.60
Picnómetro	10 ml	DILAB	29/09/2008	602.84	1	602.84
Termómetro	Rango de 0 - 150 °C	DILAB	29/09/2008	102.48	1	102.48
					TOTAL	5,300.58

Tabla XLV Costo de accesorios

4. ACCESORIOS	DESCRIPCIÓN	FUENTE	FECHA	COSTO UNITARIO (Q)	CANTIDAD	COSTO TOTAL (Q)
Pizetas de polietileno	125 ml	PROINCA	29/07/2008	23.72	1	23.72
Soportes universales	metálicos	DILAB	29/09/2008	175.11	1	175.11
Anillos metálicos	de hierro de 7 cm	DILAB	29/09/2008	217.56	1	217.56
Agitador magnético	pequeño	Química Técnica	28/03/2008	42.00	2	84.00
					TOTAL	500.39

Tabla XLVI Costo de energía eléctrica

5. ENERGÍA ELÉCTRICA	POTENCIA (WATTS)	CANTIDAD HORAS	kw-h TOTALES	COSTO kw-h (Q)	COSTO TOTAL (Q)
Balanza analítica	6	80	0.48	1.67	0.80
Plancha de calentamiento con agitación	900	80	72	1.67	120.24
Refractómetro	6	40	0.24	1.67	0.40
Campana de extracción	900	10	9	1.67	15.03
				TOTAL	136.47

Tabla XLVII Costo de otros

6. OTROS	FUENTE	FECHA	COSTO UNITARIO (Q)	CANTIDAD	COSTO TOTAL (Q)
Papel parafilm	PROINCA	29/07/2008	245.00	1	245.00
Fotocopias	USAC	20/09/2008	0.15	200	30.00
CDs	Paiz	05/05/2008	2.50	2	5.00
Papel mayordomo	Paiz	05/05/2008	12.50	6	75.00
Maskin tape	Paiz	05/05/2008	6.75	1	6.75
Guantes de látex	DILAB	29/09/2008	48.72	1	48.72
Lapiceros	Paiz	05/05/2008	1.00	6	6.00
Tijeras	Paiz	05/05/2008	15.70	1	15.70
				TOTAL	187.17

Tabla XLVIII Costos totales de la investigación

RESUMEN	COSTO (Q)
1. Reactivos	1,561.40
2. Equipo	2,058.70
3. Cristalería	5,300.58
4. Accesorios	500.39
5. Energía eléctrica	136.47
6. Otros	187.17
TOTAL	9,744.72

APÉNDICE 6

Tabla XLIX Impactos ambientales que pueden ser generados por la investigación

No.	Aspecto Ambiental	Impacto ambiental	Tipo de impacto ambiental (de acuerdo con la descripción del cuadro anterior)	Actividades de la Investigación donde Aplica el Impacto Ambiental	Manejo ambiental Indicar qué se hará para evitar el impacto al ambiente.
1	AIRE	Gases	Gases	<ul style="list-style-type: none"> ○ Secado biodiesel 	Para mitigar el impacto en aire de los gases a generar se utiliza campana de extracción de gases dentro del laboratorio.
		Ruido	No aplica	No aplica	No aplica, pues no se generará ningún ruido durante la experimentación.
		Vibraciones	No aplica	No aplica	No aplica, pues no se generará ningún impacto ambiental.
		Olores	<ol style="list-style-type: none"> 1. No perceptible 2. Muy débilmente Perceptible 3. Débilmente Perceptible 4. Distinguible 5. Fuerte 6. Muy fuerte 7. Extremadamente Fuerte 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Lavado de biodiesel (4) ○ Secado de biodiesel (5) ○ Preparación de soluciones. (4) ○ Medición de índice de refracción y densidad (4) 	Realizar los análisis en la medida de lo posible dentro de la campana de extracción.

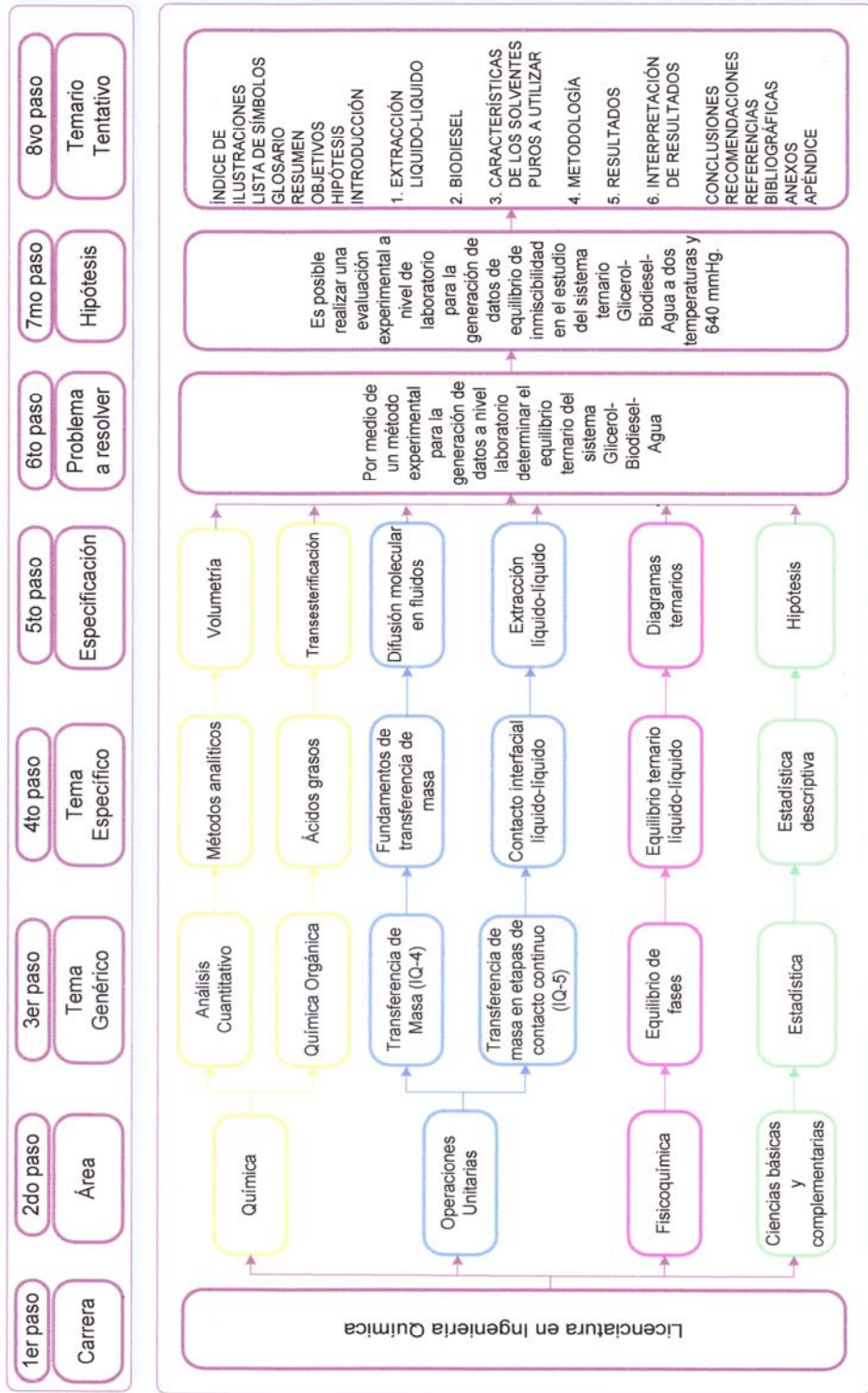
				<ul style="list-style-type: none"> ○ Titulación de las soluciones (4) 	
2	AGUA	Abastecimiento de agua	<p>1. Lavado de Cristalería</p> <p>2. Limpieza</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ Lavado del biodiesel (2) ○ Secado de biodiesel (1,2) ○ Preparación de soluciones (1,2) ○ Medición de índices de refracción y densidad (1,2) ○ Titulación de las soluciones (1,2) 	El agua se utilizará racionalmente, exclusivamente para cubrir las necesidades de la investigación y no afectará a personas ni al ambiente.
		Aguas residuales ordinarias (aguas residuales generadas por las actividades domésticas)	No aplica, porque las aguas residuales están conectadas al drenaje principal.	No aplica, pues no se generará ningún impacto ambiental.	No aplica, pues no se generará ningún impacto ambiental.
		Aguas residuales Especiales (aguas residuales generadas por servicios públicos municipales,	Si aplica, pues se generarán aguas residuales provocadas por el manejo de desechos de laboratorio.	<ul style="list-style-type: none"> ○ Durante todo el proceso de investigación. 	Se realizara el manejo de desechos adecuado para que el impacto ambiental no sea significativo

3	SUELO	actividades de servicios, industriales, agrícolas, pecuarias, hospitalarias)			
		Mezcla de las aguas residuales anteriores.	No aplica, pues no se generarán mezclas de las aguas antes mencionadas.	No aplica, pues no se generará ningún impacto ambiental.	No aplica, pues no se generará ningún impacto ambiental.
		Agua de lluvia	No aplica	No aplica, pues no se generará ningún impacto ambiental.	No aplica, pues no se genera ningún impacto ambiental.
	SUELO	Desechos sólidos (basura común)	Papel mayordomo	<ul style="list-style-type: none"> o Secado de la cristalería y limpieza de laboratorio 	Manejo de Desechos Sólidos dentro del laboratorio.
		Desechos Peligrosos (líquidos)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Corrosivos 2. Reactivos 3. Explosivos 4. Tóxicos 5. Inflamables 6. Bioinfecciosos 	<ul style="list-style-type: none"> o Durante todo el proceso de investigación por la utilización de biodiesel (4) 	Manejo de desechos líquidos.
		Modificación del relieve o	No aplica, pues no se alterará la topografía	No aplica, pues no se generará	No aplica, pues no se generará ningún

		topografía del área	del terreno.	ningún impacto ambiental.	impacto ambiental.
4	BIODIVERSIDAD	Flora (árboles, plantas)	No aplica, pues no se alterará la flora.	No aplica, pues no se generará ningún impacto ambiental.	No aplica, pues no se generará ningún impacto ambiental.
		Fauna (animales)	No aplica, ya que no se expondrá la vida de animales que habitan los alrededores del área.	No aplica, pues no se generará ningún impacto ambiental.	No aplica, pues no se generará ningún impacto ambiental.
		Ecosistema	No aplica, pues no se destruirá el hábitat de ninguna especie.	No aplica, pues no se generará ningún impacto ambiental.	No aplica, pues no se generará ningún impacto ambiental.
5	VISUAL	Modificación del paisaje	No aplica, porque no se modificará ni la topografía, ni el paisaje, ya que no se verán cambios significativos en el área de trabajo.	No aplica, pues no se generará ningún impacto ambiental.	No aplica, pues no se generará ningún impacto ambiental.
6	SOCIAL	Cambio o modificaciones sociales.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Cultural 2. Político 3. Económico 	Al final de la investigación se espera obtener un aporte industrial para el proceso de lavado de biodiesel efectivo y minimizando costos.	Se realizarán todas las actividades de la investigación procurando causar el mínimo impacto ambiental.

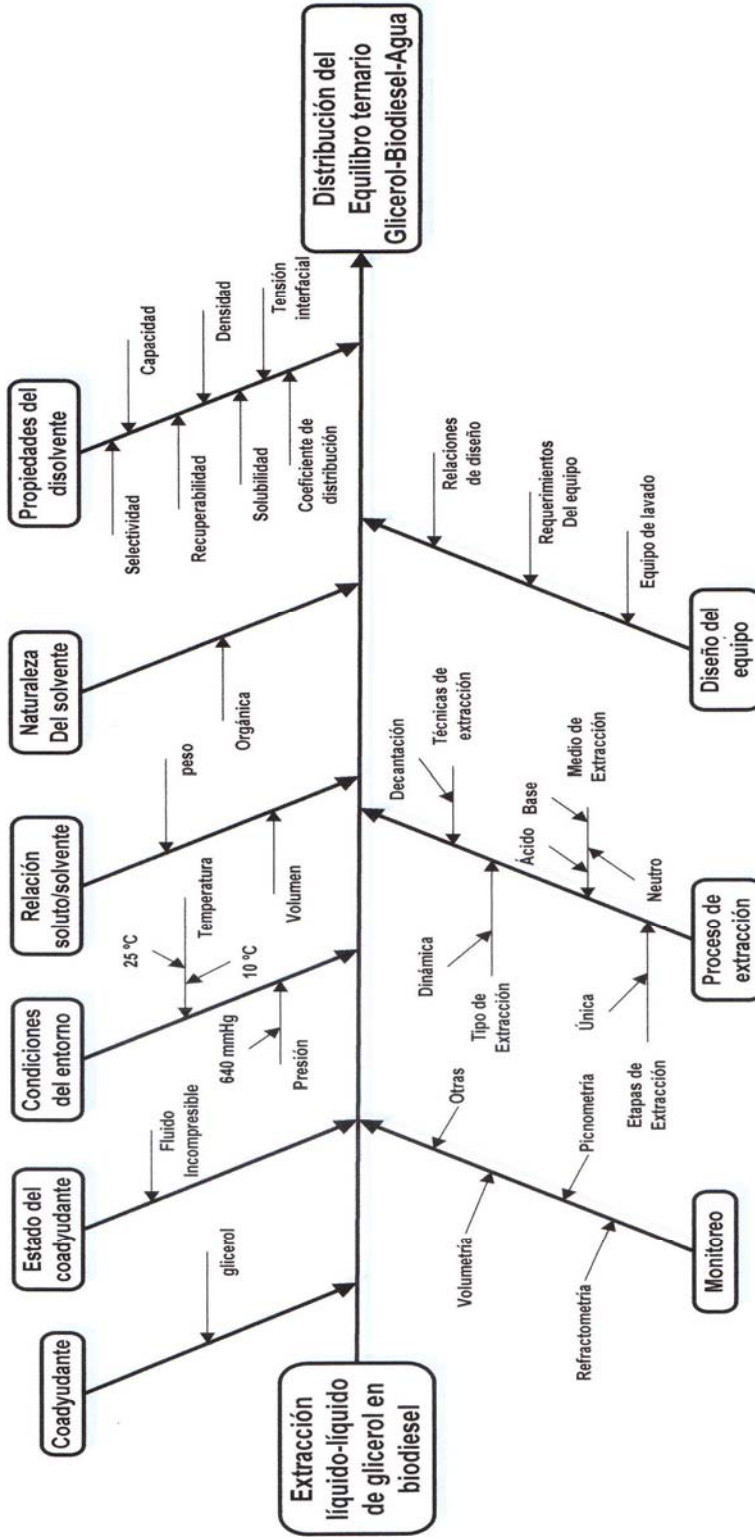
Fuente: Metodología.

Figura 33 Requerimiento académico para la elaboración de trabajo de graduación de extracción líquido-líquido en la carrera de Ingeniería Química



Fuente: Referencia 18.

Figura 34 Diagrama de Causa y Efecto para determinar las variables en un proceso de Extracción



Fuente: Metodología.

Figura 35 Detalle de la unidad de lavado de biodiesel



Fuente: laboratorio de química, Escuela de Ingeniería Química, USAC.

Figura 36 Detalle de la unidad de separación del agua de lavado del biodiesel



Fuente: laboratorio de química, Escuela de Ingeniería Química, USAC.

Figura 37 Detalle de la unidad de secado de biodiesel



Fuente: laboratorio de química, Escuela de Ingeniería Química, USAC.

Figura 38 Detalle de la unidad de calibración del picnómetro



Fuente: laboratorio de química, Escuela de Ingeniería Química, USAC.

Figura 39 Detalle de la unidad de medición de índices de refracción a la temperatura de 23 ° C.



Fuente: laboratorio de química, Escuela de Ingeniería Química, USAC.

Figura 40 Detalle de la unidad de medición de índices de refracción a la temperatura de 10 ° C.



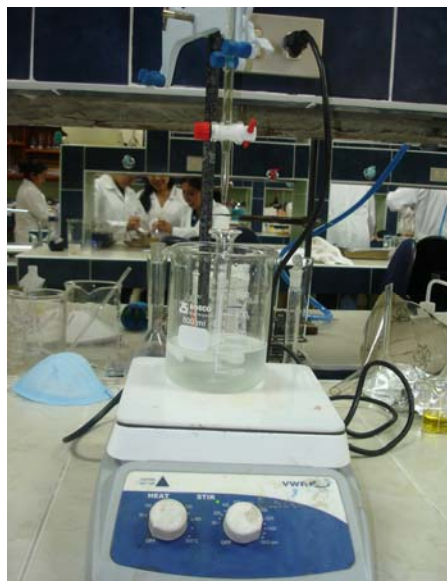
Fuente: laboratorio de química, Escuela de Ingeniería Química, USAC.

Figura 41 Detalle de la unidad utilizada para la titulación de las mezclas binarias a la temperatura de 23 ° C.



Fuente: laboratorio de química, Escuela de Ingeniería Química, USAC.

Figura 42 Detalle de la unidad utilizada para la titulación de las mezclas binarias a la temperatura de 10 ° C.



Fuente: laboratorio de química, Escuela de Ingeniería Química, USAC.

Figura 43 Detalle de la unidad de separación de las fases de las mezclas ternarias luego de la agitación.



Fuente: laboratorio de química, Escuela de Ingeniería Química, USAC.

Figura 44 Detalle de las fases de extracto y refinado durante el proceso de separación.



Fuente: laboratorio de química, Escuela de Ingeniería Química, USAC.

