

PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL USANDO ACEITES RESIDUALES DE FRITURA Y ETANOL POR CATÁLISIS ALCALINA

Edwin Alberto Bulla Pereira¹, Fabio Emiro Sierra², Carlos Alberto Guerrero³

¹ *Profesor de la Facultad de Ingeniería, programa de Ingeniería Mecánica
Universidad ECCL, Bogotá, Colombia
Correo electrónico: ebullap@eccl.edu.co*

² *Investigador Asociado I*

Facultad de Ingeniería Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica

³ *Investigador Asociado I, Facultad de Ciencias, Departamento de Química
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia*

Recibido: 25 de junio del 2014. **Aprobado:** 8 de octubre del 2014.

Cómo citar este artículo: E. Bulla-Pereira, F. E. Sierra y C. Guerrero. "Producción de biodiésel usando aceites residuales de fritura y etanol por catálisis alcalina". *Ingeniería Solidaria*, vol. 10, n.º 17, pp. 61-69, en.- dic., 2014. doi: <http://dx.doi.org/10.16925/in.v9i17.806>

Resumen. El presente trabajo muestra los resultados del proyecto "Diseño del proceso de producción de biodiésel a partir de aceites de fritura de la Universidad Nacional de Colombia" realizado en el 2013. Comúnmente, los aceites vegetales refinados son los más utilizados para la producción de biodiésel, sin embargo, el empleo de los aceites de cocina usados de fritura (AUF) permite un producto con calidad, rendimiento y beneficios ambientales. En este trabajo se diseñó el proceso de producción de biodiésel a partir de los AUF y etanol. Las condiciones óptimas encontradas en el proceso se establecieron mediante la determinación del rendimiento de ésteres etílicos analizados bajo la técnica de cromatografía de gases, empleando como patrón interno la tricaprina. En el proceso de producción se realiza una reacción de esterificación con catálisis homogénea ácida y una segunda reacción de transesterificación con catálisis homogénea básica. La producción de ésteres etílicos óptima se obtuvo con temperatura de reacción de 60 °C, relación molar aceite/etanol de 1:7 (42,5% v/v alcohol con respecto aceite) y agua a 40 °C como agente de lavado, produciendo un biocombustible con características físicas y químicas según parámetros de la norma ASTM D6751, rendimiento de 96% wt de FAEE, y 3,6%wt de MG.

Palabras clave: aceites usados, biodiésel, catalizador, etanol, esterificación, transesterificación.

BIODIESEL PRODUCTION USING WASTE COOKING OIL AND ETHANOL FOR ALKALINE CATALYSIS

Abstract. This work presents a study of the results of the project "Design of a Biodiesel Production Process Based on Cooking Oils at the Universidad Nacional de Colombia" ("Diseño de un proceso de producción de biodiesel a partir de aceites de fritura de la Universidad Nacional de Colombia") carried out in 2013. Refined vegetable oils are the most commonly used to produce biodiesel fuels; however, used fried oils (AUF from the Spanish acronym) make for a product with quality, yield and environmental benefits. In this work, a biodiesel production process using waste cooking oil (AUF) and ethanol was designed. The optimum conditions found in the process were established by determining the yield of catalyzed ethylic esters using the gas chromatography technique, with tricaprins as the internal pattern. During the production process, an esterification reaction with homogenous acid catalysis was performed, followed by a second transesterification reaction with basic homogenous catalysis. Optimum ethylic ester production was obtained at a reaction temperature of 60 °C, an oil/ethanol molar proportion of 1:7 (42.5% v/v alcohol in relation to oil) and water at 40 °C as a cleaning agent. The result was a biofuel with physical and chemical characteristics according to ASTM standard D6751 parameters, with a yield of 96% wt of FAEE, and 3.6% wt of MG.

Keywords: used oils, biodiesel, catalyst, esterification, transesterification.

PRODUÇÃO DE BIODIESEL A PARTIR DE ÓLEOS RESIDUAIS DE FRITURA E ETANOL POR CATÁLISE ALCALINA

Resumo. Este trabalho apresenta um estudo dos resultados do projeto: "Desenho do processo de produção de biodiesel a partir de óleos de fritura", da Universidade Nacional da Colômbia, realizado em 2013. Comumente, os óleos vegetais refinados são os mais utilizados para produção de biodiesel; contudo, o emprego dos óleos de cozinha usados em frituras (OUF) permite um produto com qualidade, rendimento e benefícios ambientais. Neste trabalho, desenhou-se o processo de produção de biodiesel a partir dos OUF e etanol. As melhores condições encontradas no processo foram estabelecidas mediante a determinação do rendimento de ésteres etílicos analisados sob a técnica de cromatografia de gases que emprega como padrão interno a tricaprina. No processo de produção, realiza-se uma reação de esterificação com catálise homogénea ácida e uma segunda reação de transesterificação com catálise homogénea básica. A melhor produção de ésteres etílicos obteve-se com temperatura de reação de 60 °C, relação molar óleo/etanol de 1:7 (42,5% v/v álcool com relação ao óleo) e água a 40 °C como agente de lavado, o que produziu um biocombustível com características físicas e químicas segundo parâmetros da norma ASTM D6751, rendimento de 96% wt de FAEE, e 3,6%wt de MG.

Palavras-chave: óleos usados, biodiesel, catalizador, etanol, esterificação, transesterificação.



1. Introducción

En las dos últimas décadas, la sustitución de los derivados del petróleo por recursos renovables se ha convertido en un aspecto importante en el mundo. Actualmente, el mercado presenta un crecimiento de la oferta de productos renovables debido a que los costos de producción de los biocombustibles en los últimos cinco años han sido favorables en comparación con los productos fósiles. Esto ha sido causado por la reducción de las reservas del petróleo, el aumento en los precios de los derivados del petróleo y las intenciones de disminuir los efectos dañinos causados por las fuentes fósiles al ambiente. La situación plantea la necesidad de encontrar un combustible menos dañino para el planeta, con características como las que tienen los materiales biodegradables [1]. La producción de biodiésel a partir de aceite de fritura es una excelente opción como combustible alternativo.

El biodiésel (ésteres de ácidos grasos) proviene de los aceites, grasas o de materiales que tengan en su composición triglicéridos [2]. El biocombustible es obtenido mediante el proceso de esterificación o transesterificación empleando un alcohol (metanol o etanol). Sin embargo, la reacción en los procesos puede ser supercrítica o catalizada. Se conocen cinco tipos de catálisis: homogénea (ácida o básica), heterogénea (ácida o básica) y enzimática [3]. En la última década, el biodiésel ha adquirido una notable importancia, porque es un combustible con características favorables para el medio ambiente: es biodegradable, no tóxico y renovable [4] y es uno de los principales biocombustibles generados a nivel mundial. Entre el 2001 y el 2009, pasó de 959 millones de L/año a 15 760 millones de L/año. El consumo creció 41,9% anual. Para el 2020 el mercado del biodiésel proyecta generar 45 291 millones de L/año [2].

Numerosos métodos se han investigado y desarrollado para la producción de los ésteres etílicos de ácidos grasos (FAEE's) [5]-[8], pero ha sido el proceso de transesterificación con catalizadores homogéneos el que ha obtenido mayores niveles de ésteres metílicos de ácidos grasos (FAME's) en cortos tiempos de reacción [9], [10] con bajas condiciones de temperatura y presión, convierte en el proceso más empleado a nivel industrial o pequeña escala en el mundo para la producción de biocombustible [11] y favoreciendo su producción directa en zonas aisladas.

Las características del biodiésel son similares a las del diésel convencional; posee una viscosidad similar, un poder calorífico relativamente más bajo, un punto

de inflamación y número de cetano más altos [12], genera menos emisiones de SO_x , NO_x , CO_x , hidrocarburos y material particulado [13] y, finalmente, es miscible con el diésel en cualquier proporción. No obstante, algunas desventajas que podemos destacar del biocombustible son: primero, se emplean productos de cultivos de alimentos (aceites vegetales) como materia prima; segundo, el aumento en la producción año tras año ha generado el desplazamiento de cultivos dedicados a la producción de alimentos por el reemplazo de cultivos energéticos, lo que se traduce en un interés en el desarrollo de nuevas tecnologías, así como en identificar otras materias primas que sustituyan los aceites y grasas de tipo alimenticio. Los aceites usados de fritura (AUF) son un excelente material alternativo debido a su bajo costo, pero el empleo para la producción de biocombustible es nulo. Investigaciones estiman que la producción generada de AUF es aproximadamente de 15 millones/t, sin embargo hay que puntualizar que la cantidad de este material desechado puede ser una cifra más alta fundamentados en la producción mundial (154 millones/t) [2]. Para el caso de Colombia no existe una información clara. Un estudio efectuado con una muestra de 30 hogares en la ciudad de Bogotá en el 2010 estima que la generación de esta población es de 10 L/semana, producto que es vertido a los ductos o en las basuras y termina como un importante contaminante en las fuentes hídricas del país. El uso de este material para la producción de biodiésel tiene grandes posibilidades de tipo ambiental y económico, además que esto permitiría reutilizarlo y retirarlo del ambiente transformándolo en un biocombustible con un alto valor agregado. Estas consideraciones permiten plantear el estudio del proceso de producción de transesterificación de aceites usados de fritura, empleando etanol y catalizador básico (NaOH), con el fin de establecer un proceso de producción del biodiésel especificando las mejores condiciones, a partir de obtener el mayor rendimiento de ésteres etílicos de ácidos grasos (FAEE's). Las variables consideradas en el estudio fueron: relación molar AUF/etanol, porcentaje en peso de catalizador, temperatura de reacción y agente lavado.

2. Materiales y métodos

2.1 Reactivos

El aceite usado de fritura de soja (AUFs) se obtuvo de una cadena de hoteles en Bogotá, Colombia. Se usó también etanol con pureza del 96% (Alquímicos);

hidróxido de sodio (NaOH) en escamas grado analítico con pureza del 98% (Químicos Campota); ácido sulfúrico (H_2SO_4) con 98% de pureza (Químicos Campota); ácido acético tipo glacial del 99%; tricaprina estándar interno empleado (Fluka - Buchs Suiza), piridina y hexano grado reactivo analítico (ACS).

2.2 Condiciones de reacción

Para la investigación del diseño del proceso se empleó una relación molar aceite/etanol, catalizador (hidróxido de sodio), temperatura de reacción y agente de lavado (agua a 40° C y ácido acético). Estas condiciones se utilizan con el fin de estudiar la influencia de las variables en la significancia del rendimiento de ésteres etílicos de ácidos grasos (FAEE's) para el proceso de producción del biodiésel. Para el estudio con las variables se planteó un diseño experimental de tipo factorial de cuatro variables con dos niveles (2^4), 16 conjuntos de datos experimentales y una corrida por experimento. Las variables de estudio son temperatura de reacción (50 y 60 °C), concentración del catalizador (0,7 – 0,5 %wt) basado en la masa de aceite, relación molar aceite/etanol (1:7 – 1:5), ácido acético y agua a 40 °C para la purificación del biodiésel. Como variables fijas se establecieron 200 RPM como velocidad de agitación y un tiempo de una hora de reacción.

2.3 Equipo

Las reacciones se llevaron a cabo en un reactor encaquetado de vidrio de fondo redondo de cuatro bocas

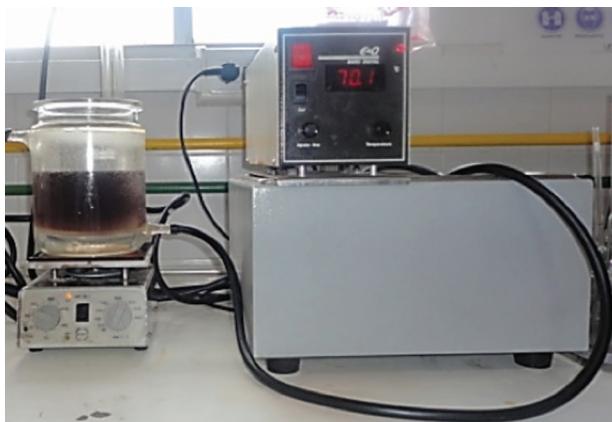


Figura 1. Montaje de la producción de biodiésel en el laboratorio
Fuente: elaboración propia

con capacidad de 500 mL, equipado con un condensador lineal, un termómetro, un puerto de muestreo y un baño termostático con controlador de temperatura $\pm 0,1$ °C de variación. Una plancha que posee un sistema agitación con un rango de 0 - 1200 RPM, tres embudos de vidrio de 500 mL empleado para el proceso de separación y purificación de las fases. En la figura 1 se observa el montaje de la producción de biodiésel en el laboratorio de biocombustibles del Departamento de Química de la Universidad Nacional de Colombia.

2.4 Procedimiento

El reactor fue cargado con 200 mL de AUFS filtrado. El conjunto del reactor y el baño termostático se colocan a temperatura constante y se calientan a la temperatura de la reacción. Una cantidad de 3,2 mL de H_2SO_4 se disuelve en 61,5 mL de etanol calentándose por separado a una temperatura cercana a la temperatura de reacción. Esta solución se añade al reactor e inicia la agitación mecánica por un periodo de 1 h, tiempo de la reacción de esterificación; luego se adiciona la solución obtenida a un embudo de decantación de 500 mL a temperatura ambiente por un tiempo de 12 h. La fase rica en FAEE, trazas de glicerina, etanol y catalizador es añadida a un matraz de 500 mL.

Una segunda reacción se realiza empleando los mismos equipos, montaje e iguales condiciones de velocidad de agitación y tiempo de reacción. En el reactor se cargan 200 mL de fase esterificada, la solución se calienta a la temperatura de reacción. Una porción de NaOH se diluye en etanol, calentándose por aparte a una temperatura cercana a la temperatura de reacción. La mezcla es vertida al reactor iniciando el proceso de agitación, iniciando la reacción de transesterificación. Transcurrida 1 h de reacción se adiciona un volumen de ácido acético a temperatura ambiente. Se controla por 15 min para neutralizar la etanolisis. La solución se vierte a un embudo de decantación de 500 mL a temperatura ambiente. El biodiésel es vertido en un embudo de decantación de 500 mL. Un volumen de agente de lavado es vertido al éster para lavarlo y purificarlo de las trazas de impurezas. Pasado un tiempo se extrae el agente de lavado y se ejecuta este mismo procedimiento tres veces. La muestra de biodiésel purificado se añade a unos recipientes de vidrio. En la figura 2 se pueden observar algunas de las muestras obtenidas por el procedimiento de producción mencionado.



Figura 2. Biodiésel producido a partir de aceite de fritura de soja
Fuente: elaboración propia

2.5 Análisis

Se extrajeron muestras del biocombustible a temperatura ambiente al finalizar el proceso de lavado y purificación, las muestras se analizaron para establecer el glicerol (G), monoglicéridos (MG), diglicéridos (DG), triglicéridos (TG) y ésteres etílicos por cromatografía de gases (CG). El equipo empleado para el análisis es un cromatógrafo de gases marca Hewlett Packard Serie II referencia 5890. Instrumento equipado con un detector de ionización de llama, una precolumna de sílice fundida y una columna capilar revestida de aluminio SUPELCO. El volumen de 1 μ L de muestra se introdujo en el inyector del instrumento manualmente. El equipo se ajustó para que a 1 min de estabilizado a 140 °C, la temperatura del horno aumentara 20 °C cada 50 s hasta llegar a 380 °C durante 10 min. La temperatura del inyector fue de 350 °C y la del detector 390 °C. El gas portador fue nitrógeno con un flujo de 8 mL/min. La obtención y procesamiento de los datos se efectuaron con el programa Cerity QA/QC versión A.04.05. Las concentraciones de glicerol y etanol se determinaron mediante balance de materiales. Por último, el procedimiento tuvo una duración de 23 min.

3. Resultados

3.1 Propiedades del aceite usado de fritura de soja

En la tabla 1 se reportan las propiedades físicas y químicas del AUFs. Como se puede observar en los datos obtenidos, el contenido de aceite es en su mayoría ácidos linoléico y oléico. Las propiedades del aceite están

en el rango de los límites estándar. Por lo tanto, los AUFs son eficientes para la producción de biodiésel.

Tabla 1. Propiedades físico químicas del aceite usado de fritura de soja

Parámetro	Valor	Unidades
Viscosidad cinemática a 40 °C	25,65	cSt
Densidad a 15 °C	921,5	Kg/m ³
Índice de saponificación	207,1	mg KOH/g aceite
Valor ácido	7,65	mg KOH/g aceite
Peso molecular	843,82	g/mol
Composición de ácidos grasos		Unidades
Láurico (C12:0)	-	
Mirístico (C14:0)	0,1	
Palmítico (C16:0)	12,2	
Estearico (C18:0)	2,5	
Oleico (C18:1)	21,5	
Linoleico (C18:2)	56,6	
Linolenico (C18:3)	7,1	

Fuente: elaboración propia

La composición indicada y peso molecular corresponden a un aceite de soja, ratificada porque el aceite de oliva contiene 80% de ácido oleico y sólo 6% de ácido linoléico; el aceite de palma contiene 43% de ácido palmítico y 40% de ácido oleico; el aceite de girasol contiene aproximadamente 50% de ácido linoleico y 30% de ácido oleico; mientras que el aceite de canola contiene 62% de ácido oleico y 22% de ácido linoleico. Se observó que las composiciones son diferentes, a la del AUF para la investigación. En consecuencia, no es probable que exista una mezcla de aceites en las muestras suministradas.

Las variables de operación empleadas fueron: relación molar de aceite/etanol (1:5-1:7), tipo de catalizador (ácido sulfúrico-hidróxido de sodio), concentración de catalizador (0,5-0,7%wt), temperatura (50-60 °C), agente de lavado (agua a 40 °C-ácido acético). Masa de aceite (200 mL), tiempo de reacción (60 min), tipo de alcohol (etanol), velocidad de agitación (200 RPM) se fijaron como parámetros comunes en todos los experimentos.

3.2 Proceso de transesterificación en dos etapas

En la figura 3, se muestra el diagrama de bloques del proceso. Pruebas del índice de acidez (IA) realizadas a muestras del AUFs dieron como resultado un promedio

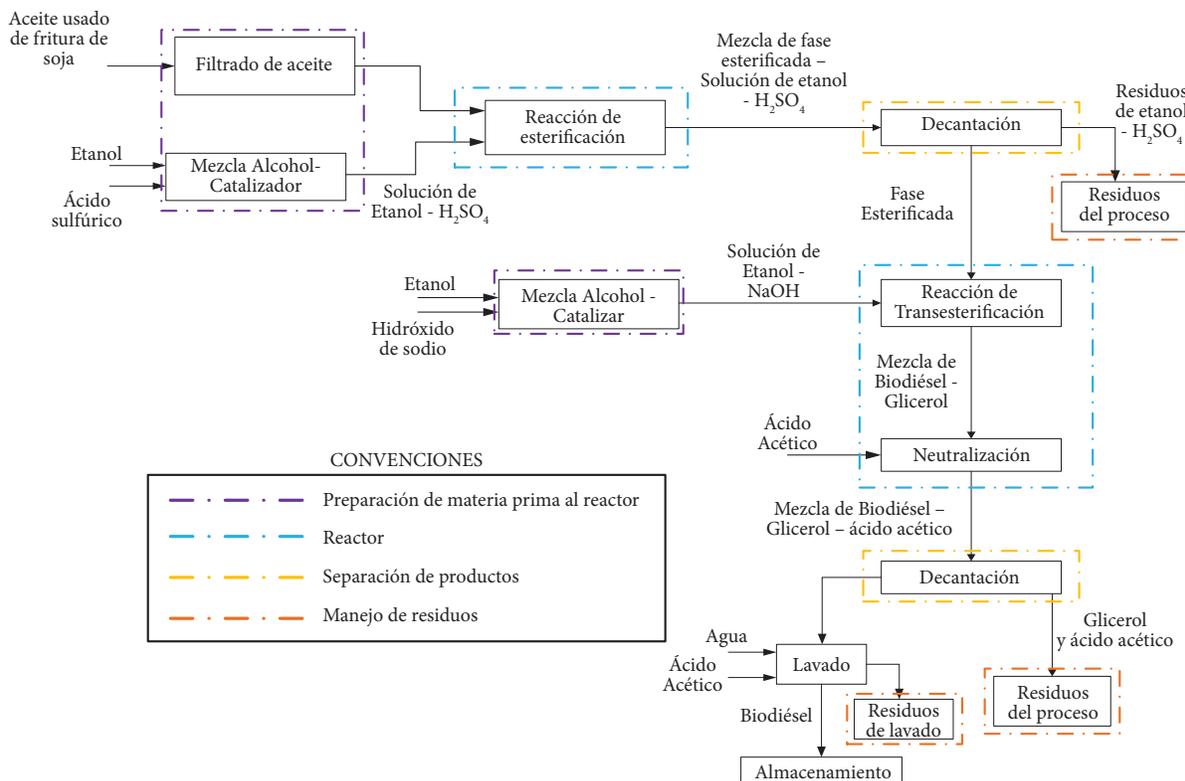


Figura 3. Diagrama genérico de bloques (GDFB) del proceso de producción del biodiésel a partir de AUFs, etanol y catálisis alcalina
Fuente: elaboración propia

de 7,65 mg KOH/g aceite; de acuerdo con este resultado existe una proporción muy alta en el aceite de ácidos grasos libres (AGL). La literatura reporta que una materia prima (aceite) ideal tiene un IA < 5 mg KOH/g aceite (2,5 %wt). El exceso de AGL hace que el catalizador tienda a la reacción de neutralización de los AG o hacia la reacción de saponificación (formación de jabones) [14]. Este aspecto establece que se debe aplicar una etapa de esterificación y posteriormente la etapa de transesterificación: en la primera etapa la concentración de ésteres etílicos de ácidos grasos (FAEE's), fue cercano al 70%wt y en el proceso de transesterificación del AUFs la concentración de (FAEE's) fue de 96,41%wt conteniendo trazas porcentuales de MG.

El rendimiento del biodiésel en el experimento se calculó por la ecuación 1 [15].

$$\text{Rendimiento \%} = \frac{\text{Peso de biodiésel}}{\text{Peso de AUFs}} \times 100 \quad (1)$$

El rendimiento máximo de ésteres de etilo fue 96,41%wt. De acuerdo con la norma EN-14214, el ren-

dimiento de ésteres de etilo debería ser 96,6%, por lo cual, después de la transesterificación, el biodiésel probablemente contiene TG, DG o MG del AUFs sin reaccionar. Según la literatura, en la proporción final de la reacción de transesterificación son admisibles ciertas cantidades significativas de los triglicéridos, diglicéridos, monoglicéridos [16]. En este aspecto, después de retirado el glicerol y realizadas las etapas de lavado, el biodiésel contiene ésteres de etilo cercano al rango mínimo estándar y 3,59% de MG sin reaccionar, condición que se encuentra 4,5 veces por encima del valor admisible. El procedimiento utilizado está de acuerdo con los resultados descritos anteriormente porque el proceso de etanolisis del AUFs requiere de dos etapas que garanticen máximo rendimiento de ese proceso y logren que la concentración de ésteres etílicos de ácidos grasos en la etapa final sea del 96,41 %wt.

3.3 Caracterización del combustible

En las tablas 2 y 3, se muestra la influencia de las variables de operación sobre algunos de los principales

parámetros del biodiésel obtenidos en cada experimento. Las propiedades del combustible fueron valoradas

bajo los parámetros y pruebas normalizadas de las normas ASTM D-6751 o EN-14214.

Tabla 2. Caracterización y variables del biodiésel obtenido en los experimentos del 1 al 8

Ensayo	1	2	3	4	5	6	7	8	Valores reportados	
									EN-14214	ASTM D-6751
Densidad a 15 °C (Kg/m ³)	912	899	877	900	897	897	935	886	860-900	-
Viscosidad a 40 °C (mm ² /s)	5,03	4,49	4,97	5,04	5,02	4,94	5,02	5,02	3,5-5,0	1,9-6,0
Contenido de cenizas (%(m/m))	0,14	0,04	0,12	0,05	0,10	0,02	0,11	0,04	0,02 máx.	0,020 máx.
Índices de acidez (mg KOH/g aceite)	0,49	0,50	0,67	0,40	0,23	0,49	0,62	0,39	0,5 máx.	0,8 máx.
Punto de nube (°C)	8	7	5	3	6	7	8	4	-	-
Contenido de agua (%)	0,15	0,26	0,06	0,13	0,22	0,21	0,08	0,07	0,05 máx.	0,05 máx.
Rendimiento (%)	73	78,5	84,6	80,8	75	72	74,4	80	-	-
Relación molar Aceite/etanol	1:5	1:7	1:5	1:5	1:5	1:7	1:7	1:7	-	-
Catalizador	NaOH	NaOH	NaOH	NaOH	NaOH	NaOH	NaOH	NaOH	-	-
% Catalizador	0,5	0,5	0,7	0,5	0,5	0,7	0,5	0,5	-	-
Temperatura °C	50	50	50	60	50	50	60	50	-	-
Agente de lavado	Agua (40 °C)	Agua (40 °C)	Agua (40 °C)	Agua (40 °C)	Ácido acético	Agua (40 °C)	Agua (40 °C)	Ácido acético	-	-

Fuente: elaboración propia

Tabla 3. Caracterización y variables del biodiésel obtenido en los experimentos del 9 al 16

Ensayo	9	10	11	12	13	14	15	16	Valores reportados	
									EN-14214	ASTM D-6751
Densidad a 15 °C (Kg/m ³)	895	895	910	896	886	911	868	885	860-900	-
Viscosidad a 40 °C (mm ² /s)	4,44	4,82	4,95	4,44	5,09	4,74	4,47	4,88	3,5-5,0	1,9-6,0
Contenido de cenizas (%(m/m))	0,12	0,05	0,11	0,05	0,09	0,05	0,08	0,08	0,02 máx.	0,020 máx.
Índices de acidez (mg KOH/g aceite)	0,57	0,36	0,43	0,38	0,48	0,42	0,32	0,41	0,5 máx.	0,8 máx.
Punto de nube (°C)	7	8	8	4	3	6	7	5	-	-
Contenido de agua (%)	0,22	0,06	0,12	0,05	0,07	0,12	0,09	0,05	0,05 máx.	0,05 máx.
Rendimiento (%)	76,8	75,1	78,6	88,9	68,5	80,7	74,3	88,1	-	-
Relación molar aceite/etanol	1:5	1:5	1:5	1:7	1:7	1:7	1:5	1:7	-	-
Catalizador	NaOH	NaOH	NaOH	NaOH	NaOH	NaOH	NaOH	NaOH	-	-
% Catalizador	0,7	0,7	0,5	0,7	0,7	0,5	0,7	0,7	-	-
Temperatura °C	60	50	60	60	50	60	60	60	-	-
Agente de lavado	Agua (40 °C)	Ácido acético	Ácido acético	Agua (40 °C)	Ácido acético	Ácido acético	Ácido acético	Ácido acético	-	-

Fuente: elaboración propia

Se establece que el biodiésel con mejor rendimiento fue 88,9%, obtenido en el laboratorio a partir de AUFS y etanol producido a partir de las variables relación molar aceite:alcohol de 1:7 %wt, catalizador de 0,7, temperatura de 60 °C y como agente de lavado agua a 40 °C. Según el estudio de las propiedades de la muestra, no cumple el parámetro de contenido de cenizas con una diferencia de 0,037%, por el rango superior, el contenido de agua con una variación de 0,006% por encima del valor estándar.

La figura 4 muestra la cromatografía de gases del ensayo 12. A partir de la ecuación 2, se obtienen los pesos de cada una de las sustancias detectadas en la muestra [17].

$$w = \frac{W_s}{a} * \left(\frac{A}{A_s} - b \right) \quad (2)$$

Los pesos de todas las sustancias y el porcentaje en peso de la muestra de biodiésel producido se pueden apreciar en la tabla 4.

El porcentaje en peso de los FAEE's fue del 96,41% en el proceso de transesterificación a partir de aceite usado de fritura de soja, etanol y NaOH como catalizador.

Tabla 4. Composición de la muestra de biodiésel producida a partir de las condiciones más óptimas

	W (mg)	% wt
FAEE	22,5704	96,41
Monoglicéridos	0,8394	3,59
Diglicéridos	0	0
Triglicéridos	0	0
Total	23,4098	100

Fuente: elaboración propia

El cromatograma determina que el triglicérido (aceite) reacciona en el producto final, es decir, que todos los TG reaccionaron para formar FAEE's, MG y DG. De acuerdo con la norma EN-14105 y ASTM D-6584 el contenido máximo de MG y DG y TG presente en el biodiésel debe ser 0,8%, 0,2%, 0,2% respectivamente. Los resultados mostraron que el contenido de monoglicéridos no cumple con el parámetro pero los DG y TG cumplen las condiciones de normatividad. Los MG presentes se deben a la posible formación de estos durante la reacción de transesterificación.

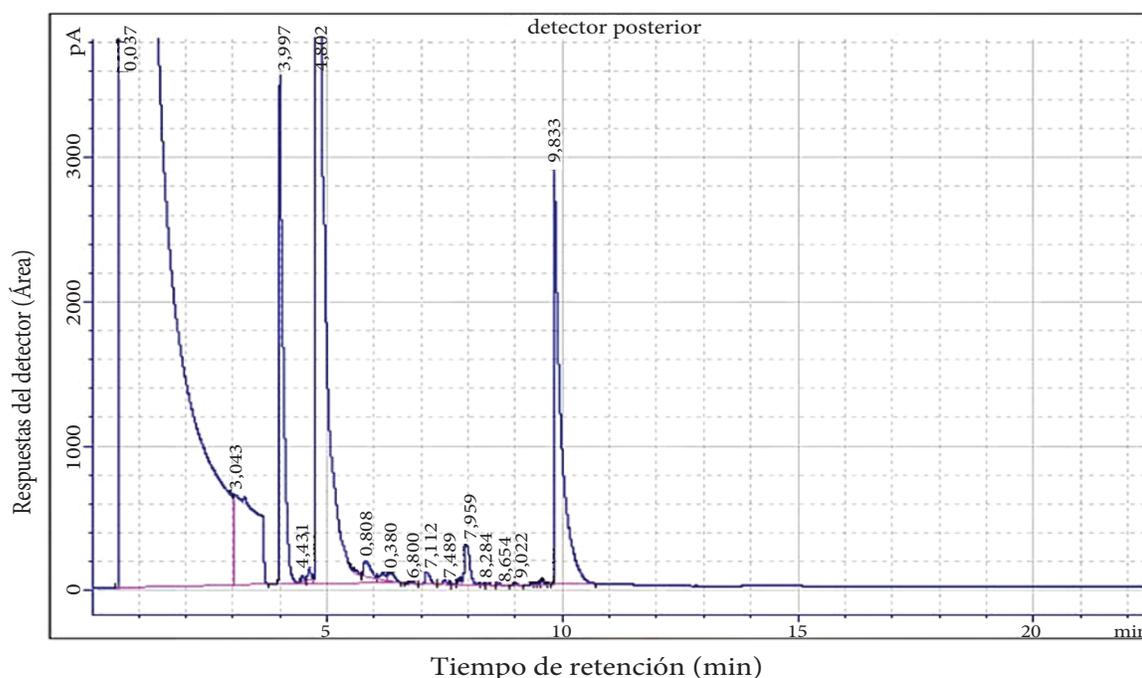


Figura 4. Cromatograma de la muestra de biodiésel obtenido con el ensayo 12 a partir de aceite de fritura y etanol

Fuente: elaboración propia

Los productos reportados y tiempos de retención obtenidos en el cromatograma de la muestra 12 se muestran en la tabla 5.

Tabla 5. Lectura del cromatograma del ensayo 12 de la producción de biodiésel a partir de AUFS

	Señal	Tiempo de retención (min)	Área (pA x s)
Solvente	1	0,637	19631,7
	1	3,997	19993,9851
	Área total		41395,5623
Ésteres etílicos de ácidos grasos	1	4,471	167,5
	1	7,112	612,85192
	Área total		137449,261
Monoglicéridos	1	7,499	164,93753
	1	9,7	20,17736
	Área total		3110,29424
Tricaprina	1	9,833	27174,8972

Fuente: elaboración propia

El análisis de la cromatografía define que el contenido de monoglicéridos supera en 2,8% al estándar de la norma; sin embargo, se considera que el no superar este parámetro se debe a la presencia de agua en el biodiésel, aspecto influenciado por tiempos muy cortos en el proceso de separación entre las fases. En cuanto al caso del contenido de monoglicéridos, se plantea la posibilidad de que se produjeron como subproductos en las diferentes etapas que suceden dentro del mecanismo de la reacción.

4. Conclusiones

El rendimiento en porcentaje del proceso de producción del biodiésel obtenido a partir de la relación entre el peso de biodiésel y la cantidad inicial de AUFS a nivel de laboratorio obtenido fue del 90% y el excedente del 10% está compuesto por glicerol y otras sustancias. Estas fueron las condiciones obtenidas a partir del proceso de transesterificación empleando catálisis alcalina (NaOH) en los rangos utilizados para las variables seleccionadas para el estudio.

Los rendimientos obtenidos de los FAEE's según prueba cromatográfico es del 96% wt trazas del 3,6% wt de monoglicéridos, sin trazas de diglicéridos y triglicéridos obtenidos a partir de los procesos de esterificación y transesterificación.

Las variables de relación molar AUFS/etanol (1:7), 0,7 porcentaje en peso de catalizador, temperatura de reacción de 60 °C y empleando agua a 40 °C como agente de lavado, con un tiempo de reacción de 60 min y una velocidad de agitación de 200 RPM resultaron ser las más óptimas para la producción de biodiésel al 96% de FAEE's a partir de AUFS con catálisis homogénea alcalina.

Referencias

- [1] A. N. Phan y T. M. Phan, "Biodiesel production from waste cooking oils," *Fuel*, vol. 87, n.º 17–18, pp. 3490–3496, Dec. 2008.
- [2] M. K. Lam, K. T. Lee y A. R. Mohamed, "Homogeneous, heterogeneous and enzymatic catalysis for transesterification of high free fatty acid oil (waste cooking oil) to biodiesel: A review," *Biotechnol. Adv.*, vol. 28, n.º 4, pp. 500–18, 2010.
- [3] C. G. Fabio Sierra, *Tecnologías para el aprovechamiento de los biocombustibles*. Bogotá, Colombia: Editorial Universidad Nacional de Colombia 2008, p. 326.
- [4] C. D. Mandolesi de Araújo, C. C. de Andrade, E. de Souza e Silva y F. A. Dupas, "Biodiesel production from used cooking oil: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 27, pp. 445–452, Nov. 2013.
- [5] C. C. Enweremadu y M. M. Mbarawa, "Technical aspects of production and analysis of biodiesel from used cooking oil—A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 13, n.º 9, pp. 2205–2224, Dec. 2009.
- [6] A. A. Apostolakou, I. K. Kookos, C. Marazioti, & K. C. Angelopoulos, "Techno-economic analysis of a biodiesel production process from vegetable oils," *Fuel Process. Technol.*, vol. 90, n.º 7–8, pp. 1023–1031, Jul. 2009.
- [7] J. M. Marchetti, "A summary of the available technologies for biodiesel production based on a comparison of different feedstock's properties," *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 90, n.º 3, pp. 157–163, May 2012.
- [8] T. Issariyakul, M. G. Kulkarni, A. K. Dalai y N. N. Bakhshi, "Production of biodiesel from waste fryer grease using mixed methanol/ethanol system," *Fuel Process. Technol.*, vol. 88, n.º 5, pp. 429–436, May 2007.
- [9] M. K. Lam y K. T. Lee, "Mixed methanol–ethanol technology to produce greener biodiesel from waste cooking oil: A breakthrough for SO₄²⁻/SnO₂–SiO₂ catalyst," *Fuel Process. Technol.*, vol. 92, n.º 8, pp. 1639–1645, Aug. 2011.
- [10] D. Y. C. Leung, X. Wu y M. K. H. Leung, "A review on biodiesel production using catalyzed transesterification," *Appl. Energy*, vol. 87, n.º 4, pp. 1083–1095, Apr. 2010.

- [11] A. E. Atabani, S. Silitonga, I. A. Badruddin, T. M. I. Mahlia, H. H. Masjuki y S. Mekhilef, "A comprehensive review on biodiesel as an alternative energy resource and its characteristics," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, n.º 4, pp. 2070–2093, May 2012.
- [12] J. M. Encinar, J. F. González y Rodríguez-Reinares, "Ethanolysis of used frying oil. Biodiesel preparation and characterization," *Fuel Process. Technol.*, vol. 88, n.º 5, pp. 513–522, May 2007.
- [13] X. Meng, G. Chen y Y. Wang, "Biodiesel production from waste cooking oil via alkali catalyst and its engine test," *Fuel Process. Technol.*, vol. 89, n.º 9, pp. 851–857, Sep. 2008.
- [14] G. Anastopoulos, A. Deligiannis, S. Kalligeros, D. Karonis, F. Zannikos y E. Lois, "Synthesis of Biodiesel from Tobacco and Waste Frying Oil Using Heterogeneous $\text{KHC}_3 / \text{Al}_2 \text{O}_3$ Catalyst," *ASTM Internacional*, vol. 7, n.º 3, pp. 1–14, 2010.
- [15] A. Birla, B. Singh, S. N. Upadhyay y Y. C. Sharma, "Kinetics studies of synthesis of biodiesel from waste frying oil using a heterogeneous catalyst derived from snail shell," *Bioresour. Technol.*, vol. 106, pp. 95–100, Feb. 2012.
- [16] H. C. Ong, T. M. I. Mahlia, H. H. Masjuki y R. S. Norhasyima, "Comparison of palm oil, *Jatropha curcas* and *Calophyllum inophyllum* for biodiesel: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, n.º 8, pp. 3501–3515, Oct. 2011.
- [17] P. C. Narvaez, J. A. Torres, F. Sánchez y L. F. Ponce de León, "Determinación por cromatografía de gases de alquil ésteres (metílico y etílico) de ácidos grasos, en presencia de mono-, di- y triglicéridos," *Rev. Ing. e Inv.*, n.º 57, pp. 58–62, abril 2005.