



# IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO  
DOCENTE  
DEL AREA  
MECANICA  
DE LAS  
INGENIERIAS

## FoDAMI

## INVESTIGACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL UTILIZANDO ACEITES DE FRITURA DE HOTELES Y SU USO EN CALDERAS PIROTUBULARES

**Edwin A. Bulla Pereira <sup>\*1</sup>, Fabio E. Sierra Vargas<sup>2</sup> y Carlos A. Guerrero Fajardo <sup>3</sup>**

<sup>\*1</sup> Facultad de ingeniería – Universidad Nacional de Colombia

Carrera 45 N° 26-85. Laboratorio de plantas térmicas. Bogotá Colombia

correo-e: [eabullap@unal.edu.co](mailto:eabullap@unal.edu.co).

MDL&GE (Investigador del grupo de investigación en mecanismos de desarrollo limpio y gestión energética)

<sup>2</sup> MDL&GE (Director del grupo de investigación en mecanismos de desarrollo limpio y gestión energética)

correo-e: [fesierrav@unal.edu.co](mailto:fesierrav@unal.edu.co).

<sup>3</sup> APRENA (Director del grupo de investigación aprovechamiento energético de recursos naturales)

correo-e: [caguerrerofa@unal.edu.co](mailto:caguerrerofa@unal.edu.co).

### RESUMEN

Ante las exigencias actuales en torno a la demanda de energía, los efectos de la contaminación ambiental y la dependencia hacia los combustibles fósiles, el biodiesel se convierte en una excelente opción de fuente de energía alternativa. La producción de biocombustibles a partir de aceites residuales tiene una importante consideración en investigación y desarrollo en los procesos de obtención. El aceite usado de fritura (AUF) es una importante alternativa para emplearse en la generación de biodiesel, además su uso contribuiría en la reutilización de un producto que después de usado es vertido al drenaje, convirtiéndose en un contaminante de alto impacto sobre el recurso hídrico. Este trabajo busca determinar el mayor rendimiento del proceso de producción de ésteres etílicos basado en las mejores condiciones de producción, considerando los parámetros: relación molar AUF/etanol (1:5 – 1:7), porcentaje de catalizador en peso (0,5 – 0,7), temperatura de reacción (50 – 60 °C) y agente de lavado (Agua a 40 °C – ácido acético) usando el proceso de transesterificación del AUF mediante catálisis homogénea alcalina (NaOH). Con los parámetros de máxima producción de biodiesel (96,4 %p/p) se llevará a cabo el diseño y construcción de una planta de producción de biodiesel de 150 L/Lote en proceso discontinuo y con el combustible obtenido se efectuarán pruebas en una caldera pirotubular. El proceso de producción se realizó en dos etapas, la primera de esterificación y la otra etapa de transesterificación con una temperatura de reacción de 60 °C, relación molar AUF:etanol de 1:7 y agua como agente de lavado. El biodiesel producido posee algunas características fisicoquímicas según la norma ASTM D 6751 y 93,5% de rendimiento de ésteres etílicos. Las condiciones óptimas encontradas en el biocombustible hacen posible su uso en equipos industriales “calderas”, que emplean diésel para su funcionamiento.



# IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO  
DOCENTE  
DEL AREA  
MECANICA  
DE LAS  
INGENIERIAS

FoDAMI

**Palabras Claves:** Aceites usados de fritura, Biodiesel, transterificación, Producción de biodiesel.

## 1. INTRODUCCIÓN

Actualmente en el mundo el 81% de la energía consumida es proporcionada por combustibles de origen fósil, el petróleo aporta el 32,4%, el carbón el 27,3% y el gas natural provee el 21,4%. El sector del transporte emplea el 57,7% de la energía producida actualmente. El consumo y aumento en el empleo de los combustibles fósiles en los diferentes sectores económicos está creando grandes cantidades de gases de efecto invernadero. En las dos últimas décadas ha producido 32 Gt/año de CO<sub>2</sub> [1]. Esta cantidad de CO<sub>2</sub> además de otros gases tipo invernadero como NO<sub>x</sub>, CO, PM, HC, O<sub>3</sub>, CH<sub>4</sub>, están generando graves problemas a las condiciones medio ambientales del planeta [2] afectando especialmente el calentamiento global. Además estimaciones plantean que para el año 2040 el sector industrial crecerá anualmente un 1,8% y que la demanda total de energía en el mundo para este mismo año será de 20664 Mtoe [1], consumos que aumentarían los problemas del medio ambiente debido a los volúmenes de producción de los gases arrojados a la atmósfera del planeta.

Para satisfacer la demanda de energía y disminuir las dificultades ambientales, se requiere un mayor uso, investigación y desarrollo de las energías renovables y en especial en los biocombustibles, debido a las proporciones del consumo que se emplean en muchos sectores económicos de un país. El biodiesel es una excelente fuente de energía renovable además su uso contribuye con la mitigación en las emisiones de los gases efecto invernadero y a su vez disminuye la dependencia hacia los combustibles fósiles. La figura 1 muestra la reducción porcentual de las emisiones empleando biodiesel.

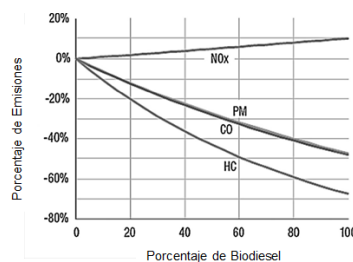


Figura 1. Generación porcentual de emisiones. Fuente: [3]

La Sociedad Americana de Ensayos y Materiales (ASTM) define al biodiésel como ésteres monoalquílicos de ácidos grasos de cadena larga derivados de insumos grasos renovables, como los aceites vegetales o grasas animales [4] o aceites usados de fritura (AUF). Actualmente se producen 154 millones t/año en el mundo [5]. Este biocombustible tiene propiedades físico-químicas similares al diésel, aspecto que permite el uso en motores de combustión interna, calderas u otros equipos industriales que empleen el combustible fósil como fuente de energía. La producción del biodiesel emplea el procedimiento de la



# IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica

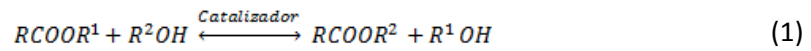


UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO  
DOCENTE  
DEL AREA  
MECANICA  
DE LAS  
INGENIERIAS

FoDAMI

esterificación y/o transesterificación. Ecuación (1) es la reacción de transesterificación que se genera en la producción del biodiesel.



El proceso de transesterificación se puede efectuar por una reacción sin catalizador (condición súper crítica para el metanol) y una reacción catalizada [6] que emplea para su proceso algunos de los tres tipos de catalizadores: heterogéneo, enzimático o homogéneo [7]. El proceso transesterificación en reacción catalizada junto con los catalizadores homogéneos se emplean actualmente en la producción a nivel industrial. Estos procesos se pueden obtener de manera discontinua o Batch (Lotes) o de forma continua [8]. La producción promedio del biodiesel en Colombia actualmente es 44214 t/mes [9] producción relativamente baja con respecto pronósticos de demanda requerida en el país. Estos aspectos mencionados hacen viable realizar investigación en la determinación del mayor rendimiento del proceso de producción de ésteres etílicos establecido en las mejores condiciones de producción utilizando el proceso de transesterificación de AUF de hoteles mediante hidróxido de sodio (NaOH). Con las máximas condiciones de la producción de biodiesel se diseñara y construirá una planta de producción en proceso tipo Batch y con el biocombustible obtenido se empleara en una caldera pirotubular con el fin de obtener datos que permitan establecer características en la empleabilidad del biocombustible en equipos industriales.

## 2. MATERIALES

### 2.1 Reactivos

La calidad de los reactivos es un factor que afecta el rendimiento del proceso y la calidad del producto; para el proceso de producción del biodiesel de este trabajo se emplean los siguientes reactivos: Etanol (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O<sub>2</sub>) con el 96% de pureza (BYCSA), NaOH en escamas con una pureza del 98% (Alquímicos), ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) del 98% (Químicos Campota), ácido acético (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>O<sub>2</sub>) glacial del 99% (Alquímicos) y aceite usado de fritura de soja (AUFS), suministrado por el sector hotelero.

El AUFS recolectado posee color negro, olor muy fuerte, presencia de partículas sólidas, baja viscosidad y textura muy pastosa. Estos cambios sufridos en las propiedades son debido a las reacciones termolíticas, oxidativas e hidrolíticas al cual el aceite es sometido en el proceso de cocción de los alimentos. Los resultados de la caracterización físico-químicos de los AUFS se presentan en la Tabla 1.



# IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO  
DOCENTE  
DEL AREA  
MECANICA  
DE LAS  
INGENIERIAS

FoDAMI

Tabla 1. Caracterización físico química del aceite usado de fritura de soja

Parámetro	Valor obtenido	Unidades
Viscosidad Cinemática a 40 °C	25,65	cSt
Densidad a 15 °C	921,5	Kg/m <sup>3</sup>
Índice de saponificación	207,1	mg KOH/g aceite
Valor ácido	7,65	mg KOH/g aceite
Masa molecular	871,3	g/mol

El valor de la acidez obtenido en el AUFS (7,65 mg KOH/g aceite), determina el alto grado de degradación que tiene el reactivo a causa de la reacción de hidrólisis. Esta reacción química es producida por la liberación del agua que tienen los alimentos cuando son sometidos al proceso de cocción produciendo la liberación de los ácidos grasos (AG) de su enlace éster. Éster que se encuentra unido a la molécula de glicerol. Este volumen tan alto de ácidos grasos libres (AGL) puede producir la reacción con el catalizador básico generando jabones. Reacción que afectaría el rendimiento del proceso de producción del biodiesel. Para evitar la reacción de los AGL con el catalizador se debe adicionar un ácido fuerte (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> o HCL) al AUF para catalizar la hidrólisis (Reacción de esterificación) este proceso se efectúa antes del proceso de la transesterificación.

### 3. DISEÑO EXPERIMENTAL

#### 3.1 Producción de biodiesel

La producción de los ésteres etílicos de ácidos grasos (sigla en inglés FAEE's) se plantea a partir de la ecuación 1. El catalizador empleado será (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) para la etapa de esterificación y NaOH para la etapa de transesterificación. En este estudio la variable de temperatura de reacción se estableció en 50 y 60 °C (X<sub>3</sub>). La cantidad de etanol necesaria se estableció a partir de relación molar AUFS:etanol de 1:5 y 1:7 (X<sub>1</sub>). Un porcentaje en peso de catalizador (0,5 – 0,7) (X<sub>2</sub>) es disuelto en el etanol. Esta mezcla es vertida en 200 mL AUFS filtrado previamente. El porcentaje del rendimiento se determinó con la ecuación (2) [10].

$$\text{Rendimiento \%} = \frac{\text{Peso de biodiesel}}{\text{Peso de AUFS}} \times 100 \quad (2)$$

Los experimentos se llevaron a cabo a una escala de laboratorio. Las reacciones se producen en un reactor enchaquetado de 500 mL en vidrio con cuatro bocas equipado con un condensador lineal, un termómetro, un agitador magnético y un baño de termostato con controlador. El reactor se mantuvo a la temperatura de reacción, una velocidad de agitación de 200 RPM, una presión atmosférica y un tiempo de 1 h finalizado el tiempo se adiciona al reactor un volumen de ácido acético dejando agitar por 15 min. La solución obtenida es vertida a un embudo separador de 500 mL a temperatura ambiente por un tiempo de 12 h. Los productos obtenidos por el proceso de decantación (biodiesel y glicerina) son depositados cada uno en



# IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO  
DOCENTE  
DEL AREA  
MECANICA  
DE LAS  
INGENIERIAS

FoDAMI

embudo de 500 mL. Para la purificación y lavado del biodiesel producido se emplearan dos agentes de lado (agua a 40 °C – Ácido acético) (X<sub>4</sub>).

## 3.2 Proceso de optimización

Optimización del proceso de transesterificación se llevó a cabo a través de un experimento con 4 factores en el cual se desea examinar los efectos de que tienen los parámetros relación molar (RM) de aceite/etanol, temperatura de reacción (T), porcentaje de concentración de catalizador (%p/p C) y el agente de lavado (AL), en el rendimiento de éster de etilo usando diseño central compuesto (DCC). El DCC consistió en 31 unidades experimentales con las cuales se debe obtener la información suficiente para permitir un modelo polinomio completo de segundo orden. El punto axial tendría un  $\alpha = 1$ . Los valores centrales (nivel cero) elegidos para el nivel DCC fueron: relación molar aceite/etanol 1:6, concentración de catalizador 0,6%, temperatura de reacción de 55 °C y agua a temperatura ambiente como agente de lavado. (Tabla 2) muestra los niveles y el símbolo de codificación utilizados para cada factor. Para evitar los errores experimentales se efectuaron las corridas experimentales en orden aleatorio como se muestra en la tabla 2. El software empleado es Minitab 16 donde se obtuvo la regresión y análisis gráfico de los datos obtenidos.

Tabla 2. Matriz del diseño central compuesto de las cuatro variables con sus símbolos de codificación; los niveles y % de los rendimientos.

Orden de Corrida	X <sub>1</sub> ; (RM)	X <sub>2</sub> ; (%p/p C)	X <sub>3</sub> ; (T)	X <sub>4</sub> ; (AL)	% Rendimiento
1	-1 ; (1:5)	0 ; (0,6)	0 ; (55)	0 ; (Agua)	79,6
2	1 ; (1:7)	1 ; (0,7)	1 ; (60)	1 ; (Agua a 40 °C)	88,1
3	0 ; (1:6)	1 ; (0,7)	0 ; (55)	0 ; (Agua)	85,7
4	0 ; (1:6)	0 ; (0,6)	0 ; (55)	0 ; (Agua)	87,9
5	0 ; (1:6)	0 ; (0,6)	0 ; (55)	0 ; (Agua)	88,1
6	1 ; (1:7)	-1 ; (0,5)	1 ; (60)	-1 ; (Ácido acético)	74,4
7	0 ; (1:6)	-1 ; (0,5)	0 ; (55)	0 ; (Agua)	85,7
8	0 ; (1:6)	0 ; (0,6)	0 ; (55)	1 ; (Agua a 40 °C)	77,3
9	-1 ; (1:5)	1 ; (0,7)	-1 ; (50)	1 ; (Agua a 40 °C)	78,6
10	-1 ; (1:5)	1 ; (0,7)	1 ; (60)	1 ; (Agua a 40 °C)	74,3
11	-1 ; (1:5)	-1 ; (0,5)	-1 ; (50)	1 ; (Agua a 40 °C)	76,8
12	0 ; (1:6)	0 ; (0,6)	0 ; (55)	0 ; (Agua)	88,5
13	1 ; (1:7)	-1 ; (0,5)	-1 ; (50)	1 ; (Agua a 40 °C)	80,1
14	0 ; (1:6)	0 ; (0,6)	0 ; (55)	0 ; (Agua)	88,9
15	-1 ; (1:5)	-1 ; (0,5)	1 ; (60)	-1 ; (Agua a 40 °C)	80,8
16	-1 ; (1:5)	-1 ; (0,5)	1 ; (60)	1 ; (Agua a 40 °C)	78,9
17	0 ; (1:6)	0 ; (0,6)	0 ; (55)	0 ; (Agua)	75,6
18	0 ; (1:6)	0 ; (0,6)	1 ; (60)	0 ; (Agua)	81,9
19	1 ; (1:7)	-1 ; (0,5)	-1 ; (50)	-1 ; (Ácido acético)	78,5
20	1 ; (1:7)	1 ; (0,7)	1 ; (60)	-1 ; (Ácido acético)	80,0
21	1 ; (1:7)	1 ; (0,7)	-1 ; (50)	-1 ; (Ácido acético)	71,9
22	-1 ; (1:5)	1 ; (0,7)	-1 ; (50)	-1 ; (Ácido acético)	84,6
23	0 ; (1:6)	0 ; (0,6)	0 ; (55)	0 ; (Agua)	75,2
24	1 ; (1:7)	0 ; (0,6)	0 ; (55)	0 ; (Agua)	79,8
25	0 ; (1:6)	0 ; (0,6)	-1 ; (50)	0 ; (Agua)	81,8
26	-1 ; (1:5)	-1 ; (0,5)	-1 ; (50)	-1 ; (Ácido acético)	74,1
27	0 ; (1:6)	0 ; (0,6)	0 ; (55)	0 ; (Agua)	89,1
28	0 ; (1:6)	0 ; (0,6)	0 ; (55)	-1 ; (Ácido acético)	77,5
29	1 ; (1:7)	-1 ; (0,5)	1 ; (60)	1 ; (Agua a 40 °C)	80,7
30	1 ; (1:7)	1 ; (0,7)	-1 ; (50)	1 ; (Agua a 40 °C)	68,5



# IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO  
DOCENTE  
DEL AREA  
MECANICA  
DE LAS  
INGENIERIAS

FoDAMI

Orden de Corrida	X <sub>1</sub> ; (RM)	X <sub>2</sub> ; (%p/p C)	X <sub>3</sub> ; (T)	X <sub>4</sub> ; (AL)	% Rendimiento
31	-1 ; (1:5)	1 ; (0,7)	1 ; (60)	-1 ; (Acido acético)	76,8

Los datos experimentales presentados en la Tabla 2 se analizaron mediante el procedimiento de regresión de superficie de respuesta (RSR). El procedimiento MSR utiliza un análisis canónico para estimar los valores para cada uno de los factores. Usando el modelo ajustado de la superficie de respuesta se construyeron gráficas para cada par de factores que se están estudiando mientras se mantiene el factor del rendimiento constante en su punto estacionario estimado.

### 3.3 Análisis de FAEE's con cromatografía de gases

Los FAEE's se analizan usando cromatografía de gases (CG). El equipo empleado es marca Hewlett Packard Serie II referencia 5890. La temperatura del inyector fue de 350 °C y la del detector fue 390 °C. El gas portador es nitrógeno con un flujo de 8 mL/min. Los datos son obtenidos con el programa Cerity QA/QC versión A.04.05.

### 3.4 Planta piloto de biodiesel

Para desarrollar la planta piloto de biodiesel es necesario determinar el mayor rendimiento del proceso de producción de ésteres etílicos basado en las mejores condiciones de operación obtenidas en las pruebas de laboratorio. El proceso que se empleara en la planta para su desarrollo y construcción es de tipo Batch, esta tendrá una capacidad de 150 L/Lote. El montaje se efectuara en el Laboratorio de Biocombustibles del Departamento de Química de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá. La etapa experimental en la planta se desarrollo a partir de varias fases tales como efectuar el análisis del balance de masa por operación del proceso de producción, una selección de equipos, desarrollo y planteamiento de la planta. Esta última etapa se construyó en tres partes. La primera: construcción y diseño de un diagrama de flujo del proceso (PFD). La segunda: caracterización física de los equipos de la planta para realizar los planos de despiece, montaje y explosivo del diseño de la planta en el espacio asignado para la realización de la obra y la tercera: consistió en la construcción y puesta a punto de la planta piloto para la implementación en la producción de biodiesel con los parámetros establecidos en el laboratorio.

### 3.5 Experimentación en caldera piro tubular

La experimentación se realizó en una caldera vertical piro tubular ubicada en los laboratorios del patio de mecánica de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá (Figura 2). No obstante anteriormente a las pruebas en caldera se realizan otras pruebas con el biocombustible obtenido en la planta piloto. La prueba de la llama del biodiesel en el laboratorio empleó un mechero Bunsen, un soporte de acero, un triángulo de porcelana y un crisol. Otra



prueba fue la evaluación de la combustión con el quemador de la caldera. Experimentación que hace posible observar el comportamiento del quemador de la caldera al emplearse una cantidad determinada de diesel comercial (B10) y una de biodiesel producido en la planta piloto (B100). Para este experimento se construyó un equipo de pruebas de combustión a escala piloto. El banco se construyó de acero, recubierto en su interior por una capa de ladrillos refractarios. Acoplado al extremo derecho tiene el quemador de la caldera vertical pirotubular cuyas características son un motor bifásico de 110 V/60Hz de 0,5 HP, con un sistema de alimentación de aire de 3450 RPM y una ignición mediante chispa eléctrica a 10000 V. Este pulveriza el combustible para generar un proceso de combustión con llama no premezclada. Durante las pruebas realizadas se emplea un flujo de aire igual a 0,123 m<sup>3</sup>/s, el consumo de combustible para una mezcla B10 es igual a 0,342 L/min y para el B100 es igual a 0,282 L/min. (Figura 2).



Figura 2 Caldera pirotubular vertical (Izq) - banco de pruebas de combustión (Der)

## 4. RESULTADOS

### 4.1 Proceso de transesterificación en dos etapas

Las pruebas del valor de acidez (VA) de las muestras del AUFS dieron como resultado un promedio de 7,65 mg KOH/g aceite. Este resultado determina una proporción muy alta de AGL en el aceite. La literatura reporta que una materia prima (aceite) ideal tiene un VA < 1 mg KOH/g aceite aunque investigaciones establecen una tolerancia entre (<0,5 - ≤ 2 %p/p) [5]. Este exceso de AGL en el AUFS plantea una alta condición de hidrolisis. Este establece que para reducir estas proporciones de AGL se debe aplicar un proceso de esterificación al AUFS para reducir la reacción de neutralización de los AG o la reacción de saponificación [11]. A partir de la ecuación 2 se estableció que la etapa de esterificación el rendimiento fue del 70% y en la segunda etapa proceso de transesterificación, la concentración de ésteres etílicos de ácidos grasos es de 90 %p/p y un 10 %p/p del glicerol con otros compuestos. El mejor rendimiento obtenido de la unidades experimentales fue del 90%, obtenido en el laboratorio a



partir de las condiciones de operación de relación molar aceite:alcohol de 1:7, %p/p catalizador de 0,7, temperatura de 60 °C y agente de lavado agua a 40 °C.

#### 4.2 Análisis del método de superficie de respuesta de la transesterificación.

La transesterificación mediante catálisis homogénea alcalina se ha ejecutado utilizando el pretratamiento de las muestra con un índice de acidez 4,3 mg de KOH/g. Con el fin de buscar las condiciones óptimas para la síntesis de biodiesel, los experimentos se realizaron de acuerdo a la matriz de DCC (Tabla 2). Las respuestas observadas de la conversión de biodiésel, se muestran también en la Tabla 2. A partir del análisis de regresión múltiple de los datos experimentales se obtuvo la siguiente ecuación polinómica de segundo orden (Ecuación 3)

$$Y = 83,74 + 0,55X_1 + 0,21X_2 + 1,85X_3 - 0,43X_4 - 2,86X_1^2 + 3,14X_2^2 - 0,71X_3^2 - 5,16X_4^2 + 0,22X_1X_2 + 2,05 X_1X_3 + 0,93 X_1X_4 + 1,42X_2X_3 - 1,56X_2X_4 + 0,61X_3X_4 \dots\dots\dots(3)$$

Donde Y, es la respuesta, es decir, la conversión a biodiesel, de las variables codificadas X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub>, X<sub>3</sub> y X<sub>4</sub>, es decir de la relación molar aceite/etanol, concentración de catalizador, tiempo de reacción y temperatura, respectivamente.

El análisis de la varianza (ANOVA) de los resultados del modelo de superficie de respuesta reveló que este modelo es adecuado para expresar la relación real entre la respuesta y las variables planteadas, con un coeficiente de determinación (R<sup>2</sup> = 0,8842), lo que indicaba que el 88% de la variabilidad en la respuesta podría ser explicada por la ecuación polinómica de segundo orden establecida (Ecuación 3). Los perfiles de las superficies de respuesta de la producción óptima de rendimiento basado en la ecuación 3. Se muestran en la figura 3, con los parámetros fijos de tiempo de reacción de 1 h, velocidad de agitación de 200 rpm y presión atmosférica. La figura 3-a muestra que la cantidad de catalizador es muy importante en relación a la temperatura de reacción en la producción del biodiesel a partir de AUF porque el mayor rendimiento se observa a 0,7 %p/p de catalizador y una temperatura de 60 °C, porque cualquier cantidad por debajo muestra una disminución en el rendimiento del biodiesel. La figura 3-b representación la interacción entre la relación molar AUF:etanol y agente de lavado. El rendimiento más óptimo del producto se consiguió en una relación molar 1:6 y agua como agente de lavado obteniéndose un rendimiento aproximado del 83% en peso. La interacción de la relación molar AUF:etanol en la producción del biodiesel se presenta en la figura 3-c, esta demuestra que la máxima relación molar y la máxima temperatura planteadas en el estudio son factores que tienen efectos significativos en el porcentaje del rendimiento. La superficie de la figura 3-d, establece que hay una interacción mutua entre el agente de lavado (agua) y la temperatura a 60 °C, definiendo que la temperatura más adecuada es de alrededor de 60 °C. Aumento de la producción del FAEE's se favorece fuertemente cuando se emplea un alto porcentaje de catalizador, sin embargo relaciones molares menores a 1:6 con concentraciones



# IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO  
DOCENTE  
DEL AREA  
MECANICA  
DE LAS  
INGENIERIAS

FoDAMI

de catalizador en el punto central (0,5 %p/p) dieron lugar a la producción de emulsiones que dificultó la separación de las fases, disminuyendo la conversión a un alrededor del 82% como se puede observar en la figura 3-e. El rendimiento obtenido alrededor del 87% aproximadamente de biocombustible, se logró con el mayor porcentaje de catalizador (0,7 %p/p) y el nivel central empleado en la variable del agente de lavado, debido a que factores empleados por debajo de parámetros obtienen rendimiento menores del 75% de combustible. Los valores óptimos de las variables de prueba en las unidades experimentales son los siguientes: Relación molar AUFS/etanol 1:7, %p/p catalizador de 0,7, temperatura de reacción de 60 °C, agua como agente de lavado, con el correspondiente  $Y = 88,9\%$ .

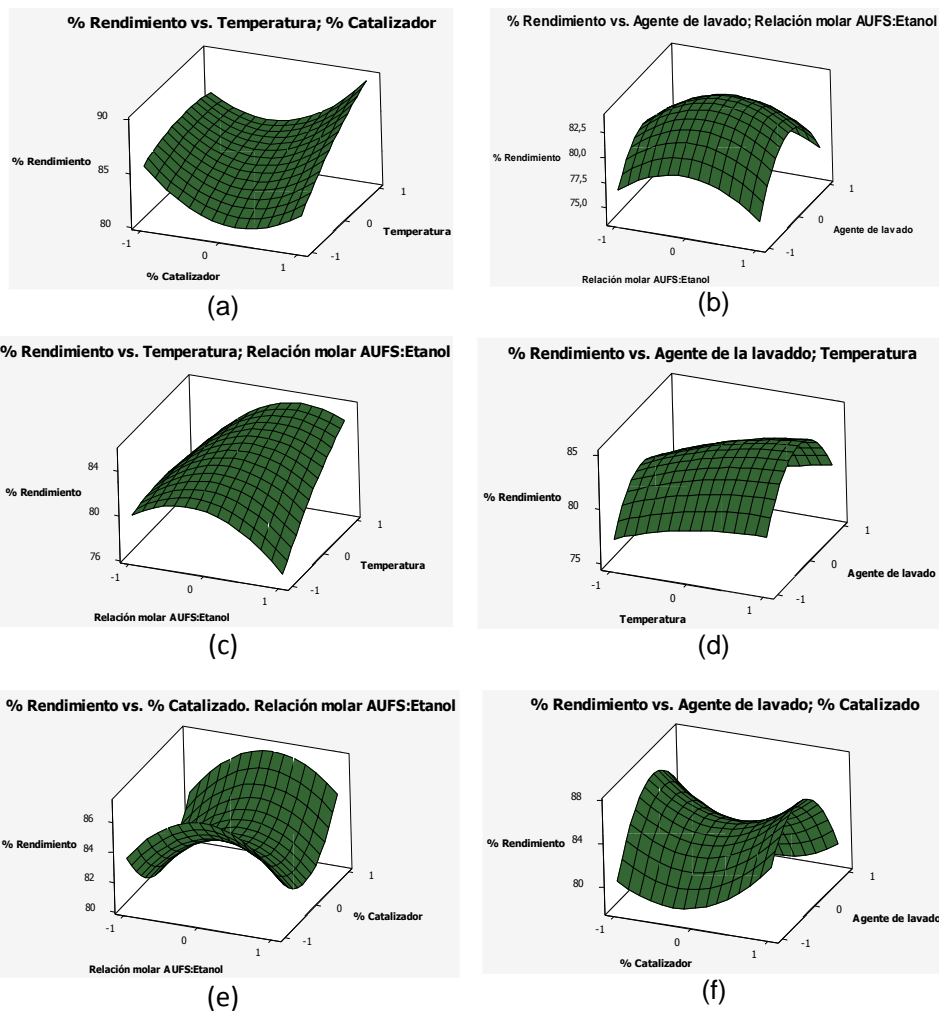


Figura 3. Trazado de superficies de respuesta del porcentaje en peso del rendimiento del biodiesel obtenido entre los efectos en la: concentración del catalizador vs temperatura (a); relación molar AUFS/etanol vs agente de lavado (b), relación molar AUFS/etanol vs temperatura (c), temperatura vs agente de lavado (d), relación molar AUFS/etanol vs concentración de catalizador (e), concentración de catalizador vs agente de lavado (f).



# IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO  
DOCENTE  
DEL AREA  
MECANICA  
DE LAS  
INGENIERIAS

FoDAMI

### 4.3. Análisis de las propiedades del biodiesel

Las composiciones de las muestras de biodiesel son analizadas por cromatografía de gases. Los datos obtenidos del cromatograma muestran que el 96,4% de la composición del biodiesel obtenido son esteres etílicos de ácidos grasos (FAEE's) estableciendo que los triglicérido (aceite) reaccionaron para formar FAEE's, monoglicéridos (MG) y diglicéridos (DG). De acuerdo a la norma EN 14105 y ASTM D6584 el contenido máximo de MG, DG y triglicéridos (TG) presente en el biodiesel debe ser 0,8%, 0,2%, 0,2% respectivamente [12]. Los resultados muestran que el contenido de MG no cumple con el parámetro porque supera en 2,8% al estándar de la norma aspecto que se debe a la presencia de agua en el biodiesel, debido a tiempos muy cortos en el proceso de separación entre las fases pero los DG y TG si cumplen las condiciones de normatividad. Los MG presentes se deben a la posible formación de estos durante la reacción. Otras de las propiedades evaluadas en el combustible se establecen en la tabla 3.

Tabla 3. Propiedades del biodiesel obtenido con las mejores condiciones de operación.

Parámetro	Valor obtenido	Unidad	Norma
Densidad a 15°C	899	kg/m <sup>3</sup>	EN ISO 12185
Viscosidad a 40°C	4,45	mm <sup>2</sup> /s	ASTM D445
Contenido de cenizas	0,057	%(m/m)	ASTM – D 6751
Índice de acidez	0,39	mg KOH/ g aceite	EN 14104
Punto de nube	4,0	°C	ASTM-D 2500
Contenido de agua	0,056	%	ASTM-D 130
Masa molar	303,15	g/mol	[13]
Monoglicéridos	3,59	%(m/m)	EN14105
Diglicéridos	0	%(m/m)	EN14105
Triglicéridos	0	%(m/m)	EN14105

### 4.4. Planta piloto

El proceso que se empleara en la planta para su desarrollo y construcción es de tipo Batch, esta tendrá una capacidad de 150 L/Lote. El montaje se efectuara en el Laboratorio de Biocombustibles del Departamento de Química de la sede Bogotá de la Universidad Nacional de Colombia. A partir de las variables obtenidas en el proceso de optimización del proceso se efectuó el diseño de la planta. La figura 4 muestra el diseño de montaje efectuado en el software Solidword y el montaje de la planta en el laboratorio (figura 4). El diseño del equipo se estableció con siete subsistemas. (Tabla 4).

Tabla 4 Subsistemas de la planta piloto de biodiesel.

Subsistema	Nombre del subsistema de la planta
1	Sistema de calentamiento de agua (CA)
2	Sistema de reacción-Reactor tipo Batch
3	Sistema de alimentación del aceite usado (AU).
4	Sistema de recuperación de alcohol (RA)
5	Sistema de transesterificación y esterificación (S.T.E).
6	Sistema mezclador catalizador-alcohol (SC).
7	Sistema de refrigeración (SR).

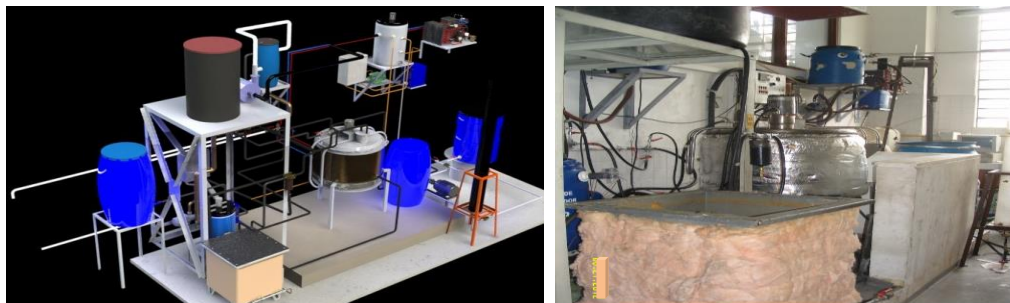


Figura 4. Plano de montaje de la planta piloto de 150 L/Lote en 3D - Montaje de planta de biodiesel de 150 L/Lote en el edificio de Química de la Universidad Nacional de Colombia. Sede Bogotá.

#### 4.5 Pruebas con biocombustible en la caldera pirotubular.

Uno de los objetivos principales de esta investigación era el obtener un biodiesel que se implementará en equipos industriales –calderas-. Por lo cual se deseó analizar el biodiesel obtenido en la planta piloto sin un postratamiento, es decir, un biodiesel de una menor calidad que cumple con algunos parámetros de la norma. Con base en esto se realizaron ensayos en la caldera vertical pirotubular de la figura 2, para identificar aspectos importantes como el consumo, eficiencia energética y emisiones generadas. Para evaluar el consumo de la caldera se toma el tiempo que dura el quemador prendido y el volumen de combustible alimentado antes de alcanzar la presión de operación (50 psi) iniciando a una presión de 25 psi la operación, los resultados se presentan en la tabla 5.

Tabla 5. Ensayos de consumo de combustible en la caldera vertical pirotubular.

Ensayo	Consumo (L/min)
1	19,44
2	31,57
3	33,04
4	17,76
5	21,73

Durante las pruebas realizadas a las 5 muestras de la combustión del biodiesel se encontró que el promedio del consumo estuvo alrededor de 24,71 L/min, asimismo el biocombustible tiene una fácil ignición y mantiene una llama constante de color amarillo, condiciones que logran mantener una combustión uniforme en el quemador. Al obtener el set point de la caldera (40 psi) se obtienen temperaturas de 4 °C (agua) - 37 °C (vapor) a la entrada y 63 °C (agua) - 77 °C (vapor) en las salidas. En el caso de las emisiones generadas se obtuvo una reducción en el CO<sub>2</sub> del 2,3% y 84 ppm de CO entre las muestras analizadas de diésel y el biodiesel producido en la planta piloto. Estos aspectos permiten que el biodiesel elaborado en la planta piloto de 150L/Lote a partir de AUFs es un combustible alternativo que puede ser implementado para su uso en calderas u otros equipos a nivel industrial permitiendo una



# IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO  
DOCENTE  
DEL AREA  
MECANICA  
DE LAS  
INGENIERIAS

FoDAMI

disminución en las emisiones de gases efecto invernadero como en la dependencia con respecto a los combustibles fósiles.

## 6. CONCLUSIONES

Los rendimientos obtenidos de los etil ésteres de ácidos grasos según la prueba cromatográfica es del 96,4 %p/p con unos rendimientos en peso del biodiesel con respecto a la cantidad de inicial de aceite del 90% a nivel de laboratorio

El biodiesel obtenido en la planta piloto de 150L/Lote con AUFS y etanol a partir de los procesos de esterificación – transesterificación obtuvo un máximo rendimiento de 93,5% de FAEE's producido con una relación molar de 1:7 aceite:alcohol, 0,7 % p/p de NaOH, tiempo de reacción de 60 min, temperatura de reacción de 60 °C, catalizador el NaOH y velocidad de agitación de 200 RPM.

El producto obtenido posee características adecuadas para su uso como combustible en caldera porque el comportamiento del biocombustibles logra obtener y mantener las condiciones de operación de la caldera para el uso en procesos industriales y permite una disminución del 2,3% de CO<sub>2</sub>.

## 7. REFERENCIAS

- [1] M. Leahy, J. L. Barden, B. T. Murphy, N. Slater-thompson, and D. Peterson, "International Energy Outlook 2013."
- [2] M. Zabeti, W. M. A. Wan Daud, and M. K. Aroua, "Activity of solid catalysts for biodiesel production: A review," *Fuel Process. Technol.*, vol. 90, no. 6, pp. 770–777, Jun. 2009.
- [3] Y. M. Sani, W. M. A. W. Daud, and a. R. Abdul Aziz, "Activity of solid acid catalysts for biodiesel production: A critical review," *Appl. Catal. A Gen.*, vol. 470, pp. 140–161, Jan. 2014.
- [4] C. G. Fabio Sierra, *Tecnologías para el aprovechamiento de los biocombustibles*. Bogotá Colombia, 2008, p. 326.
- [5] M. K. Lam, K. T. Lee, and 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, no. 4, pp. 500–18, 2010.
- [6] a. E. Atabani, a. S. Silitonga, I. A. Badruddin, T. M. I. Mahlia, H. H. Masjuki, and S. Mekhilef, "A comprehensive review on biodiesel as an alternative energy resource and its characteristics," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 4, pp. 2070–2093, May 2012.
- [7] D. Y. C. Leung, X. Wu, and M. K. H. Leung, "A review on biodiesel production using catalyzed transesterification," *Appl. Energy*, vol. 87, no. 4, pp. 1083–1095, Apr. 2010.



# IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO  
DOCENTE  
DEL AREA  
MECANICA  
DE LAS  
INGENIERIAS

FoDAMI

- [8] M. Berrios, M. a. Martín, a. F. Chica, and a. Martín, "Purification of biodiesel from used cooking oils," *Appl. Energy*, vol. 88, no. 11, pp. 3625–3631, Nov. 2011.
- [9] F. nacional de biocombustibles de Colombia, "Cifras Informativas del Sector Biocombustibles-Biodiesel de aceite de palma," vol. 1, p. 10, 2014.
- [10] J.-H. Tsai, S.-J. Chen, K.-L. Huang, Y.-C. Lin, W.-J. Lee, C.-C. Lin, and W.-Y. Lin, "PM, carbon, and PAH emissions from a diesel generator fuelled with soy-biodiesel blends," *J. Hazard. Mater.*, vol. 179, no. 1–3, pp. 237–43, Jul. 2010.
- [11] T. Issariyakul, M. G. Kulkarni, A. K. Dalai, and N. N. Bakhshi, "Production of biodiesel from waste fryer grease using mixed methanol/ethanol system," *Fuel Process. Technol.*, vol. 88, no. 5, pp. 429–436, May 2007.
- [12] A. Hayyan, F. S. Mjalli, M. A. Hashim, M. Hayyan, I. M. Alnashef, S. M. Al-Zahrani, and M. a Al-Saadi, "Ethanesulfonic acid-based esterification of industrial acidic crude palm oil for biodiesel production.," *Bioresour. Technol.*, vol. 102, no. 20, pp. 9564–9570, Jul. 2011.
- [13] Z. Yaakob, M. Mohammad, M. Alherbawi, Z. Alam, and K. Sopian, "Overview of the production of biodiesel from Waste cooking oil," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 18, pp. 184–193, Feb. 2013.

## Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo de los grupos de investigación: Mecanismos de Desarrollo Limpio y Gestión Energética y Aprovechamiento energético de Recursos Naturales, con el programa del Sistema de información de la investigación-Hermes de la Universidad Nacional de Colombia por la financiación de proyecto 14354.