



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

**GENERACIÓN DE DATOS EXPERIMENTALES A NIVEL DE
LABORATORIO, QUE PERMITAN CARACTERIZAR EL SISTEMA
TERNARIO METANOL-BIODIESEL-AGUA EN EQUILIBRIO
LÍQUIDO-LÍQUIDO A TEMPERATURA AMBIENTE Y 640 mm Hg**

Nancy Karina Díaz Fulgan

Asesorado por el Ing. Qco. César Alfonso García Guerra

Guatemala, octubre de 2010

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

GENERACIÓN DE DATOS EXPERIMENTALES A NIVEL DE LABORATORIO, QUE PERMITAN CARACTERIZAR EL SISTEMA TERNARIO METANOL-BIODIESEL-AGUA EN EQUILIBRIO LÍQUIDO-LÍQUIDO A TEMPERATURA AMBIENTE Y 640 mm Hg

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

NANCY KARINA DÍAZ FULGAN

ASESORADO POR EL ING. QCO. ALFONSO GARCÍA GUERRA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA QUÍMICA

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2010

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. Luis Pedro Ortíz de León
VOCAL V	Agr. José Alfredo Ortíz Herincx
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. José Manuel Tay Oroxom
EXAMINADOR	Dr. Adolfo Narciso Gramajo Antonio
EXAMINADOR	Ing. Manuel Gilberto Galván Estrada
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:

GENERACIÓN DE DATOS EXPERIMENTALES A NIVEL DE LABORATORIO, QUE PERMITAN CARACTERIZAR EL SISTEMA TERNARIO METANOL-BIODIESEL-AGUA EN EQUILIBRIO LÍQUIDO-LÍQUIDO A TEMPERATURA AMBIENTE Y 640 mm Hg,

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, el 13 de agosto de 2009.


Nancy Karina Díaz Fulgan

Guatemala, 23 de julio de 2010

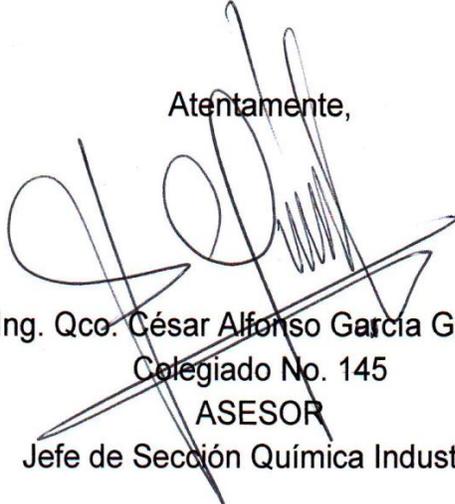
Ingeniero
Williams Guillermo Álvarez Mejía
Director
Escuela de Ingeniería Química

Respetable Ingeniero Álvarez:

Atentamente me dirijo a usted para informarle que he revisado el Informe Final de Trabajo de Graduación titulado **“Generación de datos experimentales a nivel de laboratorio que permitan caracterizar el sistema ternario metanol-biodiesel-agua en equilibrio líquido-líquido a temperatura ambiente y 640 mmHg”** desarrollado por la estudiante de Ingeniería Química Nancy Karina Díaz Fulgan con carné No. 2005-16158.

Por lo cual, después de haber realizado la revisión del respectivo informe y de haberle hecho las correcciones pertinentes, considero que llena los requisitos para su aprobación.

Atentamente,



Ing. Qco. César Alfonso García Guerra
Colegiado No. 145
ASESOR
Jefe de Sección Química Industrial



Guatemala, 08 de septiembre de 2010
Ref. EI.Q.TG.095.2010

Ingeniero
Williams Guillermo Álvarez Mejía
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Presente.

Estimado Ingeniero Álvarez:

Como consta en el Acta TG-095-10-B-IF le informo que reunidos los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del informe final del trabajo de graduación, para optar al título de INGENIERA QUÍMICA a la estudiante universitaria **NANCY KARINA DÍAZ FULGAN**, identificada con carné No. **200516158**, titulado: **“GENERACIÓN DE DATOS EXPERIMENTALES A NIVEL DE LABORATORIO, QUE PERMITAN CARACTERIZAR EL SISTEMA TERNARIO METANOL-BIODIESEL-AGUA EN EQUILIBRIO LÍQUIDO-LÍQUIDO A TEMPERATURA AMBIENTE Y 640 mm Hg”** el cual ha sido asesorado por el Ingeniero **César Alfonso García Guerra**, como consta en el Acta.

Habiendo encontrado el referido informe final **satisfactorio**, se procede a recomendarle autorice a la estudiante **Díaz Fulgan**, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

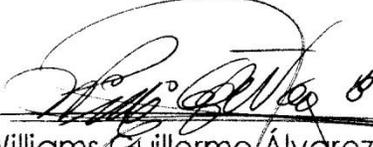
“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

Inga. Teresa Lisely de León Arana, M.Sc.
COORDINADORA
Tribunal que revisó el informe final
Del trabajo de graduación

C.c.: archivo



El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación de la estudiante **NANCY KARINA DÍAZ FULGAN** titulado: **“GENERACIÓN DE DATOS EXPERIMENTALES A NIVEL DE LABORATORIO, QUE PERMITAN CARACTERIZAR EL SISTEMA TERNARIO METANOL-BIODIESEL-AGUA EN EQUILIBRIO LÍQUIDO-LÍQUIDO A TEMPERATURA AMBIENTE Y 640 mm Hg”**. Procede a la autorización del mismo, ya que reúne rigor, coherencia y calidad requeridos.


Ing. Williams Guillermo Álvarez Mejía
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, octubre de 2010

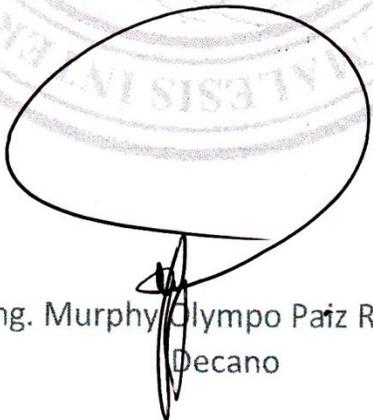
Cc: Archivo
WGAM/am





El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de graduación titulado: **GENERACIÓN DE DATOS EXPERIMENTALES A NIVEL DE LABORATORIO, QUE PERMITAN CARACTERIZAR EL SISTEMA TERNARIO METANOL-BIODIESEL-AGUA EN EQUILIBRIO LÍQUIDO-LÍQUIDO A TEMPERATURA AMBIENTE Y 640 mm Hg,** presentado por la estudiante universitaria **Nancy Karina Díaz Fulgan,** autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
Decano

Guatemala, 7 de octubre de 2010.



/gdech

ACTO QUE DEDICO A:

DIOS

Por guiarme, y haberme dado las fuerzas necesarias para salir victoriosa en los momentos difíciles en el transcurso de mi carrera.

Mis padres

Marta Leticia y René Orlando.

Por su amor, por sus consejos y regaños que me guiaron para alcanzar mi meta.

Mis hermanos

Samantha Nicole y René Orlando.

Por su cariño, apoyo y sobre todo por su existencia, son mi alegría.

Mis abuelos

Valeriana Arana Castillo, Francisco Eladio Fulgan (q.e.p.d.), José Gregorio Díaz (q.e.p.d.), gracias por los padres que me dieron, y en especial a Marta Elena Pacheco (q.e.p.d.), por el amor, apoyo y sabiduría que siempre me dio, se lo dedico mi querida abuelita.

Mi asesor

Ingeniero Químico César García.

Por depositar su confianza en mí para el desarrollo de esta investigación y por los conocimientos transmitidos.

**La Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Por la formación académica recibida de
Ingeniería Química, y contribuir de esta
manera en el desarrollo de mi bella
Guatemala.

AGRADECIMIENTOS A:

- DIOS** Mi Padre Todopoderoso por permitirme alcanzar esta meta.
- Mis padres** Por su guía y apoyo incondicional para lograr culminar mi carrera profesional.
- Mis tíos** Por su cariño, apoyo y sus consejos.
- Mis primos** Por compartir conmigo momentos de alegría y tristeza durante mi vida, los quiero mucho.
- Mis amigos** Por brindarme su amistad, compartir momentos de alegría, éxito y sobre todo por apoyarme en los momentos difíciles durante la formación de mi vida profesional, en especial a mi querido amigo Gerardo Del Águila.
- Mi revisor** Ingeniero Químico Jorge Emilio Godínez.
Por el tiempo dedicado a la revisión de esta investigación.
- Los laboratorios** Laboratorio de Química de la Escuela de Ingeniería Química, USAC.

Laboratorio de Investigación de Extractos Vegetales -LIEXVE- del Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Por permitirme utilizar sus instalaciones y brindarme los recursos necesarios para el desarrollo de esta investigación.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	XVII
GLOSARIO	XIX
RESUMEN	XXIII
OBJETIVOS	XXVII
HIPÓTESIS	XXIX
INTRODUCCIÓN	XXXI
1. ANTECEDENTES	1
2. MARCO TEÓRICO	9
2.1 Procesos de separación	9
2.2 Extracción líquido-líquido	9
2.2.1 Relaciones de equilibrio en la extracción	11
2.2.1.1 Regla de las fases	11
2.2.1.2 Equilibrio de fases	12
2.2.1.3 Coeficientes de distribución	12
2.2.2 Equilibrio líquido	13
2.2.3 Métodos de representación gráfica del equilibrio ternario	13
2.2.3.1 Coordenadas triangulares equiláteras	14
2.2.4 Sistemas ternarios de interés en la extracción en fase líquida	16

2.2.4.1 Tipo I. Formación de un par de líquidos parcialmente miscibles	17
2.2.4.2 Tipo II. Formación de dos pares de líquidos parcialmente miscibles	18
2.2.4.3 Tipo III. Formación de tres pares de líquidos parcialmente miscibles	19
2.2.4.4 Tipo IV. Formación de fases sólidas	20
2.2.5 Efecto de la temperatura sobre el sistema ternario	20
2.2.6 Efecto de la presión	21
2.2.7 Curvas de distribución	22
2.2.8 Propiedades deseables del disolvente	23
2.2.8.1 Selectividad	23
2.2.8.2 Recuperabilidad	23
2.2.8.3 Coeficiente de distribución	24
2.2.8.4 Capacidad	24
2.2.8.5 Solubilidad del disolvente	24
2.2.8.6 Densidad	25
2.2.8.7 Tensión interfacial	25
2.2.8.8 Toxicidad	26
2.2.8.9 Constante dieléctrica	26
2.2.8.10 Viscosidad	27
2.2.9 Ejemplos de diagramas ternarios	28
2.3 Biodiesel	29
2.3.1 ¿Qué es biodiesel?	29
2.3.2 Materias primas para la obtención de biodiesel	29
2.3.2.1 Características químicas de aceites vegetales y biodiesel	30
2.3.2.2 Alcoholes	33
2.3.2.3 Las reacciones de transesterificación	34

2.3.3	Proceso de obtención de biodiesel	36
2.3.3.1	Los co-productos y sub-productos de la producción de biodiesel	39
2.3.3.2	Destilación azeotrópica	40
2.3.4	Teoría de lavado de biodiesel	42
2.3.4.1	Métodos de lavado	43
2.3.5	Ventajas y desventajas del uso de biodiesel	45
2.3.5.1	Ventajas	45
2.3.5.2	Desventajas	47
2.3.6	Propiedades de caracterización de biodiesel	48
2.3.6.1	Punto de inflamación	48
2.3.6.2	Viscosidad	48
2.3.6.3	Densidad	49
2.3.6.4	Cenizas sulfatadas	49
2.3.6.5	Azufre	49
2.3.6.6	Número de cetano	50
2.3.6.7	Índice de yodo	50
2.3.6.8	Punto de nube	50
2.3.6.9	Agua y sedimentos	50
2.3.6.10	Residuo carbonoso	51
2.3.6.11	Número ácido, TAN	51
2.3.6.12	Contenido en metales (Na, K, P,..) y ácidos grasos	51
2.3.6.13	Glicerina libre	51
2.3.6.14	Glicerina total	52
2.3.6.15	Contenido de alcohol	52
2.3.7	La calidad del biodiesel	52
2.4	Características físicas y químicas generales de los solventes puros a utilizar	54

2.4.1	Agua desmineralizada	54
2.4.2	Biodiesel	55
2.4.3	Metanol	55
3.	DISEÑO METODOLÓGICO	57
3.1	Recursos y materiales	57
3.1.1	Localización	57
3.1.2	Recursos humanos	57
3.1.3	Recursos materiales	57
3.1.3.1	Reactivos	57
3.1.3.2	Equipo y cristalería	58
3.1.3.2.1	Equipo de medición	58
3.1.3.2.2	Cristalería	58
3.1.3.2.3	Materiales	59
3.1.3.2.4	Equipo auxiliar	59
3.1.3.3	Material de escritorio	59
3.2	Metodología experimental	60
3.2.1	Procedimiento experimental para lavado de biodiesel	60
3.2.2	Procedimiento experimental para el sistema líquido-líquido metanol-biodiesel-agua	62
3.2.3	Método para la elaboración de la curva de solubilidad	64
3.2.3.1	Determinación de densidad	64
3.2.3.2	Determinación del índice de refracción	64
3.2.4	Análisis estadístico	66
3.2.5	Hipótesis	66
3.2.6	Generación de datos	66
3.2.7	Manejo de desechos líquidos	68
4.	RESULTADOS	71
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	83

CONCLUSIONES	91
RECOMENDACIONES	93
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	95
REFERENCIAS ELECTRÓNICAS	99
ANEXOS	103
ANEXO 1. Requerimiento académico para la elaboración del trabajo de graduación de extracción líquido-líquido en la carrera de Ingeniería Química	103
ANEXO 2. Diagrama de causa y efecto para determinar las variables en un proceso de extracción	105
APÉNDICE	107
APÉNDICE 1. Datos originales	107
APÉNDICE 2. Muestra de cálculo	115
APÉNDICE 3. Datos calculados	125
APÉNDICE 4. Determinación del punto de pliegue	137
APÉNDICE 5. Análisis estadístico ANOVA	139
APÉNDICE 6. Presupuesto de la investigación	149
APÉNDICE 7. Impactos ambientales que pueden ser generados durante la investigación	153
APÉNDICE 8. Fotografías de la investigación	159
APÉNDICE 9. Hojas técnicas de los reactivos metanol y biodiesel respectivamente	165

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1. Operación de extracción líquido-líquido	10
2. Diagrama de equilibrio ternario	14
3. Coordenadas para un diagrama triangular	15
4. Diagrama de fases líquido-líquido en el que los componentes A y B son parcialmente miscibles	16
5. Sistema de tres líquidos, A y B parcialmente miscibles	18
6. Sistema de tres líquidos, A-B y B-C parcialmente miscibles	19
7. Diagrama de sistemas ternarios con tres pares parcialmente miscibles	20
8. Efecto de la temperatura en los equilibrios ternarios	21
9. Curvas de distribución	22
10. Diagrama de fases ternario etilenglicol-furfural-agua a 25 °C	28
11. Diagrama de fases ternario alcohol-benceno-agua a 25 °C	28
12. Proceso Lurgi de producción continua	37
13. El proceso Axens	39
14. Detalle de la unidad de lavado de biodiesel (Referencia bibliográfica 8)	61

15. Detalle de la unidad de separación del agua de lavado del biodiesel (Referencia bibliográfica 8)	61
16. Detalle de la unidad de secado de biodiesel (Referencia bibliográfica 8)	62
17. Detalle de la unidad utilizada para la titulación de las mezclas binarias a temperatura ambiente (Referencia bibliográfica 8)	64
18. Detalle de la unidad de medición de índices de refracción (Referencia bibliográfica 8)	65
19. Flujograma que presenta la metodología de un proceso de extracción líquido-líquido	67
20. Curva de correlación para la densidad en función de la concentración de la mezcla binaria metanol-agua a 23 ± 1 °C	71
21. Curva de correlación para la densidad en función de la concentración de la mezcla binaria metanol-biodiesel a 23 ± 1 °C	72
22. Curva de correlación para los índices de refracción en función de la concentración de la mezcla binaria metanol-agua a 23 °C	73
23. Curva de correlación para los índices de refracción en función de la concentración de la mezcla binaria metanol-biodiesel a 24 °C	74
24. Distribución de los datos experimentales de equilibrio de inmiscibilidad, obtenidos para el sistema metanol-biodiesel-agua, a partir de soluciones de metanol-agua, mediante la adición del solvente biodiesel a 23 ± 1 °C	75
25. Distribución de los datos experimentales de equilibrio de inmiscibilidad, obtenidos para el sistema metanol-biodiesel-agua, a partir de soluciones de metanol-biodiesel, mediante la adición del solvente agua a 23 ± 1 °C	76
26. Distribución de los datos experimentales de equilibrio de inmiscibilidad, obtenidos para el sistema metanol-biodiesel-agua a 23 ± 1 °C	77

27. Curvas de distribución de los datos experimentales en el sistema metanol-biodiesel-agua a la temperatura de 23 ± 1 °C	78
28. Línea de amarre en el sistema ternario metanol-biodiesel-agua para la especificación de 0.20% en peso máximo de metanol en biodiesel, según la norma EN 14214 a 23 ± 1 °C	80
29. Líneas de amarre para distintas relaciones de mezcla biodiesel:agua en el sistema ternario metanol-biodiesel-agua, para la especificación de 0.20% en peso máximo de metanol en biodiesel, según la norma EN 14214, para una muestra de 40 ml de biodiesel con 10% de metanol, con agitación constante a 350 rpm durante 40 minutos a la temperatura de 23 ± 1 °C	81
30. Sensibilidad del parámetro de monitoreo del refractómetro (índice de refracción) para las soluciones binarias metanol-agua y metanol-biodiesel	85
31. Requerimiento académico para la elaboración del trabajo de graduación de extracción líquido-líquido en la carrera de Ingeniería Química	103
32. Diagrama de causa y efecto para determinar las variables en un proceso de extracción líquido-líquido	105
33. Curvas de distribución de los datos experimentales en el sistema metanol-biodiesel-agua y gráfica de porcentajes de distribución de metanol en agua, en función de la distribución de metanol en biodiesel	137
34. Detalle de la unidad de lavado de biodiesel	159
35. Detalle de la unidad de separación del agua de lavado del biodiesel	159
36. Detalle de la unidad de secado de biodiesel	160

37. Detalle de la unidad de medición de índice de refracción a la temperatura de 23 ± 1 °C	160
38. Detalle de la preparación de las soluciones de metanol en biodiesel y metanol en agua respectivamente a la temperatura de 23 ± 1 °C	161
39. Detalle de la unidad utilizada para la titulación de las mezclas binarias a la temperatura de 23 ± 1 °C	161
40. Detalle de la unidad utilizada para la mezcla ternaria de metanol, biodiesel y agua por agitación a la temperatura de 23 ± 1 °C	162
41. Detalle de la unidad utilizada para la separación de fases de las mezclas ternarias de metanol, biodiesel y agua a la temperatura de 23 ± 1 °C	162
42. Detalle de las fases de extracto y refinado durante el proceso de separación a la temperatura de 23 ± 1 °C	163

TABLAS

I.	Principales empresas que producen biodiesel en Guatemala	1
II.	Principales ácidos grasos conocidos en la naturaleza	31
III.	Proporciones de ácidos grasos en aceites vegetales y grasas animales	32
IV.	Especificaciones de biodiesel del RTCA	53
V.	Propiedades físicas del agua desmineralizada	54
VI.	Propiedades físicas del biodiesel	55
VII.	Propiedades físicas y químicas del metanol	55
VIII.	Manejo de desechos líquidos	68
IX.	Valores de los coeficientes de distribución obtenidos a partir del cociente entre el porcentaje de metanol distribuido en la fase de agua, y el porcentaje de metanol distribuido en la fase de biodiesel a 24 °C	79
X.	Resultado del análisis de varianza de un factor, con varios grupos, para la evaluación del grado de diferenciación significativa en el sistema metanol-biodiesel-agua, a partir de soluciones de metanol en agua a 23 ± 1 °C	82
XI.	Resultado del análisis de varianza de un factor, con varios grupos, para la evaluación del grado de diferenciación significativa en el sistema metanol-biodiesel-agua, a partir de soluciones de metanol en biodiesel a 23 ± 1 °C	82

XII.	Comparación del grado de respuesta de variación del parámetro de monitoreo (índice de refracción, IR) para los sistemas ternarios de trabajos de graduación estudiados anteriormente	86
XIII.	Pesos de las soluciones de metanol-agua, obtenidos a la temperatura de 23 ± 1 °C	107
XIV.	Pesos de las soluciones de metanol-biodiesel, obtenidos a la temperatura de 23 ± 1 °C	108
XV.	Valores de los índices de refracción, obtenidos para las soluciones de metanol-agua a la temperatura de 23 °C	109
XVI.	Valores de los índices de refracción, obtenidos para las soluciones de metanol-biodiesel a la temperatura de 24 °C	110
XVII.	Datos de los volúmenes de biodiesel adicionados, para titular alícuotas de 3 ml de soluciones de metanol-agua a la temperatura de 23 ± 1 °C	111
XVIII.	Datos de los volúmenes de agua adicionados, para titular alícuotas de 3 ml de soluciones de metanol-biodiesel a la temperatura de 23 ± 1 °C	112
XIX.	Índices de refracción obtenidos para cada par de soluciones conjugadas (fase biodiesel y fase agua), obtenidas para cada mezcla ternaria producida a la temperatura de 24 °C	113
XX.	Índices de refracción obtenidos para las distintas relaciones mezcla biodiesel:agua para una muestra de 40 ml de biodiesel con 10% de metanol, con agitación constante a 350 rpm y durante un tiempo de 40 minutos a la temperatura de 23 ± 1 °C	114

XXI.	Índices de refracción obtenidos para los distintos ciclos de lavado de biodiesel para una muestra de 50 ml de biodiesel con 10% de metanol, con agitación constante a 350 rpm y durante un tiempo de 25 minutos a 23 ± 1 °C	114
XXII.	Pesos del picnómetro, índices de refracción y volúmenes de titulación promedio, para las soluciones de metanol en agua a la temperatura de 23 ± 1 °C	125
XXIII.	Pesos del picnómetro, índices de refracción y volúmenes de titulación promedio, para las soluciones de metanol en biodiesel a la temperatura de 23 ± 1 °C	126
XXIV.	Datos de las densidades promedio de las soluciones binarias de metanol-agua a la temperatura de 23 ± 1 °C	127
XXV.	Datos de las densidades promedio de las soluciones binarias de metanol-biodiesel a la temperatura de 23 ± 1 °C	128
XXVI.	Datos de las concentraciones reales de las soluciones binarias de metanol-agua a la temperatura de 23 ± 1 °C	129
XXVII.	Datos de las concentraciones reales de las soluciones binarias de metanol-biodiesel a la temperatura de 23 ± 1 °C	130
XXVIII.	Datos de la composición porcentual de las mezclas ternarias formadas a partir de las soluciones de metanol-agua tituladas con biodiesel, a temperatura de 23 ± 1 °C necesarios para graficar la curva binodal	131
XXIX.	Datos de la composición porcentual de las mezclas ternarias formadas a partir de las soluciones de metanol-biodiesel tituladas con agua, a temperatura de 23 ± 1 °C necesarios para graficar la curva binodal	132
XXX.	Índices de refracción promedio de la fase biodiesel y fase agua, para los puntos seleccionados por debajo del domo de solubilidad a temperatura de 24 °C	133

XXXI.	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 24 °C	134
XXXII.	Datos del coeficiente de distribución para las mezclas ternarias metanol-biodiesel-agua a la temperatura de 24 °C	135
XXXIII.	Datos de las concentraciones para la realización de las líneas de unión, obtenidos para cada relación mezcla biodiesel:agua, para una muestra de 40 ml de biodiesel al 10% de metanol con agitación constante a 350 rpm y durante un tiempo de 40 minutos a 23 ± 1 °C	136
XXXIV.	Datos de las concentraciones de metanol en agua para determinar la cantidad de ciclos de lavado, para una muestra de 50 ml de biodiesel al 10% de metanol con agitación constante a 350 rpm y durante un tiempo de 25 minutos a la temperatura de 23 ± 1 °C	136
XXXV.	Resumen del método ANOVA	141
XXXVI.	Análisis de la variación del índice de refracción en soluciones de metanol en agua de diferente concentración nominal, variación dentro de las muestras (V_d) y entre las muestras (V_e) a la temperatura de 23 °C	142
XXXVII.	Análisis de la variación del índice de refracción en soluciones de metanol en biodiesel de diferente concentración nominal, variación dentro de las muestras (V_d) y entre las muestras (V_e) a la temperatura de 24 °C	143
XXXVIII.	Análisis de la variación del volumen de biodiesel adicionado a soluciones de metanol en agua de diferente concentración nominal, variación dentro de las muestras (V_d) y entre las muestras (V_e) a la temperatura de 23 ± 1 °C	144

XXXIX.	Análisis de la variación del volumen de agua adicionado a soluciones de metanol en biodiesel de diferente concentración nominal, variación dentro de las muestras (V_d) y entre las muestras (V_e) a la temperatura de 23 ± 1 °C	145
XL.	Análisis de varianza del índice de refracción en función de soluciones de metanol en agua de diferente concentración nominal, para la evaluación del grado de diferenciación significativa en el sistema metanol-biodiesel-agua a 23 °C	146
XLI.	Análisis de varianza del índice de refracción en función de soluciones de metanol en biodiesel de diferente concentración nominal, para la evaluación del grado de diferenciación significativa en el sistema metanol-biodiesel-agua a 24 °C	146
XLII.	Análisis de varianza del volumen de biodiesel adicionado a soluciones de metanol en agua de diferente concentración nominal, para la evaluación del grado de diferenciación significativa en el sistema metanol-biodiesel-agua a 23 °C	147
XLIII.	Análisis de varianza del volumen de agua adicionado a soluciones de metanol en biodiesel de diferente concentración nominal, para la evaluación del grado de diferenciación significativa en el sistema metanol-biodiesel-agua a 23 ± 1 °C	147
XLIV.	Costo de reactivos	149
XLV.	Costo de equipo	149
XLVI.	Costo de cristalería	150
XLVII.	Costo de accesorios	151
XLVIII.	Costo de energía eléctrica	151
XLIX.	Costo de otros	152
L.	Costo total de la investigación	152

LI. Impactos ambientales que pueden ser generados por la investigación

153

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descripción
AMS	Agente Material de Separación
AEA	Alianza en Energía y Ambiente
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i> (Sociedad Americana para Pruebas y Materiales)
K	Coefficiente de distribución (adimensional)
C	Concentración (porcentaje en peso)
ϵ	Constante dieléctrica
X_i	Dato de la i -ésima observación
ρ	Densidad de la solución (g/ml)
EUR	Euro
EN	<i>European Norm</i> (Norma Europea)
FFA	<i>Fat Free Acids</i> (Ácidos Grasos Libres)
FAME	<i>Fatty Acid Methyl Esters</i> (Ésteres Metílicos de Ácidos Grasos)
X	Fracción volumen de la solución (% en peso nominal)
°C	Grados Celsius
N	Índice de refracción
LIEXVE	Laboratorio de Investigación de Extractos Vegetales

<i>M t</i>	Masa total de la mezcla ternaria
<i>X</i>	Media aritmética
<i>N</i>	Número de observación
<i>P</i>	Peso (g)
%	Porcentaje
RTCA	Reglamento Técnico Centroamericano
Sol	Solución
USDA	<i>United States Department of Agriculture</i> (Departamento de Agricultura de Estados Unidos)
<i>V</i>	Volumen (ml)

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 orgánico formado por la reacción de un ácido y un alcohol. Se representa con la

fórmula general
$$\text{R}-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}}-\text{OR}'$$
 donde R es un grupo orgánico.

Esterificación

Proceso químico que consiste en la producción de un éster por la reacción de un alcohol con un ácido. Con coproducto concomitante de agua.

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).

Mezcla azeotrópica

La mezcla azeotrópica se caracteriza por tener una composición y presión de vapor definidas para una temperatura dada, o lo que es lo mismo, una composición y temperatura de ebullición definidas para una presión dada. En resumen, se comporta como una especie pura, con temperatura de ebullición y composición fija. Las mezclas de este tipo no son compuestos químicos definidos, puesto que su composición cambia con la presión.

Miscibilidad

Capacidad de un líquido para mezclarse homogéneamente 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.

Rectificación continua

La rectificación continua, o fraccionamiento, es una destilación en contracorriente y en etapas múltiples. Para una solución binaria, con ciertas excepciones, generalmente es posible por medio de este método separar la solución en sus componentes, separando cada uno en el estado que se desee.

Refinado

Líquido residual del cual fue separado el soluto.

Refractómetro

Equipo con el cual se mide el índice de refracción.

Sistema solutrópico

Sistema en el que, el cociente de la fracción en peso de soluto en fase de extracto y , dividida por la fracción en peso de soluto en la fase de refinado x es 1.

Soluto

La fase dispersa (disuelta) de una solución.

Solvente

Líquido capaz de disolver otros materiales, para formar una solución.

RESUMEN

El presente trabajo de graduación se realizó con el objetivo de caracterizar el equilibrio ternario del sistema metanol-biodiesel-agua en equilibrio líquido-líquido a temperatura ambiente (23 ± 1 °C). Además, se determinó la línea de unión en el sistema para la especificación de 0.20% en peso máximo de metanol en biodiesel, según la norma EN 14214.

El biodiesel que actualmente se elabora en Guatemala debe cumplir con las especificaciones de calidad establecidas para que su utilización no cause daños a los motores y que su fabricación no presente residuos contaminantes que dañen el medio ambiente, *de aquí se deduce la importancia de hacer más eficiente el proceso de lavado de biodiesel ya que dicho estudio puede servir de base para posteriores investigaciones en relación con los coeficientes de distribución de los subproductos derivados de la elaboración de biodiesel.* El biodiesel que se utilizó, obtenido de reciclaje de aceite vegetal para realizar la parte experimental de la investigación, fue previamente refinado, por lo que según la hoja técnica de calidad proporcionada por Biocombustibles de Guatemala (Apéndice 9) no contiene residuos de metanol, glicerina, etc. ya que se consideran despreciables debido al tratamiento que se le dio.

Se obtuvieron las curvas de correlación del índice de refracción y densidad en función de la composición porcentual en peso, para cada serie de soluciones de metanol en agua y metanol en biodiesel, a temperatura ambiente por medio de los métodos de picnometría y refractometría.

Después se determinó el equilibrio de inmiscibilidad del sistema a la temperatura de análisis, a partir de soluciones de metanol en agua tituladas con biodiesel y soluciones de metanol en biodiesel tituladas con agua hasta que se dio la formación de dos fases, por medio de éstos datos se graficó la curva binodal del sistema. Posteriormente se procedió a la obtención de las líneas de unión, para ocho mezclas ternarias de diferente composición situadas dentro de la curva binodal. Con esto se obtuvo la curva de distribución del sistema a la temperatura analizada, a partir de la cual se determinó la composición porcentual de la mezcla ternaria correspondiente al punto de pliegue. Además se determinó la capacidad extractiva del agua, fijando como base las relaciones (20:1, 10:1, 5:1, 2.5:1, 1.25:1 y 1:1 y 1:5) de biodiesel:agua para una muestra de biodiesel con 10% de metanol.

Como resultado de la investigación, se determinó estadísticamente que existe variabilidad significativa para el índice de refracción y volumen de disolvente adicionado en función de la concentración en peso de metanol en agua y de metanol en biodiesel respectivamente. Y se aceptó la hipótesis nula, ya que se determinó que el sistema metanol-biodiesel-agua se caracteriza por ser un sistema ternario tipo II.

A la temperatura de 23 ± 1 °C, se determinó que la concentración en el punto de pliegue es de 14% de metanol, 84% de biodiesel y 2% de agua. Y se obtuvo la línea de amarre en el sistema para la especificación de 0.20% en peso máximo de metanol en biodiesel según la norma EN 14214, correspondiente a 96% de metanol en 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 mm Hg.

ABSTRACT

This graduation work was carried out with the objective of characterizing the ternary equilibrium of the methanol-biodiesel-water system in liquid-liquid equilibrium at room temperature ($23 \pm 1^\circ\text{C}$). In addition, the junction line in the system for the specification of 0.20% in maximum weight of methanol in biodiesel was determined according to the norm EN 14214.

The biodiesel that currently is produced in Guatemala must fulfill the established specifications of quality so that its use does not cause damages to engines, and that its production does not show polluting residues that damage the environment. From this fact, *it is inferred the importance of making the process of biodiesel washing more efficient, since such study might be the base for later investigations in relation to the distribution coefficients of byproducts derived from the biodiesel production.* The biodiesel used from recycling of vegetable oil to carry out the experimental part of the investigation was previously refined. And according to the technical sheet of quality provided by Biocombustibles de Guatemala (Appendix 9), this biodiesel does not contain residues of methanol, glycerin, etc. since they are considered insignificant due to the treatment given to it.

The correlation curves of the refractive index and density in terms of the percentage composition in weight for every series of solutions of methanol in water and methanol in biodiesel at room temperature were obtained through the methods of pycnometry and refractometry.

Later, it was determined the equilibrium of immiscibility of the system at the analyzed temperature from solutions of methanol in water titrated with biodiesel and solutions of methanol in biodiesel titrated with water until the formation of two phases. Through this data, the binodal curve of the system was represented by a graph. Later, the junction lines were obtained for eight ternary mixtures of different composition placed in the binodal curve. With this, it was obtained the distribution curve of the system at the analyzed temperature from which the percentage composition of the ternary mixture corresponding to the folding point was determined. In addition, it was determined the extractive capacity of water, setting as base the relations (20:1, 10:1, 5:1, 2.5:1, 1.25:1 and 1:1 and 1:5) of biodiesel:water for a sample of biodiesel with 10% methanol.

As a result of the investigation, it was statistically determined that exists significant variability for the refractive index and volume of solvent added in terms of the concentration in weight of methanol in water and methanol in biodiesel respectively. And the null hypothesis was accepted since it was determined that the methanol-biodiesel-water system is characterized for being a type II ternary system.

At the temperature of $23 \pm 1^\circ\text{C}$, it was determined that the concentration in the folding point is of 14% methanol, 84% biodiesel and 2% water. And it was obtained the mooring line in the system for the specification of 0.20% in maximum weight of methanol in biodiesel according to the norm EN 14214 corresponding to 96% methanol in water.

The experimental procedure was carried out in the chemistry laboratory of building T-5, Faculty of Engineering of the USAC, which is at an atmospheric pressure of 640 mm Hg.

OBJETIVOS

General

Generar datos experimentales a nivel de laboratorio que permitan caracterizar el sistema ternario metanol-biodiesel-agua por medio de la distribución de su solubilidad en equilibrio líquido-líquido.

Específicos

1. Desarrollar una correlación entre los valores experimentales de densidad y porcentajes de concentración en peso de metanol-agua, a temperatura ambiente.
2. Desarrollar una correlación entre los valores experimentales de densidad y porcentajes de concentración en peso de metanol-biodiesel, a temperatura ambiente.
3. Obtener el modelo matemático de correlación entre los valores experimentales de índice de refracción y porcentajes de concentración en peso de metanol-agua, a temperatura ambiente.
4. Obtener el modelo matemático de correlación entre los valores experimentales de índice de refracción y porcentajes de concentración en peso de metanol-biodiesel, a temperatura ambiente.

5. Determinar los valores experimentales de concentraciones en equilibrio de inmiscibilidad para el sistema ternario metanol-biodiesel-agua, a partir de soluciones de metanol en agua por adición del solvente biodiesel.
6. Determinar los valores experimentales de concentraciones en equilibrio de inmiscibilidad para el sistema ternario metanol-biodiesel-agua, a partir de soluciones de metanol en biodiesel por adición del solvente agua.
7. Representar y determinar el tipo de sistema ternario en equilibrio líquido-líquido a partir de los datos experimentales generados del sistema metanol-biodiesel-agua, realizando un diagrama en coordenadas triangulares.
8. Determinar la línea de unión en el sistema ternario metanol-biodiesel-agua, para la especificación de 0.20% en peso máximo de metanol en biodiesel según la Norma Europea EN 14214 y establecer el coeficiente de partición del metanol en los dos solventes.
9. Determinar el requerimiento mínimo de agua para extraer el metanol del biodiesel y evaluar el tiempo mínimo de extracción requerido, para diversas proporciones agua-biodiesel con un contenido de 10% de metanol.

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 metanol-biodiesel-agua a temperatura ambiente y 640 mm Hg.

HIPÓTESIS ESTADÍSTICA

Para variable respuesta distribución porcentual en equilibrio de inmiscibilidad:

Hipótesis nula

Ho: El sistema ternario metanol-biodiesel-agua no se identifica con el sistema ternario tipo I a temperatura y presión de estudio.

Hipótesis alterna

Ha: El sistema ternario metanol-biodiesel-agua se identifica con el sistema ternario tipo I a temperatura y presión de estudio.

INTRODUCCIÓN

La función del proceso de extracción líquido-líquido es obtener una sustancia química de interés, que puede estar en solución con una o varias sustancias diferentes a ésta. Para ello se pone en contacto con otro componente químico que sea miscible a la sustancia de interés pero inmisible con las demás. La discrepancia entre las propiedades químicas de cada componente dará como resultado la separación de la mezcla original cuando se establezca el equilibrio.

Los sistemas líquido-líquido en equilibrio ternario se representan por medio de coordenadas triangulares (diagramas triangulares), en las cuales se generan diagramas que caracterizan curvas de solubilidad, así como las composiciones de las diferentes mezclas posibles en equilibrio. *El estudio del sistema ternario metanol-biodiesel-agua se basará en la interpretación del contenido de soluto al equilibrio mediante correlatividad de la variable respuesta por técnicas de picnometría y refractometría, y así determinar las concentraciones al equilibrio del sistema ternario, ya que, dichas composiciones varían dependiendo del tipo de componentes químicos a utilizar.*

Con el presente trabajo se pretende continuar con las caracterizaciones de sistemas ternarios, empleados comúnmente en las extracciones líquido-líquido, y también hacer más eficiente el proceso de refinamiento del biodiesel. Además, se determinó la línea de amarre del sistema para la especificación de 0.20% en peso máximo de metanol en biodiesel, según la norma EN 14214.

1. ANTECEDENTES

Tabla I. Principales empresas que producen biodiesel en Guatemala

Empresas	Ubicación	Capacidad gal/día
Guatebiodiesel	Ciudad de Guatemala	1500-2000
Biocombustibles de Guatemala	Ciudad de Guatemala	1000
Fuerza Verde	Ciudad de Guatemala	50
Comunidad Nueva Alianza	El Palmar, Quetzaltenango	50
Helios	Zacapa	290
Bio Procesos Energéticos Renovables, S.A.	Antigua Guatemala, Sacatepéquez	1000
Mazat Aguí	Masagua, Escuintla	40

La empresa Guatebiodiesel (Combustibles Ecológicos, S.A.) emplea aceites usados (soya, maíz, girasol) cuando están disponibles y busca obtener semillas de tempate (*Jatropha curcas*) para poder crecer su producción que hoy es de alrededor de 2,000 galones por mes. El biodiesel producido está siendo usado para pruebas en vehículos propios y eventualmente se hace alguna comercialización en negociación directa con el cliente.

La Empresa Octagon (o Biocombustibles de Guatemala) recibió un financiamiento de EUR 90.000 de la Alianza en Energía y Ambiente (AEA) de Finlandia para desarrollar la producción de biodiesel a partir de tempate. El proyecto empezó en 2002 y fue definido con tres vertientes: agrícola, industrial y de investigación. En 2004-2005 fueron sembradas 10 manzanas en 10 regiones del país para estudio de influencias de clima y suelos para definir el manejo del cultivo. El proceso de producción de biodiesel se hace en una etapa de reacción, existe recuperación del metanol en exceso usado en el proceso, la fase de glicerina no recibe ningún tratamiento y se estudian alternativas para usarla en quemadores industriales. El biodiesel ya producido fue empleado en vehículos propios (B100), en una flota de camiones (mezcla B10), y probado en calderas que trabajan en ambientes cerrados, hornos de panaderías y generadores eléctricos estacionarios. La materia prima principal hasta ahora es el aceite usado pues no existe producción suficiente de Jatropha. Según el representante de la empresa, alrededor del 80% del biodiesel producido fue originado de aceites usados y alrededor del 20% de piñón.

La Empresa Fuerza Verde ya produjo biodiesel a partir de grasas animales, de aceites de cocina usados y de palma, siempre de forma experimental. No tiene clientes fijos y emplea el biodiesel producido para pruebas en un vehículo propio, en mezclas B20, B50 y puro (B100).

La Empresa Comunidad Nueva Alianza es una cooperativa de productores de macadamia que produce biodiesel para uso propio en motores estacionarios. Como materias primas emplea las semillas de macadamia rechazadas para comercialización y aceite usado, pero está empezando a desarrollar siembras de higüerillo y tempate.

La Empresa Helios produce alrededor de 2,000 a 3,000 galones por mes (de 7,570 a 11,350 litros por mes) de aceite de palma tratado para uso directo en motores (no es biodiesel) con fines de pruebas. La empresa no ve cómo producir biodiesel pues no existen aún materias primas con precios adecuados. Como estrategia, la empresa está en contacto con los productores de palma, y está desarrollando conversiones de vehículos para el empleo de aceite de palma tratado para eliminar metales y silicio que causan daños al motor. El representante de la empresa informó que ya fueron convertidos algunos motores estacionarios y que una flota de 50 minibuses ya está usando el aceite en motores convertidos desde el mes de septiembre.

Desde el punto de vista del proceso de producción, las cuatro empresas antes mencionadas que producen biodiesel realizan la neutralización de la materia prima (cuando se emplean aceites usados o grasa animal). La reacción de transesterificación la hacen en una sola etapa la Fuerza Verde, la Comunidad Nueva Alianza y Octagon, mientras que la Guatebiodiesel hace la reacción en dos etapas. Para purificación del producto emplean lavado con agua y posteriormente secan el biodiesel. A excepción de la Octagon, las demás empresas aún no hacen la recuperación del metanol por motivos de escala de producción actual. El subproducto de la reacción, la fase de glicerina que contiene aún impurezas, agua y metanol, no es tratada y no tiene mercado en Guatemala. Los productores afirman que están almacenando esta fase pero una solución definitiva para este problema debe aún ser desarrollada. (Ref. 23)

La empresa Bio Procesos Energéticos Renovables, S.A. (Biopersa) está conformada por 5 personas que se encargan de producir entre 400 y 500 galones semanales de biodiesel. La maquinaria empleada es simple y algunos de sus procedimientos incluso son artesanales.

Actualmente, el proyecto cuenta con el apoyo de 137 restaurantes y hoteles de la Ciudad Colonial, así como de la Ciudad Capital, en los cuales se recicla el aceite quemado de su proceso de frituras. Se tiene una recolección promedio de 450 galones de aceite semanales. El combustible que producen mueve una flotilla de diez vehículos de la municipalidad de Antigua Guatemala.

La empresa “Mazat Aguí” fue inaugurada gracias al apoyo económico del departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA). La producción está hecha a base de la *Jatropha Curcas*, una semilla llamada “piñón”, la cual se ha empezado a utilizar como materia prima, debido a los múltiples beneficios que tiene, entre otros, su amplia distribución en el país, el crecimiento en áreas marginales y el mínimo riego que requiere. El proceso para la producción es sencillo. La procesadora es encendida, la semilla es introducida en un orificio para extraer el aceite y luego es pasado por un verificador, donde se colocan reactivos para separar la glicerina y el agua que contiene el aceite de la presa y finalmente es elaborado el biodiesel. (Ref. 26-28)

Existen varias investigaciones de trabajos de graduación de Ingeniería Química referentes a la producción de biodiesel a nivel laboratorio.

Durante el año 2007 se realizó la investigación del Ing. David Antonio Mota Aguilar, asesorado por el Ing. Julio Francisco Villacinda Maldonado y cuyo título es *“Evaluación del método Base-Base con etanol para la obtención de biodiesel a partir de aceite oxidado de piñón (Jatropha Curcas L.) a nivel de laboratorio”*.

En el año 2007 se realizó la investigación del Ing. Nelson Darío Barraza López, asesorado por el Ing. José Eduardo Calderón y cuyo título es *“Análisis*

comparativo de la elaboración de biodiesel, a partir de aceite crudo de palma africana por medio de dos procesos, a nivel laboratorio y planta piloto”.

Durante el año 2008 se realizó la investigación de la Inga. Leslie Mariana Flores Barrios, asesorado por el Ing. José Eduardo Calderón García y cuyo título es *“Análisis comparativo de Diesel No. 2-D (automotriz) con biodiesel, elaborado a partir de aceite usado y oleína de palma africana (Elaeis guineensis) en mezclas de altos porcentajes, para su evaluación en un motor estacionario de combustión interna”.* En esta investigación se determinó que la mezcla de biodiesel que presenta mayor poder calorífico, es la que contiene 90% biodiesel a partir de oleína de palma africana y 10% de diesel 2-D, la cual es de 40.104 MJ/Kg comparada con 39.6 MJ/Kg del diesel utilizado.

En 2008 se realizó la investigación de la Inga. María Gabriela Hernández Castellanos, asesorado por el Ing. César Alfonso García Guerra y cuyo título es *“Estudio para la generación de datos experimentales a nivel de laboratorio del sistema ternario glicerol-biodiesel-agua en equilibrio líquido-líquido a dos temperaturas y 640 mm Hg”.* En esta investigación se determinó que el sistema glicerol-biodiesel-agua pertenece a la clasificación de sistemas ternarios tipo II.

El fundamento teórico del proyecto sobre sistemas ternarios lo sustentan las investigaciones de trabajo de graduación de Ingeniería Química anteriormente realizadas.

Durante el año 2002 se realizó la investigación de la Inga. Ligia Marilú Rivas Méndez, para el sistema acetona-agua-hexano, asesorado por el Ing. César Alfonso García Guerra y cuyo título es *“Evaluación de un método experimental de obtención de datos que permitan caracterizar el equilibrio ternario del sistema agua-hexano-acetona a dos temperaturas”.*

En esta investigación se determinó que el sistema agua-hexano-acetona pertenece a la clasificación de sistemas ternarios tipo I (con formación de un par de líquidos parcialmente miscibles) dentro del rango de temperaturas de 28 ± 7 °C.

Durante el año 2002 se realizó la investigación de la Inga. Olinda Margarita López Velásquez, para el sistema etanol-agua-hexano, asesorado por el Ing. César Alfonso García Guerra y cuyo título es "*Evaluación de un método experimental de generación de datos para el estudio del sistema ternario etanol-hexano-agua a dos temperaturas diferentes*". En dicha investigación se llegó a determinar que el punto de pliegue experimental obtenido para el sistema etanol-hexano-agua a 23 °C es: 22% agua, 71% etanol, 7% hexano y a 43 °C es 23% agua, 68% etanol y 9% hexano.

En el 2003, el Ing. Marco Vinicio Pajarito Ángel realizó la investigación de trabajo de graduación, asesorado por el Ing. César Alfonso García Guerra y titulado "*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 Hg*". En la investigación se determinó que existe una diferencia significativa entre las isotermas de temperatura de 10 °C y 50 °C para el sistema de isopropanol-hexano-agua, a partir de las curvas binodales al equilibrio de inmiscibilidad y de los puntos de pliegue obtenidos.

Para el sistema isopropanol-hexano-agua a temperatura de 25 ± 5 °C la condición límite de solubilidad representada por el punto de pliegue corresponde a la composición de 6% isopropanol, 73% agua y 21% hexano y pertenece a la clasificación de sistemas ternarios tipo I.

Durante el año 2003, el Ing. Ramiro Antonio Prado Córdova realizó la investigación de trabajo de graduación, asesorado por el Ing. César Alfonso García Guerra y la Inga. Telma Maricela Cano titulado *“Evaluación del efecto de la concentración de cloruro de sodio en el sistema cuaternario agua-glicerol-1-butanol-cloruro de sodio sobre la distribución de equilibrio del glicerol para determinar la factibilidad de un proceso alternativo de recuperación de glicerina en una planta de saponificación”*. En la investigación se determinó que el efecto del factor glicerol sobre el coeficiente de distribución del glicerol en el sistema cuaternario agua-glicerol-1-butanol-cloruro de sodio, es tal que alcanza un mínimo cuando el porcentaje de glicerol es de 5% luego del cual se incrementa al aumentar la cantidad de glicerol en el sistema.

En el año 2004, la investigación del Ing. José Luis Alfaro Soto, asesorado por el Ing. César Alfonso García Guerra y cuyo título es *“Evaluación de un método experimental de generación de datos para el estudio del sistema ternario aceite esencial de eucalipto (1-8 cineol)-agua-hexano en equilibrio líquido a dos temperaturas y 640 mm Hg”*.

Durante el año 2005 se realizó la investigación de la Inga. Marisol Amado Rodas, para el sistema Limoneno-etanol-hexano, asesorado por el Ing. César Alfonso García Guerra, con el título *“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”*. De la cual se determinó que el sistema es de tipo II, con un punto de pliegue a 10 °C a 62% de A. E. limoneno, 33% de etanol y 5% de hexano y un punto de pliegue a 25 °C a 54% de A. E. limoneno, 40% etanol y 6% hexano.

Durante el año 2006 se realizó la investigación de la Inga. Krista Ivonne Aguilar Ovando, asesorado por el Ing. César Alfonso García Guerra, con el título *“Evaluación de un método experimental de generación de datos a nivel de laboratorio para el estudio del sistema ternario aceite esencial de cardamomo (*elletaria cardamomum*) - (alcohol isopropílico -agua)_{50%} - benceno en equilibrio a dos temperaturas diferentes y 640 mm Hg”*. De la cual se concluyó que el sistema es de tipo II, con un error máximo aproximado del 2%.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Procesos de separación

En los procesos de separación si se tiene una mezcla que sea una disolución homogénea de una sola fase (gaseosa, líquida o sólida), generalmente, será preciso generar una segunda fase antes de que pueda llevarse a cabo económicamente la separación de una especie química. (*Ref. 7*)

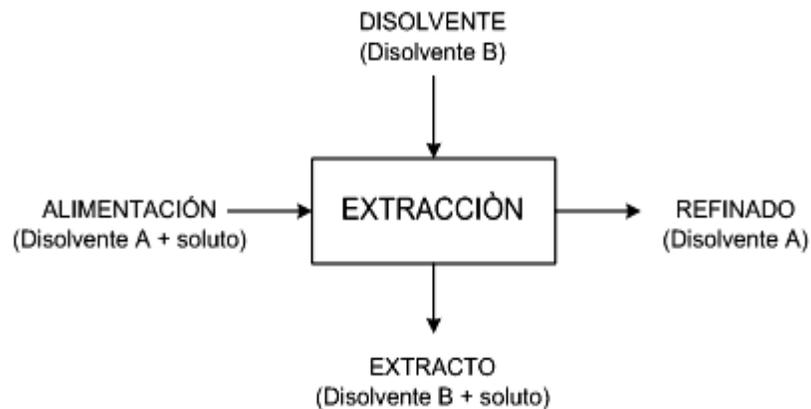
Esta segunda fase se puede generar por medio de un agente material de separación (AMS), tal como un disolvente o un absorbente.

2.2 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 uno 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/ExtraccLiqLiq2006.pdf

En el caso más sencillo participan tres componentes:

- El soluto A
- El disolvente B
- El líquido portador C

El soluto A forma parte de la mezcla de partida junto con el líquido portador C (alimento). Si la mezcla de partida y el disolvente B se mezclan entre sí, el soluto A pasa al disolvente B.

Ha de cumplirse la condición de que la solubilidad del componente A en el disolvente B sea mayor que la del líquido portador C. A su vez, el líquido portador C debería ser prácticamente insoluble en el disolvente B.

En cualquier proceso de extracción se necesita:

1. Contacto de la disolución líquida original con el disolvente.
2. Separación de las fases líquidas formadas (extracto y refinado).
3. Recuperación del disolvente.

Estos tres apartados constituyen lo que se denomina *estadio, etapa o unidad de extracción*, que recibe el nombre de *ideal* o *teórico* cuando el contacto entre la disolución líquida y el disolvente ha sido lo suficientemente íntimo para que las fases líquidas separadas tengan las concentraciones correspondientes a condiciones de equilibrio.

2.2.1 Relaciones de equilibrio en la extracción

2.2.1.1 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). Generalmente se consideran a la temperatura, presión y concentración como propiedades intensivas necesarias.

En los sistemas líquido-líquido, Laidler describe que cuando se tiene un sistema líquido-líquido, la regla de fases permite obtener 4 grados de libertad. Que significa que se deberá fijar 4 variables al sistema, en general será: temperatura, presión y dos variables de composición, debido a que basta con dos fracciones molares para definir la composición. (Ref. 10)

2.2.1.2 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. 10)

2.2.1.3 Coeficientes de distribución

Si se deja suficiente tiempo en contacto las fases, las especies químicas se distribuirán entre las fases de acuerdo con las consideraciones termodinámicas del equilibrio. 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. 14):

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

Aunque no es necesario que este coeficiente sea mayor que la unidad, valores mayores son deseables ya que implican que se requiere menos disolvente para llevar a cabo la operación.

2.2.2 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. 19)

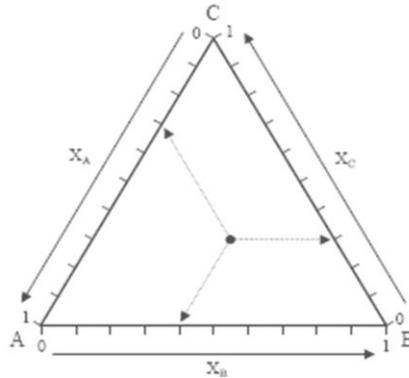
2.2.3 Métodos de representación gráfica del equilibrio ternario

En el diseño de una operación de extracción líquido-líquido suele considerarse que el refinado y el extracto se encuentran 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 dos 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 dos. 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/ExtraccLiqLiq2006.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. 14)

2.2.3.1 Coordenadas triangulares equiláteras

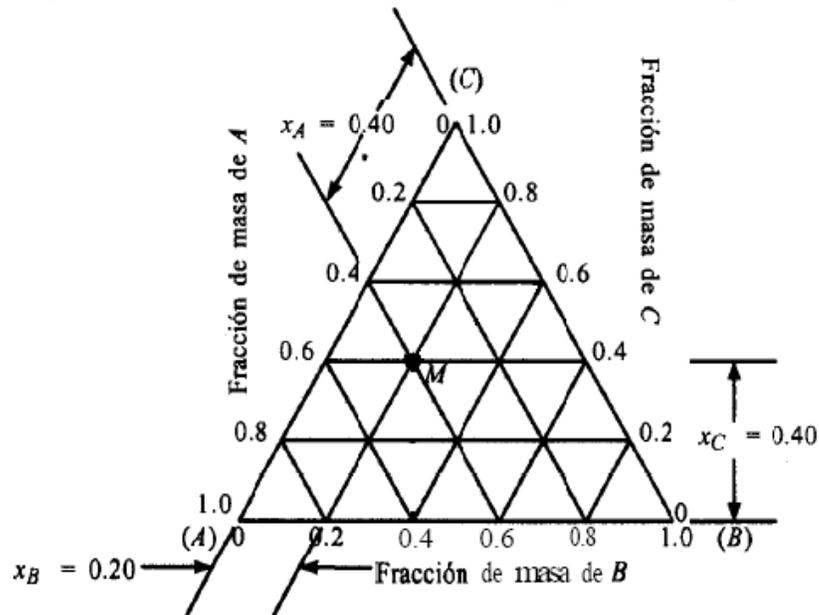
Las coordenadas triangulares equiláteras se usan con mucha frecuencia para representar los datos de equilibrio de un sistema de tres componentes, puesto que se tienen tres ejes. Esto se muestra en la figura tres. Cada uno de los tres vértices representa un componente puro A, B o C.

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,

$$x_A + x_B + x_C = 1$$

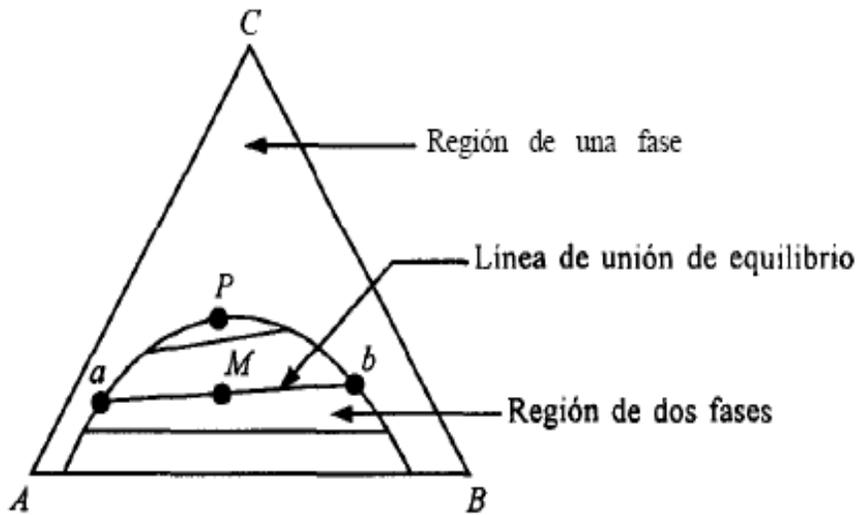
Figura 3. Coordenadas para un diagrama triangular



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

La figura tres muestra un diagrama de fases común de un par de componentes A y B parcialmente miscibles. Con respecto a la figura cuatro, 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.

2.2.4 Sistemas ternarios de interés en la extracción en fase líquida

Si los tres componentes se mezclan en todas las 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. 18):

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

Los tres componentes son líquidos a temperatura ambiente.

2.2.4.1 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 cinco, 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).

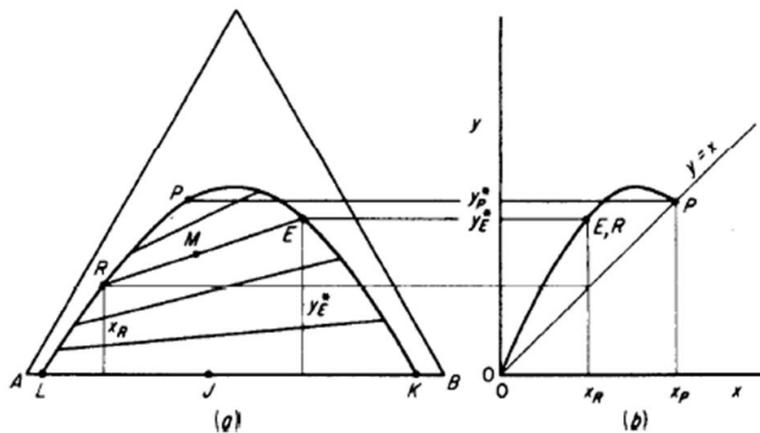
Una mezcla binaria en J se separará en dos fases líquidas insolubles de composiciones en L y K, ya que las cantidades relativas de las fases dependen de la posición J. La curva LRPEK es la curva binodal de solubilidad, que indica el cambio en la solubilidad de las fases ricas en A y B al agregar C. Una 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. 19)

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



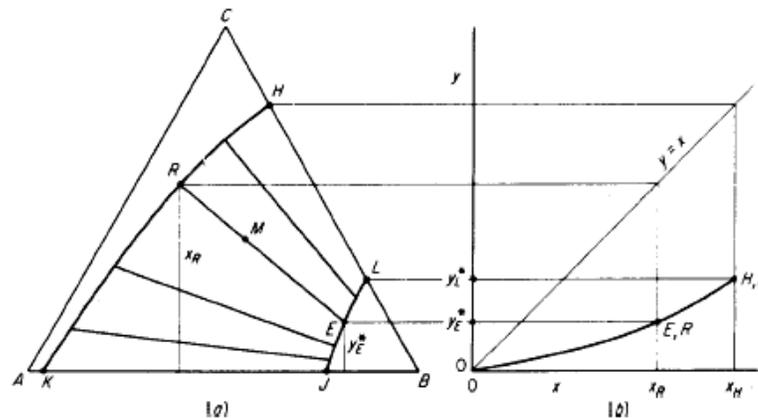
Fuente: Robert Treybal. Operaciones de transferencia de masa.

2.2.4.2 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 seis (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. 19)

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



Fuente: Robert Treybal. Operaciones de transferencia de masa.

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

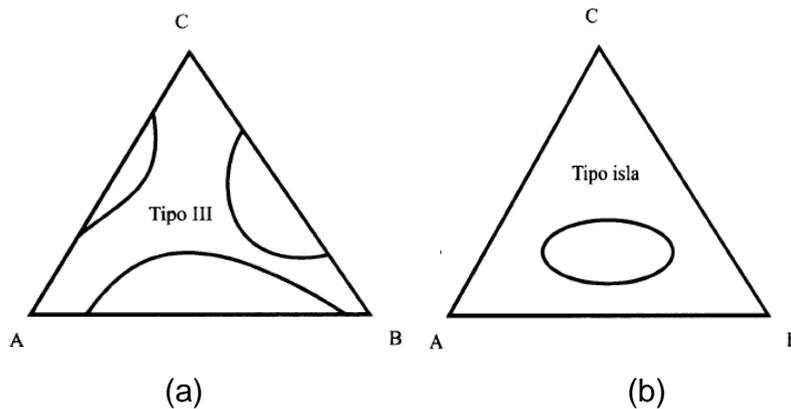
Estos sistemas son inusuales y pueden llegar a ser muy complejos en las relaciones variables que surgen al cambiar la temperatura.

Cuando los tres líquidos son parcialmente solubles entre sí, se producen tres curvas binodales, figura siete (a), a temperaturas lo suficientemente elevadas, como para que no existan intersecciones entre dichas curvas.

En la investigación de trabajo de graduación de la Inga. María Gabriela Hernández Castellanos, asesorada por el Ing. César Alfonso García Guerra, se determinó que el sistema glicerol-biodiesel-agua pertenece a la clasificación de sistemas ternarios tipo II.

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 siete (b), las curvas se intercepten, haciendo que el diagrama adopte la forma mostrada. (Ref. 18)

Figura 7. Diagramas de sistemas ternarios con tres pares parcialmente miscibles



Fuente: John H. Perry. Manual del ingeniero químico

2.2.4.4 Tipo IV. Formación de fases sólidas

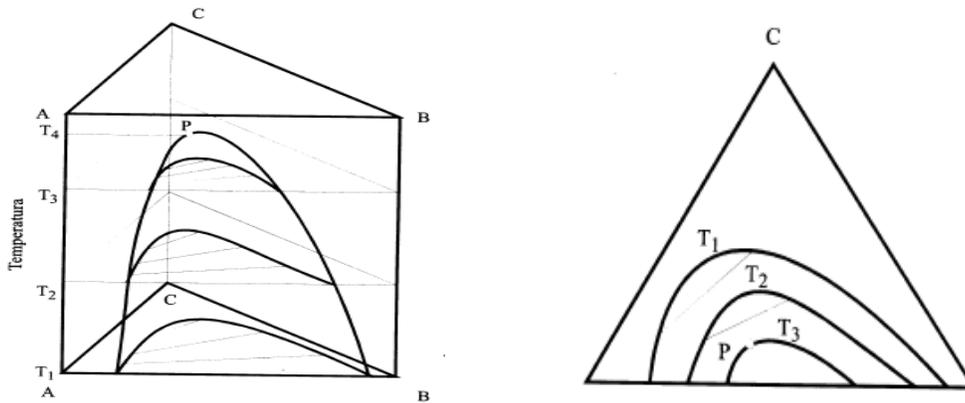
Estos sistemas pueden ser muy complejos en cuanto al número de equilibrios existentes.

2.2.5 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 ocho. 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 isoterma hasta la base del triángulo, como se muestra en la figura ocho. 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. 19)

Figura 8. Efecto de la temperatura en los equilibrios ternarios



Fuente: Robert Treybal. Operaciones de transferencia de masa.

2.2.6 Efecto de la presión

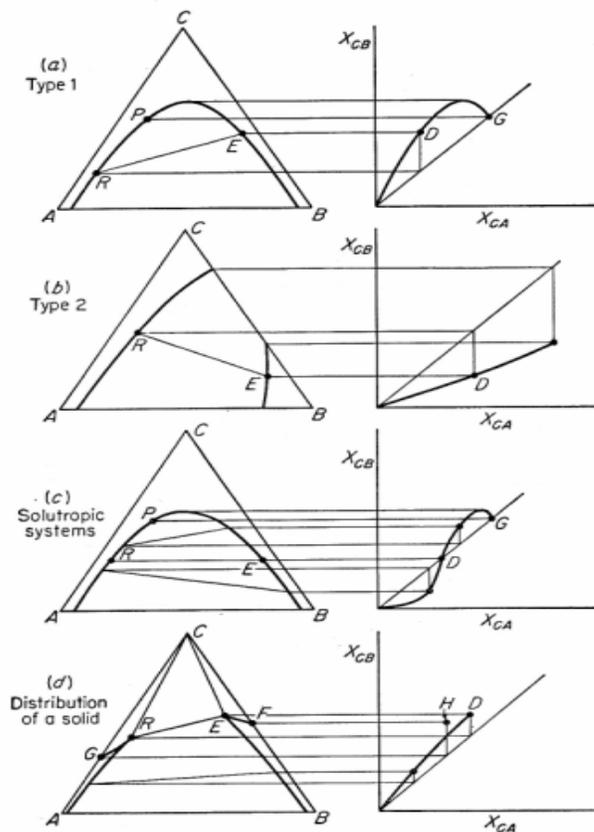
Excepto a presiones muy elevadas, el efecto de la presión sobre el equilibrio líquido es tan pequeño que generalmente puede ignorarse. Por lo tanto, todos los diagramas que se muestran deben considerarse como si se hubiesen graficado a presiones lo suficientemente altas como para mantener un sistema 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. 19)

2.2.7 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 nueve muestra varias curvas de distribución típicas con relación a su correspondiente tipo de diagrama de fases. (Ref. 18)

Figura 9. Curvas de distribución



Fuente: Robert Treybal. Liquid Extraction.

2.2.8 Propiedades deseables del disolvente

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

2.2.8.1 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.

2.2.8.2 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.

2.2.8.3 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.

2.2.8.4 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.

2.2.8.5 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. Entre más similar sea el parámetro de solubilidad (δ) de las especies en la mezcla habrá mayor oportunidad de que sean miscibles una en la otra. Por lo que se sugiere que sea lo más discrepante posible para no tener problemas en el proceso de extracción entre la *alimentación* y el *disolvente*.

Para los solventes en mezcla con el soluto de interés en el proceso de extracción debe tomarse en cuenta parámetros que establece la solubilidad que corresponden a los tres tipos de interacción de los componentes químicos, los cuales son:

- ✓ Las fuerzas de dispersión de London.
- ✓ Las interacciones entre dipolos δp , o de Van der Waals.
- ✓ Las interacciones entre enlaces de hidrógeno δh .

Es importante resaltar que la solubilidad de los componentes químicos en contacto depende también de la presión y temperatura a la cual se someta el sistema de extracción.

2.2.8.6 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.

2.2.8.7 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.

2.2.8.8 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 entrar 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. 14*)

2.2.8.9 Constante dieléctrica

Es una medida relacionada con la conductividad eléctrica, la cual tiene que ver con las interacciones específicas entre los componentes químicos presentes en el sistema de extracción. Ya sean estas de atracción o repulsión eléctricas entre iones, átomos y/o moléculas. Si se utiliza una molécula de hidrocarburo con una constante dieléctrica débil presentará una interacción débil en la fase extracto y refinado, la cual determinará la afinidad de la dispersión de las emulsiones.

La constante dieléctrica es una medida de la capacidad del disolvente para aislar a las cargas opuestas una de otra.

Las atracciones y repulsiones electrostáticas entre los iones son más pequeñas en los disolventes con constantes dieléctricas mayores. El agua es el disolvente más efectivo para promover la ionización, pero la mayoría de los compuestos orgánicos no se disuelven en forma apreciable en agua, casi siempre se disuelven en alcoholes, y a menudo se utilizan disolventes mezclados. Por lo cual el manual del ingeniero químico sugiere valores de constantes dieléctricas similares, que presentan en general, mayor afinidad que aquellas con valores de constante dieléctrica muy diferentes.

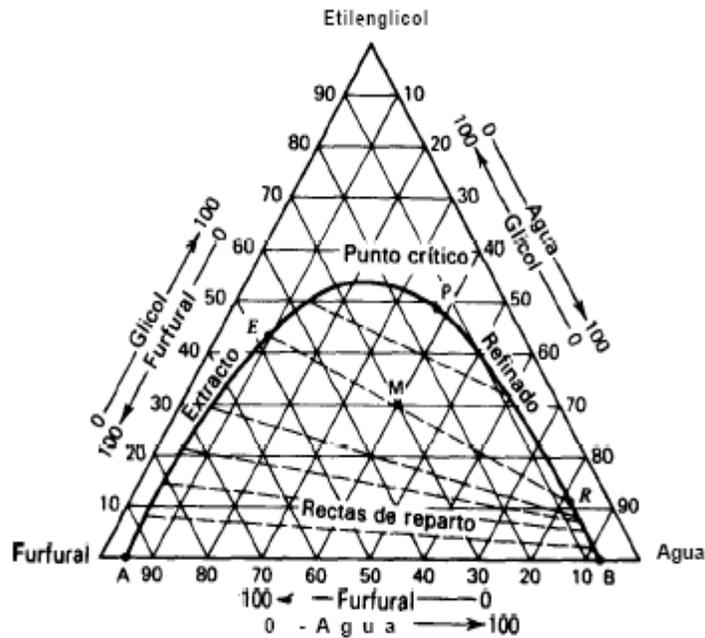
2.2.8.10 Viscosidad

Cuando se tienen líquidos en contacto estos tienden a rozar sus moléculas unas con otras, por eso son llamados viscosos. Los solventes más viscosos serán los más frenados, lo que dificultará su penetración. Cuando se mezclan varios solventes, es muy difícil prever cual será la viscosidad final.

Según las proporciones de los constituyentes de una mezcla, puede existir una variación regular de la viscosidad pero si ocurre que una mezcla presenta un máximo o un mínimo de viscosidad para una composición dada. Se sugiere que este tenga un valor bajo. *La extracción debe realizarse a altas temperaturas, porque con el aumento de la temperatura normalmente la viscosidad del solvente y el extracto disminuyen y por lo tanto la solubilidad del extracto en el solvente aumenta.*

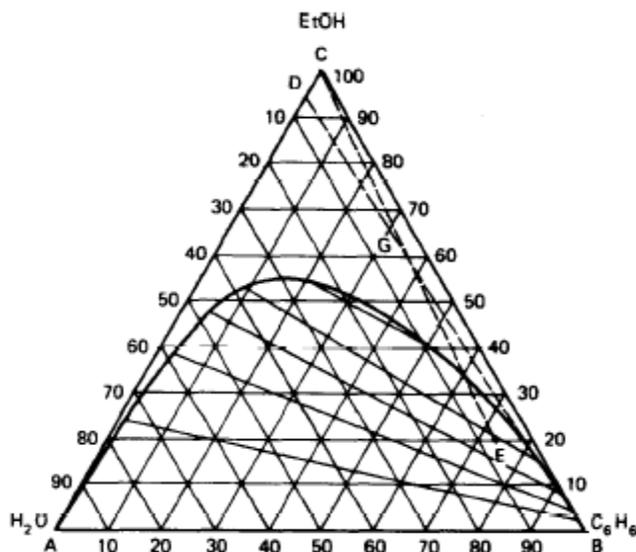
2.2.9 Ejemplos de diagramas ternarios

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.

2.3 Biodiesel

2.3.1 ¿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 and Materials*) define al biodiesel como “el éster monoalquílico de cadena larga de ácidos grasos derivados de recursos renovables, como por ejemplo aceites vegetales o grasas animales, para utilizarlos en motores diesel”. (*Ref. 17*)

Desde el punto de vista químico, el biodiesel es una mezcla de los ésteres metílicos de los ácidos grasos triglicéridos de los aceites vegetales y grasas animales empleados como materia prima. (*Ref. 29*)

2.3.2 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.

2.3.2.1 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 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 o 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. 22)

Tabla II. Principales ácidos grasos conocidos en la naturaleza

Nombre usual	Nombre IUPAC	Símbolo	Fórmula
Butírico	Butanóico	C4:0	$C_4H_8O_2$
Capróico	Hexanóico	C6:0	$C_6H_{12}O_2$
Caprílico	Octanóico	C8:0	$C_8H_{16}O_2$
Caprico	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)	$C_{16}H_{30}O_2$
Estearico	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 III. Proporciones de ácidos grasos en aceites vegetales y grasas animales

Aceite	Ácidos grasos – símbolos conforme Tabla II					
	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. 22)

2.3.2.2 Alcoholes

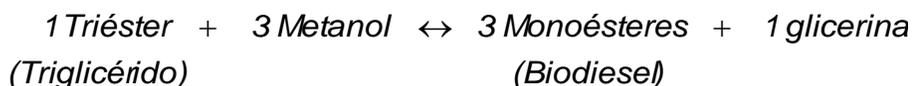
Los alcoholes que se pueden utilizar para la producción de biodiesel son los de cadena corta. Entre ellos: metanol, etanol, propanol, butanol y alcohol amílico.

El metanol (CH_3OH) y el etanol ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) son los más usados debido al bajo costo y a sus propiedades. (Ref. 17)

Aunque el etanol es 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. 21)

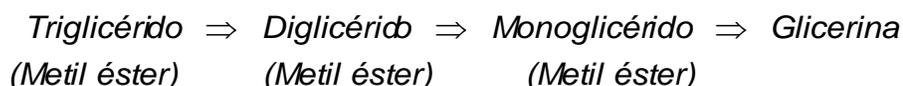
2.3.2.3 Las reacciones de transesterificación

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



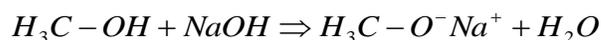
Cada molécula de biodiesel es un monoéster metílico, del tipo $R-COO-CH_3$, donde R es un radical de ácido graso y el grupo CH_3 proviene del metanol. En el caso de uso de etanol para la reacción, las moléculas de biodiesel serán monoésteres etílicos del tipo $R-COO-C_2H_5$.

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

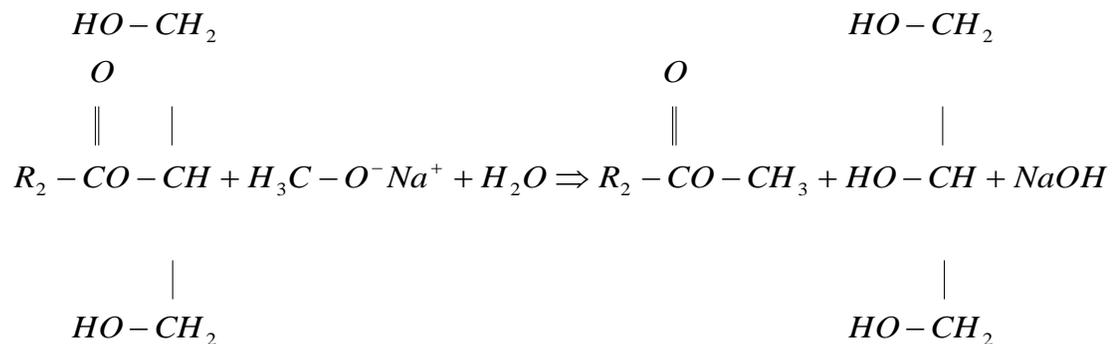
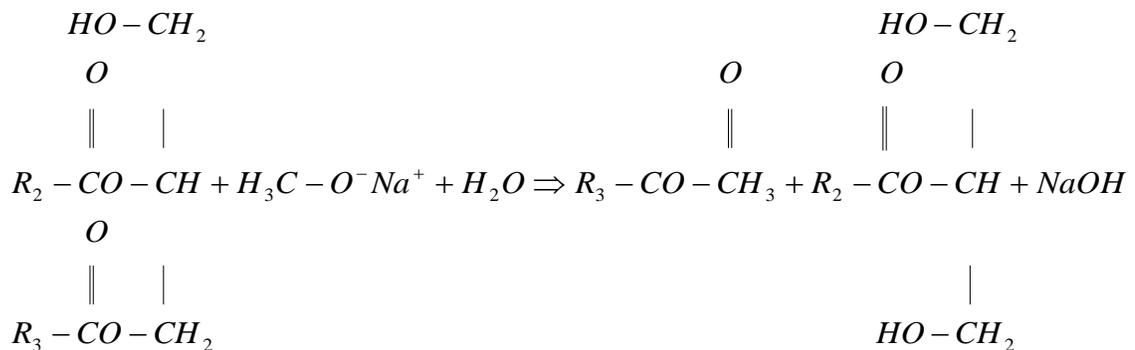


La descripción detallada de las etapas con participación del promotor de nucleófilo alcalino (NaOH o KOH) se da a continuación.

En primer lugar, ocurre la formación de metóxido de sodio o de potasio cuando se mezclan el metanol y el promotor de nucleófilo:



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 promotor de nucleófilo 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 monoglicérido y NaOH. Lo mismo ocurre entonces para el monoglicérido que se transforma finalmente en glicerina liberando la tercera molécula de biodiesel y de NaOH.



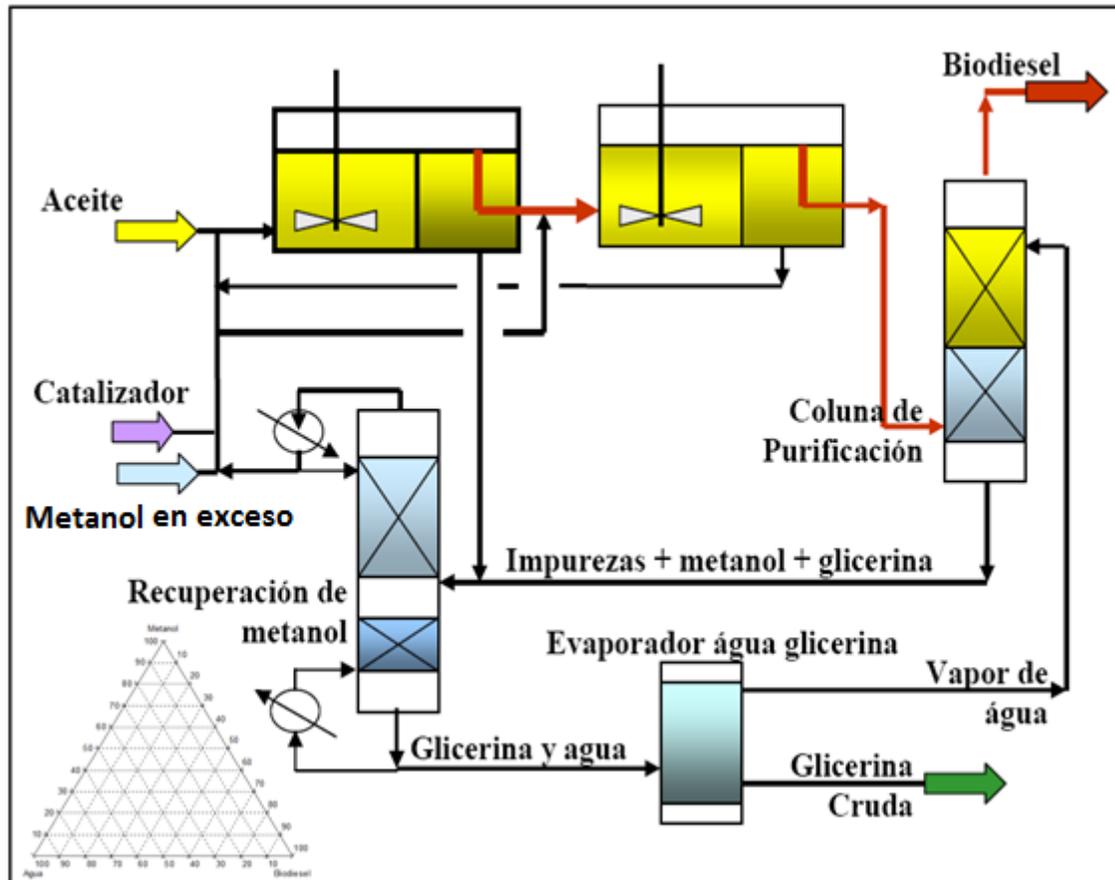
La reacción de transesterificación es reversible, por lo que es necesario trabajar con exceso de metanol (o etanol) para lograr altos porcentajes de conversión de triglicéridos en glicerina con la consecuente producción de biodiesel. *La conversión de los triglicéridos en glicerina nunca es del 100% 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 “15% de exceso aproximadamente” (Ref. *Biocombustibles de Guatemala*), es importante separar el metanol del agua y reutilizarlo en el proceso. (Ref. 22)

2.3.3 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 promotor de nucleófilo alimentan el reactor uno, 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 promotor de nucleófilo 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 dos contiene glicerina y aún mucho metanol y promotor de nucleófilo, por lo que es reciclada para el reactor uno. La fase más pesada del reactor uno 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.

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.

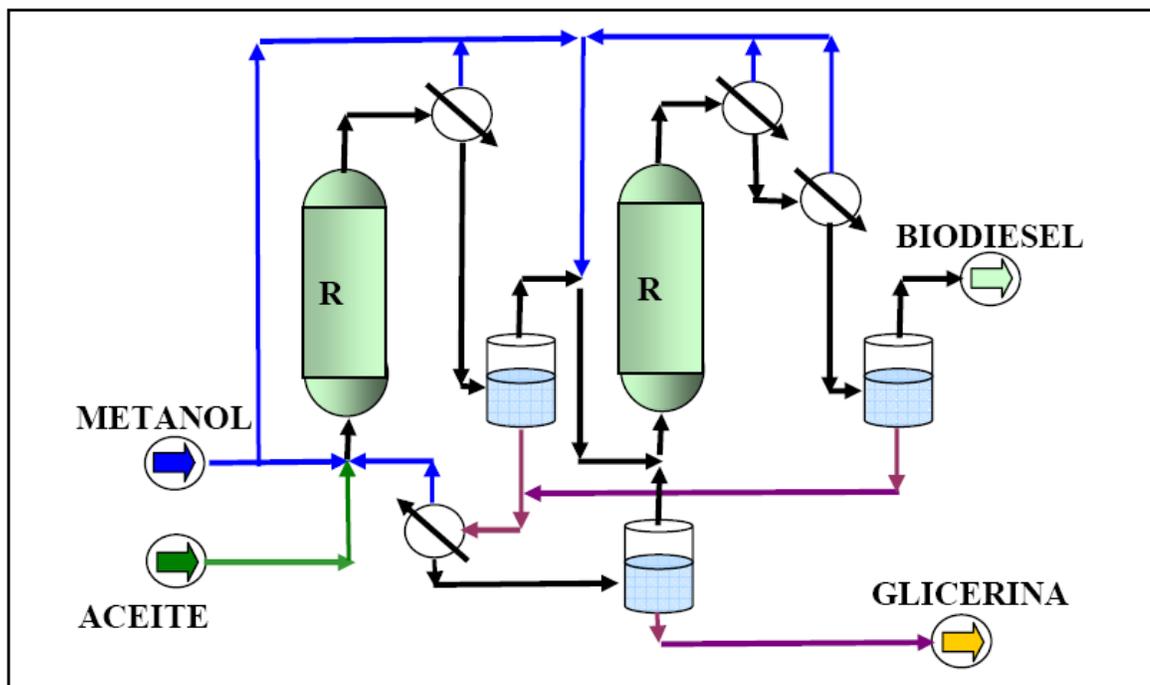
Las características más interesantes del proceso Lurgi son: puede ser adoptado para diferentes materias primas, opera a presión atmosférica y con temperatura alrededor de 60 °C, recupera metanol en exceso y el agua, la separación de fases ocurre por gravedad (no emplea centrifugas). Su eficiencia de 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 promotores de nucleófilo sólidos fijos, por lo que no es necesario alimentar el proceso con promotor de nucleófilo 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 promotor de nucleófilo sólido son la alta pureza de la glicerina (98% mínimo), 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 promotor de nucleófilo. (Ref. 22)

Figura 13. El proceso Axens



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

2.3.3.1 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. (Ref. 22)*

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. 22)

2.3.3.2 Destilación azeotrópica

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.

En química, *la destilación azeotrópica* es una de las técnicas usadas para romper un azeótropo en la destilación. Una de las destilaciones más comunes con un azeótropo es la de la mezcla etanol-agua. Usando técnicas normales de destilación, el etanol solo puede ser purificado a aproximadamente el 95%.

Una vez que se encuentra en una concentración de 95/5% etanol/agua, los coeficientes de actividad del agua y del etanol son iguales, entonces la concentración del vapor de la mezcla también es de 95/5% etanol/agua, por lo tanto las destilaciones posteriores son inefectivas. Por lo tanto, el azeótropo 95/5% debe romperse para lograr una mayor concentración.

En uno de los métodos se varía la presión en la destilación, se basa en el hecho que un azeótropo depende de la presión y también que no es un rango de concentraciones que no pueden ser destiladas, sino el punto en el que los coeficientes de actividad se cruzan. *Si el azeótropo se salta, la destilación puede continuar. (Ref. 35)*

Otro método utiliza un tercer componente, a veces denominado "arrasador", *puede adicionarse a la mezcla binaria para formar un azeótropo nuevo con punto de ebullición bajo, con uno de los componentes originales, cuya volatilidad sea tal que pueda separarse fácilmente del otro componente original.*

Introduciendo benceno en el extremo superior de una columna alimentada con una mezcla de etanol-agua, el azeótropo conteniendo benceno (53,9% en moles), agua (23,3% en moles) y etanol (22,8% en moles), con un punto de ebullición de 64,9 °C, se separa fácilmente del etanol (punto de ebullición =78,4 °C) el que sale como producto residual. También en este caso el producto de evaporación azeotrópica se separa en dos etapas líquidas, una rica en benceno que se recircula como reflujo a la parte superior de la columna, y la otra rica en agua, que se separa.

La sustancia adicionada deberá formar preferentemente el componente presente en cantidades menores, para producir los requerimientos calóricos del proceso. El nuevo azeótropo debe ser suficiente volátil como para hacer fácil la separación del componente residual y de tal manera que aparezcan cantidades despreciables del arrasador en el producto residual. (Ref. 36)

2.3.4 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 promotor de nucleófilo) y provee información para el control de calidad.

La temperatura es otro factor importante que 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 heladas.

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.

2.3.4.1 Métodos de lavado

Existen cuatro maneras principales de lavar el biodiesel:

- a. Lavado con burbujas.
- b. Lavado mediante atomización.
- c. Lavado con agitación.
- d. 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. Se debe 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 la agitación, es más probable que cause una emulsión. (Ref. 21)*

2.3.5 Ventajas y desventajas del uso de biodiesel

2.3.5.1 Ventajas

Usar biodiesel en vez de gasoil tiene varias ventajas:

- Es un combustible renovable ya que se obtiene a partir de aceites vegetales o grasas animales.
- No es tóxico.
- Su degradación ambiental es más rápida que la del gasoil, minimizando las consecuencias de posibles derrames.
- Produce menor porcentaje de emisiones contaminantes: monóxido de carbono (CO), material particulado (MP), hidrocarburos totales sin quemar (HC), hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH), hidrocarburos aromáticos policíclicos nitrogenados (nPAH), hollín y aldehídos que cuando se usa la misma cantidad de gasoil (las disminuciones dependerán fundamentalmente del tipo de aceite que se utilizó para obtener el biodiesel).

No se tendrá problemas de emulsiones durante el lavado de biodiesel, porque se utilizará biodiesel refinado y el metanol solo será añadido.

El porcentaje de reducción en las emisiones varía entre un 30 y 93%, dependiendo del tipo de emisión y del tipo de motor ensayado.

- Menores riesgos a la salud, debido fundamentalmente a la disminución de emisiones cancerígenas.
- No produce dióxido de azufre (SO₂).
- Ventajas en almacenamiento y transporte debido a que su punto de inflamación (como mínimo debe ser de 100 °C) es muy superior al del gasoil (50 °C).
- Completamente miscible con el gasoil, por lo que se pueden usar mezclas en distintas proporciones y la mezcla de ambos combustibles se puede realizar tanto en el momento de la carga como con anterioridad.
- Posee excelentes propiedades lubricantes, por ello, en algunos países como Francia, se lo utiliza como aditivo al gasoil, en un 5% en volumen.
- Es el único combustible alternativo que funciona en cualquier motor diesel convencional, sin ser necesario modificarlo.
- Se obtiene a partir de cultivos que abundan en la naturaleza; para la elaboración de este biocombustible se pueden utilizar como materia prima, aceites y grasas usadas. En este caso, más allá de la ventaja económica (el precio del biodiesel depende significativamente del precio del aceite, alrededor de un 90%) existe otra ventaja adicional desde el punto de vista ambiental, ya que se estarían reciclando importantes cantidades de sustancias que, de no ser así, habría que disponer. Además, al volverlas al ciclo de producción se estaría aumentando la rentabilidad del proceso. (*Ref. 21*)

2.3.5.2 Desventajas

También existen algunas desventajas en el uso de biodiesel, entre las que se encuentran las siguientes:

- Leves disminuciones en las prestaciones del motor (aumento en el consumo de combustible y menor potencia del motor, del orden del 10%). Esto se debe fundamentalmente a que el poder calorífico del biodiesel es algo inferior al del gasoil.
- Leve aumento en la emisión de óxidos de nitrógeno (NOx). El rango de incremento se encuentra entre el 1-15%, pero generalmente el valor es del 5%. Los resultados varían ampliamente dependiendo del tipo de motor y tipo de biodiesel con el que se realiza la medición.
- Se congela a temperaturas dos a tres grados más altas que el gasoil, formándose pequeños cristales que tapan los conductos y filtros. Este inconveniente puede ser de importancia en lugares con climas fríos.
- Presenta escasa estabilidad hidrolítica y oxidativa. Por ello, su almacenamiento no es aconsejable por períodos superiores a seis meses.
- Su poder solvente lo hace incompatible con una serie de plásticos y elementos derivados del caucho natural, y a veces obliga a sustituir mangueras en el motor (por teflón).
- Su carga en tanques ya sucios por depósitos provenientes del gasoil puede presentar problemas cuando por su poder solvente "limpia" dichos depósitos, acarreándolos por la línea de combustible, formando depósitos carbonosos en válvulas de admisión y diluyendo el aceite del cárter.

La mayoría de las desventajas mencionadas anteriormente se pueden resolver individualmente y suelen desaparecer cuando se recurre a mezclas de combustibles, en particular B20. Estas mezclas son recomendadas para cualquier tipo de motor diesel. (Ref. 17)

2.3.6 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:

2.3.6.1 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.

2.3.6.2 Viscosidad

Debe poseer una viscosidad mínima para evitar pérdidas de potencia, debido 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.

2.3.6.3 Densidad

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

2.3.6.4 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.

Tanto los sólidos abrasivos como los promotores de nucleófilo no eliminados favorecen al desgaste del inyector, bomba de inyección, pistón y anillos, además de contribuir a la formación de depósitos en el motor.

Los jabones metálicos solubles tienen un efecto menor en el desgaste, pero pueden afectar más a la colmatación de filtros y depósitos en el motor.

2.3.6.5 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.

2.3.6.6 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.

Un bajo número de cetanos conlleva a ruidos en el motor, prolongando el retraso de la ignición y aumentando el peso molecular de las igniciones.

2.3.6.7 Índice de yodo

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

2.3.6.8 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.

2.3.6.9 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 colmar filtros y darle al combustible unas propiedades de lubricidad menores. El biodiesel puede absorber hasta 40 veces más agua que el diesel.

2.3.6.10 Residuo carbonoso

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

2.3.6.11 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.

2.3.6.12 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.

2.3.6.13 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.

2.3.6.14 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.

2.3.6.15 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. 20)

2.3.7 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 IV se especifican las características físico-químicas ASTM exigidas para el biodiesel (B100) en el Reglamento Técnico Centro Americano:

Tabla IV. 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, recuperado 90%	°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

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

Tabla V. Propiedades físicas del agua desmineralizada

Nombre común	Agua
Apariencia y olor	Líquido transparente sin olor
Punto de ebullición a 1 atm	100 °C
Punto de fusión a 1 atm	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
Tensión superficial 20 °C	72.8 dinas/cm
Masa molecular	18.0148 g/mol
Fórmula estructural	H ₂ O

Tabla VI. Propiedades físicas del biodiesel

Propiedades	Límites máximos permisibles
Metanol	0.20%
Glicerina total	0.221 ± 0.001%
Glicerina libre	0.019 ± 0.003%
Humedad	1090 ppm
Constante dieléctrica	3 - 4.5
Tensión superficial 20 °C	33.8 mN/m = 33.8 dinas/cm
Viscosidad cinemática a 40 °C	4.45 cSt

Tabla VII. Propiedades físicas y químicas del metanol

General	
Nomenclatura IUPAC	Metanol
Otros nombres	Carbinol; Alcohol metílico; Alcohol de madera; Espiritu de madera
Fórmula semidesarrollada	CH ₃ -OH
Fórmula molecular	CH ₄ O
Propiedades físicas	
Estado de agregación	Líquido
Apariencia	Incoloro
Densidad	791.8 kg/m ³ ; 0.7918 g/cm ³
Masa molar	32.04 g/mol
Punto de fusión	176 K (-97.16 °C)
Punto de ebullición	337.8 K (64.7 °C)
Viscosidad	0.59 mPa·s a 20 °C
Tensión superficial 20 °C	22.61 dinas/cm

Propiedades químicas	
Acidez (pK_a)	~ 15.5
Solubilidad en agua	Totalmente miscible
Momento dipolar	1.69 D
Constante dieléctrica a 65 °C	33
Peligrosidad	
Punto de inflamabilidad	285 K (12 °C)
Temperatura de autoignición	658 K (385 °C)

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1 Recursos y materiales

3.1.1 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.

3.1.2 Recursos humanos

Investigadora: Nancy Karina Díaz Fulgan.

Asesor: Ing. Qco. César Alfonso García Guerra.

3.1.3 Recursos materiales

3.1.3.1 Reactivos

- Biodiesel (proporcionado por Biocombustibles de Guatemala)
- Metanol grado reactivo 100% (proporcionado por RGH, S.A.)
- Agua desmineralizada (proporcionada por Salvavidas)

3.1.3.2 Equipo y cristalería

3.1.3.2.1 Equipo de medición

- Balanza analítica: Marca: RADWAG
Modelo: Adventurer, AR1530
Máxima capacidad: 750 g
Mínimo valor de medición: 0.001 g
Voltaje: 8 – 14.5 v
Potencia: 6 w
- Refractómetro: Marca: Abbe
Modelo: 32200
Rango de temperatura: 0 a 70 °C
Precisión: ± 0.0002
Rango de medición: 1.3000 – 1.7000
- Termómetro [0-150 °C]

3.1.3.2.2 Cristalería

- Earlenmeyers tipo pirex de 150 ml
- Pipetas serológicas de 1, 5 y 10 ml
- Buretas de 25 y 10 ml
- Beackers tipo pirex de 25, 50, 250 ml
- Tubos de ensayo
- Picnómetro de 25 ml
- Ampolla de decantación de 250 y 500 ml

3.1.3.2.3 Materiales

- Pizetas de polietileno de 125 ml
- Soportes universales
- Anillos metálicos para ampollas de decantación
- Pinzas metálicas para buretas
- Agitador magnético

3.1.3.2.4 Equipo auxiliar

- Plancha de calentamiento con agitación
Marca: SYBRONT/Thermolyne
Modelo: Nuova II, SP18425
Voltaje: 120 v
Amperios: 7.5 A
Potencia: 80 W

3.1.3.3 Material de escritorio

- Papelería y útiles de oficina
- Computadora
- Impresora
- Software: Microsoft Word, Microsoft Excel, Microsoft Visio, TriDraw 4.5, Adobe Reader 8.0.
- CD's
- Dispositivo de almacenamiento masivo USB
- Fotocopias

3.2. Metodología experimental

Para determinar el equilibrio del sistema líquido-líquido de metanol-biodiesel-agua, trabajado a temperatura ambiente (23 ± 1 °C) y presión de 640 mm Hg, se realizarán soluciones de metanol-agua y metanol-biodiesel a diferentes porcentajes en peso.

Las técnicas a utilizar serán picnometría y refractometría de mezclas insolubles de metanol en agua y en biodiesel, y correlacionar los valores al equilibrio mediante un diseño experimental para la correlación de los datos experimentalmente obtenidos. 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.

3.2.1 Procedimiento preparatorio 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 al 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. Eliminar agua del biodiesel por medio de calentamiento a temperatura de ebullición del agua durante 10 minutos agitando constantemente.

Figura 14. Detalle de la unidad de lavado de biodiesel



Fuente: María Gabriela, Hernández Castellanos y César Alfonso, García Guerra. Estudio para la generación de datos experimentales a nivel de laboratorio del sistema ternario glicerol-biodiesel-agua en equilibrio líquido-líquido a dos temperaturas y 640 mm Hg. Pág. 143.

Figura 15. Detalle de la unidad de separación del agua en el lavado de biodiesel



Fuente: María Gabriela, Hernández Castellanos y César Alfonso, García Guerra. Estudio para la generación de datos experimentales a nivel de laboratorio del sistema ternario glicerol-biodiesel-agua en equilibrio líquido-líquido a dos temperaturas y 640 mm Hg. Pág. 143.

Figura 16. Detalle de la unidad de secado de biodiesel



Fuente: María Gabriela, Hernández Castellanos y César Alfonso, García Guerra. Estudio para la generación de datos experimentales a nivel de laboratorio del sistema ternario glicerol-biodiesel-agua en equilibrio líquido-líquido a dos temperaturas y 640 mm Hg. Pág. 144.

3.2.2 Procedimiento experimental para el sistema líquido-líquido metanol-biodiesel-agua

A una temperatura constante de 23 ± 1 °C.

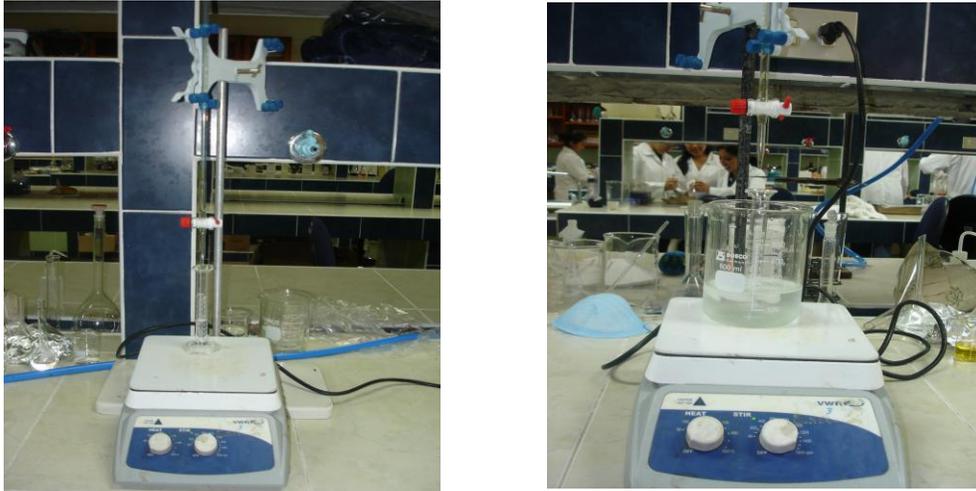
- a. Preparar soluciones de metanol en agua en proporciones de 5, 15, 25, 35, 45, 55, 70, 85, 90% en volumen.
- b. Tomar tres alícuotas de cada solución y medir el índice de refracción por medio de un refractómetro.
- c. Tomar tres alícuotas de cada solución y medir la densidad por medio de un picnómetro.
- 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 ocho 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 minutos.
- h. Separar las dos fases formadas en el inciso (g) de cada solución y medirle índice de refracción.

A una temperatura constante de 23 ± 1 °C.

- a. Preparar soluciones de metanol en biodiesel en proporciones de 8, 15, 18, 25, 30, 35, 40, 45, 50% en volumen.
- b. Tomar tres alícuotas de cada solución y medir el índice de refracción por medio de un refractómetro.
- 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 ocho 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 minutos.
- h. Separar las dos fases formadas en el inciso (g) de cada solución y medirle índice de refracción.

Figura 17. Detalle de la unidad utilizada para la titulación de las mezclas binarias a temperaturas ambiente



Fuente: María Gabriela, Hernández Castellanos y César Alfonso, García Guerra. Estudio para la generación de datos experimentales a nivel de laboratorio del sistema ternario glicerol-biodiesel-agua en equilibrio líquido-líquido a dos temperaturas y 640 mm Hg. Pág. 146.

3.2.3 Método para la elaboración de la curva de solubilidad

3.2.3.1 Determinación de densidad

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

3.2.3.2 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 dos a tres 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.

Figura 18. Detalle de la unidad de medición de índices de refracción



Fuente: María Gabriela, Hernández Castellanos y César Alfonso, García Guerra. Estudio para la generación de datos experimentales a nivel de laboratorio del sistema ternario glicerol-biodiesel-agua en equilibrio líquido-líquido a dos temperaturas y 640 mm Hg. Pág. 145.

3.2.4 Análisis estadístico

Se aplicará un análisis estadístico a los datos obtenidos del experimento y así determinar los resultados bajo el análisis de varianza ANOVA (Apéndice 4).

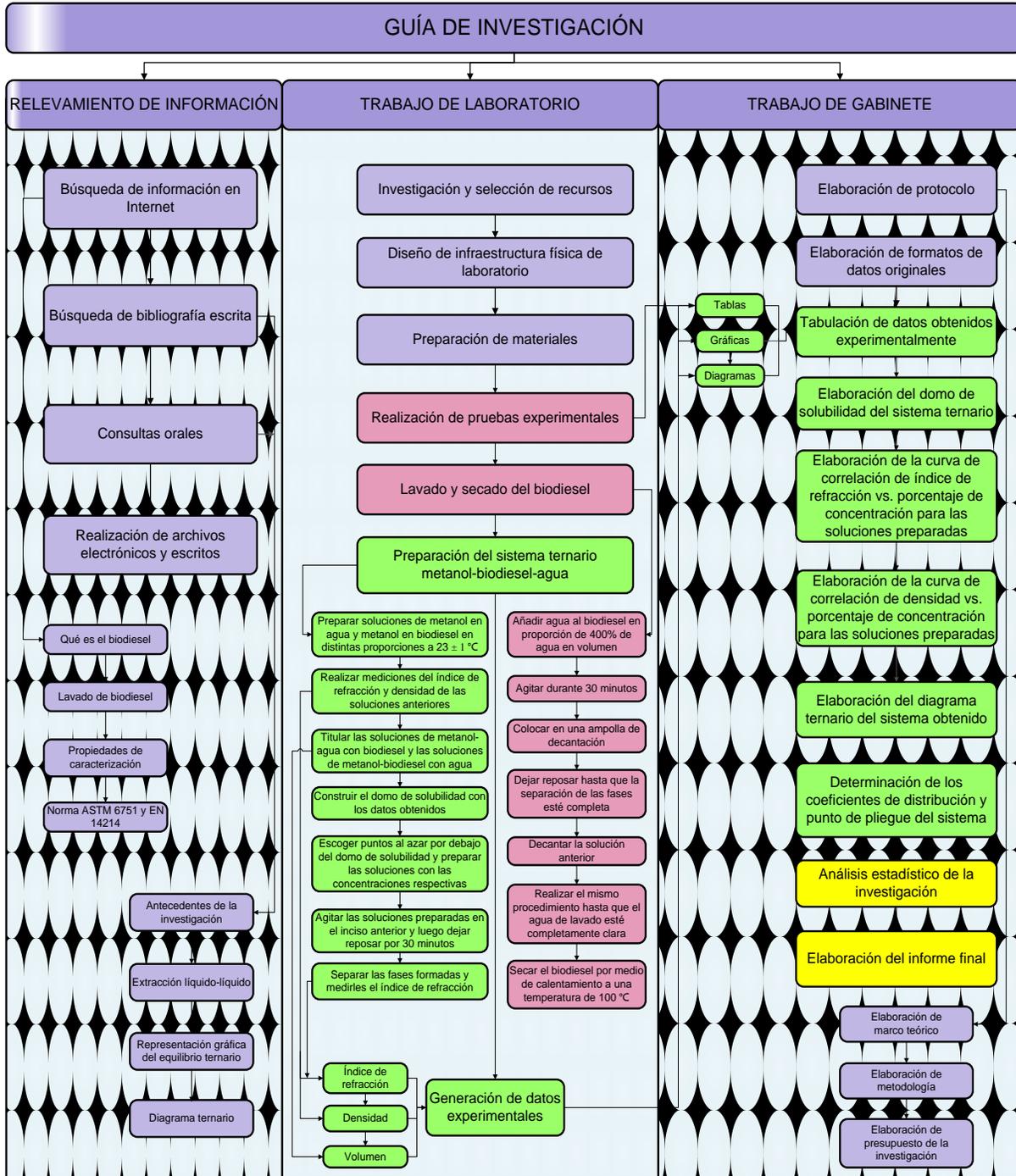
3.2.5 Hipótesis

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 metanol-biodiesel-agua a temperatura ambiente y 640 mm Hg.

3.2.6 Generación de datos

Los datos obtenidos experimentalmente para el equilibrio ternario del sistema metanol-biodiesel-agua a temperatura ambiente, se ordenaron en tablas y gráficas con base en lo especificado en el protocolo del trabajo de graduación.

Figura 19. Flujograma que presenta la metodología de un proceso de extracción líquido-líquido



3.2.7 Manejo de desechos líquidos

Las sustancias residuales en la investigación básicamente son soluciones acuosas de metanol y biodiesel.

Tabla VIII. Manejo de desechos líquidos

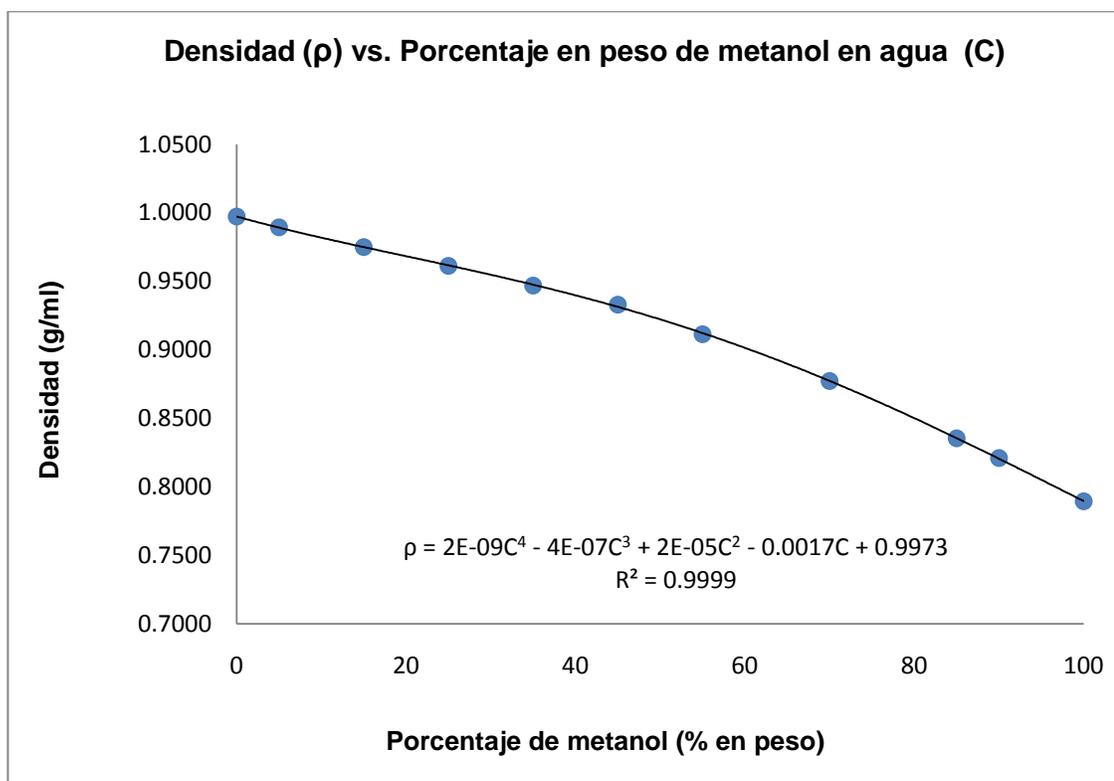
Desecho	Método	Tratamiento
Restos de solvente orgánico (soluciones acuosas de biodiesel)	Incineración	<ol style="list-style-type: none">1. La incineración debe efectuarse de manera eficiente en cámaras de combustión, y mantener los gases generados a una temperatura alta de 850 °C a 1100 °C en presencia de un exceso de oxígeno, para que los compuestos orgánicos sean completamente oxidados.2. El tiempo de residencia que debe permitir dicha cámara de combustión es de dos segundos.

Restos de solvente orgánico (soluciones acuosas de metanol)	Separación	<ol style="list-style-type: none">1. En un rotaevaporador separar metanol de la mezcla homogénea acuosa, concentrándolo hasta un 95% para su reutilización.2. Se debe mantener la temperatura a 59 ± 1 °C, para que no se produzca arrastre.
---	------------	--

Fuente: Referencias 38 y 39

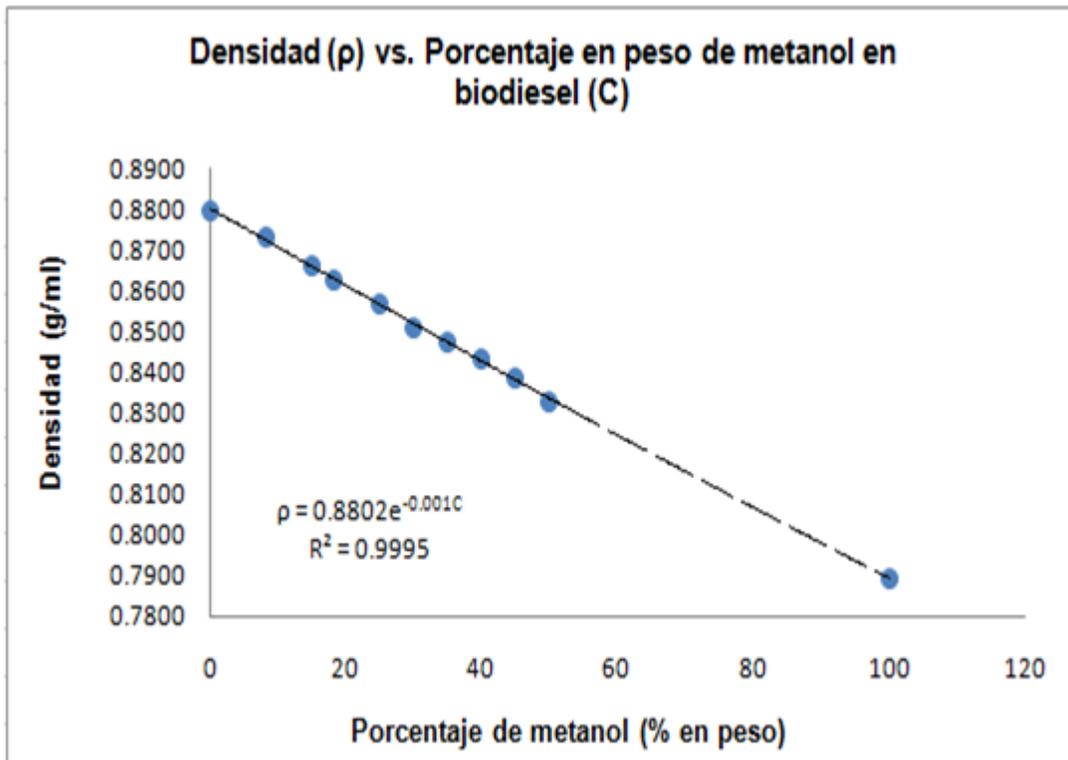
4. RESULTADOS

Figura 20. Curva de correlación para la densidad en función de la concentración de la mezcla binaria metanol-agua a 23 ± 1 °C



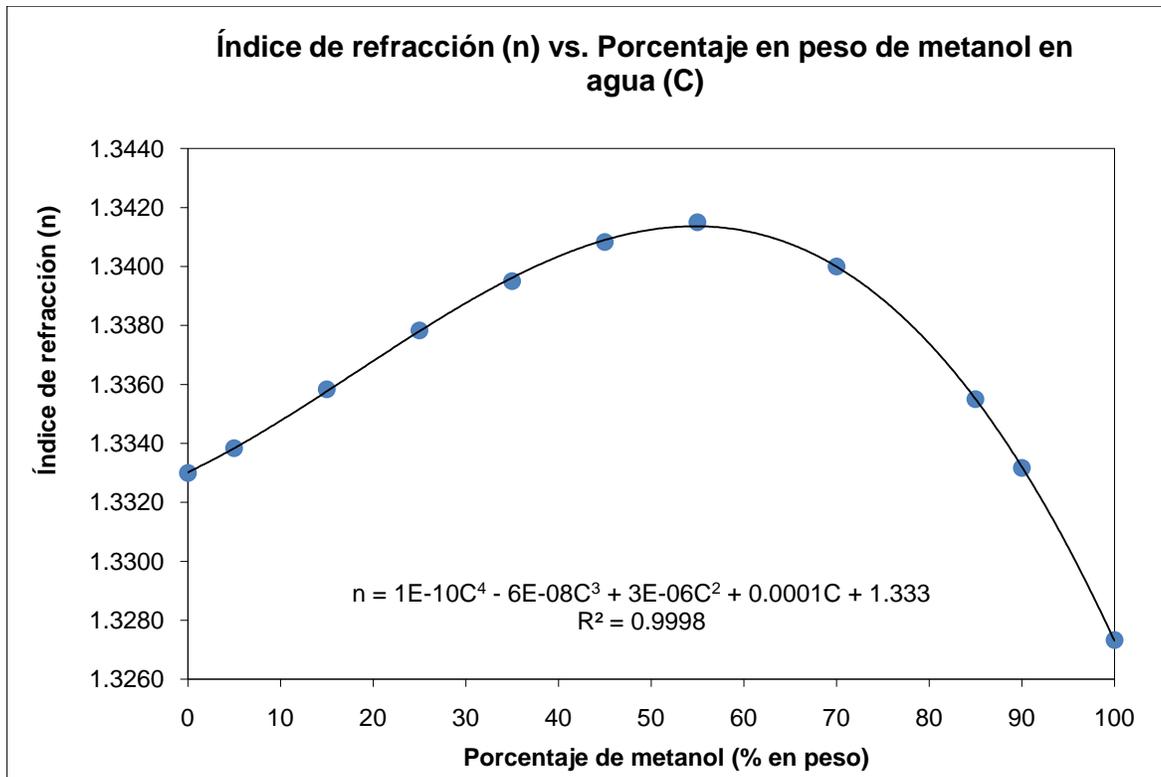
Fuente: Datos calculados. Apéndice 3.

Figura 21. Curva de correlación para la densidad en función de la concentración de la mezcla binaria metanol-biodiesel a 23 ± 1 °C



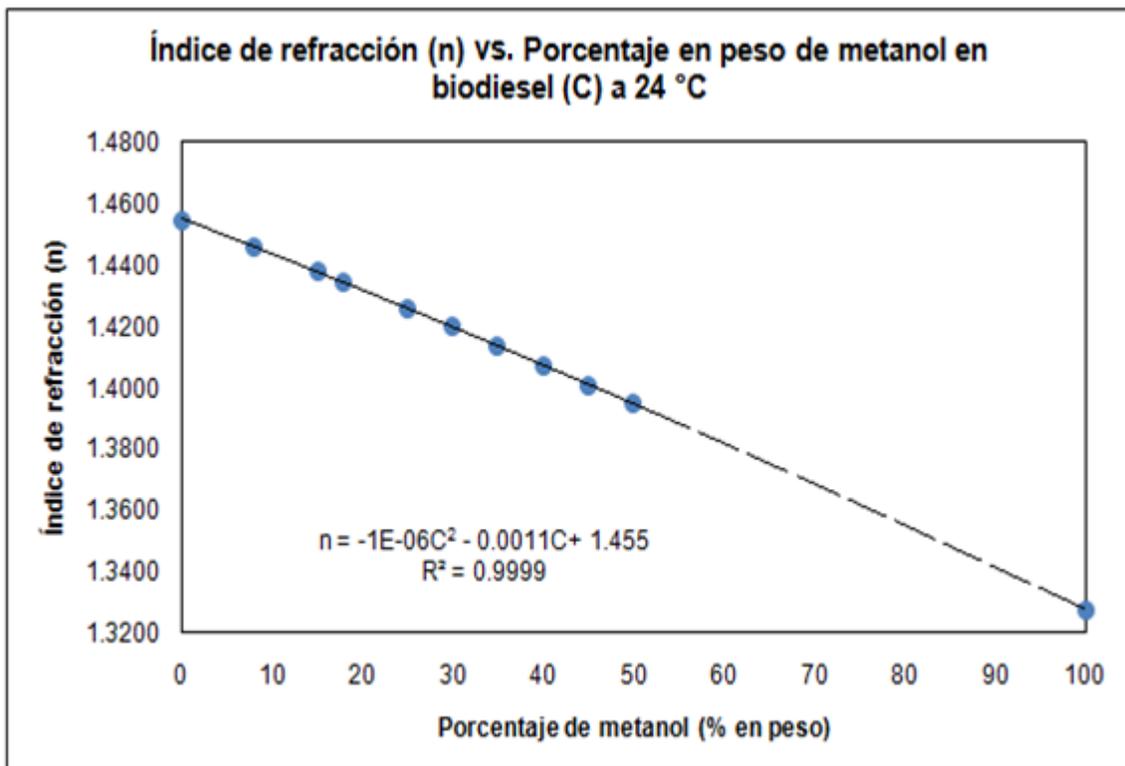
Fuente: Datos calculados. Apéndice 3.

Figura 22. Curva de correlación para los índices de refracción en función de la concentración de la mezcla binaria metanol-agua a 23 °C



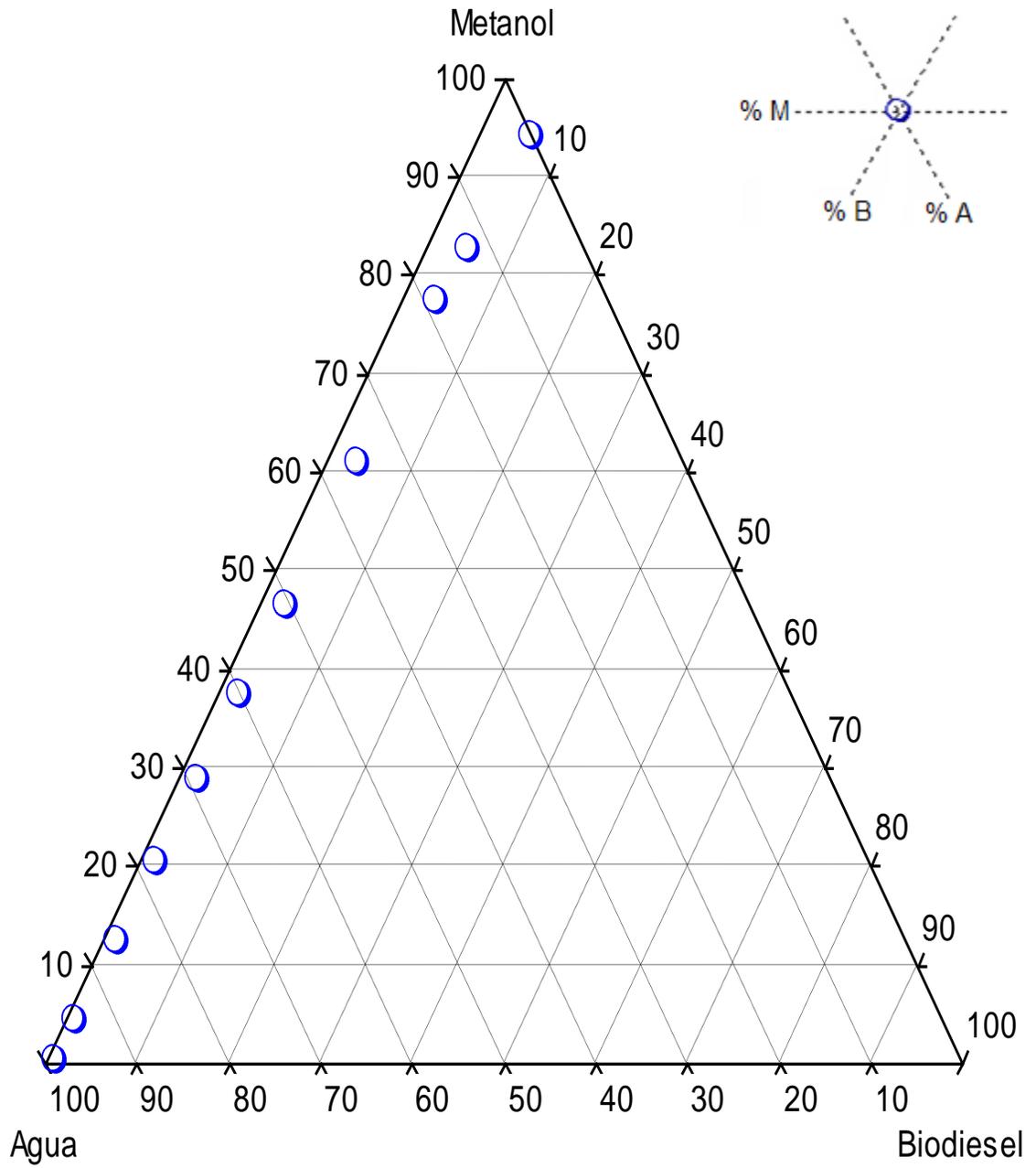
Fuente: Datos calculados. Apéndice 3.

Figura 23. Curva de correlación para los índices de refracción en función de la concentración de la mezcla binaria metanol-biodiesel a 24 °C



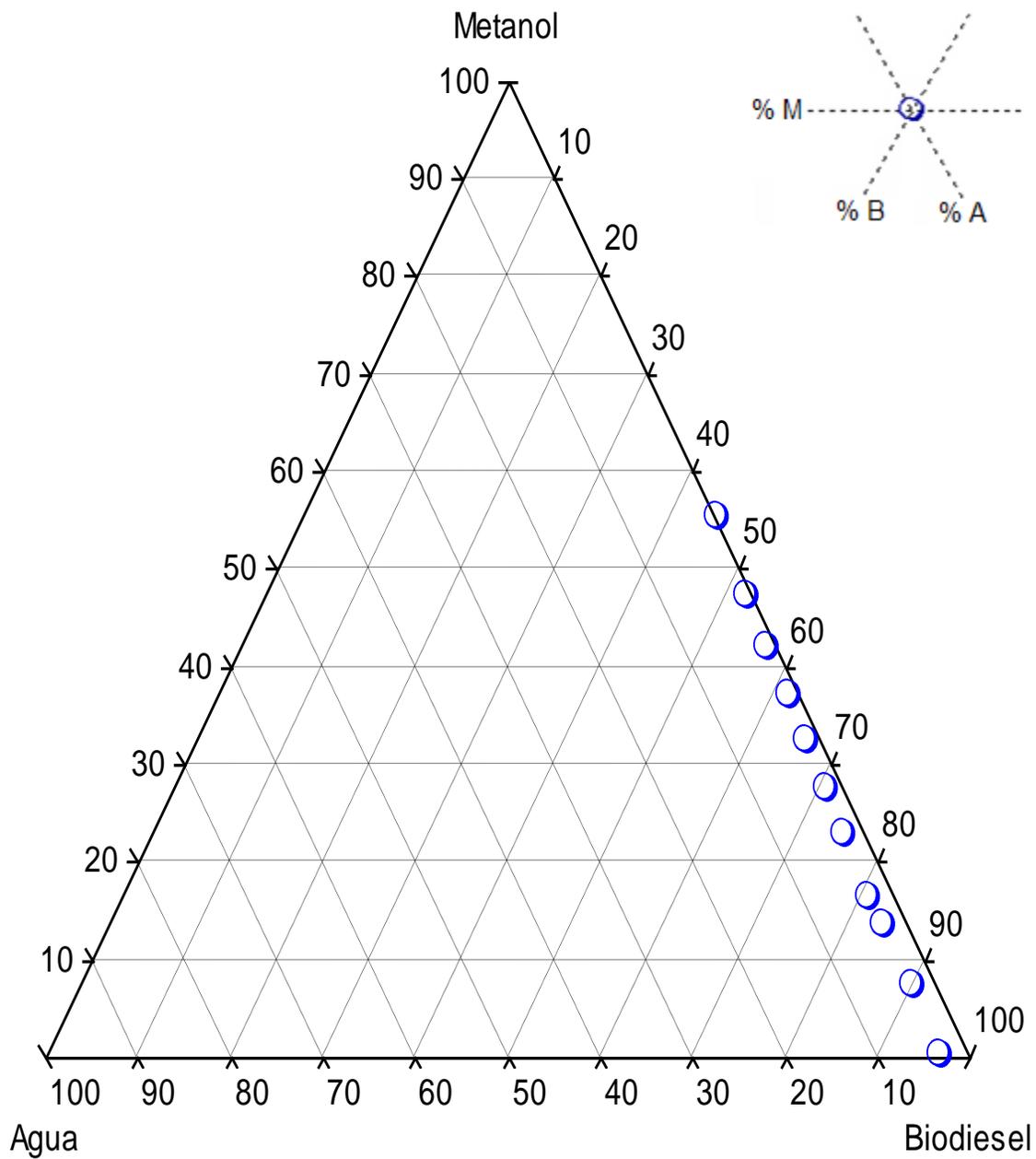
Fuente: Datos calculados. Apéndice 3.

Figura 24. Distribución de los datos experimentales de equilibrio de inmiscibilidad, obtenidos para el sistema metanol-biodiesel-agua, a partir de soluciones de metanol-agua, mediante la adición del solvente biodiesel a $23 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$



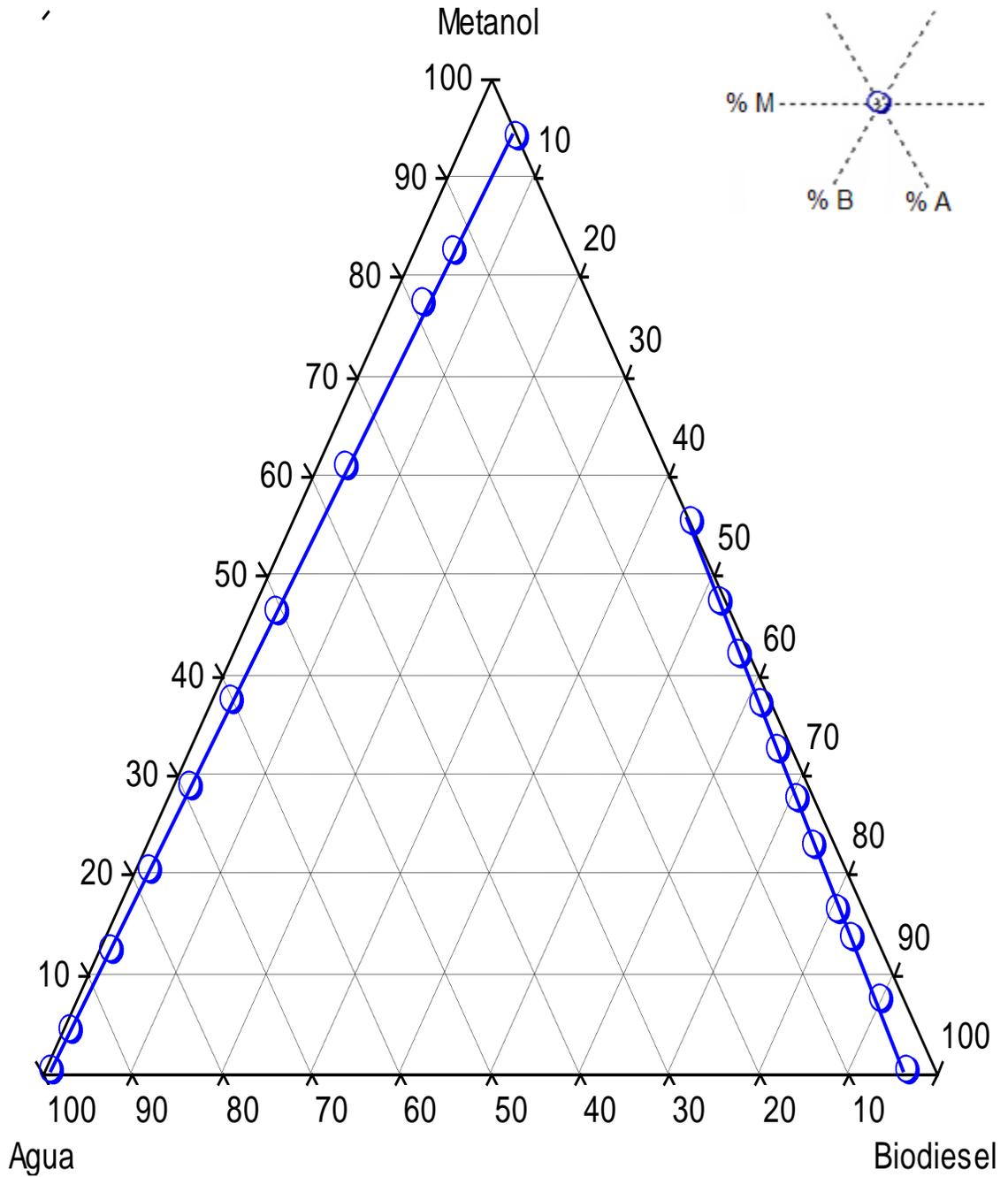
Fuente: Datos calculados. Apéndice 3.

Figura 25. Distribución de los datos experimentales de equilibrio de inmiscibilidad, obtenidos para el sistema metanol-biodiesel-agua, a partir de soluciones de metanol-biodiesel, mediante la adición del solvente agua a $23 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$



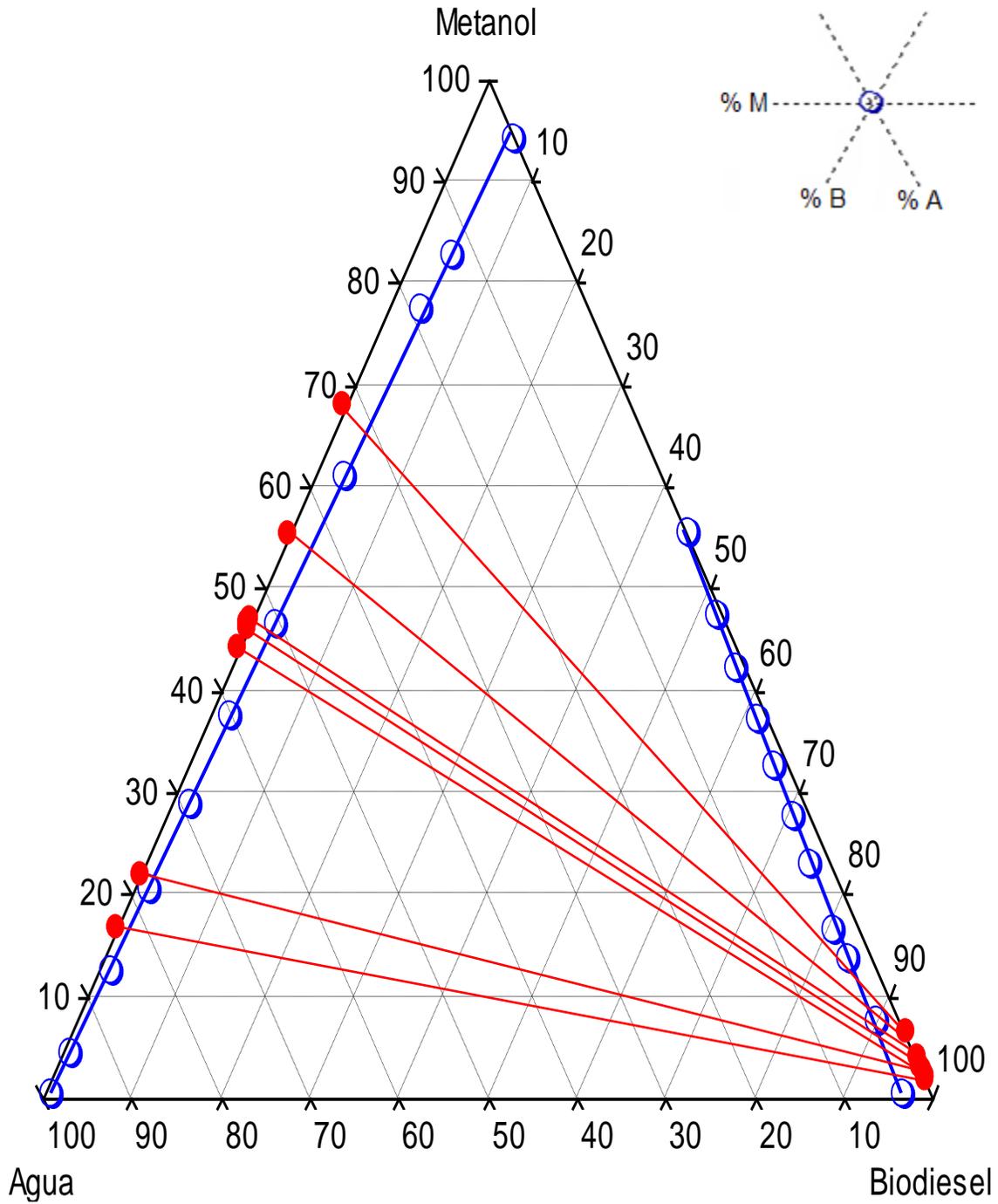
Fuente: Datos calculados. Apéndice 3.

Figura 26. Distribución de los datos experimentales de equilibrio de inmiscibilidad, obtenidos para el sistema metanol-biodiesel-agua a 23 ± 1 °C



Fuente: Datos calculados. Apéndice 3.

Figura 27. Curvas de distribución de los datos experimentales en el sistema metanol-biodiesel-agua a la temperatura de $23 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$



Fuente: Datos calculados. Apéndice 3.

- Punto de pliegue del sistema ternario metanol-biodiesel-agua a la temperatura de $23 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$

% Metanol = 14%

% Biodiesel = 84%

% Agua = 2%

Fuente: Apéndice 4.

Tabla IX. Valores de los coeficientes de distribución (K) obtenidos a partir del cociente entre el porcentaje de metanol distribuido en la fase de agua, y el porcentaje de metanol distribuido en la fase de biodiesel a $24 \text{ }^\circ\text{C}$

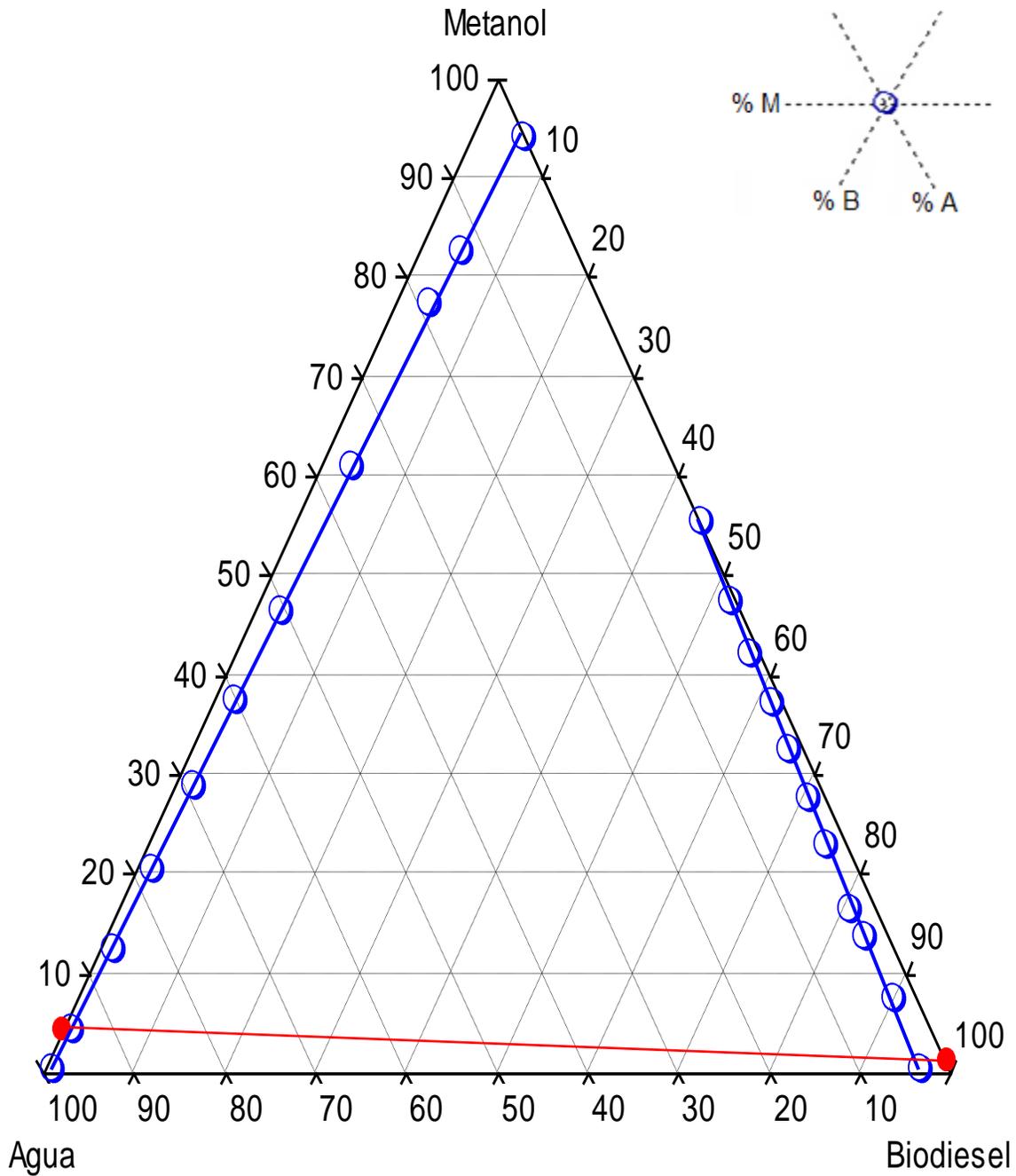
Muestra	Metanol (%)	Biodiesel (%)	Agua (%)	K*
1	10	10	80	4.28336
2	10	40	50	5.44043
3	20	60	20	9.80944
4	30	10	60	10.5545
5	30	40	30	10.1258
6	50	10	40	9.70609
7	60	20	20	9.96283
8	70	20	10	8.80829

* y = Fracción de soluto en agua, x = Fracción de soluto en biodiesel

$$K = y/x$$

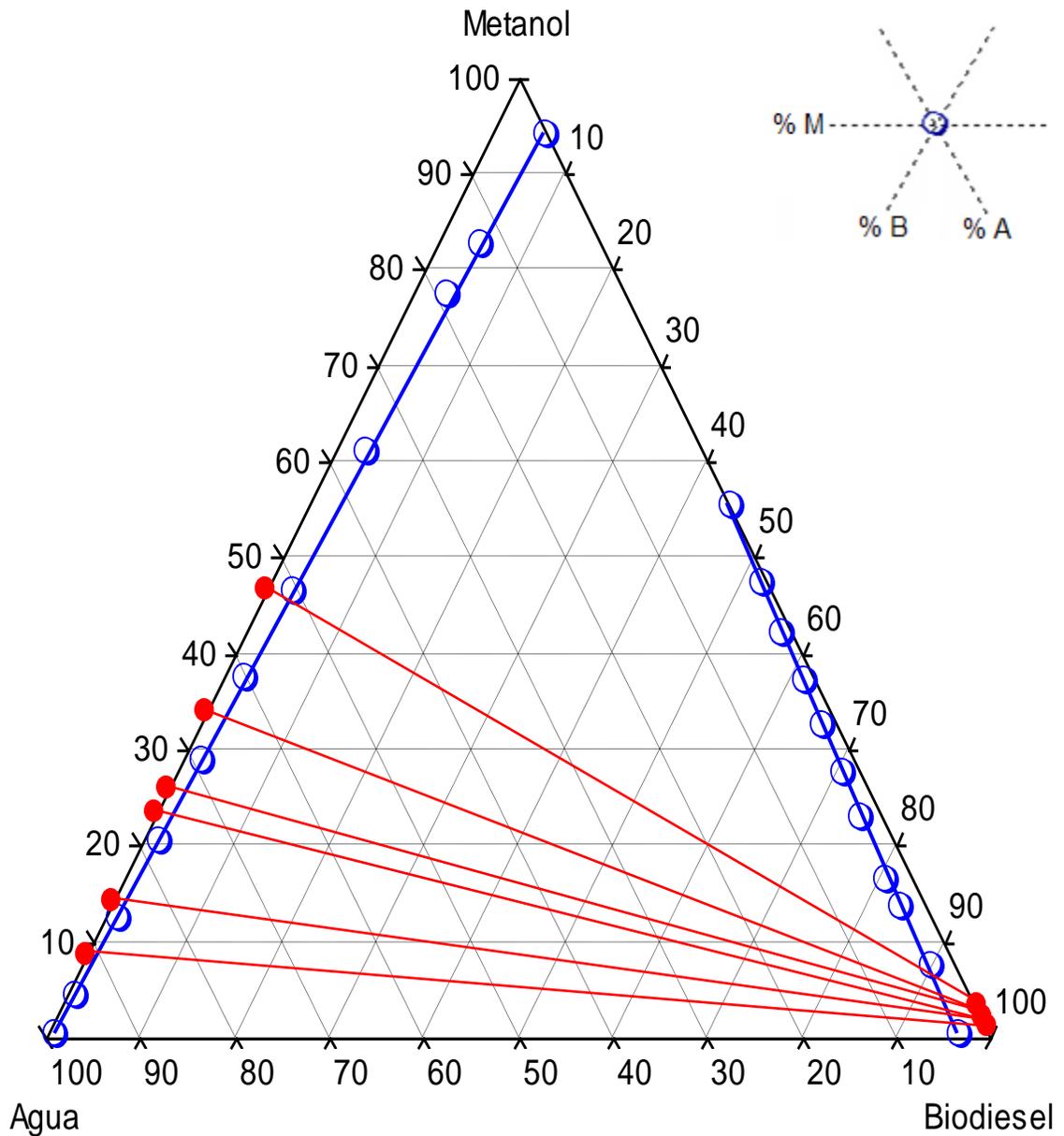
Fuente: Datos calculados. Apéndice 3.

Figura 28. Línea de amarre en el sistema ternario metanol-biodiesel-agua para la especificación de 0.20% en peso máximo de metanol en biodiesel, según la norma EN 14214 a la temperatura de $23 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$



Fuente: Datos calculados. Apéndice 3.

Figura 29. Líneas de amarre para distintas relaciones de mezcla biodiesel:agua en el sistema ternario metanol-biodiesel-agua, para la especificación de 0.20% en peso máximo de metanol en biodiesel, según la norma EN 14214, para una muestra de 40 ml de biodiesel al 10% de metanol, con agitación constante a 350 rpm durante 40 minutos a la temperatura de $23 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$



Fuente: Datos calculados. Apéndice 3.

Tabla X. Resultado del análisis de varianza de un factor, con varios grupos, para la evaluación del grado de diferenciación significativa en el sistema metanol-biodiesel-agua, a partir de soluciones de metanol en agua a la temperatura de $23 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$

Propiedades	CDM _d	CDM _e	F _{10,22}	F _{c10,22}	F > F _c	Conclusión
Índice de refracción	1.67E-07	0.00018	1091.0	2.7000	Si	Existe diferencia significativa
Volumen de biodiesel adicionado	0.00011	0.01893	170.36	2.7000	Si	Existe diferencia significativa

Fuente: Análisis estadístico ANOVA. Apéndice 5.

Tabla XI. Resultado del análisis de varianza de un factor, con varios grupos, para la evaluación del grado de diferenciación significativa en el sistema metanol-biodiesel-agua, a partir de soluciones de metanol en biodiesel a $23 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$

Propiedades	CDM _d	CDM _e	F _{9,20}	F _{c9,20}	F > F _c	Conclusión
Índice de refracción	5.00E-07	0.00354	7087.4	2.8400	Si	Existe diferencia significativa
Volumen de agua adicionado	0.00013	0.00600	43.575	2.8400	Si	Existe diferencia significativa

Fuente: Análisis estadístico ANOVA. Apéndice 5.

Donde:

CDM_d: Cuadrado de medias dentro de las muestras con determinado grado libertad.

CDM_e: Cuadrado de medias entre las muestras con determinado grado libertad.

F: Valor calculado de la función F de cola, con sus respectivos grados libertad.

F_c: Valor crítico de la función, con sus respectivos grados libertad.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Concluida la parte experimental, en el presente trabajo de graduación, se determinaron los datos para la caracterización del sistema ternario en equilibrio líquido-líquido, metanol-biodiesel-agua a temperatura ambiente, de tal manera que, con base en los resultados obtenidos se estableció el coeficiente de partición del soluto (metanol), entre los disolventes biodiesel y agua. Así como también, se determinó si existe diferencia significativa entre los datos experimentales correlacionados para la realización del domo de distribución del sistema a la temperatura analizada. Además, se obtuvo la línea de amarre del sistema para la especificación de 0.20% en peso máximo de metanol en biodiesel, según la norma EN 14214.

Para la obtención de la curva binodal del sistema ternario metanol-biodiesel-agua, se procedió a realizar mezclas para cada sistema binario metanol-agua (5, 15, 25, 35, 45, 55, 70, 85, 90% de metanol) y metanol-biodiesel (8, 15, 18, 25, 30, 35, 40, 45, 50% de metanol) a las cuales se les determinó su densidad, índice de refracción y distribución del soluto (metanol), a las distintas concentraciones de los solventes a 23 ± 1 °C.

Se determinaron las curvas de correlación para la densidad en función de la composición porcentual en peso para cada serie de mezclas binarias de metanol-agua y metanol-biodiesel (sección de resultados, figuras veinte y veintiuno respectivamente) a la temperatura analizada.

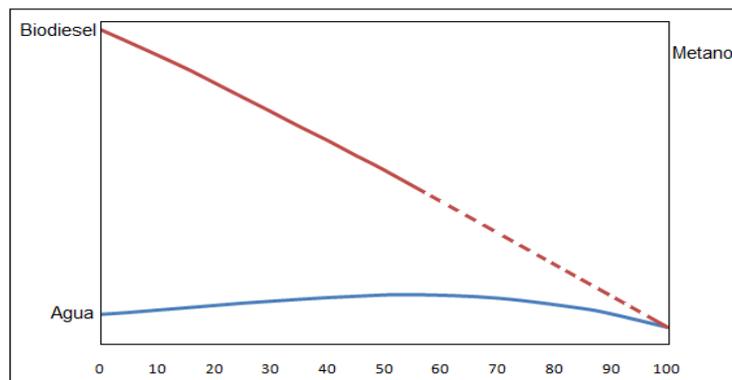
Con los datos de los pesos de las soluciones de metanol-agua y metanol-biodiesel obtenidos experimentalmente a 23 ± 1 °C por medio del método de picnometría, se realizó la determinación de las densidades de las soluciones respectivas las cuales sirvieron para la obtención de las concentraciones reales de porcentaje en peso de las soluciones. A partir de éstas concentraciones y los índices de refracción medidos experimentalmente por medio del método de refractometría se realizaron curvas de correlación del índice de refracción en función de la composición porcentual en peso para cada serie de soluciones de metanol-agua y metanol-biodiesel (sección de resultados, figuras veintidós y veintitrés respectivamente) a la temperatura analizada.

De la sección de resultados, se observa que las figuras veinte y veintiuno para las soluciones binarias metanol-agua y metanol-biodiesel respectivamente, la densidad disminuye al incrementarse la composición porcentual en peso de dichas soluciones, de manera que *la figura veinte se ajusta a una función polinómica de cuarto grado y la figura veintiuno se ajusta a una regresión exponencial, en ambos casos se muestra una relación inversamente proporcional entre la concentración y la densidad.*

En el caso de la figura veintidós, *para las soluciones de metanol-agua a la temperatura analizada, se observa que el índice de refracción aumenta conforme se incrementa la composición porcentual en peso pero luego el índice de refracción disminuye, ajustándose la curva a una función polinómica de cuarto grado;* en la figura veintitrés, *para las soluciones binarias metanol-biodiesel a la temperatura analizada, el índice de refracción disminuye conforme aumenta la concentración porcentual en peso, de manera que se ajusta a una función polinómica de segundo orden, lo cual muestra una relación inversamente proporcional entre la concentración porcentual en peso y el índice de refracción.* (Conclusiones 1 y 2)

Para el sistema metanol-biodiesel-agua, el parámetro de monitoreo del refractómetro (índice de refracción) para las soluciones binarias metanol-agua presenta sensibilidad alta y para las soluciones metanol-biodiesel el monitoreo presenta sensibilidad media, debido a que éstas soluciones binarias no poseen constantes dieléctricas similares (la afinidad entre las moléculas es baja) por lo que la sensibilidad del refractómetro disminuye.

Figura 30. Sensibilidad del parámetro de monitoreo del refractómetro (índice de refracción) para las soluciones binarias metanol-agua y metanol-biodiesel



Fuente: Resultados, figuras 22 y 23.

Se comparó el grado de respuesta de variación del parámetro de monitoreo (índice de refracción) medido con el refractómetro para los sistemas ternarios de trabajos de graduación estudiados anteriormente, en la siguiente tabla se observa que las soluciones que presentan mayor sensibilidad en la medición de índice de refracción son las preparadas con agua, ya que éstas poseen mayor afinidad entre sus moléculas por su naturaleza polar, siendo la solución de glicerol-agua la que presentó mayor sensibilidad debido a su naturaleza altamente polar por sus enlaces de hidrógeno, por lo mismo al aumentar la concentración de glicerol, la solución se hace más densa y la velocidad de onda de luz es menor por lo que la sensibilidad es notable.

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

ΔIR	Acetona / agua	IPA / agua	Limoneno / etanol	Cardamomo / (IPA/agua) _{50%}	Glicerol / agua	Metanol / agua
Acetona / hexano	++ +					
IPA / hexano		+ +				
Limoneno / hexano			-- -			
Cardamomo / benceno				++ --		
Glicerol / biodiesel					+++ ---	
Metanol / biodiesel						++ +

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

Fuente: Referencias bibliográficas 1, 2, 8, 13 y 16.

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

Con los datos obtenidos del volumen adicionado en la titulación de las distintas soluciones se procedió a determinar la composición porcentual de las mezclas ternarias; con estos resultados se hizo la representación de la curva binodal del sistema a la temperatura analizada.

En la figura veinticuatro se observa la alta afinidad molecular del metanol en agua y muestra que el soluto, metanol, es soluble en agua en toda proporción. En el caso de la figura veinticinco, el metanol muestra moderada afinidad molecular en biodiesel y se observa que el límite de solubilidad del metanol en biodiesel es de 55%.

La curva de equilibrio de inmiscibilidad del sistema ternario metanol-biodiesel-agua (figura veintiséis) se realizó uniendo las figuras veinticuatro y veinticinco, en la cual se muestra que el sistema metanol-biodiesel-agua a la temperatura analizada *pertenece a la clasificación de sistemas ternarios tipo II, según la clasificación de Treybal, por lo que se acepta la hipótesis nula* (Conclusión 3), en donde hay dos pares de líquidos parcialmente miscibles.

Por lo cual, se observa que existe mayor afinidad entre el metanol y el agua, que entre el metanol y el biodiesel (Conclusión 4), debido a esto, se requiere un gasto mayor de biodiesel para romper las fuerzas intermoleculares que existen entre el metanol y el agua.

A partir de la curva de equilibrio de inmiscibilidad del sistema ternario metanol-biodiesel-agua, se procedió a determinar el punto de pliegue a la temperatura analizada, para ello se seleccionaron puntos al azar dentro de la curva binodal que posteriormente se analizaron y se obtuvieron datos de índices de refracción; con dichos resultados se obtuvieron los porcentajes de metanol en la fase de agua y en la fase de biodiesel.

Al determinar dichos porcentajes, se procedió a graficar los datos de porcentaje de metanol en fase de biodiesel contra los datos de porcentaje de metanol en fase de agua, junto con una línea de pendiente 1, obteniéndose de esta manera la curva de distribución para el sistema metanol-biodiesel-agua.

Luego, se proyectaron los puntos de cada línea de unión en cada fase desde el diagrama triangular hacia la curva de distribución obtenida. Los porcentajes de metanol en agua se localizan en la curva de distribución y los porcentajes de metanol 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, debido a que en este punto el porcentaje de metanol en biodiesel es igual al porcentaje de metanol en agua. Este punto se proyecta a la gráfica triangular, para obtener la composición de la mezcla ternaria que indica el punto de solubilidad límite (Apéndice 4).

El punto de pliegue experimental obtenido para el sistema ternario metanol-biodiesel-agua a la temperatura de 23 ± 1 °C fue de 14% de metanol, 84% de biodiesel y 2% de agua (Conclusión 5). En la figura veintisiete se muestra la curva de distribución a la temperatura analizada.

Se determinó el coeficiente de distribución para cada punto reproducido, el cual se obtuvo al dividir el porcentaje de metanol en la fase de agua en el porcentaje de metanol en la fase de biodiesel, los datos experimentales obtenidos son mayores a uno, lo que indica que la curva de distribución se representa en la parte inferior de la curva de pendiente 1. Además estos valores implican que se requiere menos disolvente, en este caso agua, para llevar a cabo la extracción de metanol en el biodiesel.

En la figura veintiocho se observa la línea de amarre correspondiente a la especificación de 0.20% en peso máximo de metanol en biodiesel según la norma EN 14214 a la temperatura de 23 ± 1 °C; en la que se determinó gráficamente que *la concentración al equilibrio de metanol en agua para dicha especificación fue de 96% en peso* (Conclusión 6).

En la figura veintinueve, se observan las líneas de amarre para las distintas relaciones de biodiesel:agua correspondientes a la especificación de la norma EN 14214 mencionada anteriormente; en ésta curva de equilibrio de inmiscibilidad se demuestra que *es factible utilizar una relación 10:1 de biodiesel:agua para el lavado de biodiesel*, ya que los coeficientes de partición obtenidos (mayores a la unidad) indican que el agua es un excelente disolvente extractor de metanol en el biodiesel, por lo que los costos del proceso son minimizados y se reduce el impacto ambiental en materia de uso de agua para llevar a cabo esta operación indispensable.

De la misma manera, se determinó que *la cantidad óptima de ciclos de lavado son tres (Datos Calculados, tabla XXXIV), siendo suficientes para la eliminación del metanol (relación 10:1) para que se cumpla la especificación establecida, y el lavado de biodiesel se debe realizar con agitación constante de 350 a 400 rpm durante un período de tiempo de 25 minutos* (Conclusión 7).

Se realizó un análisis estadístico a través del método de ANOVA o análisis de varianza de un tratamiento con varios grupos, con el cual se determinó si existe o no variabilidad significativa entre cada una de las propiedades de las muestras analizadas necesarias para la construcción del domo de solubilidad para el sistema metanol-biodiesel-agua. Se hicieron dos análisis, uno para las soluciones binarias metanol-agua tituladas con biodiesel y otro para las soluciones binarias metanol-biodiesel tituladas con agua.

En el caso del primer análisis, para el índice de refracción se obtuvo un valor de F calculada de 1091 y para el volumen de biodiesel adicionado el F calculada es de 170. El valor teórico de F para estos análisis es de 2.70, debido a que F calculada para ambas muestras es mayor que la F teórica cuando se trata con *el índice de refracción y las soluciones binarias metanol-agua tituladas con biodiesel existe diferencia significativa cuando se varía la concentración en peso del metanol en agua* (Conclusión 8).

De la misma manera, para el segundo análisis el índice de refracción obtuvo un valor de F calculada de 7087 y para el volumen de agua adicionada el F calculada es de 44. El valor teórico de F para estos análisis es de 2.84, debido a que F calculada para ambas muestras es mayor que la F teórica cuando se trata con *el índice de refracción y las soluciones binarias metanol-biodiesel tituladas con agua existe variabilidad significativa cuando se varía la concentración en peso del metanol en biodiesel* (Conclusión 9).

Se realizó un análisis sobre el impacto ambiental que pudo ser generado durante la presente investigación (Tabla LI), en la cual los aspectos ambientales que se tomaron en consideración fueron el aire, agua, suelo, biodiversidad, lo visual y social. Pero durante el desarrollo de ésta se determinó que los aspectos ambientales que influyeron de forma significativa fueron el aire, agua y suelo. Con respecto al aire, para mitigar el impacto ambiental de los gases que se generaron durante el experimento, se utilizó la campana de extracción de gases; el impacto ambiental provocado por el suministro de agua se minimizó utilizándola de manera racional, exclusivamente para cubrir las necesidades de la investigación y además (para los aspectos ambientales agua y suelo) se hizo el manejo adecuado de desechos líquidos para que el impacto no fuera significativo. En general *se realizaron todas las actividades de la investigación procurando causar el mínimo impacto ambiental* (Conclusión 10).

CONCLUSIONES

1. Para las soluciones binarias de metanol en agua, las correlaciones no lineales para el índice de refracción y densidad en función de la concentración porcentual en peso, resultaron en funciones polinómicas de cuarto orden respectivamente a la temperatura de 23 ± 1 °C.
2. Para las soluciones binarias de metanol en biodiesel, las correlaciones no lineales para la densidad e índice de refracción en función de la concentración porcentual en peso, resultaron en funciones exponencial y polinómica de segundo orden inversamente proporcionales respectivamente, hasta un 55% a la temperatura de 23 ± 1 °C.
3. El sistema metanol-biodiesel-agua pertenece a la clasificación de sistemas ternarios tipo II, según la clasificación de Treybal. Por lo que se acepta la hipótesis nula.
4. Las gráficas del sistema ternario metanol-biodiesel-agua muestran que existe mayor afinidad entre el metanol y el agua, que entre el metanol y el biodiesel.
5. El punto de pliegue experimental obtenido para el sistema ternario metanol-biodiesel-agua a la temperatura de 23 ± 1 °C fue de 14% de metanol, 84% de biodiesel y 2% de agua.

6. La línea de amarre para el sistema ternario metanol-biodiesel-agua para cumplimiento de la especificación de 0.20% en peso máximo de metanol en biodiesel, según la norma EN 14214, corresponde a 96% de metanol en agua a la temperatura de 23 ± 1 °C.
7. Es factible utilizar una relación de lavado del metanol 10:1 de biodiesel:agua, con tres ciclos de lavado para que se cumpla la especificación de metanol residual según la norma EN 14214, durante 25 minutos por ciclo con agitación constante y a una velocidad de 350 rpm.
8. Según el análisis de varianza, ANOVA, el índice de refracción y las soluciones binarias de metanol en agua tituladas con biodiesel implica que existe diferencia significativa cuando se varía la concentración en peso del metanol en agua.
9. Según el análisis de varianza, ANOVA, el índice de refracción y las soluciones binarias de metanol en biodiesel tituladas con agua implica que existe diferencia significativa cuando se varía la concentración en peso del metanol en biodiesel.
10. Todas las actividades realizadas en la presente investigación se ejecutaron procurando causar el mínimo impacto ambiental, en el aspecto ambiental del suelo, agua y aire.

RECOMENDACIONES

1. Realizar un estudio de la distribución de solubilidad del etanol/IPA en agua y biodiesel, para determinar la caracterización del equilibrio de inmiscibilidad de sus respectivos sistemas ternarios.
2. Realizar un estudio del sistema cuaternario (glicerol/alcohol)-biodiesel-agua, con el alcohol más eficiente para el lavado del biodiesel y de esta manera disponer de la suficiente certeza para realizar el refinado completo del biodiesel.
3. Realizar un estudio de los sistemas de lavado del biodiesel con coadyuvante de salinidad.
4. Realizar estudios del residuo de jabón producido como subproducto no deseado y que reduce la eficiencia de producción del biodiesel.

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 de Ing. Química. Guatemala, USAC, Facultad de Ingeniería, 2006, págs. 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 de Ing. Química. Guatemala, USAC, Facultad de Ingeniería, 2005, págs. 3-11.
3. Amézquita, Marcos David y García Prado, Romel Alaric. Potencial que tiene Guatemala para producir biodiesel. Trabajo de graduación de Ing. Química. Guatemala, USAC, Facultad de Ingeniería, 2005, págs. 105-112.
4. Cordero López, Jorge 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 de Ing. Química. Guatemala, USAC, Facultad de Ingeniería, 2003, págs. 21-97.

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 de Ing. Mecánica Industrial. Guatemala, USAC, Facultad de Ingeniería, 2004, págs. 27-42.
6. Geankoplis, Christie J. **Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias**. 3ª ed. México: Continental, 1998, págs. 785-787.
7. Henley, Ernest J. y Seader, J.D. **Operaciones de Separación por Etapas de Equilibrio en Ingeniería Química**. España: Reverté, 1990, págs. 95-151 y 449.
8. Hernández Castellanos, María Gabriela y García Guerra, César Alfonso. Estudio para la generación de datos experimentales a nivel de laboratorio del sistema ternario glicerol-biodiesel-agua en equilibrio líquido-líquido a dos temperaturas y 640 mm Hg. Trabajo de graduación de Ing. Química. Guatemala, USAC, Facultad de Ingeniería, 2008, págs. 1-147.
9. Kirk, Raymond E. **Enciclopedia de Tecnología Química, Tomo VII**. México: Hispano-Americana, págs. 746-770.
10. Laidler, Keith y Meiser, John. **Fisicoquímica**. 2ª ed. México: Continental, 1998, págs. 220-248.
11. 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 de Ing. Química. Guatemala, USAC, Facultad de Ingeniería, 2003, págs. 1-20.

12. Miller, J.C. **Estadística para Química Analítica**. 2ª ed. USA: Addison-Wesley Iberoamericana, 1993, págs. 51-55.
13. 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 de Ing. Química. Guatemala, USAC, Facultad de Ingeniería, 2003, págs. 1-6.
14. Perry, Robert. **Manual del Ingeniero Químico, Tomo III**. 7ª ed. México: McGraw-Hill, 1993, págs. 15-1 al 15-26.
15. 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 mm Hg. Trabajo de graduación de Ing. Química. Guatemala, USAC, Facultad de Ingeniería, 2007.
16. 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 de Ing. Química. Guatemala, USAC, Facultad de Ingeniería, 2003, págs. 1-27.
17. Romano, Silvia Daniela. **Combustibles alternativos**. Argentina: Ediciones Cooperativas, 2005, págs. 11-88.

18. Treybal, Robert E. **Liquid extraction.** 2^a ed. USA: McGraw-Hill, 1963, págs. 1-28.

19. Treybal, Robert E. **Operaciones de transferencia de masa.** 2^a ed. México: McGraw-Hill, 2000, págs. 529-542.

20. Zorrilla A. Santiago y Torres X. Miguel. **Guía para elaborar la tesis.** 2^a ed. México: McGraw-Hill, 2005, págs. 4-87.

REFERENCIAS ELECTRÓNICAS

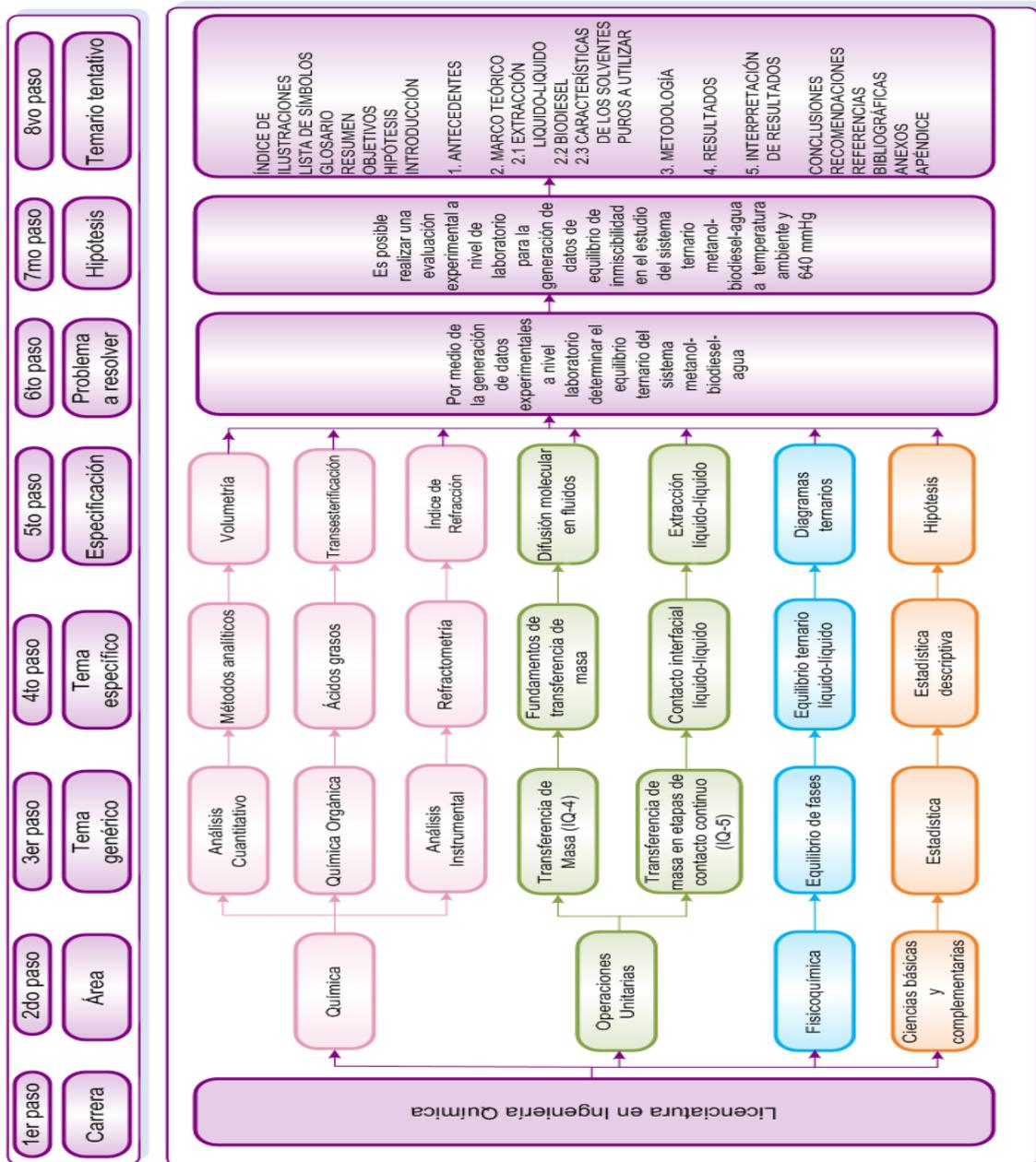
21. **Propiedades y características de combustibles diesel y biodiesel.** 15 de marzo de 2008. <http://www.fiagro.org.sv/archivos/0/997.pdf>
22. Acción Directa de Whitman. **Biodiesel: producción y aplicaciones.** 15 de marzo de 2008.
[http://www.whitmandirectaction.org/downloads/documents/biodieselguide\(espagnol\).pdf](http://www.whitmandirectaction.org/downloads/documents/biodieselguide(espagnol).pdf)
23. 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.cl/publicaciones/xml/3/29423/L791-2.pdf>
24. Universidad Autónoma de Madrid. **Extracción líquido-líquido.** 18 de marzo de 2008.
http://www.uam.es/personal_pdi/ciencias/mgilarra/experimentacionIQII/ExtraccLiqLiq2006.pdf
25. Jaramillo García, Jaime. **Glosario del ingeniero químico.** 18 de marzo de 2008. <http://www.elprisma.com/apuntes/curso.asp?id=13917>

26. **Planta de Biodiesel Mazat Aguí.** 4 de diciembre de 2008.
<http://www.deguate.com/artman/publish/noticias-guatemala/inauguran-planta-de-biodiesel-en-escuintla.shtml>
27. Girón, Rudy. **Biopersa.** 2009. <http://www.biopersa.com/>
28. El Periódico. **La idea de Alejandro.** 11 de enero de 2009.
<http://www.elperiodico.com.gt/es/20090111/domingo/85991>
29. Journey to Forever. **Biodiesel.** Julio 2003.
<http://Journeytoforever.org/biofuel.library/EthylMethylEster.html>.
30. BioDiesel Content On-board monitoring. **Constante dieléctrica del biodiesel.** 6 de agosto de 2008.
http://www1.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/pdfs/deer_2008/session8/deer08_fournel.pdf
31. Metanol. **Propiedades físicas y químicas del metanol.** 10 de septiembre 2009. <http://es.wikipedia.org/wiki/Metanol>
32. Metanol. **Constante dieléctrica del metanol.** 22 de junio de 2009.
http://es.wikipedia.org/wiki/Polaridad_de_un_disolvente
33. Sede Bogotá DNSAV. **Adhesión y cohesión.** 1 de junio de 2008.
http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/ciencias/2000051/lecciones/cap01/06_08.htm
34. Tensión superficial dinámica del biodiesel. **Tensión superficial.** Año 2004.
<http://www.unicen.edu.ar/crecic/analesafa/vol16/c4-98-101.pdf>

35. Azeotropía del etanol. **Destilación azeotrópica**. 31 de agosto de 2009.
http://es.wikipedia.org/wiki/Destilaci%C3%B3n_azeotr%C3%B3pica
36. Química Industrial. **Destilación**. 1998.
http://html.rincondelvago.com/quimica-industrial_2.html
37. Rectificación de mezclas binarias. **Diagrama de equilibrio líquido-vapor del sistema metanol-agua a 1 atm**. 1999.
http://webs.uvigo.es/prosepav/practicas/p1_Rectificacion.pdf
38. Incineración de solventes orgánicos. **Incineración de glicerina**. 2010.
http://www.bluer.es/Aplicaciones/Incineracion_glicerina.htm
39. Manejo de solventes y aceites gastados. **Incineración como alternativa de tratamiento de desechos de solventes**. 15 de noviembre de 2007.
<http://www2.ine.gob.mx/publicaciones/libros/35/manejo.html>

ANEXO 1

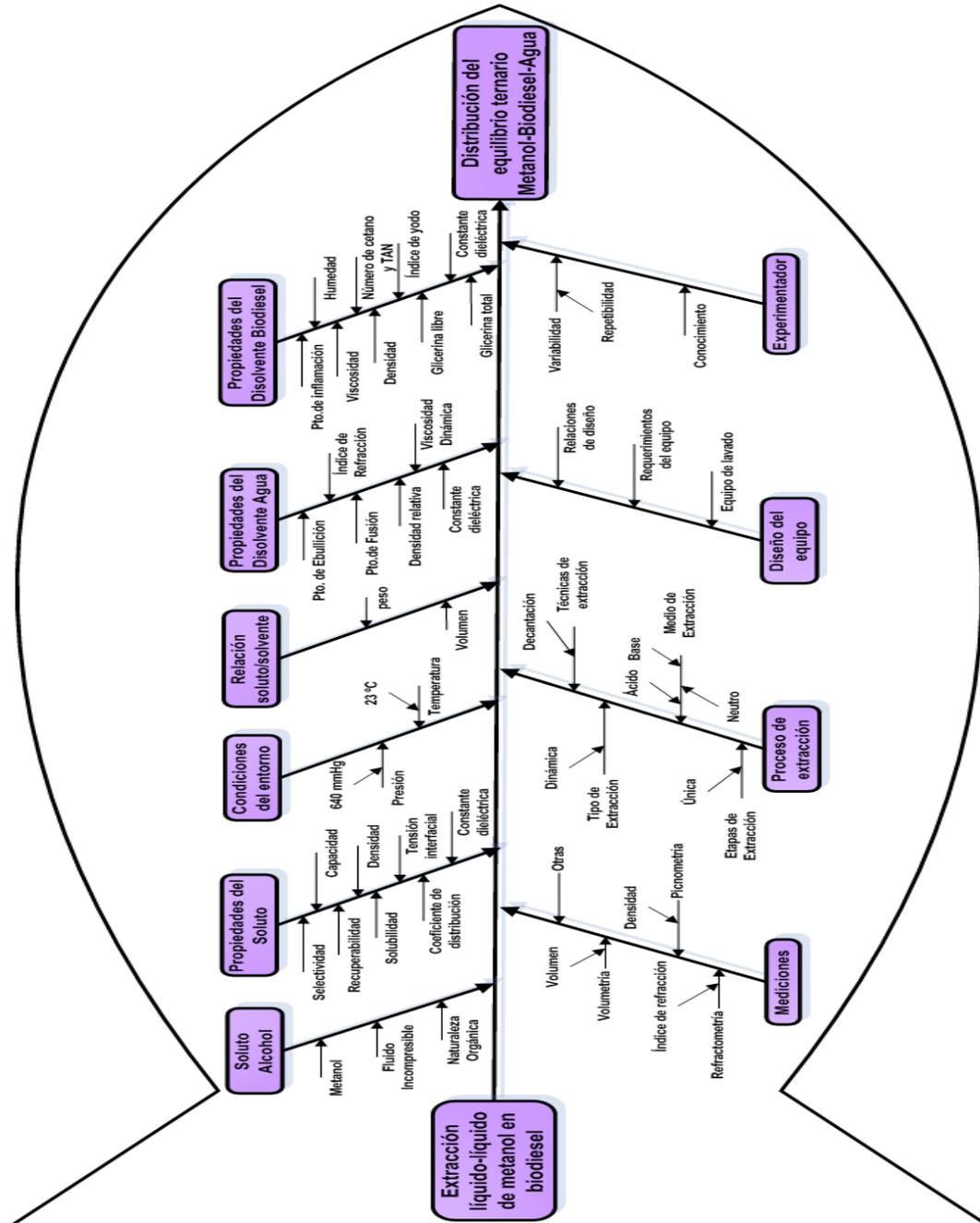
Figura 31. Requerimiento académico para la elaboración del trabajo de graduación de extracción líquido-líquido en la carrera de Ingeniería Química



Fuente: Referencia 20.

ANEXO 2

Figura 32. Diagrama de causa y efecto para determinar las variables en un proceso de extracción líquido-líquido



Fuente: Metodología.

APÉNDICE 1

DATOS ORIGINALES

Tabla XIII. Pesos de las soluciones de metanol-agua, obtenidos a la temperatura de 23 ± 1 °C

Concentración Nominal (% en peso)	Peso solución (g)		
	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3
0	45.375	45.376	45.376
5	45.180	45.181	45.181
15	44.823	44.823	44.825
25	44.479	44.481	44.479
35	44.120	44.122	44.119
45	43.769	43.765	43.776
55	43.228	43.231	43.228
70	42.375	42.379	42.375
85	41.331	41.331	41.333
90	40.968	40.964	40.972
100	40.180	40.184	40.180

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

Tabla XIV. Pesos de las soluciones de metanol-biodiesel, obtenidos a la temperatura de 23 ± 1 °C

Concentración Nominal (% en peso)	Peso solución (g)		
	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3
0	42.442	42.440	42.440
8	42.281	42.281	42.281
15	42.099	42.110	42.110
18	42.010	42.010	42.000
25	41.858	41.865	41.865
30	41.731	41.721	41.721
35	41.622	41.632	41.632
40	41.518	41.524	41.524
45	41.414	41.414	41.420
50	41.265	41.265	41.264
100	40.180	40.184	40.180

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

Tabla XV. Valores de los índices de refracción, obtenidos para las soluciones de metanol-agua a la temperatura de 23 °C

Concentración Nominal (% en peso)	Índice de refracción (n)		
	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3
0	1.3330	1.3330	1.3330
5	1.3335	1.3340	1.3340
15	1.3360	1.3355	1.3360
25	1.3380	1.3380	1.3375
35	1.3395	1.3395	1.3395
45	1.3410	1.3410	1.3405
55	1.3415	1.3415	1.3415
70	1.3400	1.3400	1.3400
85	1.3355	1.3355	1.3355
90	1.3335	1.3330	1.3330
100	1.3270	1.3275	1.3275

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

Tabla XVI. Valores de los índices de refracción, obtenidos para las soluciones de metanol-biodiesel a la temperatura de 24 °C

Concentración Nominal (% en peso)	Índice de refracción (n)		
	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3
0	1.4545	1.4545	1.4545
8	1.4460	1.4455	1.4460
15	1.4380	1.4375	1.4385
18	1.4345	1.4345	1.4340
25	1.4260	1.4255	1.4255
30	1.4195	1.4190	1.4200
35	1.4130	1.4130	1.4135
40	1.4075	1.4070	1.4070
45	1.4010	1.4000	1.4010
50	1.3940	1.3945	1.3950
100	1.3275	1.3273	1.3270

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

Tabla XVII. Datos de los volúmenes de biodiesel adicionados, para titular alícuotas de 3 ml de soluciones de metanol-agua a la temperatura de 23 ± 1 °C

Concentración Nominal (% en peso)	Volumen de Biodiesel (ml)		
	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3
0	0.040	0.030	0.040
5	0.040	0.050	0.050
15	0.060	0.060	0.050
25	0.070	0.060	0.060
35	0.080	0.080	0.070
45	0.090	0.080	0.090
55	0.100	0.090	0.100
70	0.110	0.110	0.110
85	0.120	0.130	0.120
90	0.150	0.150	0.140
100	0.180	0.180	0.170

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

Tabla XVIII. Datos de los volúmenes de agua adicionados, para titular alícuotas de 3 ml de soluciones de metanol-biodiesel a la temperatura de 23 ± 1 °C

Concentración Nominal (% en peso)	Volumen de Agua (ml)		
	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3
0	0.100	0.080	0.100
8	0.080	0.070	0.070
15	0.070	0.080	0.080
18	0.080	0.080	0.090
25	0.070	0.060	0.070
30	0.060	0.050	0.050
35	0.050	0.040	0.040
40	0.040	0.030	0.030
45	0.030	0.030	0.020
50	0.020	0.020	0.020

Fuente: Unidad de titulación. 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 la temperatura de 24 °C

Muestra	Metanol (%)	Biodiesel (%)	Agua (%)	Índice de refracción (n)			
				Fase	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3
1	10	10	80	Biodiesel	1.4535	1.4530	1.4530
				Agua	1.3355	1.3350	1.3350
2	10	40	50	Biodiesel	1.4530	1.4530	1.4530
				Agua	1.3360	1.3360	1.3360
3	20	60	20	Biodiesel	1.4520	1.4520	1.4520
				Agua	1.3415	1.3415	1.3415
4	30	10	60	Biodiesel	1.4530	1.4530	1.4525
				Agua	1.3400	1.3400	1.3395
5	30	40	30	Biodiesel	1.4525	1.4525	1.4520
				Agua	1.3410	1.3410	1.3410
6	50	10	40	Biodiesel	1.4520	1.4520	1.4520
				Agua	1.3415	1.3410	1.3410
7	60	20	20	Biodiesel	1.4510	1.4510	1.4510
				Agua	1.3385	1.3385	1.3385
8	70	20	10	Biodiesel	1.4480	1.4485	1.4480
				Agua	1.3370	1.3370	1.3370

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

Tabla XX. Índices de refracción obtenidos para las distintas relaciones mezcla biodiesel:agua para una muestra de 40 ml de biodiesel con 10% de metanol, con agitación constante a 350 rpm y durante un tiempo de 40 minutos a la temperatura de 23 ± 1 °C

Volumen agua (ml)	Relación Biodiesel:Agua	Índice de refracción Fase agua	Índice de refracción Fase biodiesel
2	20:1	1.3413	1.4520
4	10:1	1.3405	1.4525
8	5:1	1.3388	1.4528
16	2.5:1	1.3362	1.4527
32	1.25:1	1.3348	1.4530
40	1:1	1.3340	1.4538

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

Tabla XXI. Índices de refracción obtenidos para los distintos ciclos de lavado de biodiesel para una muestra de 50 ml de biodiesel con 10% de metanol, con agitación constante a 350 rpm y durante un tiempo de 25 minutos a 23 ± 1 °C

Ciclo	Índice de refracción Fase agua	Índice de refracción Fase biodiesel
1	1.3385	1.4530
2	1.3345	1.4542
3	1.3335	1.4548
4	1.3333	1.4549

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

APÉNDICE 2

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 metanol-agua al 5% (peso de solución + peso del picnómetro) a 23 ± 1 °C.

$$\bar{X} = \frac{45.1800 \text{ g} + 45.1810 \text{ g} + 45.1810 \text{ g}}{3} = 45.1807 \text{ g}$$

- 1.2 Cálculo de la media aritmética de los índices de refracción medidos para la solución binaria de metanol-agua al 5% a 23 °C.

$$\bar{X} = \frac{1.3335 + 1.3340 + 1.3340}{3} = 1.3338$$

- 1.3 Cálculo de la media aritmética de los volúmenes de agua adicionados a la solución binaria de metanol-biodiesel al 8% a 23 ± 1 °C.

$$\bar{X} = \frac{0.0800 \text{ ml} + 0.0700 \text{ ml} + 0.0700 \text{ ml}}{3} = 0.0733 \text{ ml}$$

Los resultados para las siguientes corridas de la media aritmética de los pesos de las soluciones binarias, índices de refracción y volúmenes de adición de los solventes 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

P_2 : Peso de la solución, más el peso inicial del picnómetro

V_1 : Volumen del picnómetro (25 ml)

- 2.1 Cálculo de la densidad de la solución binaria metanol-agua al 5% a 23 ± 1 °C.

$$\rho = \frac{(45.1807 \text{ g} - 20.4470 \text{ g})}{25 \text{ ml}} = 0.9893 \text{ g / ml}$$

Los resultados para las siguientes corridas de las soluciones binarias metanol-agua y metanol-biodiesel se presentan en la sección de datos calculados.

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

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

Donde:

ρ_{met} : Densidad del metanol a la temperatura analizada (g/ml)

V_{sol} : Volumen de la solución preparada (60 ml)

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

x : Fracción volumen del metanol en la solución (% en peso nominal)

- 3.1 Cálculo de la concentración real de la solución binaria metanol-biodiesel al 8% a 23 ± 1 °C.

$$C = \frac{(0.7894 \text{ g/ml})(60 \text{ ml})(0.0800)}{(0.8734 \text{ g/ml})(60 \text{ ml})} * 100 = 7.2302\%$$

Los resultados para las siguientes corridas de las soluciones binarias metanol-agua y metanol-biodiesel se presentan en la sección de datos calculados.

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

Se determinaron ploteando los índices de refracción contra las concentraciones de metanol 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 en función de la concentración (porcentaje en peso) con su coeficiente de correlación, para las soluciones de metanol-agua a 23 °C.

$$n = 1E - 10C^4 - 6E - 08C^3 + 3E - 06C^2 + 0.0001C + 1.333$$
$$R^2 = 0.9998$$

- 4.2 La ecuación de correlación del índice de refracción en función de la concentración (porcentaje en peso) con su coeficiente de correlación, para las soluciones de metanol-biodiesel a 24 °C.

$$n = -1E - 06C^2 - 0.0011C + 1.4550$$
$$R^2 = 0.9999$$

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 metanol-agua y metanol-biodiesel, se presentan en la sección de datos calculados.

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

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

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

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

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

Donde:

M_t : Masa total de la mezcla ternaria

V_2 : Volumen del solvente de adición (biodiesel o agua)

ρ_2 : Densidad del solvente de adición

V_1 : Volumen de alícuota de la solución a titular

ρ_{sol} : Densidad de la solución a titular

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

ρ_{met} : Densidad del soluto (metanol)

5.1 Cálculo de la composición porcentual en peso de la mezcla ternaria formada, para la solución metanol-agua al 5%, titulada con biodiesel, a 23 ± 1 °C.

$$M_t = (0.0467 \text{ ml})(0.8797 \text{ g / ml}) + (3.0000 \text{ ml})(0.9893 \text{ g / ml}) = 3.0091 \text{ g}$$

$$\% \text{ metanol} = \frac{(0.0500)(3.0000 \text{ ml})(0.7894 \text{ g / ml})}{3.0091 \text{ g}} * 100 = 3.9349\%$$

$$\% \text{ biodiesel} = \frac{(0.0467 \text{ ml})(0.8797 \text{ g / ml})}{3.0091 \text{ g}} * 100 = 1.3644\%$$

$$\% \text{ agua} = \frac{(3.0000 \text{ ml})(0.9893 \text{ g / ml}) - (0.0500)(3.000 \text{ ml})(0.7894 \text{ g / ml})}{3.0091 \text{ g}} * 100 = 94.70\%$$

5.2 Cálculo de la composición porcentual en peso de la mezcla ternaria formada, para la solución metanol-biodiesel al 8%, titulada con agua, a 23 ± 1 °C.

$$M_t = (0.0733 \text{ ml})(0.9972 \text{ g / ml}) + (3.0000 \text{ ml})(0.8734 \text{ g / ml}) = 2.6934 \text{ g}$$

$$\% \text{ metanol} = \frac{(0.0800)(3.0000 \text{ ml})(0.7894 \text{ g / ml})}{2.6934 \text{ g}} * 100 = 7.0339\%$$

$$\% \text{ agua} = \frac{(0.0733 \text{ ml})(0.9972 \text{ g / ml})}{2.6934 \text{ g}} * 100 = 2.7150\%$$

$$\% \text{ biodiesel} = \frac{(3.0000 \text{ ml})(0.8734 \text{ g / ml}) - (0.0800)(3.000 \text{ ml})(0.7894 \text{ g / ml})}{2.6934 \text{ g}} * 100 = 90.25\%$$

Los resultados de las siguientes corridas de las composiciones porcentuales en peso de las mezclas ternarias formadas con cada solución 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 metanol-biodiesel, a la temperatura analizada, de esta manera 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 metanol-agua, a la temperatura analizada, de esta manera se obtiene la composición porcentual en peso.

7.1 Cálculo de la composición de metanol en la fase de biodiesel formada para la mezcla ternaria 1 (10% metanol, 10% biodiesel, 80% agua) a 24 °C.

$$1.4532 = -1E - 06C^2 - 0.0011C + 1.4550$$

Despejando C de la ecuación anterior, se obtiene:

$$C = 1.6339\%$$

7.2 Cálculo de la composición de metanol en la fase de agua formada para la mezcla ternaria 1 (10% metanol, 10% biodiesel, 80% agua) a 24 °C.

$$1.3352 = 1E - 10C^4 - 6E - 08C^3 + 3E - 06C^2 + 0.0001C + 1.333$$

Despejando C de la ecuación anterior, se obtiene:

$$C = 16.4695\%$$

Los resultados de las siguientes capas conjugadas de las composiciones porcentuales en peso de las mezclas ternarias, a la temperatura de estudio analizada 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 (Apéndice 4) se procede a la obtención de la curva de distribución, graficando los datos de % de metanol en fase biodiesel vs. % de metanol 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 metanol en biodiesel se localizan en la curva de distribución y los de % de metanol en agua se localizan en la línea de 45°. El punto de pliegue será la composición para la cual, la curva de distribución intercepte a la línea de 45° (% metanol en extracto = % metanol 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 metanol en fase agua

x : Concentración al equilibrio de metanol en fase biodiesel

10.1 Cálculo del coeficiente de distribución para los datos obtenidos de la mezcla 1 (10% metanol, 10% biodiesel, 80% agua) a 24 °C.

$$k = \frac{16.4695\%}{1.6339\%} = 10.0799$$

Los resultados de las siguientes corridas de las soluciones ternarias a la temperatura analizada se presentan en la sección de datos calculados.

APÉNDICE 3

DATOS CALCULADOS

Tabla XXII. Pesos del picnómetro, índices de refracción y volúmenes de titulación promedio, para las soluciones de metanol en agua a la temperatura de 23 ± 1 °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	45.3757	0.0009	1.3330	0.0000	0.0367	0.0094
5	45.1807	0.0009	1.3338	0.0005	0.0467	0.0094
15	44.8237	0.0019	1.3358	0.0005	0.0567	0.0094
25	44.4797	0.0019	1.3378	0.0005	0.0633	0.0094
35	44.1203	0.0024	1.3395	0.0000	0.0767	0.0094
45	43.7700	0.0085	1.3408	0.0005	0.0867	0.0094
55	43.2290	0.0028	1.3415	0.0000	0.0967	0.0094
70	42.3763	0.0038	1.3400	0.0000	0.1100	0.0000
85	41.3317	0.0019	1.3355	0.0000	0.1233	0.0094
90	40.9680	0.0057	1.3332	0.0005	0.1467	0.0094
100	40.1813	0.0038	1.3273	0.0005	0.1767	0.0094

Fuente: Apéndices 1 y 2.

Tabla XXIII. Pesos del picnómetro, índices de refracción y volúmenes de titulación promedio, para las soluciones de metanol en biodiesel a la temperatura de 23 ± 1 °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	42.4407	0.0019	1.4545	0.0000	0.0933	0.0189
8	42.2810	0.0000	1.4458	0.0005	0.0733	0.0094
15	42.1063	0.0104	1.4380	0.0007	0.0767	0.0094
18	42.0067	0.0094	1.4343	0.0005	0.0833	0.0094
25	41.8627	0.0066	1.4257	0.0005	0.0667	0.0094
30	41.7243	0.0094	1.4195	0.0007	0.0533	0.0094
35	41.6287	0.0094	1.4132	0.0005	0.0433	0.0094
40	41.5220	0.0057	1.4072	0.0005	0.0333	0.0094
45	41.4160	0.0057	1.4007	0.0009	0.0267	0.0094
50	41.2647	0.0009	1.3945	0.0007	0.0200	0.0000

Fuente: Apéndices 1 y 2.

Tabla XXIV. Datos de las densidades promedio de las soluciones binarias de metanol-agua a la temperatura de 23 ± 1 °C

Concentración Nominal (% en peso)	Densidad (g/ml)
0	0.9972
5	0.9893
15	0.9751
25	0.9613
35	0.9469
45	0.9329
55	0.9113
70	0.8772
85	0.8354
90	0.8208
100	0.7894

Fuente: Apéndices 1 y 2.

Tabla XXV. Datos de las densidades promedio de las soluciones binarias de metanol-biodiesel a la temperatura de 23 ± 1 °C

Concentración Nominal (% en peso)	Densidad (g/ml)
0	0.8797
8	0.8734
15	0.8664
18	0.8624
25	0.8566
30	0.8511
35	0.8473
40	0.8430
45	0.8388
50	0.8327
100	0.7894

Fuente: Apéndices 1 y 2.

Tabla XXVI. Datos de las concentraciones reales de las soluciones binarias de metanol-agua a la temperatura de 23 ± 1 °C

Concentración Nominal (% en peso)	Concentración real (% en peso)
0	0.00000
5	3.98940
15	12.1434
25	20.5287
35	29.1764
45	38.0759
55	47.6424
70	62.9934
85	80.3182
90	86.5499
100	100.000

Fuente: Apéndices 1 y 2.

Tabla XXVII. Datos de las concentraciones reales de las soluciones binarias de metanol-biodiesel a la temperatura de 23 ± 1 °C

Concentración Nominal (% en peso)	Concentración real (% en peso)
0	0.00000
8	7.23024
15	13.6669
18	16.4760
25	23.0373
30	27.8244
35	32.6085
40	37.4554
45	42.3504
50	47.3980
100	100.000

Fuente: Apéndices 1 y 2.

Tabla XXVIII. Datos de la composición porcentual de las mezclas ternarias formadas a partir de las soluciones de metanol-agua tituladas con biodiesel, a temperatura de 23 ± 1 °C necesarios para graficar la curva binodal

Concentración Nominal (% en peso)	Masa total (g)	Metanol (%)	Biodiesel (%)	Agua (%)
0	3.0314	0.0000	1.0641	98.9359
5	3.0091	3.9349	1.3644	94.7007
15	2.9751	11.9399	1.6757	86.3844
25	2.9396	20.1396	1.8954	77.9651
35	2.9082	28.4997	2.3192	69.1811
45	2.8750	37.0662	2.6520	60.2818
55	2.8189	46.2051	3.0169	50.7781
70	2.7283	60.7590	3.5470	35.6940
85	2.6147	76.9852	4.1498	18.8651
90	2.5915	82.2407	4.9789	12.7805
100	2.5235	93.8411	6.1589	0.0000

Fuente: Apéndices 1 y 2.

Tabla XXIX. Datos de la composición porcentual de las mezclas ternarias formadas a partir de las soluciones de metanol-biodiesel tituladas con agua, a temperatura de 23 ± 1 °C necesarios para graficar la curva binodal

Concentración Nominal (% en peso)	Masa total (g)	Metanol (%)	Biodiesel (%)	Agua (%)
0	2.7323	0.0000	96.5938	3.4062
8	2.6934	7.0339	90.2511	2.7150
15	2.6756	13.2764	83.8664	2.8573
18	2.6703	15.9633	80.9248	3.1119
25	2.6364	22.4564	75.0221	2.5215
30	2.6065	27.2567	70.7029	2.0404
35	2.5850	32.0634	66.2650	1.6716
40	2.5622	36.9695	61.7332	1.2972
45	2.5429	41.9075	57.0468	1.0457
50	2.5181	47.0227	52.1853	0.7920

Fuente: Apéndices 1 y 2.

Tabla XXX. Índices de refracción promedio de la fase biodiesel y fase agua, para los puntos seleccionados por debajo del domo de solubilidad a temperatura de 24 °C

Muestra	Metanol (%)	Biodiesel (%)	Agua (%)	Fase Biodiesel		Fase Agua	
				Media	Desviación	Media	Desviación
1	10	10	80	1.4532	0.0005	1.3352	0.0005
2	10	40	50	1.4530	0.0000	1.3360	0.0000
3	20	60	20	1.4520	0.0000	1.3415	0.0000
4	30	10	60	1.4528	0.0005	1.3398	0.0005
5	30	40	30	1.4523	0.0005	1.3410	0.0000
6	50	10	40	1.4520	0.0000	1.3412	0.0005
7	60	20	20	1.4510	0.0000	1.3385	0.0000
8	70	20	10	1.4482	0.0005	1.3370	0.0000

Fuente: Apéndices 1 y 2.

Tabla XXXI. 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 24 °C

Muestra	Metanol (%)	Biodiesel (%)	Agua (%)	Concentración de metanol (% en peso)	
				Fase Biodiesel	Fase Agua
1	10	10	80	1.6339	16.4695
2	10	40	50	1.8152	21.7552
3	20	60	20	2.7205	46.7665
4	30	10	60	1.9964	43.8276
5	30	40	30	2.4491	45.9397
6	50	10	40	2.7205	46.2738
7	60	20	20	3.6244	55.1552
8	70	20	10	6.1474	67.7164

Fuente: Apéndices 1 y 2.

Tabla XXXII. Datos del coeficiente de distribución para las mezclas ternarias metanol-biodiesel-agua a la temperatura de 24 °C

Muestra	Metanol (%)	Biodiesel (%)	Agua (%)	K
1	10	10	80	10.0799
2	10	40	50	11.9850
3	20	60	20	17.1904
4	30	10	60	21.9533
5	30	40	30	18.7578
6	50	10	40	17.0093
7	60	20	20	15.2177
8	70	20	10	11.0155

Fuente: Apéndices 1 y 2.

Tabla XXXIII. Datos de las concentraciones para la realización de las líneas de unión, obtenidos para cada relación mezcla biodiesel:agua, para una muestra de 40 ml de biodiesel al 10% de metanol con agitación constante a 350 rpm y durante un tiempo de 40 minutos a 23 ± 1 °C

Relación Biodiesel:Agua	Metanol en agua (% en peso)	Metanol en biodiesel (% en peso)
20:1	46.4392	2.7205
10:1	33.7985	2.2681
5:1	25.7806	2.0869
2.5:1	23.1019	1.9964
1.25:1	13.8183	1.8152
1:1	8.27937	1.0898

Fuente: Apéndices 1 y 2.

Tabla XXXIV. Datos de las concentraciones de metanol en agua para determinar la cantidad de ciclos de lavado, para una muestra de 50 ml de biodiesel al 10% de metanol con agitación constante a 350 rpm y durante un tiempo de 25 minutos a la temperatura de 23 ± 1 °C

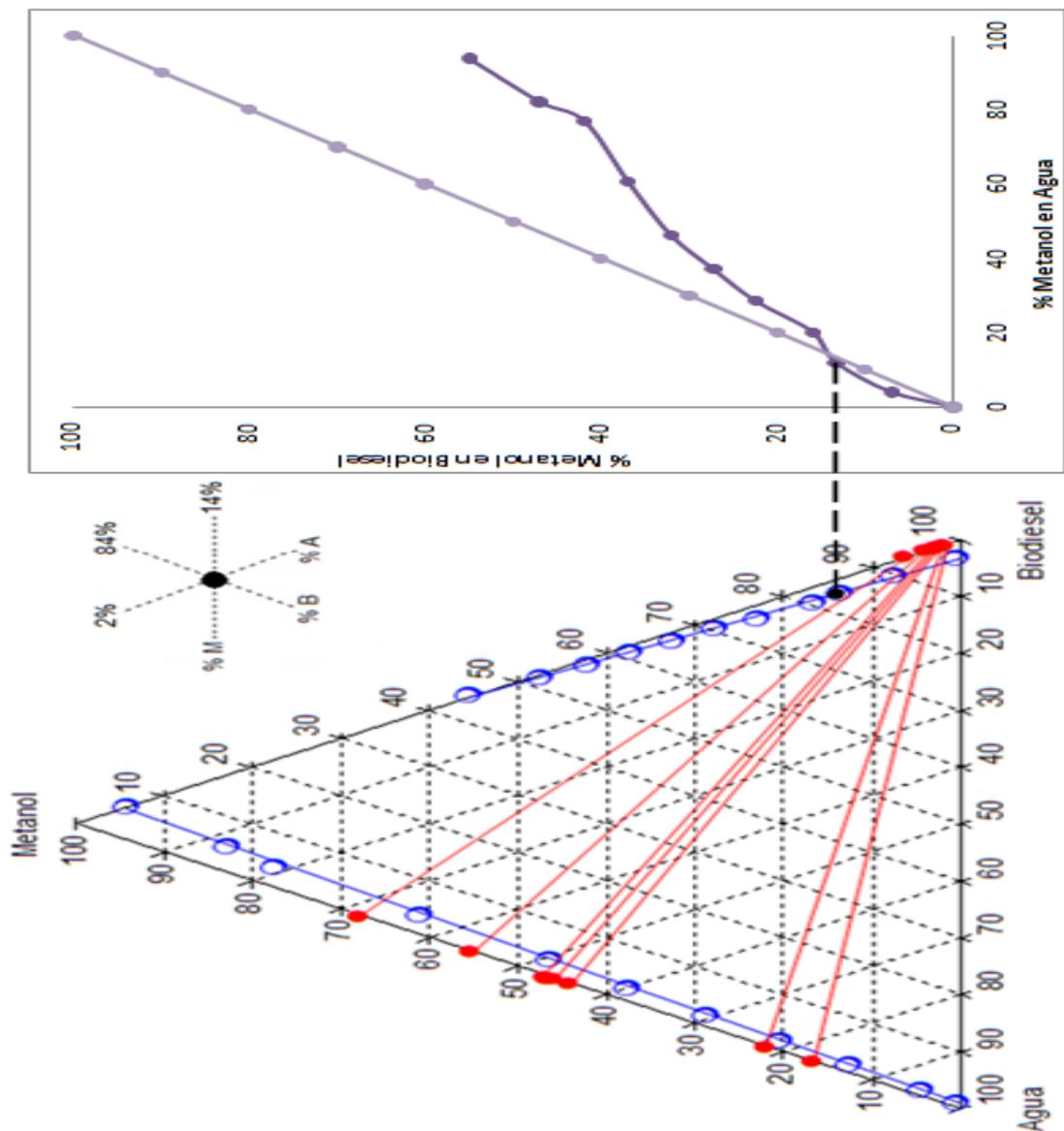
Ciclo	Metanol en agua (% en peso)	Metanol residual (% en peso)
1	55.1552	1.8152
2	11.7926	0.7268
3	4.45680	0.1818
4	2.78080	0.0909

Fuente: Apéndices 1 y 2.

APÉNDICE 4

DETERMINACIÓN DEL PUNTO DE PLIEGUE

Figura 33. Curvas de distribución de los datos experimentales en el sistema metanol-biodiesel-agua y gráfica de porcentajes de distribución de metanol en agua, en función de la distribución de metanol en biodiesel



Fuente: Datos calculados. Apéndice 3.

APÉNDICE 5

ANÁLISIS ESTADÍSTICO ANOVA

Este análisis se realizará a través del método de ANOVA o análisis de varianza, denominado “Análisis de Varianza de Clasificación Simple”, con la cual se determinará si existe o no una diferencia o variabilidad significativa entre cada una de las propiedades de las muestras analizadas. El procedimiento es el siguiente:

- **Variación dentro de las muestras:**

Para una muestra de n mediciones X_1, X_2, \dots, X_n se define como la suma de los cuadrados de las diferencias entre los datos (partículas) de las mediciones y su media X' correspondiente, dividida entre n menos uno, así:

$$V_d = \frac{\sum_i^n ((X_i - X')^2)}{n - 1} \quad (9)$$

Donde:

\sum : Sumatoria

V_d : Variación dentro de las muestras

X_i : Valor de la propiedad medida

X' : Valor de la media de propiedades

n : Número de mediciones

- a) Se calcula el valor de la media de las muestras (X_m).
- b) Se calcula el cuadrado de medias dentro de las muestras (CDM_d), con:

$$CDM_d = \frac{\sum_i^h (V_{di})}{n} \quad \text{con} \quad gl = h*(n-1) \quad (10)$$

Donde:

V_{di} : Valor de la variación para cada muestra

gl : Grados libertad

h : Número de muestras

n : Número de propiedades

- **Variación entre las muestras**

Esta variación se define como la sumatoria de los cuadrados de las diferencias entre la media de propiedades y el valor de la media de las muestras X_m , así:

$$V_e = \frac{\sum_i^h ((X'_i - X_m)^2)}{h-1} \quad (11)$$

Donde:

V_e : Variación entre las muestras

X'_i : Media de las propiedades de n mediciones

h : Número de muestras

X_m : Media de las muestras de h mediciones

a) Se calcula el cuadrado de las medias entre las muestras (CDM_e), así:

$$CDM_e = V_e * (h-1) \quad \text{con} \quad gl = (h-1) \quad (12)$$

b) Se divide el CDM_e entre el CDM_d , el cociente forma el valor calculado de la función F de cola, así:

$$F_{[(h-1)/(h(n-1))]} = \frac{CDM_e}{CDM_d} \quad (13)$$

c) Se compara el valor de F con el valor de F_c o valor crítico de F para una prueba de dos colas (Referencia 12), utilizando la distribución F-Fisher ($\alpha/2$) teniendo en cuenta los grados de libertad correspondientes y utilizando una significancia de 5% ($\alpha = 0.05$).

d) Conclusiones:

Si $F \leq F_c$: No existe variabilidad significativa.

Si $F > F_c$: Si existe variabilidad significativa.

e) En la siguiente tabla se resume el método:

Tabla XXXV. Resumen del método ANOVA

Variabilidad	CDM	Grados libertad	Varianza	F
Entre las muestras	CDM_e	$h-1$	V_e	$\frac{CDM_e}{CDM_d}$
Dentro de las muestras	CDM_d	$h*(n-1)$	V_d	

Fuente: Referencias 4 y 12.

Tabla XXXVI. Análisis de la variación del índice de refracción en soluciones de metanol en agua de diferente concentración nominal, variación dentro de las muestras (V_d) y entre las muestras (V_e) a la temperatura de 23 °C

Concentración Nominal (% en peso)	Índice de refracción promedio (n)	Desviación	V_d	V_e
0	1.3330	0.0000	0.000000	1.81E-05
5	1.3338	0.0005	8.33E-08	
15	1.3358	0.0005	8.33E-08	
25	1.3378	0.0005	8.33E-08	
35	1.3395	0.0000	0.00000	
45	1.3408	0.0005	8.33E-08	
55	1.3415	0.0000	0.00000	
70	1.3400	0.0000	0.00000	
85	1.3355	0.0000	0.00000	
90	1.3332	0.0005	8.33E-08	
100	1.3273	0.0005	8.33E-08	
Promedio total	1.3362	$\sum V_d$	5.00E-07	

Fuente: Apéndices 3 y 5.

Tabla XXXVII. Análisis de la variación del índice de refracción en soluciones de metanol en biodiesel de diferente concentración nominal, variación dentro de las muestras (V_d) y entre las muestras (V_e) a la temperatura de 24 °C

Concentración Nominal (% en peso)	Índice de refracción promedio (n)	Desviación	V_d	V_e
0	1.4545	0.0000	7.40E-32	0.00039
8	1.4458	0.0005	8.33E-08	
15	1.4380	0.0007	2.50E-07	
18	1.4343	0.0005	8.33E-08	
25	1.4257	0.0005	8.33E-08	
30	1.4195	0.0007	2.50E-07	
35	1.4132	0.0005	8.33E-08	
40	1.4072	0.0005	8.33E-08	
45	1.4007	0.0009	3.33E-07	
50	1.3945	0.0007	2.50E-07	
Promedio total	1.4233	$\sum V_d$	1.50E-06	

Fuente: Apéndices 3 y 5.

Tabla XXXVIII. Análisis de la variación del volumen de biodiesel adicionado a soluciones de metanol en agua de diferente concentración nominal, variación dentro de las muestras (V_d) y entre las muestras (V_e) a la temperatura de 23 ± 1 °C

Concentración Nominal (% en peso)	Volumen de biodiesel (ml promedio)	Desviación	V_d	V_e
0	0.0367	0.0094	3.33E-05	0.00189
5	0.0467	0.0094	3.33E-05	
15	0.0567	0.0094	3.33E-05	
25	0.0633	0.0094	3.33E-05	
35	0.0767	0.0094	3.33E-05	
45	0.0867	0.0094	3.33E-05	
55	0.0967	0.0094	3.33E-05	
70	0.1100	0.0000	0.000000	
85	0.1233	0.0094	3.33E-05	
90	0.1467	0.0094	3.33E-05	
100	0.1767	0.0094	3.33E-05	
Promedio total	0.0927	ΣV_d	3.33E-04	

Fuente: Apéndices 3 y 5.

Tabla XXXIX. Análisis de la variación del volumen de agua adicionado a soluciones de metanol en biodiesel de diferente concentración nominal, variación dentro de las muestras (V_d) y entre las muestras (V_e) a la temperatura de 23 ± 1 °C

Concentración Nominal (% en peso)	Volumen de agua (ml promedio)	Desviación	V_d	V_e
0	0.0933	0.0189	1.33E-04	0.000646
8	0.0733	0.0094	3.33E-05	
15	0.0767	0.0094	3.33E-05	
18	0.0833	0.0094	3.33E-05	
25	0.0667	0.0094	3.33E-05	
30	0.0533	0.0094	3.33E-05	
35	0.0433	0.0094	3.33E-05	
40	0.0333	0.0094	3.33E-05	
45	0.0267	0.0094	3.33E-05	
50	0.0200	0.0000	0.000000	
Promedio total	0.0570	ΣV_d	4.000E-04	

Fuente: Apéndices 3 y 5.

Tabla XL. Análisis de varianza del índice de refracción en función de soluciones de metanol en agua de diferente concentración nominal, para la evaluación del grado de diferenciación significativa en el sistema metanol-biodiesel-agua a 23 °C

Variabilidad	CDM	Grados libertad	Varianza	F	F _c
Concentración Nominal (% en peso)	0.00018	10	1.82E-05	1091.0	2.7000
Repeticiones	1.67E-07	22	5.00E-07		

Fuente: Apéndices 3 y 5.

Tabla XLI. Análisis de varianza del índice de refracción en función de soluciones de metanol en biodiesel de diferente concentración nominal, para la evaluación del grado de diferenciación significativa en el sistema metanol-biodiesel-agua a 24 °C

Variabilidad	CDM	Grados libertad	Varianza	F	F _c
Concentración Nominal (% en peso)	0.00354	9	0.000394	7087.4	2.8400
Repeticiones	5.00E-07	20	1.50E-06		

Fuente: Apéndices 3 y 5.

Tabla XLII. Análisis de varianza del volumen de biodiesel adicionado a soluciones de metanol en agua de diferente concentración nominal, para la evaluación del grado de diferenciación significativa en el sistema metanol-biodiesel-agua a 23 ± 1 °C

Variabilidad	CDM	Grados libertad	Varianza	F	F _c
Concentración Nominal (% en peso)	0.01893	10	0.00189	170.36	2.7000
Repeticiones	0.00011	22	0.00033		

Fuente: Apéndices 3 y 5.

Tabla XLIII. Análisis de varianza del volumen de agua adicionado a soluciones de metanol en biodiesel de diferente concentración nominal, para la evaluación del grado de diferenciación significativa en el sistema metanol-biodiesel-agua a 23 ± 1 °C

Variabilidad	CDM	Grados libertad	Varianza	F	F _c
Concentración Nominal (% en peso)	0.00600	9	0.00065	43.575	2.8400
Repeticiones	0.00013	20	0.00040		

Fuente: Apéndices 3 y 5.

APÉNDICE 6

PRESUPUESTO DE LA INVESTIGACIÓN

Tabla XLIV. Costo de reactivos

1. REACTIVOS	UNIDAD	FUENTE	FECHA	COSTO UNITARIO (Q)	CANTIDAD	COSTO TOTAL (Q)
Biodiesel	1 galón	Biocombustibles de Guatemala	17/09/2009	25.00	1	25.00
Metanol grado reactivo 100 %	1 litro	RGH, S.A.	17/09/2009	99.70	5	498.50
Agua desmineralizada	1 galón	Salvavidas	15/09/2009	12.70	1	25.40
					TOTAL	548.90

Tabla XLV. 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	18393.00	3678.60	613.10
Plancha de calentamiento con agitación	SYBRON/Thermolyne, SP18425	KRON	21/03/2008	3280.00	656.00	109.33
Refractómetro	marca ABBE, modelo 32200	INSBAL	23/05/2008	3136.00	627.20	104.53
Campana de extracción	LABOTEC	INSBAL	23/05/2008	36952.00	7390.40	1231.73
					TOTAL	2058.70

Tabla XLVI. 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
Beackers	25 ml de borosilicato	DILAB	29/09/2008	41.11	2	82.22
Beackers	50 ml de borosilicato	DILAB	29/09/2008	41.44	2	82.88
Beackers	250 ml de borosilicato	DILAB	29/09/2008	41.44	2	82.88
Beackers	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	1200.42
Ampolla de decantación	1000 ml	DILAB	29/09/2008	1440.50	1	1440.50
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	5300.58

Tabla XLVII. 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 XLVIII. 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	1.33	0.64	
Plancha de calentamiento con agitación	900	80	72	1.33	95.76	
Refractómetro	6	40	0.24	1.33	0.32	
Campana de extracción	900	10	9	1.67	11.97	
					TOTAL	108.69

Tabla XLIX. Costo de otros

6. OTROS	FUENTE	FECHA	COSTO UNITARIO (Q)	CANTIDAD	COSTO TOTAL (Q)
Papel parafilm	PROINCA	17/09/2009	245.00	1	245.00
Fotocopias	USAC	07/11/2009	0.15	300	45.00
CDS	Paiz	20/09/2009	2.50	2	5.00
Papel mayordomo	Paiz	18/09/2009	12.50	6	75.00
Maskin tape	Paiz	18/09/2009	6.75	1	6.75
Guantes de látex	DILAB	18/09/2009	48.72	1	48.72
Medición de índice de refracción	LIEXVE	22/10/09	120.00	60	7200.00
Tinta (color) para impresora	Office Depot	15/02/2010	287.00	2	574.00
Tinta (color negro) para impresora	Office Depot	15/02/2010	250.00	2	500.00
				TOTAL	8699.47

Tabla L. Costo total de la investigación

RESUMEN	COSTO (Q)
1. Reactivos	548.90
2. Equipo	2058.70
3. Cristalería	5300.58
4. Accesorios	500.39
5. Energía eléctrica	108.69
6. Otros	8699.47
TOTAL	17216.73

APÉNDICE 7

IMPACTOS AMBIENTALES QUE PUEDEN SER GENERADOS DURANTE LA INVESTIGACIÓN

Tabla LI. Impactos ambientales que pueden ser generados por la investigación

No.	Aspecto ambiental	Impacto ambiental	Tipos de impacto ambiental (de acuerdo con la descripción del cuadro anterior)	Actividades de la investigación donde aplica el impacto ambiental	Manejo ambiental: indica que se hará para evitar el impacto ambiental
1	AIRE	Gases	Gases	Secado de 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 genera ningún ruido durante la realización experimental de la investigación.

		Vibraciones	No aplica	No aplica	No aplica, pues no se genera ningún tipo de vibración.
		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) • Titulación de las soluciones (4) 	Realizar los análisis en la medida de lo posible dentro de la campana de extracción.
2	AGUA	Abastecimiento de agua	<ol style="list-style-type: none"> 1. Realización de la parte experimental de la investigación 2. Lavado de cristalería 3. Limpieza 	<ul style="list-style-type: none"> • Lavado de biodiesel (1, 3) • Secado de biodiesel (1, 3) • Preparación de soluciones (1, 2, 3) • Medición de índices de refracción y densidad (1, 2) 	El agua se utilizará racionalmente, exclusivamente para cubrir las necesidades de la investigación y no afectará a seres humanos ni al ambiente.

			• Titulación de soluciones (1, 2)	
	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 genera ningún impacto ambiental.	No aplica pues no se genera ningún impacto ambiental.
	Aguas residuales especiales (aguas generadas por servicios públicos municipales, actividades de servicios, industriales, agrícolas, pecuarias y hospitalarias)	Sí aplica, ya que se generarán aguas residuales provocadas por el manejo de desechos de laboratorio.	Durante todo el proceso de la parte experimental de la investigación.	Se realizará el manejo de desechos adecuado para que el impacto ambiental sea minimizado y por lo tanto no sea significativo.
	Mezcla de las aguas residuales anteriores	No aplica, ya que 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.

3		Agua de lluvia	No aplica	No aplica, pues no se generará ningún impacto ambiental.	No aplica, pues no se generará ningún impacto ambiental.
	SUELO	Desechos sólidos (basura común)	1. Papel mayordomo 2. Papel parafilm	<ul style="list-style-type: none"> • Durante la realización de la parte experimental de la investigación (1, 2) • Secado de la cristalería y limpieza del laboratorio (1) 	Manejo de desechos sólidos dentro del laboratorio.
		Desechos peligrosos (líquidos)	1. Corrosivos 2. Reactivos 3. Explosivos 4. Tóxicos 5. Inflamables 6. Bioinfecciosos	Durante todo el proceso de la realización de la parte experimental de la investigación, por la utilización de biodiesel (4, 5).	Manejo de desechos líquidos dentro del laboratorio.
		Modificación del relieve o topografía del área	No aplica, ya que no se alterará la topografía del terreno.	No aplica, pues no se generará ningún impacto ambiental.	No aplica, pues no se generará ningún impacto ambiental.
4	BIODIVERSIDAD	Flora (árboles y plantas)	No aplica, ya que no se alterará la flora.	No aplica, pues no se generará ningún impacto ambiental.	No aplica, pues no se generará ningún impacto ambiental.

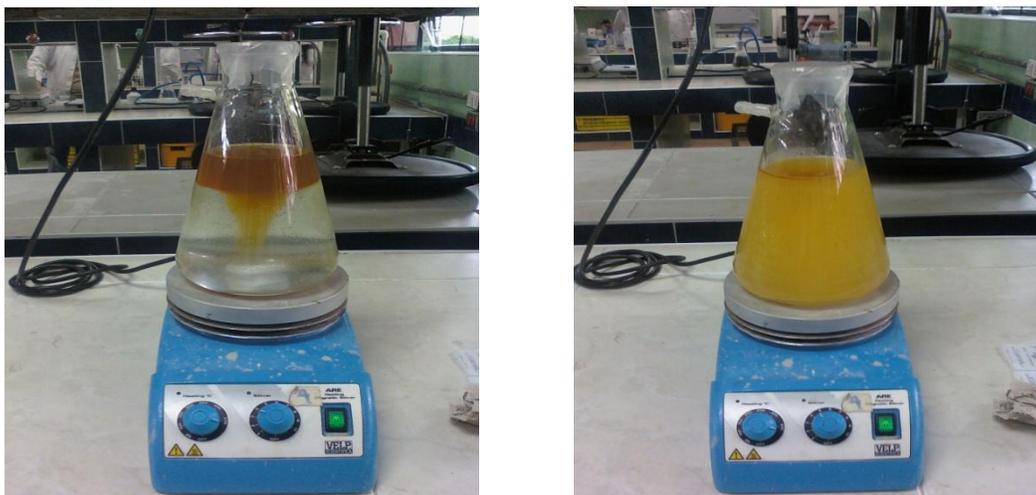
5		Fauna (animales)	No aplica, ya que no se expondrá la vida de animales que habitan los alrededores del área.	No aplica, pues no se generará ningún impacto ambiental.	No aplica, pues no se generará ningún impacto ambiental.
		Ecosistema	No aplica, ya que no se destruirá el hábitat de ninguna especie.	No aplica, pues no se generará ningún impacto ambiental.	No aplica, pues no se generará ningún impacto ambiental.
	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	Cambios o modificaciones sociales	<ol style="list-style-type: none"> 1. Cultural 2. Político 3. Económico 	Al terminar la investigación se espera obtener un aporte industrial para el proceso de lavado de biodiesel de manera eficiente y minimizando costos.	Se realizarán todas las actividades de la investigación procurando causar el mínimo impacto ambiental.

Fuente: Metodología.

APÉNDICE 8

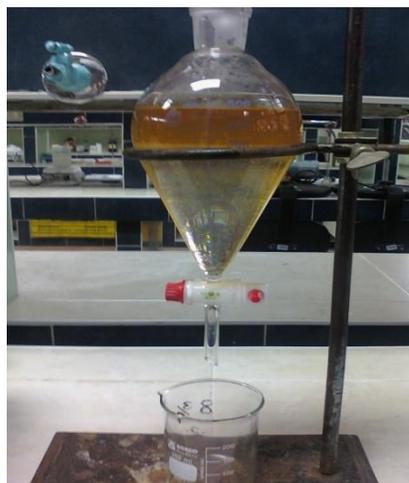
FOTOGRAFÍAS DE LA INVESTIGACIÓN

Figura 34. Detalle de la unidad de lavado de biodiesel



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

Figura 35. Detalle de la unidad de separación del agua de lavado del biodiesel



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

Figura 36. Detalle de la unidad de secado de biodiesel



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

Figura 37. Detalle de la unidad de medición de índice de refracción a la temperatura de 23 ± 1 °C



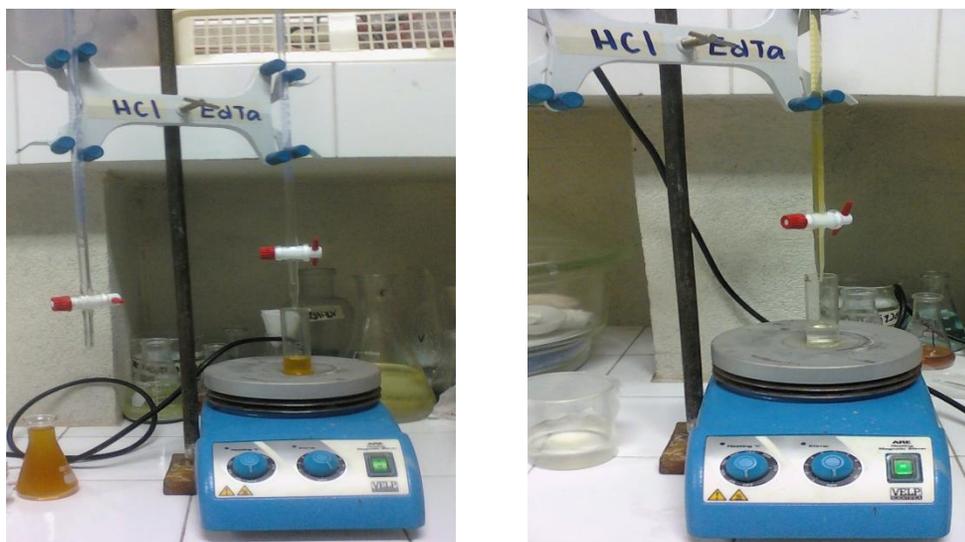
Fuente: Refractómetro marca Abbe. LIEXVE, Escuela de Ingeniería Química, USAC.

Figura 38. Detalle de la preparación de las soluciones de metanol en biodiesel y metanol en agua respectivamente a $23 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$



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

Figura 39. Detalle de la unidad utilizada para la titulación de las mezclas binarias a la temperatura de $23 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$



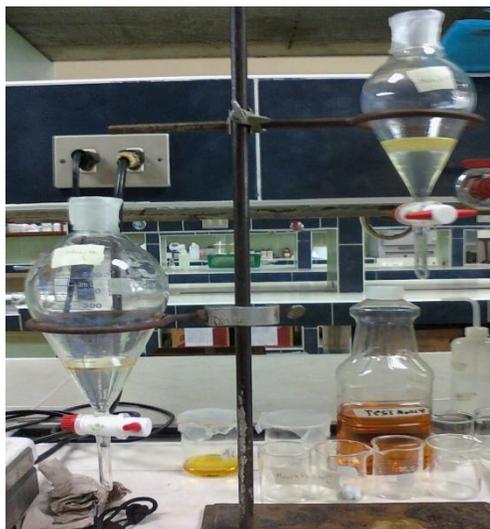
Fuente: Laboratorio de química, Escuela de Ingeniería Química, USAC.

Figura 40. Detalle de la unidad utilizada para las mezclas ternarias de metanol, biodiesel y agua por agitación a 23 ± 1 °C



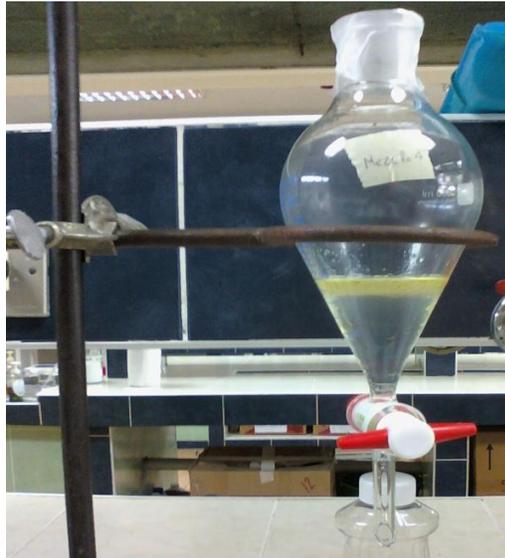
Fuente: Laboratorio de química, Escuela de Ingeniería Química, USAC.

Figura 41. Detalle de la unidad utilizada para la separación de fases de las mezclas ternarias de metanol, biodiesel y agua a la temperatura de 23 ± 1 °C



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

Figura 42. Detalle de las fases de extracto y refinado durante el proceso de separación a la temperatura de $23 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$



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

APÉNDICE 9

**HOJAS TÉCNICAS DE LOS REACTIVOS METANOL Y BIODIESEL
RESPECTIVAMENTE**

Specification

<http://certificates.merck.de>

Date of print: 03.06.2010

1.06009.5000 Methanol for analysis EMSURE®
ACS,ISO,Reag. Ph Eur

	Spec. Values	
Purity (GC)	≥ 99.9	%
Identity (IR)	conforms	
Appearance	clear	
Colour	≤ 10	Hazen
Solubility in water	conforms	
Acidity	≤ 0.0002	meq/g
Alkalinity	≤ 0.0002	meq/g
Density (d 20 °C/20 °C)	0.791 - 0.793	
Boiling point	64 - 65 °C	
Ethanol (GC)	≤ 0.05	%
Acetone	≤ 0.001	%
Acetaldehyde	≤ 0.001	%
Formaldehyde	≤ 0.001	%
Readily carbonizable substances	conforms	
Carbonyl compounds (as CO)	≤ 0.001	%
Chloride (Cl)	≤ 0.5	ppm
Sulphate (SO ₄)	≤ 1	ppm
Substances reducing potassium permanganate (as O)	≤ 0.00025	%
Ag (Silver)	≤ 0.000002	%
Al (Aluminium)	≤ 0.00005	%
As (Arsenic)	≤ 0.000002	%
Au (Gold)	≤ 0.000002	%
Ba (Barium)	≤ 0.00001	%
Be (Beryllium)	≤ 0.000002	%
Bi (Bismuth)	≤ 0.000002	%
Ca (Calcium)	≤ 0.00005	%
Cd (Cadmium)	≤ 0.000005	%
Co (Cobalt)	≤ 0.000002	%

Specification

1.06009.5000 Methanol for analysis EMSURE®
ACS,ISO,Reag. Ph Eur

	Spec. Values	
Cr (Chromium)	≤ 0.000002	%
Cu (Copper)	≤ 0.000002	%
Fe (Iron)	≤ 0.0000100	%
Ga (Gallium)	≤ 0.000002	%
In (Indium)	≤ 0.000002	%
Li (Lithium)	≤ 0.000002	%
Mg (Magnesium)	≤ 0.00001	%
Mn (Manganese)	≤ 0.000002	%
Mo (Molybdenum)	≤ 0.000002	%
Ni (Nickel)	≤ 0.000002	%
Pb (Lead)	≤ 0.00001	%
Pt (Platinum)	≤ 0.000005	%
Sn (Tin)	≤ 0.00001	%
Ti (Titanium)	≤ 0.000002	%
Tl (Thallium)	≤ 0.000002	%
V (Vanadium)	≤ 0.000002	%
Zn (Zinc)	≤ 0.00001	%
Zr (Zirconium)	≤ 0.000002	%
Evaporation residue	≤ 0.0005	%
Water	≤ 0.05	%

ACS, ISO reagent, Ph Eur-reagent

Dr. Michael Savelsberg

responsible laboratory manager quality control

This document has been produced electronically and is valid without a signature



Hoja Técnica

Fecha: 28 de septiembre de 2009 / Revisión: 01

BioD-100

DESCRIPCIÓN: Es un producto formulado a partir de aceites vegetales reciclados, no contiene azufre ni compuestos aromáticos. Es 100% Biodegradable.

DATA	RESULTADOS
Gravedad API @ 60°F (ASTM D287)	29.5
Densidad, Kg/m ³ (ASTM D1298)	878.4
Estabilidad a la oxidación, mg/100ml (ASTM D2274)	0.4
Viscosidad Cinemática @ 40°C, cSt (ASTM D445)	4.45
Contenido de Azufre, %peso (ASTM D4294)	0.001
Flash Point, °F (ASTM D93)	>230
Indice de Cetano (ASTM D976)	47
Contenido de Cenizas Sulfatadas, %peso (ASTM D874)	<0.01
Copper strip corrosión @122°F (ASTM D130)	1A
Indice de Acidez, mg KOH/g (ASTM D974)	0.09
Punto de enturbiamiento, °C (ASTM D2500)	9
Na, K, Ca, ppm (ASTM D3605)	1.4, 0.1, 0.006
Punto de Ebullición, °C (ASTM D86)	321

APARIENCIA: Líquido viscoso, color caramelo y olor característico.

ALMACENAMIENTO: Almacenar en depósitos herméticos a temperaturas entre 10 °C y 120 °C. No exponer a calor ni a luz solar.

***El producto puede ser utilizado como sustituyente o aditivo del Diesel de petróleo.**

CONTÁCTENOS

Licda María Isabel Girón, Gerente Ventas: mgiron@biocombustibles.com.gt
Inga. Jeimy Barrios, Desarrollo de Productos Nuevos: jbarrios@biocombustibles.com.gt
Marvin Winter, Representante de Ventas: mwinter@biocombustibles.com.gt

4026-9124
4026-9133
4026-9130