



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

**DETERMINACIÓN, OBTENCIÓN Y ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS DE
LA LEY DE VELOCIDAD DE LA REACCIÓN DEL BIODIÉSEL, UTILIZANDO
EL MÉTODO DE ANÁLISIS DIFERENCIAL**

Gerardo René Robles Alfonso

Asesorado por el Ing. José Eduardo Calderón García

Guatemala, noviembre de 2009

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DETERMINACIÓN, OBTENCIÓN Y ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS DE
LA LEY DE VELOCIDAD DE LA REACCIÓN DEL BIODIÉSEL, UTILIZANDO
EL MÉTODO DE ANÁLISIS DIFERENCIAL**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

GERARDO RENÉ ROBLES ALFONSO

ASESORADO POR EL ING. JOSÉ EDUARDO CALDERÓN GARCÍA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2009

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Narda Lucía Pacay Barrientos
VOCAL V	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

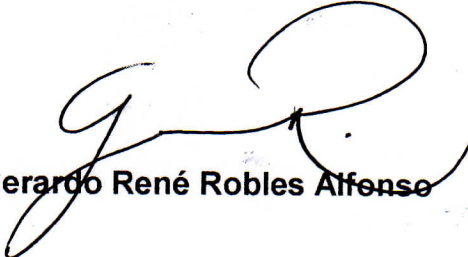
DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Federico Guillermo Salazar Rodríguez
EXAMINADOR	Ing. Jaime Domingo Carranza González
EXAMINADOR	Ing. Byron René Aguilar Uck
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

DETERMINACIÓN, OBTENCIÓN Y ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS DE LA LEY DE VELOCIDAD DE LA REACCIÓN DEL BIODIÉSEL, UTILIZANDO EL MÉTODO DE ANÁLISIS DIFERENCIAL

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha julio de 2006.



Gerardo René Robles Alfonso



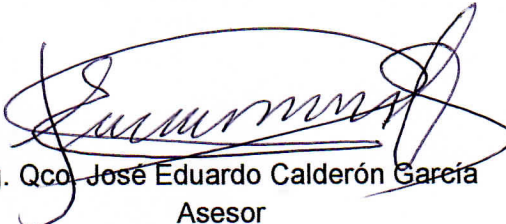
Guatemala 10 de Octubre del 2008

Ingeniero
Williams Álvarez
Director
Escuela de Ingeniería Química
USAC

Por este medio informo a la Escuela de Ingeniería Química, que doy por aprobado el Informe Final de Trabajo de Graduación del alumno Gerardo René Robles Alfonso, Carné No. 2001-17178, titulado:

DETERMINACIÓN, OBTENCIÓN Y ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS DE LA LEY DE VELOCIDAD DE LA REACCIÓN DEL BIODIESEL UTILIZANDO EL MÉTODO DE ANÁLISIS DIFERENCIAL

Sin otro particular. Atentamente,


Ing. Qco. José Eduardo Calderón García
Asesor





Guatemala, 09 de Septiembre de 2009
Ref. EIQ.481.2009

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

Estimado Ingeniero Álvarez:

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 INGENIERO QUÍMICO a el estudiante universitario **GERARDO RENÉ ROBLES ALFONSO**, identificado con carné No. **2001-17178**, titulado: "**DETERMINACIÓN, OBTENCIÓN Y ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS DE LA LEY DE VELOCIDAD DE LA REACCIÓN DEL BIODIESEL UTILIZANDO EL MÉTODO DE ANÁLISIS DIFERENCIAL**" el cual ha sido asesorado por el Ingeniero Químico José Eduardo Calderón García.

Habiendo encontrado el referido informe final **satisfactorio**, se procede a recomendarle autorice a el estudiante **Robles Alfonso** 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

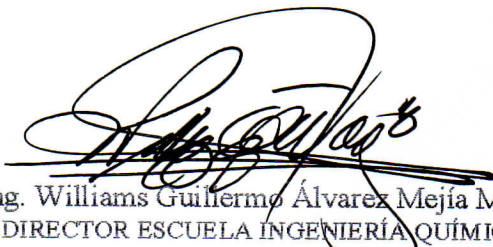


ESCUELA DE
INGENIERIA QUIMICA

C.c.: archivo



El Director de la Escuela de Ingeniería Química Ing. Williams Guillermo Álvarez Mejía, M.Sc. Después de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el trabajo de graduación del estudiante **GERARDO RENÉ ROBLES ALFONSO** titulado: **“DETERMINACIÓN, OBTENCIÓN Y ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS DE LA LEY DE VELOCIDAD DE LA REACCIÓN DEL BIODIESEL, UTILIZANDO EL MÉTODO DE ANÁLISIS DIFERENCIAL”**, procede a la autorización del mismo, ya que reúne rigor, coherencia y calidad requeridos.


Ing. Williams Guillermo Álvarez Mejía M.Sc.
DIRECTOR ESCUELA INGENIERÍA QUÍMICA




Guatemala, noviembre de 2009



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: **DETERMINACIÓN, OBTENCIÓN Y ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS DE LA LEY DE VELOCIDAD DE LA REACCIÓN DEL BIODIESEL, UTILIZANDO EL MÉTODO DE ANÁLISIS DIFERENCIAL**, presentado por el estudiante universitario **Gerardo René Robles Alfonso**, procede a la autorización para la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.


Ing. Murphy Olimpo Paiz Robles
DECANO



Guatemala, noviembre de 2009

/gdech

ACTO QUE DEDICO A:

Mis padres

Osmundo Robles (q.e.p.d.) y Patricia Alfonso, por darme la vida y estar conmigo en todo momento. Gracias por hacer de mí una mejor persona a través de sus consejos, enseñanzas y amor.

Mi esposa

Wendy Hernández, por estar a mi lado, por permitirme soñar y crecer con su imaginación; por enseñarme que no hay límites y que todo lo que me proponga lo puedo lograr y que solo depende de mí. Gracias mi amor, porque sin ti, no lo hubiera logrado.

Mi hija

Luna María Robles Hernández, porque su sonrisa me da la fuerza necesaria para seguir adelante y alcanzar mis objetivos.

Mi hermana

Clara Robles, gracias por estar conmigo y apoyarme siempre.

Mis amigas

Iveth Guerra, Ana Lucía Canahuí, Andrea Rodas, Astrid Ucelo y Patty Gaitán (q.e.p.d.), con quienes compartí mi carrera. Gracias por su incondicional amistad, por sus sabios consejos y por estar conmigo en los momentos difíciles.

AGRADECIMIENTOS A:

**La Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Por enseñarme la realidad de la vida y motivarme a luchar por un país mejor. Soy y seré siempre orgullosamente sancarlista.

Facultad de Ingeniería

Por brindarme conocimientos y experiencias que me permitirán desempeñarme con excelencia en mi vida profesional.

**Mis amigos de la
Facultad**

Héctor Escobar, Joze Del Cid, Franty Miranda y demás compañeros, por acompañarme en el transcurso de mis estudios y por compartir momentos inolvidables.

Mi asesor

Ing. Eduardo Calderón (q.e.p.d.), mil gracias por su asesoría, dedicación y ayuda para realizar este trabajo de graduación.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	III
LISTA DE SÍMBOLOS.....	VII
GLOSARIO.....	IX
RESUMEN.....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
HIPOTESIS.....	XVI
INTRODUCCIÓN.....	XVII
1. ANTECEDENTES.....	1
2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. Elaboración de biodiésel.....	5
2.1.1. Uso de etanol (catálisis alcalina).....	10
2.1.2. Uso de etanol (catálisis ácida).....	11
2.1.3. Especificaciones de calidad del biodiésel.....	11
2.2. Obtención y análisis de datos de velocidad cinética.....	12
2.2.1. Método diferencial de análisis de velocidad.....	13
2.2.1.1. Método gráfico.....	16
2.2.1.2. Método numérico.....	17
2.2.1.3. Método de ajuste de polinomios.....	18
2.2.2. Método Integral de análisis de velocidad.....	20
2.3. Refractómetro Abbe.....	25
2.3.1. Uso del refractómetro Abbe.....	28
2.3.2. Ajuste de la escala.....	29

2.3.3.	Medición del índice de refracción de las soluciones	30
3.	MARCO METODOLÓGICO	31
4.	RESULTADOS	37
5.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	43
	CONCLUSIONES	49
	RECOMENDACIONES	51
	BIBLIOGRAFÍA	53
	APÉNDICES.....	55

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Evolución de la acidez en el tiempo, para diferentes concentraciones de ácido (grasa de pollo)	2
2.	Evolución de la acidez en el tiempo, para diferentes experiencias (residuo desgomado de aceite de girasol)	2
3.	Conversión versus tiempo, transesterificación de aceite de girasol con etanol.....	3
4.	Reacción básica de transesterificación para la obtención de biodiésel.....	7
5.	Reacción básica de esterificación en condiciones ácidas.....	8
6.	Proceso de transesterificación por etapas en condiciones cáusticas.....	9
7.	Proceso de transesterificación en condiciones ácidas.....	10
8.	Parámetros para biodiésel (B100), según norma ASTM D-6751	12
9.	Gráficas de $-dC/dt$ versus C utilizadas en el método diferencial de análisis de velocidad, para determinar el orden de reacción.	15
10.	Método de ajuste a un polinomio de grado n de los datos de concentración-tiempo	19
11.	Gráfica de una reacción de orden cero para datos analizados por el método integral de análisis de velocidad	22
12.	Gráfica de una reacción de primer orden para datos analizados por el método integral de análisis de velocidad	23
13.	Gráfica de una reacción de segundo orden para datos analizados por el método integral de análisis de velocidad	24

14.	Gráfica del recíproco de la concentración en función del tiempo, utilizada en el método integral de análisis de velocidad.....	25
15.	Esquema del funcionamiento del refractómetro	26
16.	Esquema de las partes principales que componen el refractómetro Abbe.....	29
17.	Esquema del proceso de medición del índice de refracción en un refractómetro.....	30
18.	Vista del programa de computadora construido para determinar las cantidades de reactivo que se emplearán en la reacción de transesterificación para la elaboración de biodiésel.....	32
19.	Gráfica de concentración en función del tiempo para la reacción de transesterificación en la fabricación de biodiésel	39
20.	Gráfica de $\ln(-dC/dt)$ contra $\ln(C)$ para determinar el orden de la reacción del biodiésel, utilizando el método diferencial de análisis de velocidad.....	41
21.	Equipo utilizado para efectuar la reacción de transesterificación	44
22.	Refractómetro Abbe utilizado en el experimento.....	46

TABLAS

I.	Análisis comparativo entre tiempo y concentración.....	17
II.	Variables para la determinación de α y k , utilizando el método de la derivada de polinomios.....	20
III.	Proporciones utilizadas para la obtención de biodiésel (cantidades en toneladas).....	31
IV.	Reactivos, productos y subproductos de la reacción de biodiésel, obtenidos por el método de transesterificación (cantidades en litros) ..	37

V.	Concentración de aceite a partir de índices de refracción promedio, medidos para diferentes tiempos durante la reacción de transesterificación.	38
VI.	Derivada de la concentración respecto del tiempo para determinar el orden de reacción y la constante k de velocidad, utilizando el método diferencial de análisis de velocidades.....	40
VII.	Orden de reacción α y constante de velocidad específica k , para la reacción de transesterificación del biodiésel, determinados a partir del método diferencial de análisis de velocidad.....	42

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
C_i	Concentración de la especie i (gmol/dm ³)
dC_i	Derivada de la concentración de la especie i
dt	Derivada del tiempo
V/V	Fracción volumétrica
°C	Grados Celsius de temperatura
g	Gramos
IR	Índice de refracción
L	Litros
Ln	Logaritmo natural
α	Orden de reacción
%	Porcentaje
%V	Porcentaje en volumen
t	Tiempo
$-r_i$	Velocidad de desaparición de la especie/por unidad de volumen (gmol i /s dm ³)
k	Velocidad de reacción específica

GLOSARIO

Ácidos grasos

Son moléculas orgánicas de naturaleza lipídica formadas por una larga cadena hidrocarbonada lineal, de número par de átomos de carbono, en cuyo extremo hay un grupo carboxilo. Cada átomo de carbono se une al siguiente y al precedente por medio de un enlace covalente sencillo o doble. Al átomo de su extremo le quedan libres tres enlaces que son ocupados por átomos de hidrógeno. Los demás átomos tienen libres dos enlaces, que son ocupados igualmente por átomos de hidrógeno.

Biodiésel

Es un biocombustible sintético líquido que se obtiene a partir de lípidos naturales como aceites vegetales o grasas animales, nuevos o usados, mediante procesos industriales de esterificación y transesterificación, y que se aplica en la preparación de sustitutos totales o parciales del petrodiesel o gasóleo obtenido del petróleo.

Calibración

Es el procedimiento de comparación entre lo que indica un instrumento y lo que debiera indicar de acuerdo a un patrón de referencia con valor conocido.

Catalizador

Es una sustancia (compuesto o elemento) capaz de acelerar (catalizador positivo) o retardar (catalizador negativo o inhibidor) una reacción química, permaneciendo este mismo inalterado (no se consume durante la reacción). Los catalizadores no alteran el balance energético final de la reacción química, sino que solo permiten que se alcance el equilibrio con mayor o menor velocidad.

Cinética química

Es el área de la química que estudia la velocidad o rapidez con que ocurren las reacciones químicas. La velocidad de las reacciones químicas se ve afectada por varios factores, es decir, factores que influyen en la velocidad de las mismas.

Concentración

Es la magnitud fisicoquímica que permite conocer la proporción entre el soluto y el solvente en una solución.

Ésteres

Los ésteres son compuestos orgánicos en los cuales un grupo orgánico reemplaza a un átomo de hidrógeno en un ácido oxigenado. En bioquímica son el producto de la reacción entre los ácidos grasos y los alcoholes. En química orgánica y bioquímica, los ésteres son un grupo funcional compuesto de un radical orgánico unido al residuo de cualquier ácido oxigenado, orgánico o inorgánico.

Esterificación	Es el proceso por el cual se sintetiza un éster. Un éster es un compuesto derivado formalmente de la reacción química entre un oxácido y un alcohol.
Glicerina	También llamado glicerol, es un alcohol con tres grupos hidroxilos.
Índice de refracción	El índice de refracción de un medio homogéneo es una medida que determina la reducción de la velocidad de la luz al propagarse por un medio. Se denomina índice de refracción al cociente entre la luz en el vacío y la velocidad de la luz en el medio cuyo índice se calcula.
Norma ASTM	Es un documento que ha sido desarrollado y establecido dentro de los principios de consenso de la organización y que cumple con los requisitos de los procedimientos y regulaciones de la ASTM.
Prisma	Un prisma es un objeto capaz de refractar, reflejar y descomponer la luz en los colores del arco iris. Generalmente, estos objetos tienen la forma de un prisma triangular, de ahí su nombre.
Refractómetro	Instrumento empleado para determinar el índice de refracción.

RPM

Revoluciones por minuto (rpm, RPM o r/min.) es una unidad de frecuencia, usada frecuentemente para medir la velocidad angular. En este contexto, una revolución es una vuelta de una rueda, un eje, un disco o cualquier cosa que gire.

Transesterificación

Es el proceso de intercambiar el grupo alcoxi de un éster por otro alcohol. Estas reacciones son frecuentemente catalizadas mediante la adición de un ácido o una base.

Triglicérido

Los triglicéridos, triacilglicéridos o triacilgliceroles son acilgliceroles (un tipo de lípidos) formados por una molécula de glicerol que tiene esterificados sus tres grupos hidroxilo por tres ácidos grasos, saturados o insaturados. Los triglicéridos forman parte de las grasas, sobre todo de origen animal. Los aceites son triglicéridos en estado líquido de origen vegetal o que provienen del pescado.

RESUMEN

Con base en un proceso formal de experimentación se determinaron y analizaron los parámetros de la ley de velocidad de la reacción del biodiésel, utilizando el método de análisis diferencial.

Para cumplir con este objetivo, se calcularon las cantidades necesarias de reactivo que se debían de utilizar para la elaboración de biodiésel, a nivel laboratorio y planta piloto; así como también se analizó, por medio de un refractómetro de Abbe, el avance de la reacción del biodiésel para diferentes intervalos de tiempo y a temperatura constante. Finalmente, se aplicó el método diferencial de análisis de velocidades, con el que se determinaron los parámetros de la ley de velocidad cinética de la reacción de transesterificación para la elaboración de biodiésel a nivel planta piloto. El análisis concluyó que el orden de reacción α tiene un valor de 0.3021 y la constante de velocidad específica tiene un valor de $0.0341 (V/V)^{0.6979} \text{ min}^{-1}$ a $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

Se llegó a determinar que en la fabricación de biodiésel, aplicando la reacción de transesterificación, es necesario utilizar un exceso del 800 % de alcohol etílico para que el biodiésel se separe de la fase pesada y que una reacción de transesterificación para la obtención de biodiésel, utilizando 2.5 L de aceite, 4 L de alcohol etílico y 46.24 g de hidróxido de sodio como catalizador, se completa en aproximadamente 45 minutos.

El proceso de experimentación se realizó a una temperatura de $25 \text{ }^\circ\text{C}$, bajo condiciones normales de operación.

OBJETIVOS

General

Determinar y analizar los parámetros de la velocidad de reacción del biodiesel, utilizando el método de análisis diferencial, en la fabricación de biodiésel a nivel de planta piloto.

Específicos

1. Calcular para un volumen dado, las cantidades necesarias de reactivo que se deben de utilizar para la elaboración de biodiésel a nivel laboratorio y planta piloto.
2. Analizar por medio de un refractómetro de Abbe, el avance de la reacción del biodiésel para diferentes intervalos de tiempo y a temperatura constante.
3. Utilizar el método diferencial de análisis de velocidades, para la determinación de los parámetros de la ley de velocidad cinética en la reacción del biodiésel.

HIPÓTESIS

Es factible la utilización del método diferencial de análisis de velocidades para la determinación del orden de reacción y la constante de equilibrio de la reacción de transesterificación, en la obtención de biodiésel a nivel de plata piloto.

INTRODUCCIÓN

Los biocombustibles son una alternativa energética que ha venido tomando auge en los últimos años, debido al incremento en el precio del petróleo y porque eventualmente se agotarán. Los biocombustibles no presentan esta desventaja, ya que provienen de fuentes renovables de energía. Si se transforma de manera adecuada, la biomasa puede producir biocombustibles con potencial para utilizarse en los sistemas actuales de producción.

El biodiésel es uno de estos biocombustibles que se obtiene por la reacción de transesterificación de un triglicérido con un alcohol, típicamente metanol o etanol, utilizando hidróxido de sodio como catalizador. Un estudio analítico de esta reacción, por lo regular, se efectúa midiendo la concentración en función del tiempo y utilizando después los métodos de análisis de datos diferenciales, integral o de mínimos cuadrados, para determinar el orden de reacción, α , y la velocidad de reacción específica, k .

Cuando una reacción es irreversible, en muchos casos es posible determinar estas variables, diferenciando numéricamente los datos de concentración contra tiempo.

El propósito de este trabajo de investigación experimental es demostrar la aplicación de un método analítico para el estudio de la reacción de transesterificación, con la finalidad de obtener los parámetros principales de la ley de velocidad cinética de la reacción utilizada para la fabricación del biodiésel.

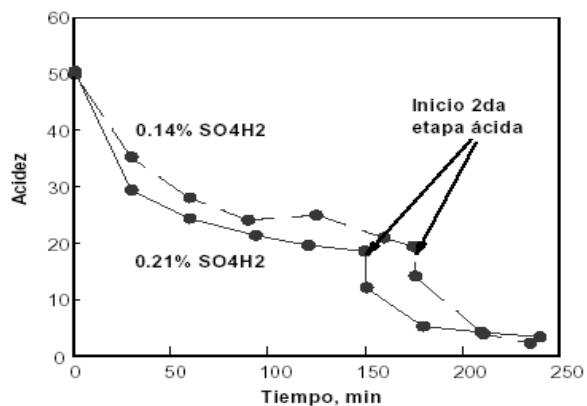
1. ANTECEDENTES

Se pueden encontrar importantes aplicaciones de la ingeniería de las reacciones químicas en industrias de procesamiento químico de países como Brasil, Estados Unidos y Argentina.

Fogler Scott (2001), en su investigación *Elementos de ingeniería de las reacciones químicas* muestra ejemplos con datos y parámetros reales de la ley de velocidad de reacciones utilizadas para la fabricación de óxido de etileno, anhídrido ftálico, etilenglicol, metaxileno, estireno, trióxido de azufre, propilenglicol, queteno e i-buteno.

En el 2004, un grupo de científicos del Instituto de Investigaciones de Catálisis y Petroquímica (INCAPE), de la Universidad Nacional de Santa Fe en Argentina, realizaron estudios con materias primas de diversas procedencias; la metodología utilizada fue combinar pasos de catálisis ácida seguida por catálisis alcalina y reportar la evolución de la acidez en función del tiempo para diferentes tipos de grasas.

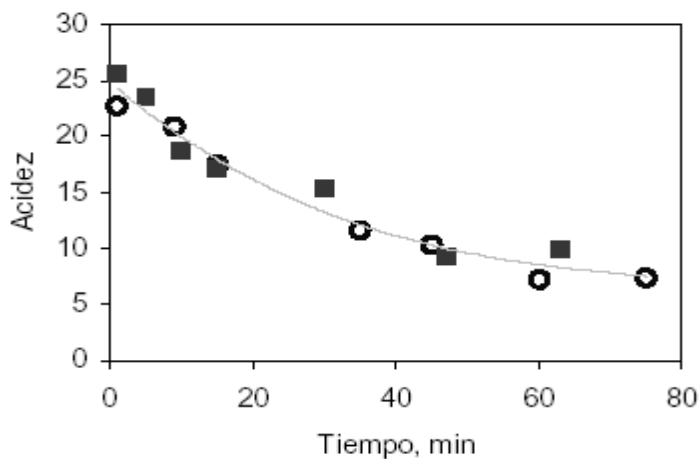
Figura 1. **Evolución de la acidez en el tiempo, para diferentes concentraciones de ácido (grasa de pollo)**



Fuente: http://www.zoetecnocampo.com/Documentos/biodie_lar/biodie_lar.pdf.

Consulta: agosto de 2009.

Figura 2. **Evolución de la acidez en el tiempo, para diferentes experiencias (residuo desgomado de aceite de girasol)**

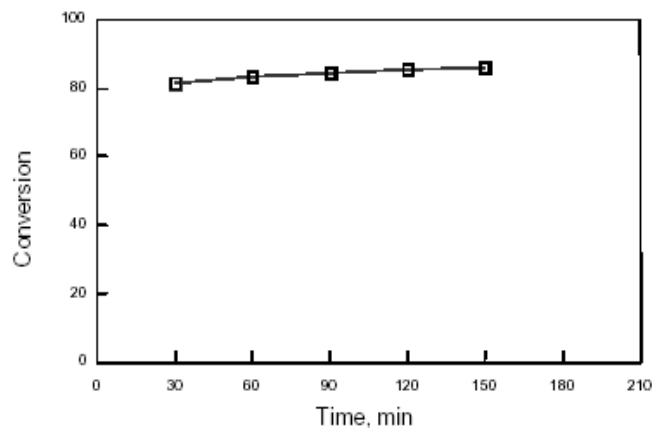


Fuente: http://www.zoetecnocampo.com/Documentos/biodie_lar/biodie_lar.pdf.

Consulta: agosto de 2009.

Se analizó también el avance de la conversión de la reacción de transesterificación para el aceite de girasol refinado con etanol, utilizando KOH como catalizador a temperatura ambiente de 25° C.

Figura 3. **Conversión versus tiempo, transesterificación de aceite de girasol con etanol**



Fuente: http://www.zoetecnocampo.com/Documentos/biodie_lar/biodie_lar.pdf.

Consulta: agosto de 2009.

La investigación anterior no trata en absoluto acerca de la obtención de los parámetros de la ley de velocidad del biodiésel, pero se concluyó, a través del estudio de la evolución de la conversión del aceite en el tiempo, que la producción de biodiésel a partir de materias primas de alta acidez es factible técnica y económicamente, y se pretende desarrollar un proceso para producir biodiésel a partir de materias grasas de muy alta acide, con etanol al 96 %.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Elaboración de biodiésel

El biodiésel es un combustible que se obtiene por la reacción de transesterificación de un triglicérido con un alcohol, típicamente metanol o etanol, utilizando hidróxido de sodio como catalizador. Tiene una serie de ventajas respecto del diésel derivado de petróleo, pero la principal razón para su utilización es el hecho de que presenta un impacto ambiental mucho menor que los derivados del petróleo.

Al ser producido a partir de aceites vegetales o grasas de cualquier origen, o sea recursos renovables, produce una ventaja neta en lo que se refiere al ciclo de carbono, no produciendo acumulación del mismo en el ambiente. Adicionalmente, el biodiésel presenta una gran lubricidad que extiende la vida útil del motor, no es tóxico, y es fácilmente biodegradable.

Existen numerosas alternativas que se pueden emplear para solventar el problema en el uso de hidrocarburos y combustibles fósiles como una fuente de energía proveniente de recursos no renovables, entre ellas está la fabricación de biodiésel. De las fuentes más factibles para su elaboración, se encuentra el aceite de palma africana el cual tiene potencial para la elaboración de biodiésel a escala industrial, debido a la gran cantidad que se genera (5.000 Kg/año); aunque existen otros aceites que también son aptos para este propósito. El aceite de palma contiene una combinación de ácidos grasos: saturados, monoinsaturados y poliinsaturados.

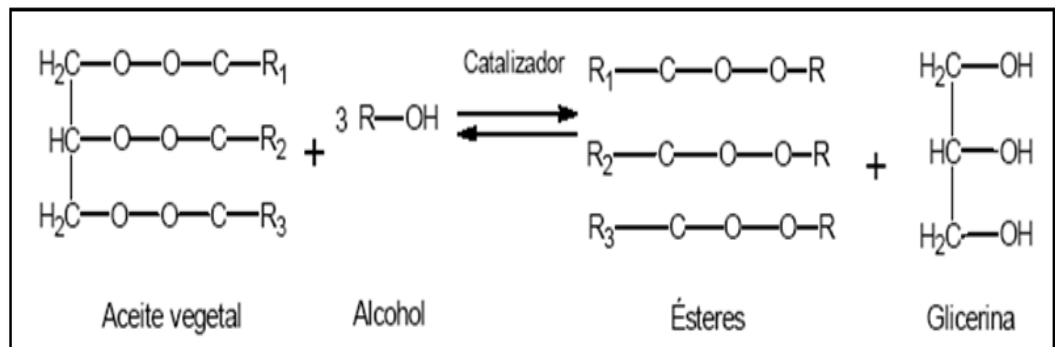
Debido al alto porcentaje de ácidos grasos saturados presentes en el aceite crudo de palma, podría no ser el más aconsejable para la obtención de biodiésel. Sin embargo, la consideración del aceite crudo de palma africana para síntesis de biodiésel, representa una ventaja en términos económicos y energéticos, al evitar el proceso de refinación del aceite. Respecto de los gases de combustión o emisiones, el biodiésel posee ciertas ventajas sobre el diésel derivado del petróleo:

- Monóxido de carbono (CO): la emisión durante la combustión del biodiésel en motores diésel es menor o igual a 50 %, comparada con aquella que produce el mismo motor con combustible diésel. Es conocida la toxicidad del monóxido de carbono sobre todo en las ciudades.
- Dióxido de azufre (SO₂): no se produce emisión de dióxido de azufre por cuanto el biodiésel no contiene azufre. El dióxido de azufre es nocivo para la salud humana, así como para la vegetación.
- Material particulado: esta emisión con el empleo del biodiésel se reduce a un 65 % respecto del combustible diésel. Las partículas finas son nocivas para la salud.
- Productos orgánicos aromáticos: el biodiésel no contiene productos aromáticos (benceno y derivados), siendo conocida la elevada toxicidad de los mismos para la salud.
- Balance de dióxido de carbono (CO₂): el dióxido de carbono emitido durante la combustión del biodiésel es totalmente reabsorbido por los vegetales. Por lo tanto, el biodiésel puede ser considerado un combustible renovable.

La síntesis de biodiésel puede ser efectuada a partir de tres metodologías:

- La transesterificación del aceite, empleando una base como catalizador. Esta metodología es ampliamente usada debido a que tiene un alto porcentaje de rendimiento y representa un proceso de conversión directa.
- La transesterificación del aceite empleando un ácido como catalizador.
- La conversión de los ácidos grasos del aceite en ésteres y posteriormente en biodiésel, lo cual posee la ventaja de evitar la formación de jabón en la reacción. Sin embargo, esta opción presenta la desventaja de requerir mayor tiempo de proceso, debido a que involucra un proceso de esterificación seguido por uno de transesterificación.

Figura 4. **Reacción básica de transesterificación para la obtención de biodiésel**



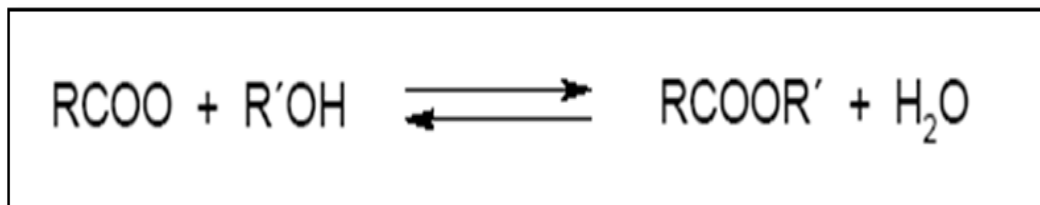
Fuente: http://www.biodiesel.org/pdf_files/fuelfactsheets/prod_quality.pdf.

Consulta: 2 de agosto 2009.

La estandarización de la metodología de fabricación del biodiésel se fundamentó en el empleo de dos sistemáticas. La primera metodología o metodología A, es una síntesis fundamentada en un proceso de transesterificación con el empleo de un alcohol como reactivo y una base como catalizador (figura 4).

La segunda metodología o metodología B desarrollada por Aleksander Kac, citado por Cordero (2003), fue recopilada por la organización no gubernamental “*Journey to forever*”. Dicha metodología involucra dos fases: la primera es un proceso de esterificación en condiciones ácidas (figura 5), y la segunda un proceso de transesterificación en condiciones cáusticas (figura 6).

Figura 5. **Reacción básica de esterificación en condiciones ácidas**

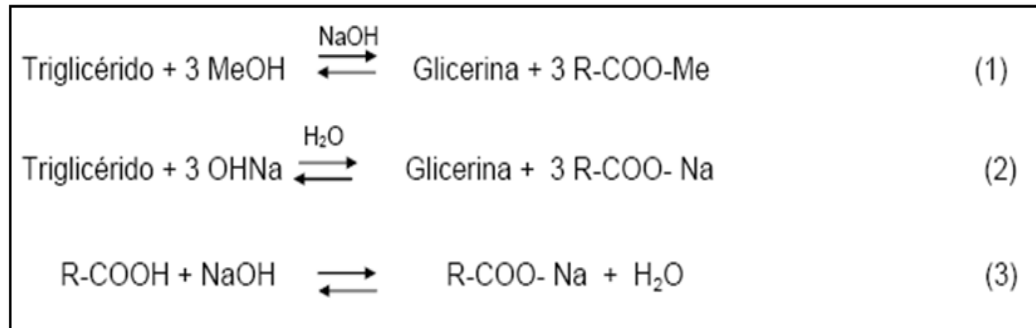


Fuente: http://www.biodiesel.org/pdf_files/fuelfactsheets/prod_quality.pdf.

Consulta: 2 de agosto 2009.

El sistema reaccionante a considerar para el diseño del proceso, se presenta en la siguiente figura.

Figura 6. **Proceso de transesterificación por etapas en condiciones cáusticas**



Fuente: http://www.biodiesel.org/pdf_files/fuelfactsheets/prod_quality.pdf.

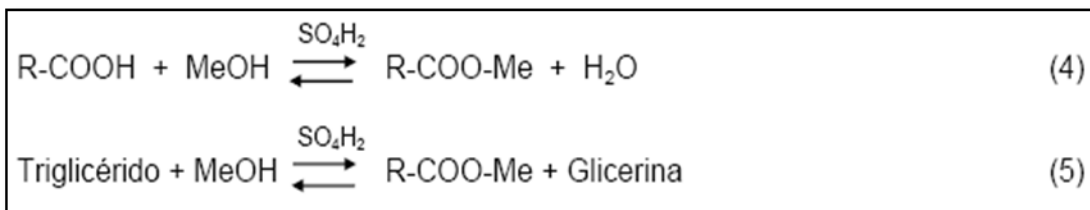
Consulta: 2 de agosto 2009.

Con R-COO-Me se representa la mezcla de metilésteres (biodiésel). El agua producida en la reacción 3 de la figura 6, que aparece en el sistema por la neutralización de los ácidos grasos, favorece la reacción (2) que da lugar a la formación de jabones. De esta manera, los ácidos grasos libres presentes en el sistema se están transformando en material de bajo valor. Por lo tanto, en los materiales de alta acidez, este esquema reaccionante conduce a un bajo rendimiento del proceso, perdiéndose los ácidos grasos que se transforman en jabones.

Dado que la acidez representa la cantidad de ácidos libres, expresados como gramos de ácido oleico por 100 gramos de material, la pérdida de rendimiento porcentual es prácticamente igual al valor de acidez. Además, la presencia de jabones complica el proceso en el reactor, dificultando las etapas de separación de fases y purificación.

La alternativa es realizar un primer paso catalizado por un ácido fuerte, según la figura 7.

Figura 7. **Proceso de transesterificación en condiciones ácidas**



Fuente: http://www.biodiesel.org/pdf_files/fuelfactsheets/prod_quality.pdf.

Consulta: 2 de agosto 2009.

La reacción 4 de la figura 7 está limitada por el equilibrio, mientras que la 5 es muy lenta. De esta manera, se pueden transformar los ácidos grasos, generando biodiésel y agua.

Luego de esta reacción, y la separación de fases, la mezcla reaccionante compuesta de triglicéridos y biodiésel se transforma según la primera reacción. Las fases que se separan luego de la catálisis ácida, una es rica en triglicéridos y otra rica en metanol. En esta última se concentra el agua formada durante la reacción.

2.1.1. Uso de etanol (catálisis alcalina)

El uso de etanol para la reacción de transesterificación es de interés no solo por la utilización de otro recurso renovable, sino por las diferentes propiedades que le confiere al biodiésel. Así, el producto obtenido a partir de grasas, presenta un menor punto de escurrimiento cuando se usa etanol respecto de metanol. Por otro lado, la reactividad del etanol es muy diferente a la del metanol, tanto por una diferencia en la polaridad de la molécula, como por una mayor miscibilidad mutua que se tiene en presencia de etanol.

Una mayor miscibilidad implica mayor velocidad de reacción, dado que se eliminan o disminuyen los problemas de transferencia de masa. El uso de NaOH como catalizador conduce a mayores velocidades de reacción, pero se presentan otras dificultades operativas, como la formación de geles.

2.1.2. Uso de etanol (catálisis ácida)

El uso de materiales de alta acidez, tal como fue discutido anteriormente, es de interés para el aprovechamiento de materiales de bajo costo. Para esterificar los ácidos grasos con etanol, en presencia de ácido sulfúrico como catalizador, cabe la posibilidad de utilizar el etanol al 96%, de costo muy inferior al etanol absoluto.

Esto se debe a que en medio ácido, el agua no es perjudicial desde el punto de vista del rendimiento, tal como sucede en presencia de un álcali, como fue explicado con anterioridad.


2.1.3. Especificaciones de calidad del biodiésel

Las características físicas y químicas de los ésteres de los aceites vegetales (biodiésel) son muy parecidas a las del aceite combustible diésel derivado del petróleo; por esa razón pueden mezclarse en cualquier proporción. Actualmente se utiliza como un aditivo que no excede un 20 % en volumen (B20) sin modificaciones al motor.

Para su comercialización, el biodiésel puro (B100), debe cumplir con una serie de especificaciones de calidad que se hallan en la norma ASTM D 6751; esto se muestra en la figura siguiente.

Figura 8. **Parámetros para biodiésel (B100), según norma ASTM D6751**

Propiedad	Método ASTM	Límites	Unidades
Punto de Inflamabilidad	D-93	130 min.	°C
Agua y sedimentos	D-2709	0.05 máx.	% Vol.
Viscosidad cinemática a 40 °C	D-445	1.9-6.0	mm ² /s
Ceniza sulfatada	D-874	0.02 máx.	% masa
Azufre	D-5453	0.05 máx.	% masa
Corrosión tira de cobre, 3 h, 50 °C	D-130	No. 3 máx.	
Índice de cetano	D-613	47 min	
Punto de enturbiamiento	D-2500	Reportar	
Destilación, 90% recuperados	D-1160	360 máx.	



Fuente: http://www.biodiesel.org/pdf_files/fuelfactsheets/prod_quality.pdf.

Consulta: 2 de agosto 2009.

2.2. Obtención y análisis de datos de velocidad cinética

Se emplean reactores por lotes primordialmente para determinar los parámetros de ley de velocidad en reacciones homogéneas.

Esta determinación, por lo regular, se efectúa midiendo la concentración en función del tiempo y utilizando después los métodos de análisis de datos diferenciales, integral o de mínimos cuadrados, para determinar el orden de reacción α , y la velocidad de reacción específica k .

2.2.1. Método diferencial de análisis de velocidad

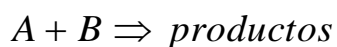
Cuando una reacción es irreversible, en muchos casos es posible determinar el orden de reacción α y la constante de velocidad específica, diferenciando numéricamente los datos de concentración contra tiempo. Este método aplica cuando las condiciones de la reacción son tales, que la velocidad es esencialmente función de la concentración de un solo reactivo. Por ejemplo, para la reacción de descomposición siguiente:



(Ec. 1)

$$-r_A = kC_A^\alpha$$

Se puede usar el método diferencial. Sin embargo, también es posible utilizar el método de exceso para determinar la relación entre $-r_A$ y la concentración de otros reactivos. Es decir, para la reacción irreversible:



Cuya ley de velocidad es:

$$-r_A = k_A C_A^\alpha C_B^\beta \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde tanto α como β son incógnitas, la reacción podría efectuarse primero con B en exceso, para que C_B prácticamente no cambie durante el curso de la reacción.

Luego:

$$-r_A = k' C_A^\alpha \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde:

$$k' = k C_B^\beta \approx k C_{B0}^\beta \quad (\text{Ec. 4})$$

Después de determinar α , la reacción se efectúa con A en exceso, y en ese caso la ley de velocidad se aproxima con:

$$-r_A = k'' C_B^\beta \quad (\text{Ec. 5})$$

Una vez determinados α y β , se puede calcular k_A , a partir de la medición de $-r_A$ a concentraciones conocidas de A y B:

$$k_A = \frac{-r_A}{C_A^\alpha C_B^\beta} = (\text{dm}^3/\text{mol})^{\alpha+\beta-1/s}$$

Se puede determinar tanto α como β usando el método del exceso, aunado a un análisis diferencial de los datos de sistemas por lotes.

Podría delinearse el procedimiento que se usa en el método de análisis diferencial y se considerará una reacción que se efectúa isotérmicamente en un reactor por lotes de volumen constante, registrando la concentración en función del tiempo.

Si se combina un balance de moles con la ley de velocidad dada por la ecuación (1), se obtiene:

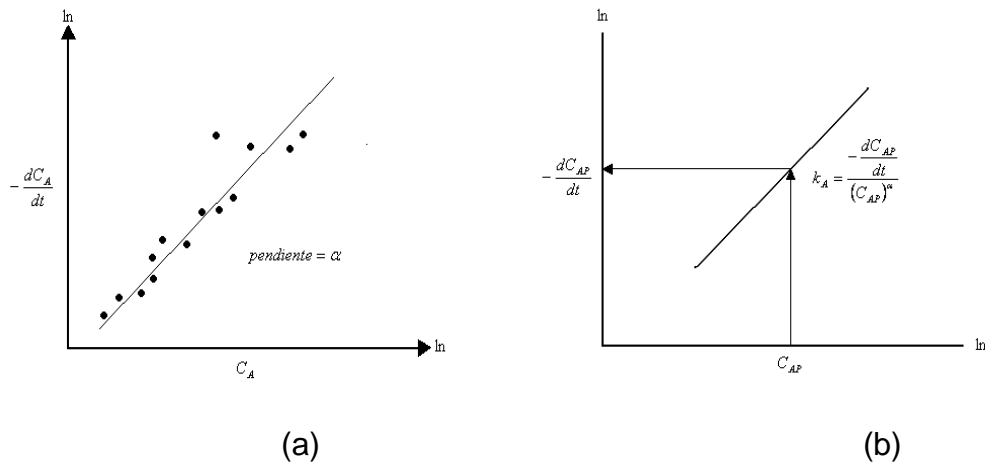
$$-\frac{dC_A}{dt} = k_A C_A^\alpha \quad (\text{Ec. 6})$$

Después de sacar el logaritmo natural de ambos miembros de la ecuación (6),

$$\ln\left(\frac{-dC_A}{dt}\right) = \ln k_A + \alpha \ln C_A \quad (\text{Ec. 7})$$

Puede observarse que la pendiente de una gráfica de $\ln(-dC_A/dt)$ en función de $(\ln C_A)$ es el orden de reacción, en la figura 9.

Figura 9. **Gráficas de $-dC/dt$ versus C utilizadas en el método diferencial de análisis de velocidad, para determinar el orden de reacción**



Fuente: SMITH, Otto. *Ingeniería de la cinética química*, p. 228.

La figura 9 (a) muestra una gráfica de $-(dC_A/dt)$ contra C_A en papel log-log, donde la pendiente es igual al orden de reacción α . La velocidad de reacción específica, k_A , se puede determinar escogiendo primero una concentración en la gráfica, suponiendo C_{AP} , y encontrando después el valor correspondiente de $-(dC_A/dt)$, como se muestra en la figura 9 (b). Después de elevar C_{AP} a la α potencia, se divide entre $-(dC_A/dt)_P$ para determinar k_A :

$$k_A = \frac{-(dC_A / dt)_P}{(C_{AP})^\alpha}$$

Para obtener la derivada de $-dC_A/dt$ que se usa en esta gráfica, se deben diferenciar los datos de concentración tiempo, sea numérica o gráficamente.

Se describirán tres métodos para determinar la derivada a partir de datos de donde se obtiene la concentración en función del tiempo. Estos métodos son:

- Diferenciación gráfica
- Fórmulas de diferenciación numérica
- Diferenciación de un polinomio ajustado a los datos

2.2.1.1. Método gráfico

Con este método es fácil ver disparidades en los datos. El método gráfico implica graficar $\Delta C_A/\Delta t$ en función de t y luego usar diferenciación por áreas iguales para obtener dC_A/dt . Además de la técnica gráfica que se usa para diferenciar los datos, existen otros dos métodos de uso común: fórmulas de diferenciación y ajuste de polinomios.

2.2.1.2. Método numérico

Se pueden usar fórmulas de diferenciación numérica si los puntos de datos de la variable independiente están espaciados de manera uniforme, como $t_1 - t_0 = t_2 - t_1 = \Delta t$:

Tabla I. **Análisis comparativo entre tiempo y concentración**

Tiempo (min)	0	1	2	3	4	5
Concentración (mol/dm ³)	A0	A1	A2	A3	A4	A5

Fuente: elaboración propia.

Pueden usarse las fórmulas de diferenciación de tres puntos:

Punto inicial:
$$\left(\frac{dC_A}{dt}\right)_{t_0} = \frac{-3C_{A0} + 4C_{A1} - C_{A2}}{2\Delta t} \quad (\text{Ec. 8})$$

Puntos interiores:
$$\left(\frac{dC_A}{dt}\right)_{t_i} = \frac{1}{2\Delta t} [(C_{A(i+1)} - C_{A(i-1)})] \quad (\text{Ec. 9})$$

$$\left[p.ej., \left(\frac{dC_A}{dt}\right)_{t_3} = \frac{1}{2\Delta t} [C_{A4} - C_{A2}] \right]$$

Último punto $\left(\frac{dC_A}{dt}\right)_{t_5} = \frac{1}{2\Delta t} [C_{A3} - 4C_{A4} + 3C_{A5}]$ (Ec. 10)

Para calcular dC_A/dt se usan las ecuaciones (8) y (10) para el primer y último punto, respectivamente; mientras que la ecuación (9) sirve para todos los puntos de datos intermedios.

2.2.1.3. Método de ajuste de polinomios

Otra técnica para diferenciar los datos consiste en ajustar primero los datos de concentración-tiempo a un polinomio de orden n :

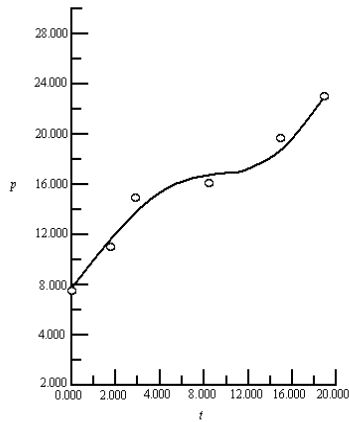
$$C_A = a_0 + a_1t + a_2t^2 + \dots + a_nt^n \quad (\text{Ec. 11})$$

Hay que tener cuidado al escoger el orden del polinomio. Si el orden es demasiado bajo, el ajuste del polinomio no captura las tendencias de los datos y no pasará por muchos de los puntos.

Si se escoge un orden demasiado alto, la curva ajustada puede tener crestas y valles al pasar por casi todos los puntos de datos, y esto produce errores importantes cuando se generan las derivadas, dC_A/dt , en los diversos puntos.

En la figura 10 se muestra un ejemplo de esto, en el que los mismos datos se ajustan a un polinomio de tercer orden (a) y a uno de quinto orden (b).

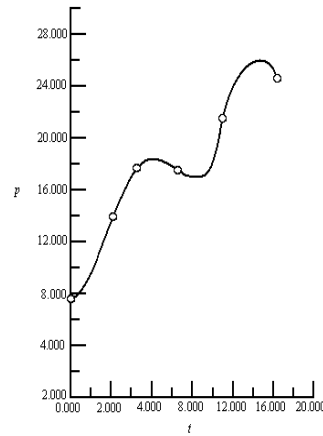
Figura 10. **Método de ajuste a un polinomio de grado n de los datos de concentración-tiempo**



$$p(t) = 7.50167 + 1.59822 \cdot t - 0.105874 \cdot t^2 + 0.00279741 \cdot t^3$$

Varianza = 0.738814

(a)



$$p(t) = 7.5 - 0.305644 \cdot t + 0.86538 \cdot t^2 - 0.151976 \cdot t^3 + 0.00965104 \cdot t^4 - 0.000205154 \cdot t^5$$

(b)

Fuente: SMITH, Otto. *Ingeniería de la cinética química*, p. 228.

Puede observarse cómo cambia la derivada del polinomio de quinto orden, de un valor positivo a los 15 minutos y a un valor negativo a los 20 minutos.

Para la determinación de α y k ahora utilizando el método gráfico, el de fórmulas de diferenciación o el de derivada de polinomio, se puede preparar la tabla que a continuación se presenta.

Tabla II. **Variables para la determinación de α y k , utilizando el método de la derivada de polinomios**

<i>Tiempo</i>	t_0	t_1	t_2	t_3
<i>Concentración</i>	C_{A0}	C_{A1}	C_{A2}	C_{A3}
<i>Derivada</i>	$\left(-\frac{dC_A}{dt}\right)_0$	$\left(-\frac{dC_A}{dt}\right)_1$	$\left(-\frac{dC_A}{dt}\right)_2$	$\left(-\frac{dC_A}{dt}\right)_3$

Fuente: SMITH, Otto. *Ingeniería de la cinética química*, p. 39.

Se determina el orden de reacción a partir de una gráfica de $\ln(-dC_A/dt)$ en función de $\ln C_A$, como se muestra en la figura 1(a), puesto que:

$$\ln\left(-\frac{dC_A}{dt}\right) = \ln k_A + \alpha \ln C_A \quad (\text{Ec. 12})$$

2.2.2. Método Integral de análisis de velocidad

Para determinar el orden de reacción por el método integral, se presupone un orden de reacción y se integra la ecuación diferencial que se usa para modelar el sistema.

Si el orden que se supone es correcto, la gráfica apropiada de los datos concentración-tiempo (determinada a partir de la integración) será lineal. Se usa el método integral con mayor frecuencia cuando se conoce el orden de reacción y se desea evaluar las constantes de velocidad de reacción específicas a diferentes temperaturas y determinar la energía de activación.

En el método integral para análisis de datos de velocidad se busca la función apropiada de la concentración, que corresponde a una ley de velocidad específica que sea lineal respecto del tiempo.

Para la reacción $A \Rightarrow$ productos, efectuada en un reactor por lotes de volumen constante, el balance de moles es:

$$\frac{dC_A}{dt} = r_A$$

En el caso de una reacción de orden cero, $r_A = -k$, y la ley de velocidad y balance de moles combinados dan:

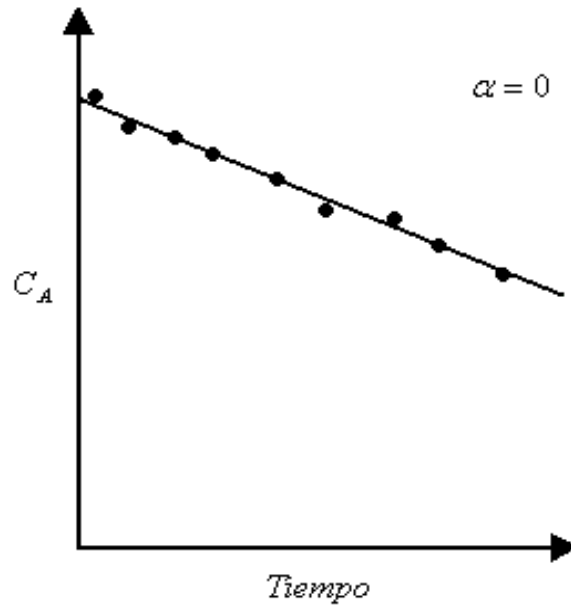
$$\frac{dC_A}{dt} = -k \quad (\text{Ec. 13})$$

Integrando con $C_A = C_{A0}$ en $t = 0$, se tiene:

$$C_A = C_{A0} - kt \quad (\text{Ec. 14})$$

Una gráfica de la concentración de A en función del tiempo será lineal (figura 12) con pendiente $(-k)$ para una reacción de orden cero, efectuada en un reactor a volumen constante.

Figura 11. **Gráfica de una reacción de orden cero para datos analizados por el método integral de análisis de velocidad**



Fuente: SMITH, Otto. *Ingeniería de la cinética química*, p. 236.

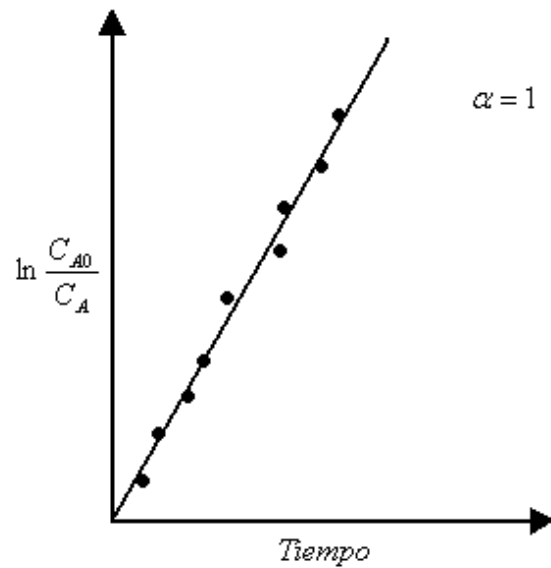
Si la reacción es de primer orden, figura 12, la integración del balance de moles y ley de velocidad combinados, será:

$$-\frac{dC_A}{dt} = kC_A$$

Con el límite $C_A = C_{A0}$ en $t = 0$, da:

$$\ln \frac{C_{A0}}{C_A} = kt \quad (\text{Ec. 15})$$

Figura 12. **Gráfica de una reacción de primer orden para datos analizados por el método integral de análisis de velocidad**



Fuente: SMITH, Otto. *Ingeniería de la cinética química*, p. 236.

Así, se puede observar que la pendiente de una gráfica de $[\ln(C_{A0}/C_A)]$ en función del tiempo es lineal, con pendiente k .

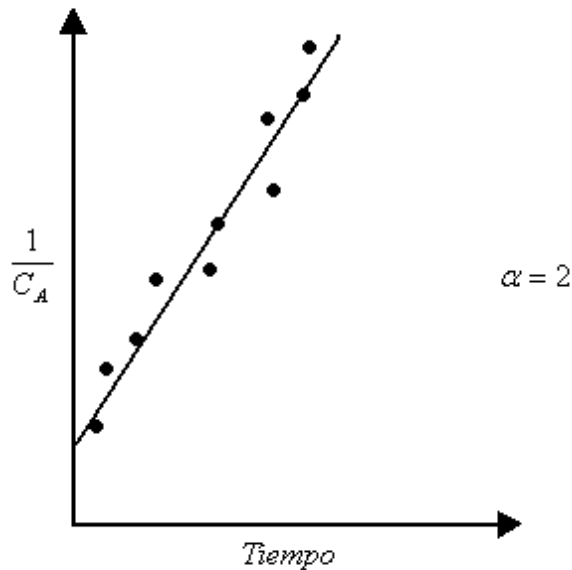
Si la reacción es de segundo orden (figura 13), entonces:

$$-\frac{dC_A}{dt} = kC_A^2$$

La integración con $C_A = C_{A0}$, inicialmente da

$$\frac{1}{C_A} - \frac{1}{C_{A0}} = kt \tag{16}$$

Figura 13. **Gráfica de una reacción de segundo orden para datos analizados por el método integral de análisis de velocidad**



Fuente: SMITH, Otto. *Ingeniería de la cinética química*, p. 237.

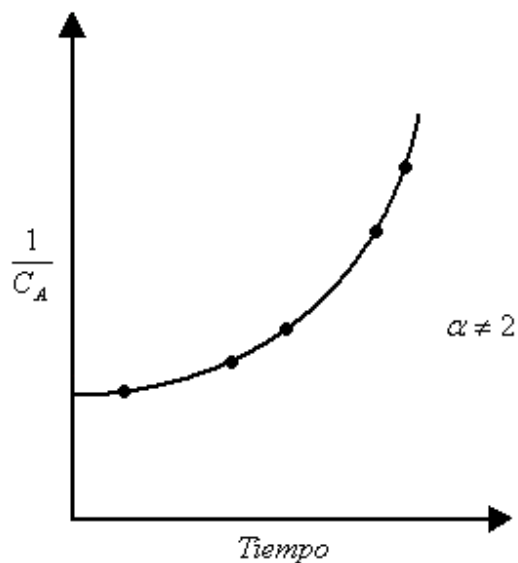
Se observa que para una reacción de segundo orden, una gráfica de $1/C_A$ en función del tiempo, debe ser lineal con pendiente k .

En las tres figuras que se analizaron con anterioridad, se observó que al graficar la función apropiada de la concentración (es decir, C_A , $\ln C_A$ o $1/C_A$) contra el tiempo, las gráficas son lineales, y se concluye que las reacciones son de orden cero, uno y dos, respectivamente.

Sin embargo, si las gráficas de datos de concentración contra tiempo no hubieran sido lineales, como en la figura 14, se diría que el orden de reacción propuesto no concuerda con los datos. En el caso de la figura 14, se llega a la conclusión de que la reacción no es de segundo orden.

Es importante señalar que, dada una ley de velocidad de reacción, deberá ser posible escoger con rapidez la función apropiada de la concentración o la conversión que produzca una línea recta, al graficarse contra el tiempo o el espacio tiempo.

Figura 14. **Gráfica del recíproco de la concentración en función del tiempo, utilizada en el método integral de análisis de velocidad**

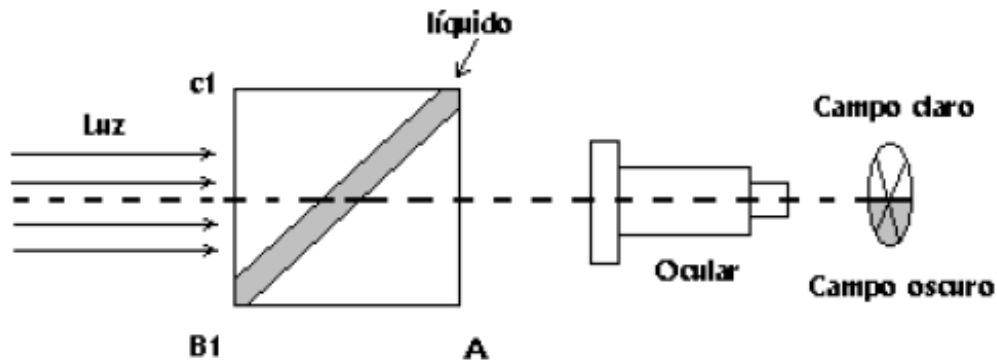


Fuente: SMITH, Otto. *Ingeniería de la cinética química*, p. 238.

2.3. Refractómetro Abbe

El principio de funcionamiento de este instrumento es la reflexión total interna. El líquido cuyo índice de refracción se desea medir, se coloca entre dos prismas transparentes rectangulares de índice de refracción conocido (figura 15).

Figura 15. Esquema de funcionamiento del refractómetro



Fuente: www.fisica.uh.cu/bibvirtual/fisica_aplicada/fisicall/folleto/Lab-3.pdf.

Consulta: 2 de agosto 2009.

Los prismas son de vidrio ópticamente denso; una condición necesaria para poder utilizar el instrumento es que el índice de refracción del líquido sea *menor* que el de los prismas. La cantidad de líquido necesaria es de solamente unas pocas gotas. La luz entra en el prisma por la cara B1C1, se refracta, y los rayos se dirigen a la cara esmerilada A1B1.

En esta cara tiene lugar el fenómeno de la reflexión total interna, y los rayos que no son reflejados, atraviesan el líquido y el otro prisma (que corrige las desviaciones de los rayos), para emerger por la cara A1C1 y seguir hasta el ocular.

El ángulo crítico viene dado por la relación:

$$\text{Sen}(w_0) = \frac{n_{\text{liq}}}{n_{\text{vid}}}$$

Donde n_{liq} y n_{vid} representan los índices de refracción del líquido y del vidrio, respectivamente. Conociendo el valor de n_{vid} y del ángulo w_0 , se puede obtener el valor del índice de refracción desconocido.

El refractómetro Abbe está diseñado de tal forma que, cuando se ajusta la inclinación de los prismas de manera que la separación de los campos claro y oscuro en el ocular, coincida con el centro del retículo (ver figura 15); entonces el índice de refracción buscado se lee directamente en una escala calibrada, acoplada a los prismas y anexa al ocular. En algunos instrumentos, la escala está ubicada dentro del campo de visión del ocular, de forma que es posible verla conjuntamente con el retículo y los campos claro y oscuro.

Los refractómetros usualmente tienen un sistema óptico auxiliar (prisma de Amici) que permite trabajar con luz blanca, eliminando la coloración causada por la dependencia de n de la longitud de onda (acromatización). El sistema se regula mediante un control en el instrumento, y debe ser ajustado cada vez que se hace una medición. El ocular posee otro control para el enfoque preciso del retículo y de la división claro-oscuro.

Para calibrar el instrumento se utiliza un control adicional o sea calibración que permite establecer en la escala el valor correcto del índice de refracción de una sustancia conocida, cuando esta se coloca entre los prismas. El índice de refracción depende de la temperatura.

Para la mayoría de las sustancias orgánicas esta variación se encuentra entre 0.001 y 0.004 unidades de índice de refracción por $^{\circ}\text{C}$ de variación de la temperatura. Por esta razón, en mediciones de precisión, es imprescindible controlar la temperatura del líquido analizado.

Con este fin, los prismas del refractómetro tienen acoplado un sistema para estabilizar y medir la temperatura durante la determinación, utilizando un termostato como medio auxiliar para establecer un flujo de agua a la temperatura deseada.

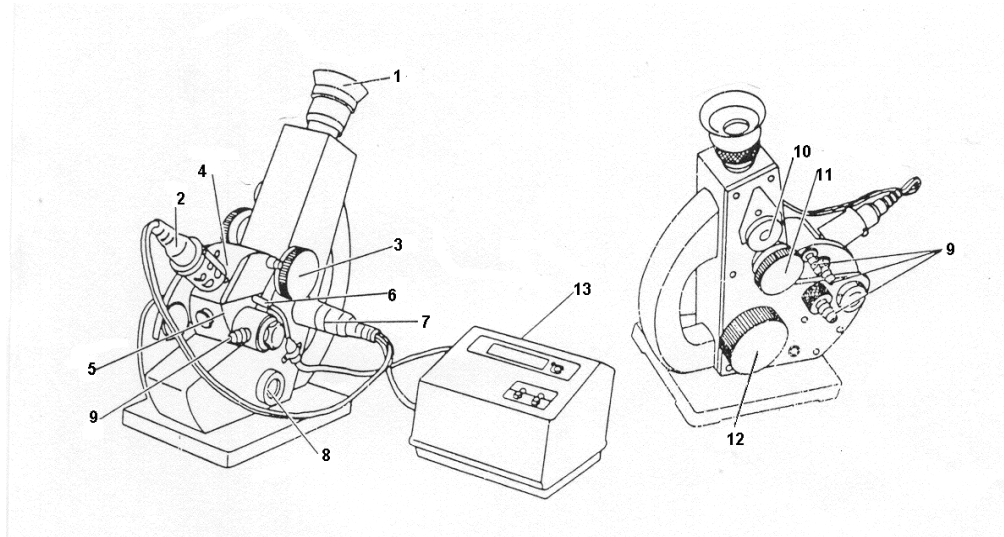
Al igual que en cualquier otro instrumento, si no existe información al respecto, el error absoluto cometido en la medición (Δn) se determina por el valor de la menor división de la escala.

2.3.1. Uso del refractómetro Abbe

Lista de partes principales, señaladas en la figura 16:

1. Ocular
2. Ensamble de iluminación de la muestra
3. Perillas de abertura del prisma
4. Prisma secundario
5. Prisma principal
6. Termistor
7. Ensamble de la iluminación de la escala
8. Caja desecadora
9. Conexiones de entrada y salida de agua para el control de temperatura
10. Tornillo de ajuste
11. Perilla de compensación de color
12. Perilla de medición
13. Termómetro

Figura 16. **Esquema de las partes principales que componen el refractómetro Abbe**



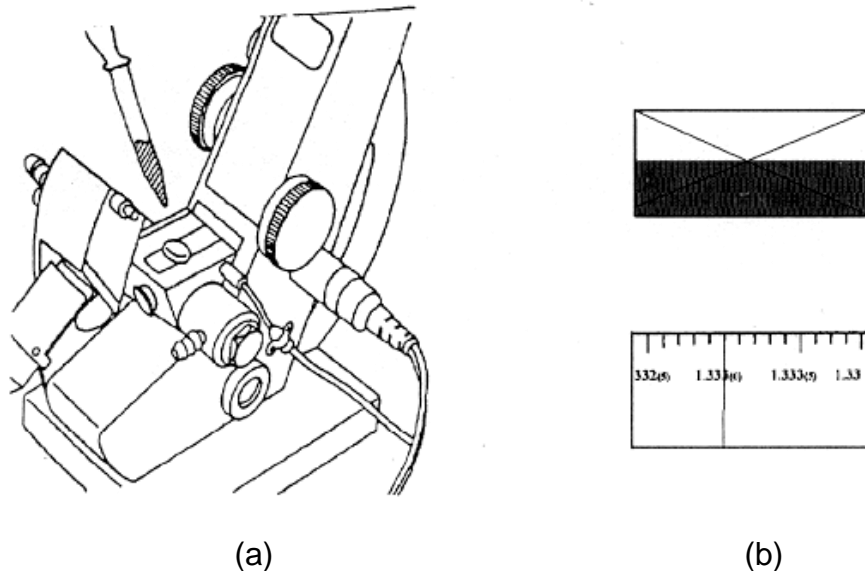
Fuente: www.maquimsa.com/html/tecnica/refractometros.html.

Consulta: 3 de agosto 2009.

2.3.2. Ajuste de la escala

- Colocar de 2 a 3 gotas de agua destilada en la superficie del prisma principal con una jeringa (figura 17);
- Cerrar el prisma secundario y observar a través del ocular;
- Ajustar la escala, a 1.333, brix 0% (figura 17)

Figura 17. **Esquema del proceso de medición del índice de refracción en un refractómetro**



Fuente: www.maquimsa.com/html/tecnica/refractometros.html.

Consulta: 3 de agosto 2009

2.3.3. Medición del índice de refracción de las soluciones

- Se abre el prisma secundario y se colocan de 2 a 3 gotas de solución en el centro de la superficie del prisma;
- Se cierra cuidadosamente el prisma secundario;
- Observar por el ocular, girar la perilla de compensación de color hasta que aparezca una línea clara y definida en el campo de visión;
- Girar la perilla de medición, alineando la línea delimitadora con las líneas de intersección, y leer en la escala superior el índice de refracción.

3. MARCO METODOLÓGICO

Para la obtención de biodiésel se aplicó la reacción de transesterificación de un triglicérido, utilizando alcohol etílico anhidro e hidróxido de sodio como catalizador. La reacción se realizó a nivel planta piloto, utilizando un motor con agitador y un recipiente plástico como reactor. Las cantidades de reactivo utilizado se calcularon a partir de proporciones ya establecidas y utilizando como base un volumen de producto final; las proporciones se presentan en la tabla siguiente.

Tabla III. **Proporciones utilizadas para la obtención de biodiésel (cantidades en toneladas)**

Aceite vegetal	Etanol	Ésteres	Glicerina
1.000	0.150	1.050	0.100

Fuente: <http://onzariteam.blogspot.com/2007/01/produccion-de-combustible-automotriz.html>.

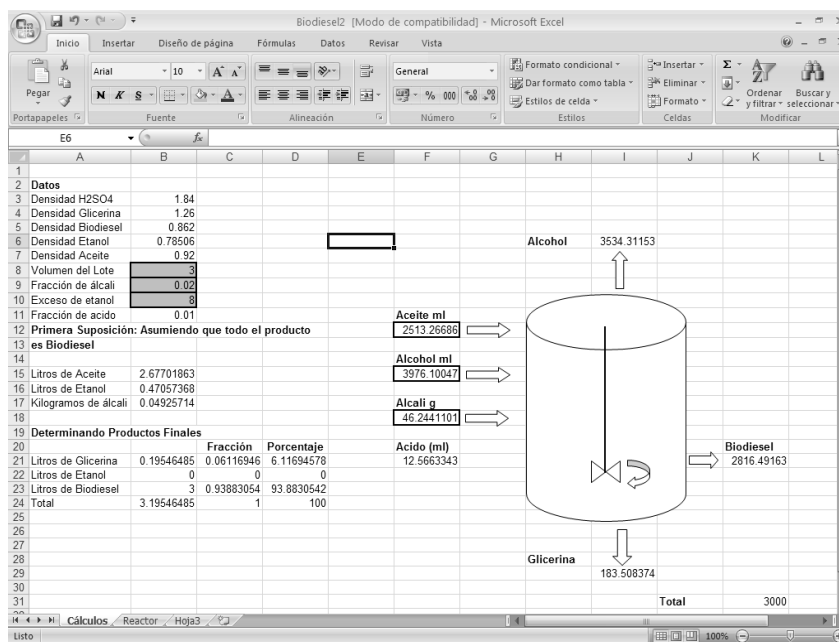
Consulta: 3 de agosto 2009.

Se utilizó el programa Excel para construir una hoja de cálculo en donde fuera posible obtener, a partir de un volumen dado, encontrar las cantidades de reactivo que se agregarían para mezcla en el recipiente, así como las cantidades de producto que se obtendrían al final del proceso. La figura 18 muestra un ejemplo del cálculo empleado. Debido a que se utilizó aceite usado como materia prima, fue necesario calcular el índice de acidez para determinar la forma en que se procedería con el experimento.

Si el índice de acidez del aceite es menor al 5 %, la reacción de transesterificación proporciona altos rendimientos.

Por otro lado, la producción de biodiésel utilizando materiales de alta acidez, requiere de un proceso con dos pasos de catálisis: una catalizada por ácidos (esterificación de Fisher), y otra por álcalis (transesterificación); lo que complicaría el experimento, ya que para poder realizar el análisis y obtención de los parámetros de velocidad de reacción del biodiésel, se necesita que la reacción se complete en un solo paso, sin segundas reacciones que requieran la aplicación de más reactivo o catalizador.

Figura 18. Vista del programa de computadora construido para determinar las cantidades de reactivo que se emplearán en la reacción de transesterificación para la elaboración de biodiésel



Fuente: imagen obtenida de hoja de cálculo en programa Microsoft Excel.

La formación de biodiésel por medio de la reacción de transesterificación se completó en una secuencia sencilla de pasos, los cuales se detallan a continuación:

- Con base en la hoja de cálculo antes mencionada, se determinó la cantidad de hidróxido de sodio que fue utilizado como catalizador en la reacción; así también se midieron las cantidades de alcohol etílico anhidro y aceite vegetal usado;
- En un contenedor adecuado (en este caso el recipiente de plástico que será manejado como reactor) se adicionaron las cantidades de hidróxido de sodio y alcohol, medidas en el paso anterior y se mezclaron por aproximadamente 15 min;
- Una vez mezclado el hidróxido de sodio y el alcohol etílico, se añadió el aceite vegetal usado, y se mezcló por aproximadamente 2 horas;
- Al finalizar la mezcla, el contenido que se encontraba dentro del contenedor se transfirió a un nuevo recipiente, en donde permaneció aproximadamente 24 horas, con el propósito de observar la separación de cualquier subproducto;
- Después de este tiempo, se observó dentro de la ampolla de decantación una fase transparente. Dicha fase se compone del biodiésel formado en la reacción, el alcohol en exceso y los subproductos (glicerina, jabones y residuos de ésteres sin reaccionar);

- Para la recuperación del biodiésel se requirió que el alcohol que contaminaba la muestra fuera evaporado; este proceso se efectuó en una plancha de calentamiento. Ya eliminado el alcohol en exceso, se observaron dos fases: la fase pesada que se componía del subproducto y la fase liviana que se componía de biodiésel;
- Finalmente, se realizó una serie de lavados para limpiar el etiléster (biodiésel), de las trazas de hidróxido de sodio, agua, alcohol, glicerina y jabón que habían quedado suspendidas en la muestra.

Para la obtención de los parámetros de velocidad, se aplicó el método diferencial de análisis de velocidades; este método, junto con el método integral de análisis de velocidades se usa primordialmente para analizar datos en sistemas de reacciones por lotes; precisamente el sistema que se utilizó en esta investigación, por las condiciones de la experimentación.

El método diferencial de análisis de velocidades se aplica cuando una reacción es reversible o las condiciones de la reacción son tales que la velocidad es esencialmente función de la concentración de un solo reactivo.

En la reacción de transesterificación se requiere que el alcohol se encuentre en exceso, para este propósito, el alcohol se encontraba en un 800 % de exceso, por lo que se pudo considerar que la concentración del alcohol etílico no varió apreciablemente en el tiempo, y fue la concentración del aceite usado la que rigió el curso del proceso y estableció el orden de la reacción y la constante de equilibrio.

En el método diferencial, existen tres técnicas para determinar la derivada a partir de datos que dan la concentración en función del tiempo. Estas técnicas son:

- Diferenciación gráfica
- Fórmulas de diferenciación numérica
- Diferenciación de un polinomio ajustado a los datos

Para efectos del experimento, se aplicó la técnica de diferenciación de un polinomio, pues presenta más versatilidad en los cálculos, y mayor facilidad de análisis para la posterior interpretación de resultados.

No se aplicó el método integral, ya que es un procedimiento de ensayo y error; además, el método se aplica con mayor frecuencia cuando se conoce el orden de reacción y se desean evaluar las constantes de velocidad de reacción específicas a diferentes temperaturas y determinar la energía de activación.

Para la aplicación del método diferencial, se requiere de una tabla de datos que proporcione, para una reacción específica, el cambio de concentración en el tiempo. Esta tabla se obtuvo con ayuda del refractómetro Abbe. El procedimiento teórico fue el siguiente:

- Se construyó una curva de calibración con la cual se obtuvieron diferentes valores de concentración de uno de los componentes (biodiésel) en función del índice de refracción. Se hicieron diferentes mezclas de concentración conocida, que simulaban un momento específico del tiempo en el avance de la reacción del biodiésel. Para cada una de las mezclas, se determinó en el refractómetro el índice de refracción correspondiente.

- Una vez se obtuvo la curva de calibración del refractómetro, fue posible analizar la reacción de transesterificación para la obtención de biodiésel, siguiendo el procedimiento que se detalló para su elaboración. Durante la reacción dentro del recipiente se extrajeron, periódicamente, muestras de la mezcla, las cuales fueron analizadas en el refractómetro; este mostró un índice de refracción que, basado en la curva de calibración, proporcionó un valor de concentración.
- Con estos valores fue posible construir la curva de concentración versus tiempo, que era necesaria para la aplicación del método diferencial de análisis de velocidades.

4. RESULTADOS

Tabla IV. **Reactivos, productos y subproductos de la reacción de biodiésel, obtenidos por el método de transesterificación (cantidades en litros)**

No.	Aceite	Alcohol adicionado	Alcohol recuperado	Alcohol en reacción	Biodiésel	Residuos
1	2,5137	3,9512	2,7900	1,1612	2,0800	0,7000
2	2,5137	3,9512	3,1600	0,7912	1,7200	1,0800
3	2,5137	3,9512	3,1800	0,7712	1,7200	0,9500

Se utilizó un volumen de 3 L de mezcla, a un 800 % de exceso de etanol.

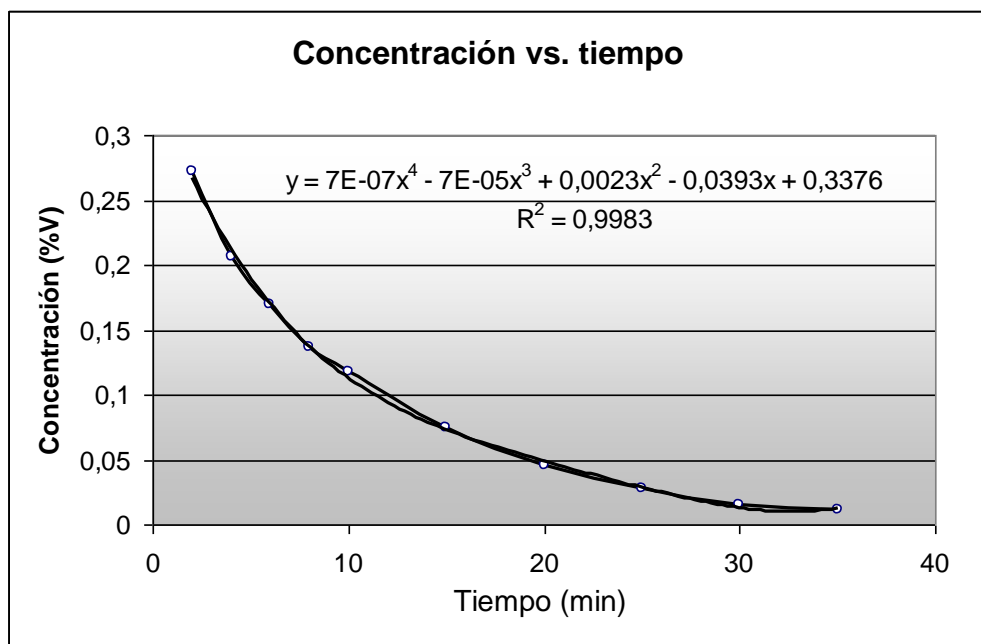
Fuente: elaboración propia.

Tabla V. **Concentración de aceite a partir de índices de refracción promedio, medidos para diferentes tiempos durante la reacción de transesterificación**

tiempo	IR Prom	Concentración (V/V)
2	1,3750	0,2720
4	1,3803	0,2058
6	1,3835	0,1694
8	1,3868	0,1366
10	1,3888	0,1182
15	1,3943	0,0746
20	1,3990	0,0452
25	1,4028	0,0274
30	1,4060	0,0158
35	1,4075	0,0116
40	1,4080	0,0104
45	1,4085	0,0093
50	1,4085	0,0093
55	1,4085	0,0093
60	1,4085	0,0093
Proceso de fabricación de biodiésel a temperatura ambiente.		

Fuente: elaboración propia.

Figura 19. **Gráfica de concentración en función del tiempo para la reacción de transesterificación en la fabricación de biodiésel**



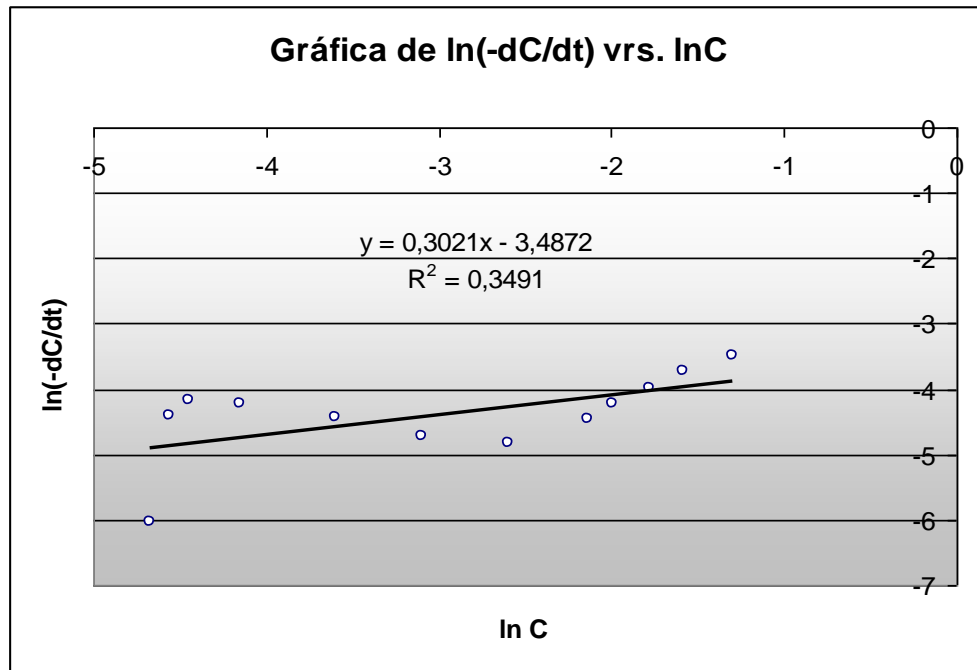
Fuente: elaboración propia, utilizando datos de la tabla V.

Tabla VI. **Derivada de la concentración respecto del tiempo para determinar el orden de reacción y la constante k de velocidad, utilizando el método diferencial de análisis de velocidades**

Tiempo	IR Prom.	V/V	-dC/dt	Ln(-dC/dt)	Ln C	k
2	13750	0,2720	0,0309	-3,4764	-1,3018	0,0458
4	1,3802	0,2057	0,0241	-3,7263	-1,5811	0,0388
6	1,3835	0,1694	0,0186	-3,9816	-1,7755	0,0319
8	1,3867	0,1366	0,0145	-4,2332	-1,9905	0,0265
10	1,3887	0,1182	0,0115	-4,4654	-2,1351	0,0219
15	1,3942	0,0746	0,0081	-4,8159	-2,5952	0,0177
20	1,3990	0,0452	0,0089	-4,7217	-3,0962	0,0227
25	1,4027	0,0274	0,0118	-4,4397	-3,5975	0,0350
30	1,4060	0,0158	0,0147	-4,2199	-4,1482	0,0515
35	1,4075	0,0116	0,0155	-4,1669	-4,4528	0,0595
40	1,4080	0,0104	0,0121	-4,4145	-4,5629	0,0480
45	1,4085	0,0093	0,0024	-6,0323	-4,6774	0,0099

Fuente: elaboración propia, utilizando datos de la tabla IV.

Figura 20. **Gráfica de $\ln(-dC/dt)$ contra $\ln(C)$ para determinar el orden de la reacción del biodiésel, utilizando el método diferencial de análisis de velocidad**



Fuente: elaboración propia, utilizando datos de la tabla VI.

Tabla VII. **Orden de reacción α y constante de velocidad específica k , para la reacción de transesterificación del biodiésel, determinados a partir del método diferencial de análisis de velocidad**

	Valor numérico	Unidades
α	0,3021	Adimensional
k	0,0341	$(V/V)^{0.6979} \text{ min}^{-1}$

Fuente: elaboración propia, utilizando los datos de la figura 20.

5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La tabla III muestra los resultados obtenidos en el proceso de producción de biodiésel, utilizando el método de transesterificación. Durante la primera fase de la experimentación se realizaron tres pruebas.

Para determinar las cantidades exactas de reactivos que debían adicionarse, se diseñó una hoja de cálculo que devolvía las cantidades a partir de una proporción definida; es decir, se establecía el volumen de la mezcla, el porcentaje de álcali y el porcentaje de exceso en el que se encontraría el alcohol; el resto era calculado por el programa (figura 18).

Después de una serie de pruebas preliminares, se determinaron los valores de las variables que mostraban los resultados más favorables. Para el experimento, se limitó el volumen de la mezcla a 3 L; el álcali se fijó a un 2 % respecto de la cantidad de aceite presente en la mezcla y el alcohol utilizado se fijó a un 800 % en volumen respecto de toda la mezcla.

Las tres pruebas se efectuaron utilizando un agitador como el mostrado en la figura 21. La mezcla de los reactivos se realizó en un recipiente plástico recubierto con fibra de vidrio para mantener la temperatura constante y evitar cualquier variación de la misma.

La velocidad de agitación se fijó a 700 rpm para las tres pruebas, a modo de mantener todos los parámetros iguales y así obtener los mismos resultados.

Figura 21. **Equipo utilizado para efectuar la reacción de transesterificación**



Fuente: laboratorio de química de la Facultad de Ingeniería,
Universidad de San Carlos de Guatemala.

De las tres pruebas, la número 1 fue la que mostró el mayor grado de conversión de aceite a biodiésel, obteniéndose 2.08 L. De las pruebas 2 y 3 se obtuvo en ambas 1.72 L de biodiésel. La diferencia se debió probablemente a que no se tenía la certeza del origen del aceite utilizado en el experimento, ya que era aceite reprocesado. Con base en esto, el aceite pudo contener diferentes proporciones de ácidos grasos y triglicéridos, mismos que alteraron el resultado de los experimentos.

En la prueba número 1 se observó que solamente reaccionó el 29.38 % del alcohol agregado; de igual forma para las pruebas 2 y 3, el valor porcentual fue de 20.02 % y 19.52 %, respectivamente.

A pesar de que son porcentajes bajos, era necesario agregar cantidades excesivas de alcohol para que se completara la reacción; de otra forma, lo único que se obtenía era una masa semisólida de grasas.

Una posible explicación para la necesidad de grandes cantidades de alcohol es que la cantidad que se encuentra en exceso favorece la separación entre el biodiésel y la fase pesada que se genera durante la reacción de transesterificación.

En la siguiente fase se analizó la reacción de transesterificación, utilizándose un refractómetro del tipo Abbe (figura 22). Se realizaron tres pruebas, los resultados fueron promediados y se muestran en la tabla IV.

La tendencia de los resultados muestra que a medida que disminuye la concentración de aceite dentro de la mezcla, aumenta el valor del índice de refracción dado por el refractómetro.

Este aumento no es indefinido; los resultados también muestran que el valor de índice de refracción aumenta hasta un valor que se mantiene constante a partir de los 45 minutos de iniciado el proceso; esto se interpreta como el final de la reacción, en donde ya no existe conversión de reactivos en productos.

Figura 22. **Refractómetro Abbe utilizado en el experimento**



Fuente: laboratorio de química de la Facultad de Ingeniería,
Universidad de San Carlos de Guatemala.

Existen cinco métodos para obtener y analizar datos de velocidad de reacción para deducir la ley de velocidad de una reacción específica; estos son:

- Diferencial
- Integral
- De vidas medias
- De velocidades iniciales
- Análisis de mínimos cuadrados

Se utilizó el método diferencial de análisis de velocidades, porque aplica cuando las condiciones de la reacción son tales, que la velocidad es esencialmente función de la concentración de un solo reactivo. De los reactivos involucrados en la reacción de transesterificación, el aceite es el que determina la velocidad de la reacción, ya que el alcohol etílico se encuentra en exceso en el sistema y su variación es mínima.

Cuando una reacción se considera irreversible, en muchos casos es posible determinar el orden de reacción α y la constante de velocidad específica, diferenciando numéricamente los datos de concentración contra tiempo.

La figura 19 muestra la variación de la concentración del aceite analizado, en función del tiempo de reacción. Se observa que la concentración de aceite disminuye a medida que aumenta el tiempo de reacción en una relación inversamente proporcional.

Los datos de concentración en tiempo fueron ajustados a un polinomio de grado 4. Utilizando un polinomio de grado 3 no fue posible capturar la tendencia de muchos de los datos, y los resultados de las derivadas negativas de la concentración en función del tiempo no eran congruentes con los valores esperados. De igual forma, para polinomios de grado superior a 4, se presentaban gráficas con variaciones de pendiente consecutivas, debido a la presencia de crestas o valles en la misma gráfica; esto generaba errores importantes cuando se determinaban las derivas de dC/dt en cada punto analizado.

La figura 20 muestra la relación entre los valores de $\ln(-dC/dt)$ contra $\ln(C)$, obtenidos de la derivación del polinomio de grado 4, de la figura 19. Con base en el método diferencial de análisis de velocidades, los datos obtenidos deben ser ajustados a una regresión lineal a modo de obtener una ecuación de la forma:

$$\ln\left(-\frac{dC_A}{dt}\right) = \ln k_A + \alpha \ln C_A$$

De donde α es la pendiente de la gráfica lineal y la constante de k de velocidad es el intercepto de la curva. La tabla VI muestra el orden de reacción α y la constante de velocidad específica k , calculados a partir del método diferencial de análisis de velocidad.

Se concluyó que la velocidad de la reacción de transesterificación es del orden 0,3021 respecto del aceite utilizado; es decir, que la velocidad de desaparición del aceite dentro del sistema está dada por un factor de potencia de 0,3021 positivo.

El valor de la constante de velocidad de $0,0341 (V/V)^{0.6979} \text{ min}^{-1}$ está calculado para una temperatura de operación de $25 \text{ }^\circ\text{C}$ y es el factor que relaciona la velocidad de reacción de transesterificación con los reactivos involucrados en la reacción; en este caso, el aceite de reciclaje y el alcohol en exceso:

$$k_A = \frac{-(dC_A / dt)_P}{(C_{Ap})^\alpha}$$

El método diferencial de análisis de velocidades plantea el problema de que los resultados de la derivación de los datos de concentración como función del tiempo, deben ser ajustados a una gráfica lineal, ya sea utilizando papel logarítmico o calculando el logaritmo natural de cada valor; esto originó un valor de R^2 de 0.3491 para el experimento realizado.

CONCLUSIONES

1. Con base en los resultados obtenidos de orden de reacción y de constante velocidad cinética, utilizando el método de análisis diferencial, se define la ecuación de velocidad para la reacción de biodiésel de la siguiente manera: $-r_A = 0.0341C_A^{0.3021}$.
2. En la fabricación de biodiésel, utilizando la reacción de transesterificación, fue necesario utilizar un exceso del 800 % de alcohol etílico para que el biodiésel se separe de la fase pesada formada de glicerina y grasas sin reaccionar.
3. Una reacción de transesterificación para la obtención de biodiésel utilizando 2.5 L de aceite, 4 L de alcohol etílico y 46.24 g de hidróxido de sodio como catalizador, se completa en aproximadamente 45 minutos.
4. El biodiésel obtenido cumple con las especificaciones de calidad establecidas en la legislación nacional, según Acuerdo Ministerial Número 192-06.
5. Es factible la utilización del método diferencial de análisis de velocidades, en la determinación del orden de reacción y la constante de equilibrio de la reacción de transesterificación para la producción de biodiésel.

RECOMENDACIONES

1. Es conveniente utilizar el procedimiento gráfico y el numérico del método diferencial de análisis de velocidad para determinar $-dC_A/dt$, a partir de los datos de concentración en función del tiempo. De esta forma se puede demostrar la eficiencia de cada método.
2. Para el experimento se debe utilizar un aceite vegetal de masa molecular conocida, y así determinar los parámetros de velocidad de reacción en función de otras unidades de concentración, como concentración molar.
3. Determinar los parámetros de velocidad de reacción, utilizando para el experimento reactivos puros como aceite nuevo, etanol e hidróxido de sodio, grado reactivo. De esta forma se mostrará si las impurezas del aceite reciclado afectan la magnitud de los parámetros calculados y en qué proporción.

BIBLIOGRAFÍA

1. Biodiesel. America's Advanced Biofuel. *Production quality*. [en línea]. <http://www.biodiesel.org/pdf_files/fuelfactsheets/prod_quality.pdf> [Consulta: febrero de 2009].
2. CORDERO LÓPEZ, Jorge Alejandro. *Evaluación de las propiedades fisicoquímicas del biodiésel, obtenido a partir de aceite de palma y etanol, como combustible alternativo del diésel 2D*. Trabajo de graduación de Ing. químico, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2003. 104 p.
3. Corpodib.com. *Estudios de biocombustibles*. [en línea]. <<http://www.corpodib.com/estudios2.pdf>>. [Consulta: febrero de 2009].
4. Diesel technology forum. *Clean diesel*. [en línea]. <<http://www.dieselforum.org/factsheet/cleandiesel.html>>. [Consulta: febrero de 2009].
5. FOGLER, H. Scott. *Elements of chemical reaction engineering*. 4a ed. Michigan: Prentice-Hall, 2001. 1120 p.
6. Handmade projects. *How to make biodiesel*. [en línea]. <http://journeytoforever.org/biodiesel_make.html>. [Consulta: febrero de 2009].

7. _____. *The foolproof way to make biodiesel*. [en línea].
<http://journeytoforever.org/biodiesel_aleksnew.html>. [Consulta:
febrero de 2009].
8. Journeytoforever.org. *Biodiésel*. [en línea].
<<http://www.dangerouslaboratories.org/biodiesel.html>>. [Consulta:
febrero de 2009].
9. SMITH, Otto J. M. *Ingeniería de la cinética química*. 6a ed. México:
McGraw-Hill, 1991. 165 p.
10. Whole Earth Magazine. *From the fryer to the fuel tank*.
[en línea].
<[http://www.joshtickell.com/files/download/FromtheFryertotheFuel
Tank.pdf](http://www.joshtickell.com/files/download/FromtheFryertotheFuelTank.pdf)>. [Consulta: febrero de 2009].
11. ZOE Tecno-Campo. *El biodiésel*. [en línea].
<[http://www.zoetecnocampo.com/Documentos/biodie_lar/biodie_la
r.pdf](http://www.zoetecnocampo.com/Documentos/biodie_lar/biodie_lar.pdf)>. [Consulta: febrero de 2009].

APÉNDICES

Apéndice 1. Datos originales

Apéndice 1a. **Reactivos, productos y subproductos de la reacción de biodiésel, obtenidos por el método de transesterificación**

No.	Aceite	Alcohol	Alcohol exc	Alcohol rxn	Biodiésel	Residuo
1	2,5137	3,9512	2,7900	1,1612	2,0800	0,7000
2	2,5137	3,9512	3,1600	0,7912	1,7200	1,0800
3	2,5137	3,9512	3,1800	0,7712	1,7250	0,9500

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. **Datos calculados**

Apéndice 2a. **Distribución de reactivos, productos y subproductos, utilizada en la simulación de diferentes etapas dadas durante la reacción de transesterificación del biodiésel**

(0,0) (No. de mezcla, tiempo)				
(Cantidades en litros, t en minutos)				
Prueba	Aceite	Alcohol	Biodiésel	Residuo
1	2,5137	3,9512	0,00	0,00
2	2,5137	3,9512	0,00	0,00
3	2,5137	3,9512	0,00	0,00
(1,12)				
Prueba	Aceite	Alcohol	Biodiésel	Residuo
1	2,2623	3,8351	0,2080	0,0700
2	2,2623	3,8721	0,1720	0,1080
3	2,2623	3,8741	0,1725	0,0950
(2,24)				
Prueba	Aceite	Alcohol	Biodiésel	Residuo
1	2,0110	3,7190	0,4160	0,1400
2	2,0110	3,7930	0,3440	0,2160
3	2,0110	3,7970	0,3450	0,1900
(3,36)				
Prueba	Aceite	Alcohol	Biodiésel	Residuo
1	1,7596	3,6028	0,6240	0,2100
2	1,7596	3,7138	0,5160	0,3240
3	1,7596	3,7198	0,5175	0,2850

Continuación del apéndice 2a.

(4,48)				
Prueba	Aceite	Alcohol	Biodiésel	Residuo
1	1,5082	3,4867	0,8320	0,2800
2	1,5082	3,6347	0,6880	0,4320
3	1,5082	3,6427	0,6900	0,3800
(5,60)				
Prueba	Aceite	Alcohol	Biodiésel	Residuo
1	1,2568	3,3706	1,0400	0,3500
2	1,2568	3,5556	0,8600	0,5400
3	1,2568	3,5656	0,8625	0,4750
(6,72)				
Prueba	Aceite	Alcohol	Biodiésel	Residuo
1	1,0055	3,2545	1,2480	0,4200
2	1,0055	3,4765	1,0320	0,6480
3	1,0055	3,4885	1,0350	0,5700
(7,84)				
Prueba	Aceite	Alcohol	Biodiésel	Residuo
1	0,7541	3,1384	1,4560	0,4900
2	0,7541	3,3974	1,2040	0,7560
3	0,7541	3,4114	1,2075	0,6650
(8,96)				
Prueba	Aceite	Alcohol	Biodiésel	Residuo
1	0,5027	3,0222	1,6640	0,5600
2	0,5027	3,3182	1,3760	0,8640
3	0,5027	3,3342	1,3800	0,7600

Continuación del apéndice 2a.

(9,108)				
Prueba	Aceite	Alcohol	Biodiésel	Residuo
1	0,2514	2,9061	1,8720	0,6300
2	0,2514	3,2391	1,5480	0,9720
3	0,2514	3,2571	1,5525	0,8550
(10,120)				
Prueba	Aceite	Alcohol	Biodiésel	Residuo
1	0,00	2,7900	2,0800	0,7000
2	0,00	3,1600	1,7200	1,0800
3	0,00	3,1800	1,7250	0,9500

Fuente: elaboración propia, usando datos originales del apéndice 1.

Apéndice 2b. **Promedio aritmético de mezclas simuladas para la transesterificación del biodiésel, (cantidades en litros)**

Mezcla	Aceite	Alcohol	Biodiésel	Residuo	Total
0	2,5137	3,9512	0,0000	0,0000	6,4649
1	2,2623	3,8604	0,1842	0,0091	6,3979
2	2,0110	3,7696	0,3683	0,1820	6,3309
3	1,7596	3,6788	0,5525	0,2730	6,2639
4	1,5082	3,5880	0,7367	0,3640	6,1969
5	1,2568	3,4973	0,9208	0,4550	6,1300
6	1,0055	3,4065	1,1050	0,5460	6,0630
7	0,7541	3,3157	1,2892	0,6370	5,9960
8	0,5027	3,2249	1,4733	0,7280	5,9290
9	0,2514	3,1341	1,6575	0,8190	5,8620
10	0,0000	3,0433	1,8417	0,9100	5,7950

Fuente: elaboración propia, utilizando los datos del apéndice 2a.

Apéndice 2c. **Valor porcentual del promedio aritmético de las mezclas simuladas para la reacción de transesterificación del biodiésel**

Mezcla	Aceite	Alcohol	Biodiésel	Residuo	Total
0	38,88	61,12	0,00	0,00	100,00
1	35,36	60,34	2,88	1,42	100,00
2	31,76	59,54	5,82	2,87	100,00
3	28,09	58,73	8,82	4,36	100,00
4	24,33	57,90	11,89	5,87	100,00
5	20,50	57,05	15,02	7,42	100,00
6	16,58	56,18	18,22	9,01	100,00
7	12,58	55,30	21,50	10,62	100,00
8	8,48	54,39	24,85	12,28	100,00
9	4,29	53,46	28,27	13,97	100,00
10	0,00	52,52	31,78	15,70	100,00

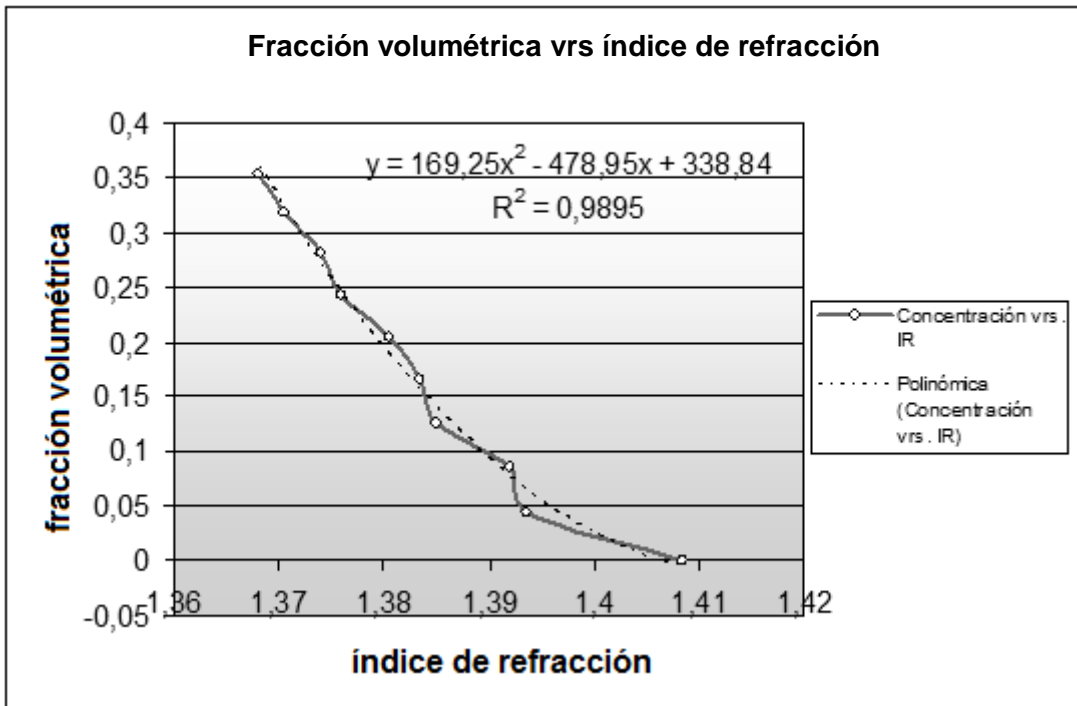
Fuente: elaboración propia, utilizando los datos del apéndice 2a.

Apéndice 2d. **Valores de índices de refracción contra fracciones volumétricas de aceite, utilizados en la construcción de la gráfica de calibración del refractómetro Abbe**

Muestra	IR	Aceite (V/V)
1	1,3680	0,3536
2	1,3705	0,3176
3	1,3740	0,2809
4	1,3760	0,2434
5	1,3805	0,2050
6	1,3835	0,1658
7	1,3850	0,1258
8	1,3920	0,0848
9	1,3935	0,0429
10	1,4085	0,0000

Fuente: elaboración propia, utilizando los datos del apéndice 2c.

Apéndice 2e. **Curva de calibración del refractómetro Abbe, para la determinación de la concentración (% volumen) del aceite a partir de valores de índice de refracción**



Fuente: elaboración propia, utilizando los datos del apéndice 2d.

Apéndice 2f. **Índices de refracción medidos directamente durante el progreso de la reacción de transesterificación y su correspondiente valor de concentración, obtenido a partir de la gráfica de calibración del refractómetro Abbe**

Tiempo	IR Exp 1	IR Exp 2	IR Prom	V/V
2	1,3750	1,3750	1,3750	0,2720
4	1,3800	1,3805	1,3802	0,2057
6	1,3835	1,3835	1,3835	0,1694
8	1,3865	1,3870	1,3867	0,1366
10	1,3890	1,3885	1,3887	0,1182
15	1,3945	1,3940	1,3942	0,0746
20	1,3990	1,3990	1,3990	0,0452
25	1,4025	1,4030	1,4027	0,0274
30	1,4060	1,4060	1,4060	0,0158
35	1,4075	1,4075	1,4075	0,0116
40	1,4080	1,4080	1,4080	0,0104
45	1,4085	1,4085	1,4085	0,0093
50	1,4085	1,4085	1,4085	0,0093
55	1,4085	1,4085	1,4085	0,0093
60	1,4085	1,4085	1,4085	0,0093

Fuente: elaboración propia, utilizando los datos del apéndice 2e.

