



**OBTENCIÓN DE BIODIÉSEL A PARTIR DE MEZCLAS DE ACEITE USADO DE COCINA Y
ACEITE DE PALMA**

RICHARD ARLEY ALARCÓN RODRÍGUEZ

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS
BOGOTÁ D.C.
2014

**OBTENCIÓN DE BIODIÉSEL A PARTIR DE MEZCLAS DE ACEITE USADO DE COCINA Y
ACEITE DE PALMA**

RICHARD ARLEY ALARCÓN RODRÍGUEZ

Trabajo de Grado en la modalidad de solución de Problema de Ingeniería para optar al
título de:
Ingeniero Mecánico

Director:
Ph.D, Ing. Qco Dionisio Humberto Malagón Romero

Línea de Investigación:
Energía y Termofluidos
Grupo de Investigación:
Grupo de Estudios y Aplicaciones en Ingeniería Mecánica - GEAMEC

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS
BOGOTÁ D.C.
2014

Nota de aceptación:

Firma del Presidente del jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Dedicatoria

Dedico esta tesis en primer lugar a Dios, porque es quien todo me ha dado, a mis padres y familia por su apoyo incondicional en esta etapa de mi vida, a mi primo Bayron por su retroalimentación hacia el tema y su apoyo incondicional durante toda mi formación profesional.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco especialmente a la Universidad Santo Tomás por el apoyo brindado para la realización de este proyecto donde se destaca la ayuda financiera, soporte técnico, infraestructura e instalaciones y el recurso humano.

De igual manera, quiero presentar mi agradecimiento al director del proyecto Dionisio Humberto Malagón Romero por su orientación, tiempo, espíritu investigativo y dedicación que permitió llevar a la culminación de este proyecto.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	15
1. MARCO TEÓRICO	17
1.1 BIODIÉSEL.....	17
1.2 Definición	17
1.2.1 Características.....	17
1.3 OBTENCIÓN DE BIODIÉSEL.....	18
1.4 CARACTERIZACIÓN DE BIODIÉSEL.....	19
1.4.1 Cromatografía de gases	19
1.4.2 Prueba de potencia en motores	19
1.4.3 Prueba de opacidad	20
1.5 MANDATOS PARA MEZCLA DE BIODIÉSEL-DIÉSEL.....	21
1.6 ACEITE DE PALMA	22
1.6.1 Definición	22
1.6.2 Características.....	22
1.7 ACEITE VEGETAL USADO	23
1.8 MEZCLAS DE ACEITES.....	24
2. MATERIALES Y MÉTODOS	26
2.1 MATERIALES.....	26
2.2 METODOLOGÍA	26
2.2.1 Filtración del aceite usado de cocina.....	26
2.2.2 Caracterización de los aceites.....	26
2.2.3 Diseño experimental.....	27
2.2.4 Obtención de biodiésel.....	28
2.2.5 Escalamiento en la planta productora.....	30
2.2.6 Caracterización del biodiésel	31
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	33
3.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS ACEITES	33
3.1.1 Densidad	33
3.1.2 Viscosidad	34
3.1.3 Índice de acidez	36
3.1.4 Índice de yodo.....	37
3.1.5 Índice de saponificación	38
3.2 OBTENCIÓN DE BIODIÉSEL.....	40
3.3 ESCALAMIENTO EN LA PLANTA PRODUCTORA	41
3.4 CARACTERIZACIÓN DEL BIODIÉSEL	42
3.5 COSTOS	48

4. CONCLUSIONES.....	49
5. RECOMENDACIONES	51
Bibliografía	52

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Reactor y decantador.	28
Figura 2. Planta de biodiésel de Universidad Santo Tomas.	30
Figura 3. Splinder de viscosímetro	59
Figura 4. Montaje del reactor	68
Figura 5. Tapón del reactor.....	68
Figura 6. Parte superior del reactor	69
Figura 7. Fases de separación en el destilador.	69
Figura 8. Tablero de control y planta eléctrica.	71
Figura 9. Resistencias y conectores al tablero de control.....	71
Figura 10. Emsanblaje de la probeta a la planta eléctrica.	72
Figura 11. Fases del tablero de control.	72
Figura 12. Pinzas voltiamperimetricas.....	72
Figura 13. Equipo de medición de opacidad.	74
Figura 14. Panel de control del equipo de opacidad	74
Figura 15. Sonda y exosto de planta eléctrica.	75

LISTA DE GRAFICAS

	Pág.
Grafica 1. Sector de aceites vegetales usados en Bogotá .	24
Grafica 2. Comportamiento de la densidad en los aceites y sus mezclas.	34
Grafica 3. Comportamiento de la viscosidad en los aceites y sus mezclas.	35
Grafica 4. Comportamiento del índice de acidez en los aceites y sus mezclas.	37
Grafica 5. Comportamiento del índice de yodo en los aceites y sus mezclas.	38
Grafica 6. Comportamiento del índice de saponificación en los aceites y sus mezclas.	39
Grafica 7. Comportamiento de las mezclas en la densidad del biodiésel	42
Grafica 8. Comportamiento de las mezclas en el índice de cetanos.	43
Grafica 9. Prueba de potencia a 300 watts de carga comparando la mezcla B0 con 850 Watts.	45
Grafica 10. Prueba de potencia a 600 watts de carga comparando la mezcla B0 con 1200 Watts.	45
Grafica 11. Prueba de potencia a 600 watts de carga comparando la mezcla B0 con 1789 Watts.	46

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Propiedades del Biodiésel Colombiano.....	17
Tabla 2. Opacidad según el modelo del auto.	20
Tabla 3. Mandatos de mezcla de biodiésel 2011	21
Tabla 4. Requisitos del aceite de palma crudo.	22
Tabla 5. Mezclas de aceite para el diseño experimental.....	27
Tabla 6. Resultado de la densidad	33
Tabla 7. Densidad para las mezclas de aceites.	33
Tabla 8. Resultado de la viscosidad	34
Tabla 9. Viscosidad para las mezclas de aceites	35
Tabla 10. Resultados del índice de acidez.	36
Tabla 11. Índice de acidez de las mezclas de aceites.	36
Tabla 12. Resultado del índice de yodo.....	37
Tabla 13. Índice de yodo para las mezclas de aceites.	38
Tabla 14. Resultados del índice de saponificación	38
Tabla 15. Índice de saponificación para las mezclas de los aceites.....	39
Tabla 16. Rendimiento de biodiésel obtenido según mezcla de aceite	40
Tabla 17. Resultados del balance de estequiometria según mezcla de aceite.	40
Tabla 18. Resultados de la conversión según diseño experimental.....	41
Tabla 19. Resultado en volumen del biodiésel obtenido a nivel planta.....	41
Tabla 20. Resultados de la cromatografía de gases	44
Tabla 21. Resultado de opacidad.....	47
Tabla 22. Precio estimado de los aceites y las mezclas de ellos.....	48
Tabla 23. Factor de cálculo de viscosidad	60
Tabla 24. Parámetros de elección para grado de acidez	61
Tabla 25. Parámetros de elección para índice de yodo.....	63
Tabla 26. Volumen para realizar las mezclas según porcentaje de aceite.	67

LISTA DE ECUACIONES

	Pág.
Ecuación 1. Calculo del rendimiento de la reacción.	28
Ecuación 2. Relación para la determinación del peso molecular del aceite.	29
Ecuación 3. Determinación peso molecular metil éster	29
Ecuación 4. Balance por estequiometria	30
Ecuación 5. Determinación de la conversión	30
Ecuación 6. Determinación de la densidad.....	58
Ecuación 7. Determinación de la viscosidad dinámica en cP.	60
Ecuación 8. Determinación de la viscosidad cinemática.	60
Ecuación 9. Determinacion del índice de acidez.	62
Ecuación 10. Determinacion del índice de yodo.	64
Ecuación 11. Determinacion del índice de saponificación.	65
Ecuación 12. Determinacion de la potencia eléctrica generada.	73
Ecuación 13. Relacion de potencia por volumen consumido	73

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. Determinación de densidad.....	58
ANEXO B. Determinación de Viscosidad.....	59
ANEXO C. Determinación del índice de acidez	61
ANEXO D. Determinación de índice de yodo.....	63
ANEXO E. Determinación de índice de saponificación	65
ANEXO F. Obtención de biodiésel a nivel laboratorio	67
ANEXO G. Prueba de potencia eléctrica generada	71
ANEXO H. Prueba de opacidad	74

RESUMEN

Actualmente, la producción de biodiésel en Colombia utiliza como materia prima el aceite de palma; sin embargo los costos asociados a dicha materia, representa entre el 70% y 90% del costo de producción. Una alternativa para reducir los costos es el cambio de materia prima por aceite usado de cocina, desafortunadamente los volúmenes recolectados de dicho aceite son bajos para poder establecer un proceso de producción. En este trabajo se presenta el estudio realizado a la producción de biodiésel a partir de mezclas de aceite de palma virgen y aceite usado de cocina proveniente de restaurantes. La reacción de transesterificación se realizó usando hidróxido de potasio (KOH) como catalizador al 1% con respecto al aceite (p/p). El biodiésel se caracterizó mediante cromatografía de gases (determinación de ésteres metílicos, monoglicéridos, diglicéridos y triglicéridos) e índice de cetanos. Adicionalmente, se realizaron mezclas diésel-biodiésel B0, B10 y B100 y se determinó la potencia eléctrica generada por cada mezcla y la opacidad de los gases resultantes. Los resultados obtenidos en la cromatografía de gases muestran que el contenido de metil ésteres fue superior al 98% con un rendimiento superior al 96%. Los resultados cumplen a satisfacción con la norma NTC 5444. Por otro lado, el índice de cetanos tuvo un promedio de 55,87%. La prueba de potencia señala que la mejor mezcla diésel-biodiésel es la B10 (10% biodiésel) con un valor medio de 4,93 W/ml de mezcla de diésel-biodiésel comparado con la mezcla B0 con 5,48 W/ml de mezcla de diésel-biodiésel, mientras que la opacidad indica que la mejor mezcla es B100 con un resultado promedio de 78,85% comparado con la mezcla B0 con 98%, donde se observó una reducción considerable del 19,75% en la cantidad de material particulado expulsado por la planta eléctrica. Los resultados del estudio confirman la posibilidad de establecer el proceso de producción de biodiésel a partir de la mezcla de aceite usado de cocina y aceite de palma obteniendo un producto que cumple con la normatividad establecida en Colombia, disminuyendo los costos de producción.

Palabras clave: Transesterificación, catalizador, cromatografía de gases, índice de cetanos.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Evaluar la obtención de biodiésel a partir de mezclas de aceite usado de cocina y aceite de palma por transesterificación.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar el aceite de cocina usado, el aceite de palma y la mezcla de estos dos aceites.
- Realizar transesterificación ácido/básica para la mezcla de los dos aceites.
- Escalar la reacción de transesterificación y evaluar el comportamiento del biodiésel obtenido en planta eléctrica.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad y con miras a disminuir la generación de gases de efecto invernadero, el país ha implementado políticas como la Ley 939 de 2004 [1] que promueven el funcionamiento de plantas de producción y uso de biocombustibles, el cual se ha disparado en los últimos años. Con la promulgación en Colombia del uso obligatorio de biodiésel en automotores de motor diésel (mandato) se incrementó la producción de biodiésel hasta un nivel de 489 991 Toneladas en el 2012 [2].

Por otra parte, existe un problema asociado con la seguridad alimentaria en la producción de biodiésel y hace referencia a la materia prima para la obtención de este (aceites vegetales para consumo humano). Adicionalmente el uso de aceite de palma para la producción de energía es discutido desde un punto de vista económico, ya que como materia prima el aceite de palma tiene un costo elevado para llevar a cabo la obtención del biocombustible el cual debe disminuir. Según Fedepalma el precio del aceite de palma crudo radica en un costo de \$1 822 por litro [3]. Una de las alternativas de materia prima es el aceite usado de cocina con un precio de \$800 por litro [4]; sin embargo los volúmenes recolectados de dicho aceite son bajos para establecer un proceso de producción. Un estudio realizado por el grupo de investigación en aplicaciones de Ingeniería Mecánica GEAMEC, particularmente en el área de termofluidos y energía de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Santo Tomas, evaluó el proceso de obtención de biodiésel a partir de aceite usado de cocina, encontrando rendimientos superiores al 90% [5]. La anterior experiencia en la Universidad evidencia de primera mano que técnicamente es posible obtener el biodiésel. Ahora bien, el aceite usado vegetal como materia prima base para la obtención de biodiésel a nivel industrial en el país implicaría una modificación sustancial en las tecnologías y parámetros de proceso en las plantas de producción actuales en el país, incrementando considerablemente los costos. En consecuencia, la idea de utilizar mezclas de aceites reside en que no se vea afectada la tecnología instalada en Colombia, reduciendo costos y a su vez generando un impacto ambiental que tiene el diésel sobre el problema de contaminación frente al planeta.

Por lo anterior, este proyecto se inclinó por la mezcla de aceite vegetal usado proveniente de restaurantes y aceite de palma como una alternativa para la obtención de biodiésel, donde se observó el comportamiento de estos dos tipos de materia prima con respecto a la conversión de ésteres metílicos en presencia de un catalizador básico (KOH). Fue necesario realizar un diseño experimental, el cual evidencia resultados asequibles, generando una alternativa de bajo costo para la obtención de biodiésel sin necesidad de cambiar las tecnologías actuales y a su vez mejorando el aspecto ambiental que tiene diésel en cuanto a la contaminación.

El biodiésel obtenido se caracterizó mediante cromatografía de gases e índice de cetanos; a su vez, se realizaron mezclas diésel-biodiésel B0, B10 y B100 para pruebas de potencia eléctrica y opacidad. Los resultados en la cromatografía de gases muestran una composición promedio de ésteres metílicos, monoglicéridos, diglicéridos y triglicéridos son de 98,83%, 0,82%, 0%, 0% respectivamente, cumpliendo la norma NTC 5444. Por otro lado, el índice de cetanos tuvo un promedio de 55,87%. La prueba de potencia señala que la mejor mezcla diésel-biodiésel es la B10 (10% biodiésel) con un valor medio de 4,93 W/ml de mezcla de diésel-biodiésel comparado con la mezcla B0 con 5,48 W/ml de mezcla de diésel-biodiésel, mientras que la opacidad indica que la mejor mezcla es B100 con un resultado promedio de 78,85% comparado con la mezcla B0 con 98%, donde se observó una reducción considerable del 19,75% en la cantidad de material particulado (hollín) expulsado por la planta eléctrica.

En el mediano plazo, se podría implementar el proceso a nivel industrial, reduciendo costos en la producción de biodiésel y originando una solución al problema de desecho del aceite usado de cocina y la contaminación ambiental.

1. MARCO TEÓRICO

Los biocombustibles han surgido como alternativas a combustibles fósiles, donde el uso del petróleo se extendió a lo largo del siglo XX y generó daños ambientales y una considerable disminución en las reservas de dicho combustible a nivel global [6]. Los biocombustibles son obtenidos a partir de fuentes biológicas tales como aceites, biomasa, algas, bacterias, entre otras [7], lo que les imprime el carácter de ser renovables. Dos de ellos ya son usados a nivel industrial, el bioetanol y el biodiésel, y se prevé el desarrollo de otros en el futuro cercano como el biohidrógeno y el butanol [6, 8]. Es por esta razón que el biodiésel será entonces el tema principal de este trabajo. El objetivo de esta sección es contextualizar al lector con información fundamental para la comprensión de este proyecto.

1.1 BIODIÉSEL

1.2 Definición

La norma D 6751 del 2008 de ASTM (*American Society for Testing Materials*) define el biodiésel como: el éster monoalquílico de cadena larga de ácidos grasos derivados de recursos renovables [9], es decir es un derivado de aceites vegetales o grasas animales, obtenido por alcoholólisis, con metanol o etanol siendo una mezcla compleja de ácidos grasos esterificados, cuyas propiedades y características dependen básicamente de la composición de la materia prima de la cual son obtenidos [10]. El metanol es el alcohol de mayor uso en la producción de biodiésel porque es más económico que etanol [11].

1.2.1 Características

La calidad, propiedades químicas y físicas del biodiésel están asociadas a dos factores principales en el proceso de producción; la técnica utilizada y el tipo de materia prima, es por ello que se estandarizan valores del producto mediante normas que pueden variar según la región en donde se produzca dicho biocombustible. En Colombia, el biodiésel está regido por la norma NTC 5444 [12], donde algunos parámetros de dicha norma están basados en la norma ASTM D6751, para ser utilizados en mezclas. Algunas propiedades del biodiésel definidos en la norma NTC 5444 [12], se presentan en la tabla 1.

Tabla 1. Propiedades del Biodiésel Colombiano.

PROPIEDADES	MÉTODO ASTM	UNIDADES	ESPECIFICACIÓN	
			MÍNIMO	MÁXIMO
Densidad a 15°C	D 4052	Kg/m ³	860	900

Viscosidad Cinemática a 40°C	D 445	mm ² /s	1.9	6.0
Número de Cetano	D 613	Cetanos	47	
Índice de yodo	EN 14111	gr yodo/100 g	-	120
Contenido de monoglicéridos	D 6584	% masa	-	0.80
Contenido de diglicéridos	D 6584	% masa	-	0.20
Contenido de triglicéridos	D 6584	% masa	-	0.20

Fuente. Norma NTC 5444 [12].

1.3 OBTENCIÓN DE BIODIÉSEL

La producción de biodiésel tiende a provenir mayoritariamente de los aceites extraídos de plantas oleaginosas, especialmente girasol, soja y colza. Sin embargo, cualquier materia que contenga triglicéridos puede utilizarse para la producción de biodiésel (girasol, colza, soja, palma, aceites de fritura usado, sebo de vaca, grasa de pollo y de pescado, entre otros) [13]. Por tal motivo la producción del biocombustible en su mayoría se encuentra dada por fuentes no tóxicas, biológicas y renovables [14]. Para la obtención del biocombustible, se utiliza el proceso de transesterificación, el cual consiste en la reacción entre un aceite vegetal o grasa animal y un alcohol ligero (metanol o etanol), donde se obtienen como productos glicerina y biodiésel derivados de los ácidos grasos de partida [15, 16]. En general se suele usar metanol como alcohol en la reacción con ácidos grasos para formar ésteres, ya que dicho alcohol es el más económico en Colombia; en cuyo caso el biodiésel estará compuesto por ésteres metílicos [15, 16, 17]. Los principales factores que afectan a los procesos de transesterificación incluyen temperatura de reacción, relación molar alcohol/aceite, tipo y concentración de catalizador, así como la pureza de los reactivos [18]. El biodiésel obtenido debe ser lavado para retirar el glicerol residual, por lo que se gasta realmente una gran cantidad de agua (para obtener 1 tonelada de biodiésel se debe gastar 3 137 litros de agua) para conseguir la eliminación completa de glicerina [18].

1.4 CARACTERIZACIÓN DE BIODIÉSEL

Para poder utilizar el biodiésel en motores es necesario que cumpla con ciertas características o propiedades de tal manera que su efecto no sea más perjudicial que el diésel o ACPM tradicional [19]. Las propiedades del biocombustible deben ser similares a las del diésel convencional y puede ser utilizado como sustituto o en mezclas. Al ser un combustible obtenido de fuentes naturales tiene características que hacen de su uso un mecanismo favorable al medio ambiente [19]. Las propiedades para el análisis del biodiésel demostrarán: la composición del biocombustible, eficiencia en potencia eléctrica e impacto ambiental del biodiésel en la prueba de opacidad.

1.4.1 Cromatografía de gases

La cromatografía de gases es una técnica para el análisis de la calidad del biodiésel, que permite observar presencia de distintas familias de compuestos junto con el análisis del contenido de metil ésteres, mono, di y triglicéridos obtenido de la reacción de transesterificación. Aunque existen otras técnicas con la que se podría realizar esta evaluación, como: cromatografía líquida de alto rendimiento (HPLC), espectroscopia infrarroja (NIR), resonancia magnética nuclear (RMN), entre otras, la técnica más utilizada en el análisis de biodiésel es la cromatografía de gases [14] y para este caso los parámetros establecidos para comparación estará regida por la norma NTC 5444 [12].

1.4.2 Prueba de potencia en motores

La obtención de biodiésel, por ser un combustible para motores de combustión interna, debe ser evaluado en cuanto a la transformación del mismo en potencia y compararlo con el diésel de origen petroquímico [20]. Estas pruebas se suelen realizar en dinamómetro o plantas de generación de electricidad [20]. El aumento de la concentración de biodiésel (a partir de aceite de cocina usado) en las mezclas diésel-biodiésel disminuye la potencia del motor y la eficiencia térmica [21, 22] principalmente por la reducción en el poder calorífico de biodiésel en comparación con el diésel, la cual es aproximadamente de 13,3-13,5% [23]. Según Gonzales [24] la máxima eficiencia térmica se ha reportado en mezclas B20 y B40 con 26,73% y 27,82% respectivamente, mientras B100 registró un peor rendimiento con valores entre 20% hasta 25% [24]. Se encontró que el B10 es la mezcla óptima de biodiésel dando una pérdida no significativa en la eficiencia térmica teniendo valores para el biodiésel 26,30% en comparación con el diésel 27,82%. Otros autores por el contrario reportan que el biodiésel tiene una disminución 1-4% en el par motor esto debido a los análisis de combustión, los cuales mostraron que la adición de biodiésel al diésel convencional disminuyó el retraso de la ignición [25]. La literatura muestra claramente una contraposición con respecto al análisis de la potencia, encontrándose valores bajos y altos con relación al uso de biodiésel, lo que hace obligatorio la realización

de experimentación como la que se plantea en este proyecto, para definir bajo qué condiciones se presentan las fluctuaciones que se exponen por los diferentes autores.

1.4.3 Prueba de opacidad

El hollín (partículas sólidas cuyos tamaños oscilan entre 100 nm hasta 5 μm) es la principal emisión particulada contaminante de los motores diésel [26]. El nivel de emisión de este material particulado se mide a través de la prueba de opacidad, que se define como el proceso para constatar la cantidad de carbonilla que produce un gas de escape según sea el caso [27].

Para determinar dicha opacidad se emplea un opacímetro el cual evalúa la atenuación de la intensidad de radiación visible por absorción y dispersión de humo [27]. La intensidad de radiación visible, generada por una fuente de radiación, pasa a través de una columna de humo de longitud específica, donde parte de la radiación es absorbida o dispersada por el humo ocasionando una reducción de la intensidad recibida por un elemento fotosensible conocido como detector [27, 28]. La radiación absorbida y la radiación dispersada dependen de que exista interacción entre las componentes monocromáticas de radiación con el material que atraviesa dicha radiación, por lo que la longitud de onda es una magnitud de influencia [27, 28]. El término, longitud específica de humo, se refiere a la trayectoria recorrida por la radiación a través del material, conocida como longitud efectiva del camino óptico o longitud óptica efectiva, la cual depende del diseño del fabricante del opacímetro [27].

Todos los vehículos diésel que operan actualmente cuentan con una restricción de funcionamiento que los obliga a operar dentro de ciertos rangos de opacidad de gases de escape [29]. En Colombia la Resolución 910, proferida en el año 2008 por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, determina en su Artículo 8° los límites máximos de emisión permisibles para vehículos diésel [30]. Estos porcentajes máximos de opacidad, se definen por el modelo de vehículo y se clasifican según la tabla 2.

Tabla 2. Opacidad según el modelo del auto [30].

Año - modelo	Opacidad [%]
1 970 y anteriores	50
1 971 – 1 984	45
1 985 – 1 997	40
1 998 y posterior	35

Estudios evidencian que el humo en las mezclas de biocombustibles es más bajo que el del diésel. Rahman [31] muestra en su trabajo que molécula de biodiésel aporta, por unidad de volumen, más átomos de oxígeno que lo que aporta el mismo volumen de diésel convencional, por tal motivo la presencia de inquemados es menor utilizando biodiésel

dato que hay menos moléculas de material particulado (hollín) y menos de monóxido de carbono (CO). Zhu [32] presentan el descenso de opacidad del humo para la mezcla diésel-biodiésel B10 (10% biodiésel), la cual tiene un valor de reducción de opacidad de 31,79%, en comparación con la de los combustibles diésel. Roy [33] reporta que el número de cetanos tiene relación con la generación de material particulado (hollín); en su estudio se evidencio un retraso extendido de ignición en la mezcla B10 (10% biodiésel) resultante de un número de cetanos bajos, esto proporciona un tiempo más largo para formar una buena mezcla reduciendo en gran medida la generación de hollín. Para el combustible diésel, el humo aumenta la opacidad como se esperaba cuando el tiempo de inyección se retrasa [33].

1.5 MANDATOS PARA MEZCLA DE BIODIÉSEL-DIÉSEL

Los mandatos restringen las cantidades mínimas de biodiésel que deben tener las mezclas diésel-biodiésel. En la tabla 3, se muestran las diferentes regiones del mundo con el tipo de mandato que sus gobiernos exigen en cuanto a mezclas diésel-biodiésel.

Tabla 3. Mandatos de mezcla de biodiésel 2011 [34].

País	Mandato
Estados unidos	B5 - B10
Unión Europea	B5
Brasil	B2
Colombia	B7-B10
México (Guadalajara)	B2
Perú	B1
Paraguay	B2
Canadá	B2
Tailandia	B3
Indonesia	B5
Corea del sur	B5
Taiwán	B1

Kosaka [35] concluye que en la Unión Europea es obligatorio el 5% de biodiésel en las mezclas en los 28 países que la conforman, en Brasil, se utilizan mezclas del B2 junto con México, Paraguay y Canadá; en cuanto Estados unidos, Indonesia y corea del sur tiene un mandato de la mezcla B5 [35, 36], además en países como Jamaica, Alemania, Irlanda y Suecia no se registra ningún mandato y África no tiene programas de mezclas [35]. Por otro lado, Colombia tiene un régimen B7 en el centro-oriente [35, 37] , y en el resto del país B10 [37]. Colombia es la primera nación latinoamericana en superar las mezclas B7 [35, 37].

1.6 ACEITE DE PALMA

1.6.1 Definición

Este aceite, se obtiene de los frutos de dicha planta (*Elaeis guineensis*), donde ésta es originaria del golfo de Guinea (África Occidental); en la actualidad su cultivo se ha extendido radicalmente en las regiones tropicales del mundo gracias a que sus usos son múltiples y sus costos son muy bajos, además de su rendimiento por hectárea (alrededor de 3,7 toneladas), que es el mejor comparado con el aceite de soya (2,5 toneladas) [38], ahora bien, la palma como fuente principal de aceite vegetal en el planeta representa el 31% de producción mundial de aceite de acuerdo con sus 37 millones de toneladas producidas por año donde se produce de manera industrial [39]. En cuanto a sus usos, la palma junto con sus frutos son transformados en la industria agroalimentaria, la industria química y cosmética, entre otras [40].

En Colombia, según Fedepalma, en el segundo trimestre de 2013 se produjeron 286 176 toneladas de aceite a nivel nacional, en el cual la zona oriental se destacó por su producción semestral con 235 728 toneladas [41]. En cuanto a las ventas en el país, el aceite de palma alcanzó las 442 100 toneladas donde se tuvo un aumento del 5% comparado con el 2012 que se vendieron 419 300 toneladas [41]; como se puede observar anteriormente, el aumento de las ventas explica principalmente el mayor consumo industrial de dicho aceite.

1.6.2 Características

En la tabla 4, se presentaran las características fisicoquímicas del aceite de palma que está regida por la norma NTC 431 [42].

Tabla 4. Requisitos del aceite de palma crudo.

Requisitos	Máximo	Mínimo
Densidad en g/ml	0,899	0,891
Índice de yodo	55	50
Índice de saponificación	209	190
Acidez expresada como ácido palmítico en %	5	-

Fuente. Norma NTC 431 [42].

Durante el primer semestre de 2012, el precio del aceite de palma Bursa Malasia (BMD/P3) estuvo alrededor de 1 049 US\$/ton [41], mostrando un aumento del 26% con respecto a los 778 US\$/ton en el mismo periodo del 2013 [41], Por lo anterior para el proceso, el costo de la materia prima (aceite de palma) sería alto impactando drásticamente la producción de biodiésel.

1.7 ACEITE VEGETAL USADO

Son aceites vegetales, provenientes de desechos de las industrias de alimentos, específicamente de las cocinas [43], que por su uso intensivo no son aptos para seguir otro proceso en la fabricación de comestibles; en su mayoría los aceites vegetales se utilizan en las frituras, donde se utilizan grandes cantidades de aceite porque necesita una inmersión completa del alimento y temperaturas muy elevadas aproximadamente de 180°C [44]. Al calentar un aceite a dicha temperatura, este cambia sus características, sus propiedades fisicoquímicas y organolépticas, haciendo que su vida útil se reduzca a máximo dos cocciones porque pueden generar un peligro potencial al consumidor ya que desarrollan radicales libres acrilamidas y elementos cancerígenos [43].

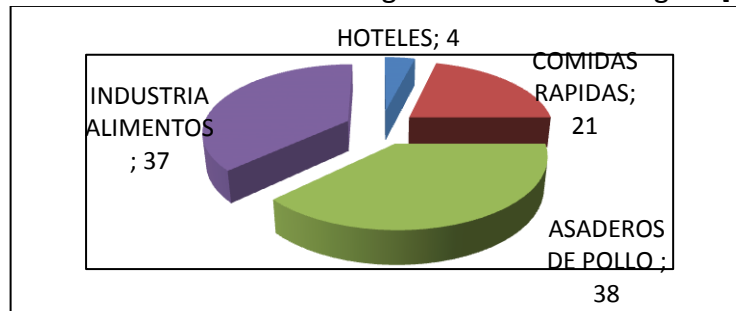
Una vez los aceites vegetales usados finalizan su vida útil, deberán tener una correcta disposición de residuos [45], estos pueden ser recolectados en envases plásticos bien sellados y pueden ser reutilizados como materia prima para la obtención de diferentes productos con un valor agregado como: el compostaje en la agricultura, pintura, barnices, lubricantes, jabones, cosmética y a nivel de la industria energética se puede utilizar para la fabricación de biodiésel [46].

Estudios realizados plantean la posibilidad de obtener biodiésel a partir de aceite usado de cocina, que puede servir como sustituto para el aceite de palma virgen. Zou et al. [47] muestran la posibilidad de obtener biodiésel utilizando como materia prima aceite vegetal usado y transesterificación como reacción obteniendo ésteres metílicos de 96,9% y 86,5%. Además Kanan et al. [48] exponen que el biodiésel derivado del aceite usado de cocina a través del proceso de transesterificación donde se observaron resultados óptimos en la variación de la presión de inyección, reducción en óxido nítrico (NO) y emisión de humo. Adicionalmente investigaciones han demostrado la utilización de aceites vegetales usados en la obtención de ésteres metílicos, algunos de los antecedentes que describen este uso son los siguientes:

Zhang et al. [49] presentan un esquema sobre la producción de biodiésel a partir de aceite usado de cocina el cual ha llegado a desarrollarse industrialmente en países como China, Estados Unidos y Japón que cuentan con legislaciones adecuadas sobre la disposición final de los aceites usados de cocina y en los que existen empresas con experiencia en la gestión de su recolección.

Los aceites vegetales usados han sido una alternativa de bajo costo con una disponibilidad aceptable como materia prima para la producción de biodiésel. Para el caso específico de Bogotá, se realizó un estudio por parte de CORPODIB en el año 2002 [50], con relación a la producción anual de aceites gastados de diversos entornos, se establece la distribución de las principales fuentes productoras de estos en la ciudad estas se muestran en la gráfica 1.

Grafica 1. Sector de aceites vegetales usados en Bogotá [50].



En Bogotá se estima una cantidad de aceites vegetales usados provenientes de las fuentes anteriormente nombradas entre 15 000 y 18 000 toneladas anuales [14]. Según estudios realizados al utilizar dicha cantidad de aceite como materia prima para la producción de biodiésel se obtendría aproximadamente la misma cantidad de biocombustible respecto al aceite [14]. Sin embargo la recolección de los aceites vegetales usados no alcanza a satisfacer la demanda por parte de una planta productora de biodiésel, ya que se requieren cerca de 100 000 toneladas anuales de aceite [51], por tal motivo no es viable implementar la producción a partir de este aceite. Es allí donde surge la posibilidad de realizar mezclas de aceite usado y aceite virgen, con miras a reducir los costos y aprovechar el aceite usado de cocina.

1.8 MEZCLAS DE ACEITES

Existen investigaciones que demuestran la viabilidad de hacer mezclas de aceite para la producción de biodiésel. Fengxian et al. [52] presentan la posibilidad de obtener biodiésel a partir de mezclas de soja y colza obteniendo un rendimiento de 94% de ésteres metílicos bajo condiciones óptimas (relación molar metanol/aceite 5,0:1, temperatura de reacción 55°C, cantidad de catalizador 0,8% en peso y el tiempo de reacción 2 horas). Rehehman et al. [53] evidencian la obtención del biocombustible a partir de mezclas de aceite de mahua con Simarouba mostrando que la cantidad de depósitos de hollín sobre los componentes de un motor diésel de inyección directa de 10,3 kW de un solo cilindro refrigerado por agua, en promedio, fue 21% menor para el motor alimentado por la mezcla diésel-biodiésel B10 (10% biodiésel) en comparación con un motor alimentado-HSD (hibrido) debido a una mejor combustión. Sin embargo no existe algún estudio que indique que se puede obtener biodiésel a partir de mezclas de aceite de palma y aceite usado de cocina. En el presente trabajo se demuestra la posibilidad de obtener el biocombustible a partir de la mezcla de los aceites mencionados anteriormente, aplicando materias primas

alternativas, solucionando el problema del aceite usado de cocina como desecho y disminuyendo los costos de producción del biocombustible.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Dentro del desarrollo de esta sección se presentaran de manera detalla las diferentes fases que integran la realización del proyecto: reactivos utilizados, materias primas, caracterización de las materias, diseño experimental, obtención de biodiésel, escalamiento a nivel planta y caracterización del biodiésel obtenido. Se definieron variables de proceso estructuradas bajo la literatura encontrada para su conformación.

2.1 MATERIALES

Aceite de palma adquirido en SUPRACEITES S.A. (SUPRACEITES S.A., Bogotá, Colombia), aceite usado de cocina proveniente de restaurantes y asaderos. Por otro lado, metanol de 98% de pureza comprado en la empresa PANREAC (PANREAC, Barcelona, España); hidróxido de potasio de 85% de pureza e hidróxido de sodio de 98% de pureza adquirido en MERCK (MERCK, Darmstadt, Alemania); y diésel donado por ECOPETROL (ECOPETROL, Barrancabermeja, Colombia). Los demás reactivos empleados para la caracterización de los aceites se pueden ver en los protocolos de caracterización ubicados en los anexos, son de grado analítico y de laboratorio.

2.2 METODOLOGÍA

2.2.1 Filtración del aceite usado de cocina

Para eliminar las impurezas presentes en el aceite usado de cocina, se realizó el proceso de filtración para 20 litros del mismo. Se empleó un equipo de filtración de marco y platos, con un filtro cuya porosidad retiene material particulado con un tamaño superior a 4 μm (micras). Una vez filtrado el aceite se guardó en recipientes plásticos de 20 litros de capacidad, a temperatura ambiente, hasta su uso acorde al diseño experimental.

2.2.2 Caracterización de los aceites

Se realizó la caracterización de la materia prima (aceite usado de cocina, palma y sus mezclas) en cuanto a las siguientes propiedades:

- **Densidad.** La técnica que se utilizó para la determinación del parámetro se encuentra regida por la norma NTC 336 [54]. La prueba se realiza midiendo la masa, a la temperatura ambiente, de un volumen de grasa liquida en un picnómetro calibrado. En el anexo A, se muestra el protocolo a seguir para la realización de la prueba.

- **Viscosidad.** la realización de estas pruebas se hicieron en base a la norma ASTM D 445 [55], se utilizó un viscosímetro Brookfield Engineering Laboratories LV, este permite medir la viscosidad dinámica de un fluido mediante la rotación de un móvil a determinados esfuerzos cortantes. Se utiliza un factor de corrección dependiendo del tipo de sonda utilizada. Las muestras se calentaron previamente a 40°C en una placa de calentamiento. En el anexo B, está definido el protocolo a seguir para la realización de la prueba.
- **Índice de acidez.** La determinación del índice de acidez se realizó mediante la NTC 218 [56]. La prueba se desarrolló tomando una muestra del aceite la cual se disuelve en una mezcla de solventes adecuados, los ácidos presentes se titularon con una solución metanólica de hidróxido de potasio (Ver anexo C). [56]
- **Índice de yodo.** La técnica que se ejecutó para la determinación del parámetro se encuentra regida por la norma NTC 283 [57]. La prueba consistió en la dilución de 0.2 gramos de ensayo en un solvente y adición de reactivo de W_{ijs} (ver anexo D.). Después de un tiempo específico, se adiciono yoduro de potasio y agua y se tituló la liberación de yoduro con una solución de tiosulfato sódico. [57]
- **Índice de saponificación.** Los procedimientos realizados para la determinación de este índice se llevaron a cabo según la norma NTC 335 [58]. La prueba consistió en saponificar (convertir en jabón un cuerpo graso) completamente una cantidad exactamente pesada de 2 gramos, de la muestra por ensayar, mediante un exceso de solución alcohólica de hidróxido de potasio, valorando luego dicho exceso de solución alcalina con ácido clorhídrico 0,5N. (Ver anexo E).

2.2.3 Diseño experimental

Para dar cumplimiento a los objetivos planteados, se propusieron las mezclas mostradas en la tabla 5.

Tabla 5. Mezclas de aceite para el diseño experimental.

Porcentaje de aceite usado de cocina	Aceite usado	Aceite de palma
0%	0 %	100 %
5%	5 %	95 %
10%	10 %	90 %
15%	15 %	85 %
20%	20 %	80 %
100%	100 %	0%

Estas mezclas de aceite fueron sometidas a transesterificación y su caracterización será por los parámetros de viscosidad, densidad, índice de acidez, índice de yodo y saponificación.

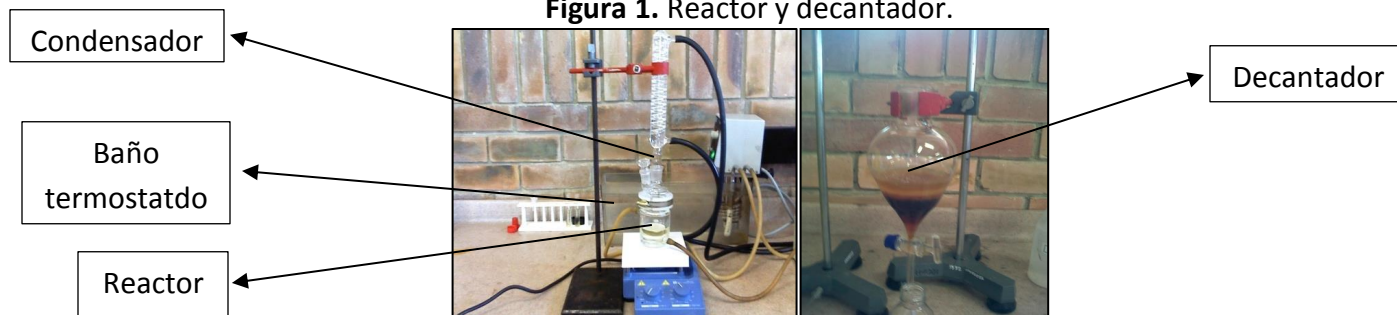
2.2.4 Obtención de biodiésel

La reacción de trans-esterificación para la obtención del biocombustible se realizó en condiciones establecidas previamente por el grupo de investigación GEAMEC [59]: relación molar metanol:aceite 6:1, porcentaje de catalizador 1%, catalizador hidróxido de potasio (KOH). El alcohol seleccionado para esta reacción fue el metanol, ya que éste es empleado actualmente en las plantas de producción de biodiésel instaladas en Colombia. El tiempo de reacción fue de 2 horas. La reacción se montó en un reactor de vidrio de 100 ml de capacidad con un volumen útil de 60 ml, donde se llevó a una temperatura de 60°C con un baño termostatado durante 2 horas [14, 5] (ver figura 1). Al finalizar el tiempo de reacción, se obtuvieron 2 fases: biodiésel y glicerol, por lo cual se colocó la mezcla de reacción en un embudo de decantación (ver figura 1). Se permitió la separación de las 2 fases mediante decantación, se recogió la fase superior (rica en biodiésel). Se adiciono un volumen de agua correspondiente a 1/3 del volumen del biodiésel obtenido, se concedió la separación de fases y se descargó el agua. Se repitió el procedimiento hasta lograr que el pH del agua fuera neutro. Se calentó el biodiésel en un horno hasta una temperatura de 110°C durante 3 minutos. Se pesó el biodiésel obtenido y se determinó el rendimiento de biodiésel con la siguiente ecuación 1. Se tomaron muestras para cromatografía de gases e índice de cetanos. El protocolo del proceso estará mostrado en el anexo F.

Ecuación 1. Calculo del rendimiento de la reacción.

$$\text{Rendimiento, \%} = \frac{\text{peso de biodiesel obtenido}}{\text{peso de aceite utilizado}} * 100$$

Figura 1. Reactor y decantador.



Fuente: Autor.

- **Conversión**

Se tomó como referencia el aceite usado de cocina, ya que este será el compuesto fundamental en el balance por estequiometria respecto a la conversión. Con la

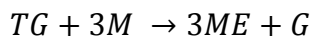
determinación del índice de saponificación para el aceite usado de cocina, se obtuvo el peso molecular de dicho por medio de la reacción de saponificación teniendo en cuenta la estequiometría [14]. Se tuvo presente el resultado obtenido para el índice de saponificación, el cual señala los gramos de hidróxido de potasio para saponificar (obtener jabón) 1 gramo de aceite. Se utilizó la ecuación 2, para la determinación del peso molecular del aceite.

Ecuación 2. Relación para la determinación del peso molecular del aceite.

$$\left(X \text{ mg KOH} \times \frac{1 \text{ g}}{1000 \text{ mg}} \times \frac{1 \text{ mol KOH}}{56,1 \text{ g}} \times \frac{1 \text{ mol TG}}{3 \text{ mol KOH}} \times \frac{1}{1 \text{ g}} \right)^{-1} = X \text{ g/mol}$$

El peso molecular del metil éster se calculó por la ecuación general de la reacción de transesterificación [60, 14] (ver ecuación 3).

Ecuación 3. Determinación peso molecular metil éster [60].



Donde

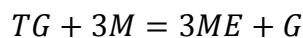
TG: Son los triglicéridos (aceite)

M: Metanol.

ME: Metil éster

G: Glicerol.

se despeja *ME*



$$\frac{TG + 3M - G}{3} = ME$$

$$\frac{x \frac{\text{g}}{\text{mol}} + 3 \left(32,04 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \right) - 92,09 \frac{\text{g}}{\text{mol}}}{3} = x \text{ g/mol}$$

Los valores de los pesos moleculares del metanol y glicerol fueron tomados del manual del ingeniero químico [60].

Se tomó la fracción de triglicéridos del aceite usado de cocina en el proceso de obtención. Se utilizó la ecuación 4, para hacer el balance de estequiometria.

Ecuación 4. Balance por estequiometria [60, 14].

$$Esteq = m_i x_{TG} \frac{3MW_{ME}}{MW_{TG}}$$

Donde,

m_i : Masa inicial de aceite vegetal usado.

x_{TG} : Fracción de triglicéridos.

TG : Numero de Trigliceridos.

ME : Numero de ésteres metílicos.

Se empleó la ecuación 5, para cálculo de la conversión.

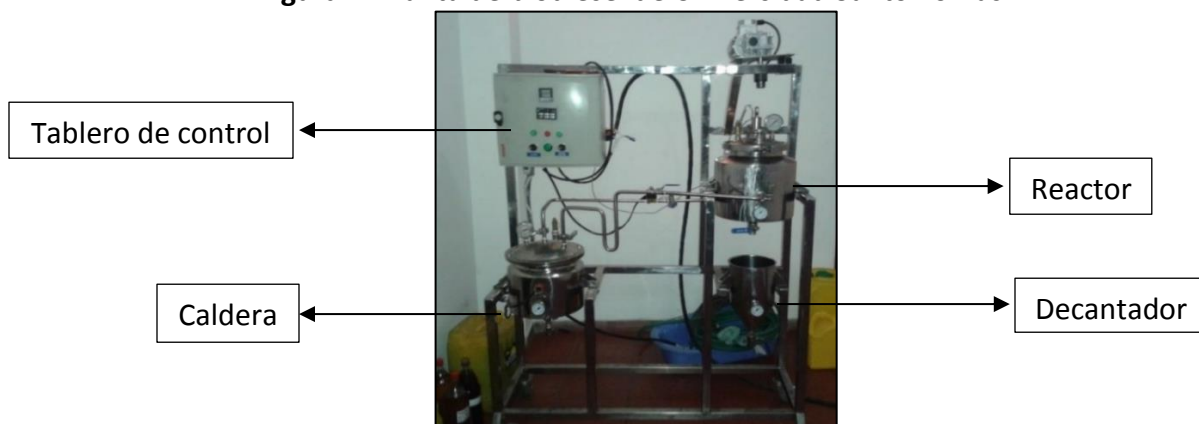
Ecuación 5. Determinación de la conversión [14].

$$C = \left(\frac{x_{ME} m_f}{Esteq} \right) m_i x_{TG}$$

2.2.5 Escalamiento en la planta productora

El escalamiento del proceso de producción se llevó a cabo en la planta piloto de la Universidad Santo Tomás (ver figura 2).

Figura 2. Planta de biodiésel de Universidad Santo Tomas.



Fuente: Autor.

El procedimiento que se utilizó, se hizo en base a lo planteado por el grupo de investigación GEAMEC [59] y fue el siguiente: Se tomó un volumen de 2 litros de mezcla de aceites, se realizó la trans-esterificación empleando una relación molar aceite:metanol de 1:6, catalizador hidróxido de potasio (KOH) al 1% con respecto al peso del aceite, el tiempo de reacción fue de 2 horas, la temperatura de reacción fue de 60°C [5]. Una vez finaliza la reacción, se permitió la separación de las 2 fases (biodiésel y glicerol) usando el decantador de la planta. Se recogió el biodiésel y se realizó el lavado del biodiésel usando agua destilada (6 lavados) hasta alcanzar un pH neutro en el agua de lavado. El biodiésel se calentó en un horno hasta una temperatura de 110°C durante 10 minutos para su secado [59, 5]. Se pesó el biodiésel obtenido y se calculó el rendimiento con la ecuación 1. El biocombustible obtenido fue almacenado para la realización de pruebas en la planta eléctrica.

2.2.6 Caracterización del biodiésel

- **Índice de cetanos**

El índice de cetano fue calculado de acuerdo al procedimiento que se encuentra descrito en la norma ASTM D-4737, la cual indica los parámetros necesarios para realizar dicho calculo a partir de la densidad y curva de destilación. La densidad se realizó con un densímetro digital Mettler Toledo modelo 30 PX y la curva de destilación empleando un equipo marca Presicion PS Scientific series junto con un termómetro PGERTCO ASTM 400C y un cronometro OAKTON calibrados.

- **Cromatografía de gases**

Para el análisis de cromatografía de gases, se empleó un cromatógrafo de gases Agilent 6820 (Agilent Technologies, China), equipado con un detector de ionización de llama (FID), una columna capilar HT-5 SGE. Con 12 m (longitud nominal) x 530 μm (diámetro nominal) y 0,15 μm (grosor nominal de película). Se realizaron tres inyecciones por muestra de 1 μL cada una en forma manual.

- **Potencia**

Esta prueba se realizó en base por lo establecido en la norma ISO 1585 [61]. Con el biodiésel obtenido en el escalamiento en la planta productora, se realizaron mezclas diésel-biodiésel B0, B10, B100 (0%, 10% y 100% biodiésel respectivamente). Se efectuó la combustión en la planta eléctrica diésel marca Kipor E6500 de la Universidad Santo Tomás, donde se calculó la potencia midiendo voltaje y amperaje. Esta prueba se realizó por triplicado.

- **Opacidad**

Esta prueba se realizó por parámetros establecidos de la norma NTC 4231 [62]. En esta prueba se utilizó un opacímetro marca Lucas Smokemeter para la

determinación del contenido de carbón en porcentaje de diésel-biodiésel B0, B10 y B100 donde la medición se realizó por triplicado para cada muestra.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS ACEITES

3.1.1 Densidad

Bajo la norma NTC 336 usando un picnómetro a una temperatura de 15°C se determinó la densidad por triplicado al aceite usado de cocina y al aceite de palma. Los resultados aparecen en la tabla 6.

Tabla 6. Resultado de la densidad

Aceite	Densidad experimental [g/ml]	NTC 431 [g/ml]
Palma	0,8703 $\pm$ 0,011	0,869 - 0,879
Usado de cocina	0,9102 $\pm$ 0,019	-

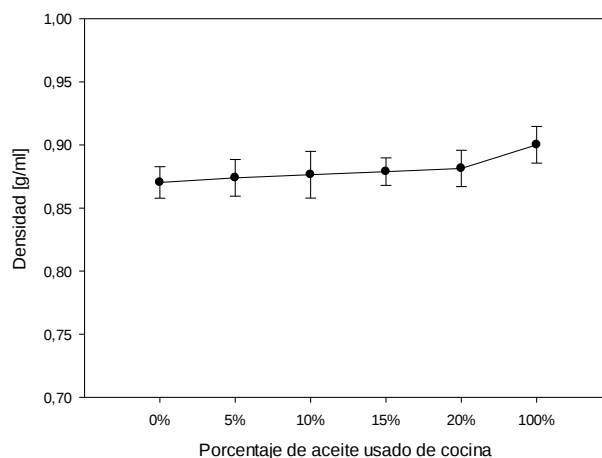
A partir de esta tabla la densidad del aceite de palma se encuentra dentro del rango establecido por la norma NTC 431 [42]. El aceite usado de cocina tiene valores reportados en la literatura por López [14] de 0,9115 g/ml y por Herrera et al. [63] de 0,9156 g/ml, comparando estas dos cifras con la densidad experimental se puede concluir que este se encuentra próximo a lo reportado en la literatura. En la tabla 7, se presenta los valores experimentales de la densidad para mezclas de aceites.

Tabla 7. Densidad para las mezclas de aceites.

Porcentaje de aceite usado de cocina	Densidad 1	Densidad 2	Densidad 3	Desviación estándar
5%	0,8740	0,8752	0,8743	0,001
10%	0,8765	0,8778	0,8795	0,002
15%	0,8789	0,879	0,8785	0,000
20%	0,8814	0,8875	0,881	0,004

En la gráfica 2, se muestra el comportamiento de las mezclas de estos dos aceites de acuerdo a la propiedad analizada.

Grafica 2. Comportamiento de la densidad en los aceites y sus mezclas.



Con los datos presentados anteriormente se realizó un análisis estadístico de varianza de un factor para observar si los valores de densidad son iguales entre sí e independientes de la mezcla de aceites. En esta prueba no se tuvo en cuenta el aceite usado de cocina, por cuanto el interés de la investigación era determinar si se podían emplear mezclas de aceite virgen y aceite usado de cocina. Los resultados de la prueba estadística mostraron un valor de $p > 0,05$, por tal motivo los valores son estadísticamente iguales. Lo anterior demuestra que aplicando un porcentaje más alto de aceite usado de cocina en la mezcla, la densidad no cambia.

3.1.2 Viscosidad

En la tabla 7, se presenta los resultados de la viscosidad cinemática la cual se realizó a una temperatura de 40°C [14, 63, 64]. El ensayo se realizó por triplicado.

Tabla 8. Resultado de la viscosidad

Aceite	Viscosidad experimental [mm ² /s]
Palma	115,929 ± 1,02
Usado de cocina	132,150 ± 1,66

Para la determinación de la viscosidad absoluta, se tomó la densidad a 40°C, con un valor de 0,3255 g/ml y se calculó el valor de la viscosidad dinámica el cual fue 37,73 cP. Fedepalma [65] reporta un valor de la viscosidad dinámica en 37,8 cP para el aceite de palma a 40°C y Rincon et al. [66] reporta un valor de 39,35 cP a 40°C; se puede observar que el valor experimental se encuentra cercano a los valores reportados por la literatura. Por otro lado Alarcón et al. [64] reporta un valor de viscosidad cinemática de 114,8 mm²/s para el aceite de palma, comparando el valor experimental de 115,929 ± 1,02 mm²/s obtenido en este trabajo; lo anterior demuestra que el valor experimental está cerca a lo

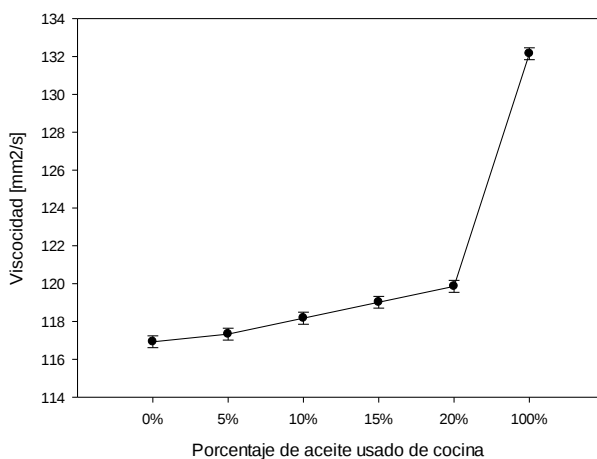
reportado en la literatura. López [14] reporta para el aceite usado un valor de 133,33 mm²/s [14] donde el valor experimental es prácticamente similar a lo reportado por el autor anteriormente mencionado. En la tabla 7, se puede observar que el aceite usado de cocina es mucho más viscoso que el aceite de palma, esto podría generar problemas a la hora de utilizar bombas en un proceso de producción de biodiésel, ya que se necesitaría una mayor potencia para transportar la materia prima al reactor generando así un aumento en los costos de producción. En la tabla 9, se presenta los valores experimentales de la viscosidad para mezclas de aceites.

Tabla 9. Viscosidad para las mezclas de aceites

Porcentaje de aceite usado de cocina	Viscosidad 1	Viscosidad 2	Viscosidad 3	Desviación estándar
5%	117,3311	116,9852	117,1574	0,173
10%	118,1731	117,8562	118,1579	0,179
15%	119,0152	118,7462	118,9731	0,145
20%	119,8572	119,6573	119,9753	0,161

En la gráfica 3, se muestra el comportamiento de la viscosidad en las mezclas de los aceites de acuerdo al diseño experimental.

Grafica 3. Comportamiento de la viscosidad en los aceites y sus mezclas.



En la gráfica mostrada anteriormente se ve reflejado el comportamiento de la viscosidad donde se observa que el valor máximo se obtiene para el 100% aceite usado de cocina. Sin embargo en esta prueba no se tuvo en cuenta el aceite usado de cocina, ya que el interés de la investigación era determinar si se podían emplear mezclas de aceite virgen y aceite usado de cocina. Se realizó un análisis estadístico de varianza de un factor para observar si los valores de viscosidad no tienen una variación estadística. Los resultados del análisis fueron positivos ($p > 0,05$), es decir, que los valores de la viscosidad para los porcentajes son iguales entre sí e independientes de la mezcla de aceites. Lo anterior demuestra que

al no haber variación en los porcentajes de mezcla de aceite usado, no habrá necesidad de aumentar la potencia si se requiere colocar un porcentaje mayor de dicho aceite en las mezclas con el aceite virgen.

3.1.3 Índice de acidez

Para los aceites de palma y usado de cocina, se realizó el procedimiento establecido en la norma NTC 218 por triplicado. Los resultados del índice de acidez para los aceites se muestran en la tabla 8.

Tabla 10. Resultados del índice de acidez.

Aceite	Índice de acidez
Palma	0,328 ± 0,013
Usado de cocina	2,182 ± 0,015

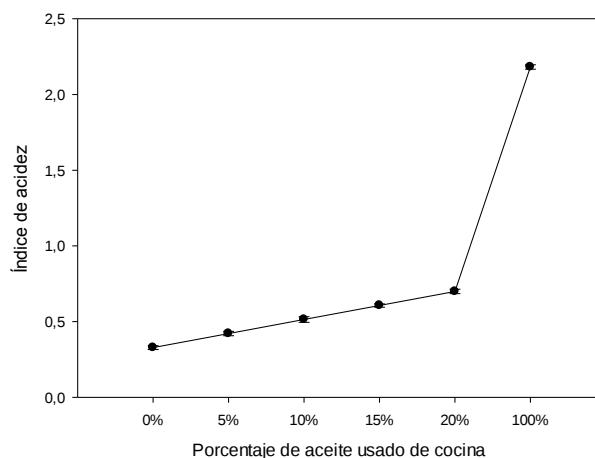
El índice de acidez determina los ácidos grasos libres que tiene cada aceite, por consiguiente entre menor número de ácidos grasos tenga el aceite es mejor, ya que estos pueden reaccionar con el catalizador para formar jabón. En la norma NTC 218 no existe ningún parámetro de comparación para los aceites de palma y usado de cocina. Sin embargo estudios como el de Alarcón [64] y Asociación Malaya de Refinerías de Aceite de Palma [67] reportan valores de índice de acidez para el aceite de palma de 0,589 y 0,3655, respectivamente. El valor experimental para el índice de acidez es cercano a los valores reportados en la literatura. Por otro lado, el aceite usado de cocina tiene valores de índice de acidez entre 0,2 a 0,824 [14, 63], por consiguiente la propiedad tiene un valor alto. El alto índice de acidez obtenido para el aceite usado en este trabajo; es un indicativo del uso del aceite en los restaurantes. En la medida en que se reutilice el aceite, el índice de acidez será mayor ya que conducirá al aumento del porcentaje de ácidos grasos libres; generando así problemas a la hora de la producción, ya que por su alto valor de índice de acidez se produciría una reacción de saponificación que conduciría a la formación de espuma durante la etapa de lavado. En la tabla 11, se presenta los valores experimentales del índice de acidez para mezclas de aceites.

Tabla 11. Índice de acidez de las mezclas de aceites.

Porcentaje de aceite usado de cocina	Índice de acidez 1	Índice de acidez 2	Índice de acidez 3	Desviación estándar
5%	0,4211	0,4255	0,421	0,003
10%	0,5138	0,5289	0,4987	0,015
15%	0,6064	0,5984	0,6135	0,008
20%	0,6991	0,5981	0,7014	0,059

En la gráfica 4, se muestra el comportamiento de las mezclas en cuanto a la característica descrita anteriormente.

Grafica 4. Comportamiento del índice de acidez en los aceites y sus mezclas.



En la gráfica 4, se ve reflejado el comportamiento del índice de acidez de acuerdo a los porcentajes de aceite usado de cocina. En esta prueba no se tuvo en cuenta el 100% aceite usado de cocina, ya que el interés de la investigación era determinar si se podían emplear mezclas de aceite de palma y aceite usado de cocina. Se realizó un análisis estadístico de varianza de un factor para saber si los valores de las mezclas entre los aceites de palma y usado de cocina son iguales. Los resultados demostraron que no hay variación estadística ($p > 0,05$), es decir que los valores de índice de acidez de las mezclas de aceite virgen y aceite usado de cocina son iguales.

3.1.4 Índice de yodo

Los resultados obtenidos del índice de yodo se muestran en la tabla 9. El procedimiento para la realización de esta prueba fue tomado de la norma colombiana NTC 283.

Tabla 12. Resultado del índice de yodo

Aceite	Índice de yodo [g/100 g de sustancia]	Norma NTC 431 [g/100 g de sustancia]
Palma	57,918 ± 0,212	50 - 55
Usado de cocina	70,254 ± 0,285	-

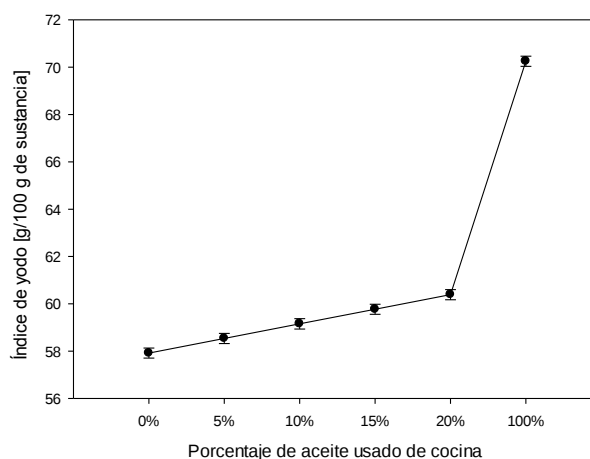
El índice de yodo presenta la cantidad de este compuesto que puede adsorber el aceite vegetal en los enlaces insaturados (enlaces dobles carbono-carbono), es decir, que entre mayor sea el valor del índice mayor será la adsorción en los enlaces dobles presentes en el aceite [14]. En la literatura aparece reportado que el valor para el aceite de palma está en el rango de 50 a 58 g/100 g de aceite de palma [68] y para el aceite usado de cocina debe estar entre 60 a 70 g/100 g de aceite usado [14]. En la tabla 13, se presenta los valores experimentales del índice de yodo para mezclas de aceites.

Tabla 13. Índice de yodo para las mezclas de aceites.

Porcentaje de aceite usado de cocina	Índice de yodo 1	Índice de yodo 2	Índice de yodo 3	Desviación estándar
5%	58,536	59,712	59,334	0,601
10%	59,152	58,974	60,179	0,650
15%	59,769	58,974	59,350	0,398
20%	60,386	60,189	60,348	0,104
100%	70,254	70,159	69,895	0,186

En la gráfica 5, se presenta el comportamiento de esta característica en las mezclas planteadas en el diseño experimental.

Grafica 5. Comportamiento del índice de yodo en los aceites y sus mezclas.



Como se puede observar en la gráfica 5, entre mayor sea el porcentaje de aceite usado de cocina en la mezcla, los niveles de insaturación (enlaces dobles carbono-carbono) aumentan, ya que el aceite ha sido reutilizado cambiando sus propiedades. Por otro lado se realizó la prueba estadística de análisis de varianza de un factor para ver si los valores entre el 0% al 20% aceite usado de cocina son iguales. Los resultados del análisis mostraron que no existe variación estadística ($p > 0,05$), es decir que son iguales.

3.1.5 Índice de saponificación

Para la realización de este procedimiento, se siguieron los parámetros establecidos por la norma NTC 335. Los resultados se muestran en la tabla 10.

Tabla 14. Resultados del índice de saponificación

Aceite	Índice de saponificación [mg de KOH/g]	Norma NTC 431 [mg de KOH/g]
--------	--	-----------------------------

Palma	195,592 ± 1,985	195 - 205
Usado de cocina	197,169 ± 0,934	-

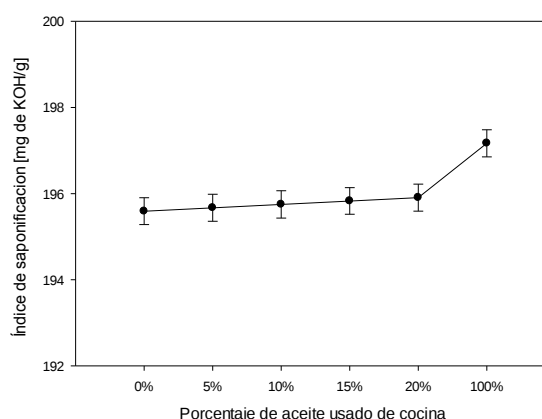
El índice de saponificación muestra la cantidad de hidróxido de potasio (KOH) que se necesita para saponificar (convertir en jabón) un gramo de aceite. El rango reportado en la literatura para el aceite de palma varía desde 195 a 205 mg KOH/g [68], donde se evidencia que es el valor experimental es el mínimo. Por otro lado, el valor del aceite usado de cocina reportado es 196,98 mg KOH/g [14], comparando el valor experimental obtenido en este trabajo es aproximadamente el mismo reportado en la literatura. En la tabla 15, se presenta los valores experimentales del índice de saponificación para mezclas de aceites.

Tabla 15. Índice de saponificación para las mezclas de los aceites.

Porcentaje de aceite usado de cocina	Índice de saponificación 1	Índice de saponificación 2	Índice de saponificación 3	Desviación estándar
5%	195,671	195,336	196,136	0,402
10%	195,750	195,569	195,690	0,092
15%	195,829	195,580	195,897	0,167
20%	195,908	195,548	196,160	0,308

El comportamiento de las mezclas de los aceites planteados en el diseño experimental se muestra en la gráfica 6.

Grafica 6. Comportamiento del índice de saponificación en los aceites y sus mezclas.



Analizando la gráfica 6, se observa que a mayor porcentaje de aceite usado de cocina mayor índice de saponificación. Sin embargo se realizó un análisis de varianza de un factor para verificar si estadísticamente los valores son iguales donde el resultado fue positivo ($p > 0,05$). Por lo tanto la cantidad de hidróxido de potasio (KOH) que se necesita para saponificar (convertir en jabón) un gramo de aceite de palma será la misma cantidad para saponificar el aceite usado de cocina o sus porcentajes de mezcla con el aceite de palma.

3.2 OBTENCIÓN DE BIODIÉSEL

La obtención de biodiésel se realizó a nivel de 60 ml de reacción como se mencionó en la metodología. Los resultados obtenidos se exponen en la tabla 11.

Tabla 16. Rendimiento de biodiésel obtenido según mezcla de aceite

Porcentaje de aceite usado de cocina	Rendimiento [%]
0%	92,25
5%	98,69
10%	93,79
15%	94,86
20%	94,70
100%	94,92

En la tabla 11, se evidencia que el mejor porcentaje de acuerdo al criterio de reacción fue el 5% de aceite usado de cocina con un rendimiento de reacción del 98,69%, generando una mayor obtención de biodiésel y poca glicerina. Sin embargo se observa que en todas las mezclas los rendimientos fueron superiores al 90%. Chen et al. [69] reportan valores de rendimiento superiores al 90% para el aceite de palma. Por otro lado López [14] reporta rendimientos entre el 80% y el 94% para el aceite usado de cocina. Comparando los rendimientos obtenidos en este trabajo con los reportados en la literatura se observa que juntos son superiores al 90%, obteniendo así una óptima cantidad de biodiésel a partir de la materia prima con muy poca glicerina como desecho.

- **Conversión**

En la tabla 12, se muestra los resultados del cálculo del balance por estequiometria para cada porcentaje de aceite usado de cocina según el diseño experimental expuesto en este trabajo.

Tabla 17. Resultados del balance de estequiometria según mezcla de aceite.

Porcentaje de aceite usado de cocina	Mi	TG	ME	Estequiometria
0%	100	855,2	286,4	93,326
5%	100			93,326
10%	100			93,326
15%	100			93,326
20%	100			93,326
100%	100			93,326

Los resultados de la conversión se muestran en la tabla 13.

Tabla 18. Resultados de la conversión según diseño experimental.

Porcentaje de aceite usado de cocina	Conversión [%]
0%	92,06
5%	95,53
10%	91,10
15%	87,90
20%	88,76
100%	90,69

La tabla 13, muestra el porcentaje de conversión que se obtuvo de acuerdo a los 100 mililitros de muestra de aceite. El 5% aceite usado de cocina muestra una conversión del 95,53% del aceite en biodiésel. Sin embargo todos los ensayos son superiores a una conversión del 87%. López [14] reporta una conversión superior del 80% para el aceite usado de cocina. Comparando los valores experimentales con lo reportado en la literatura las conversiones de los ensayos de acuerdo al porcentaje de aceite usado de cocina, se encuentran dentro del rango establecido por el autor anteriormente mencionado.

3.3 ESCALAMIENTO EN LA PLANTA PRODUCTORA

Se realizó el escalamiento del proceso de producción a un nivel de 2 litros de reacción, empleando la planta de producción de biodiésel de la Universidad Santo Tomás (ver figura 2). En la tabla 14, se muestra el rendimiento del biodiésel obtenido para el escalamiento a nivel planta

Tabla 19. Resultado en volumen del biodiésel obtenido a nivel planta

Porcentaje de aceite usado de cocina	Rendimiento (%)
0%	96,42
5%	97,28
10%	95,10
15%	95,38
20%	96,76
100%	96,83

A nivel planta, se observar en la tabla 14 que el rendimiento en todos los ensayos es superior al 90%. Sin embargo el porcentaje del 5% aceite usado de cocina muestra un mayor rendimiento con 97,28%, es decir que el 97,28% de los 2 litros de aceite se

convirtieron en ésteres metílicos, viéndose beneficiado el proceso con la menor pérdida en glicerol durante la reacción.

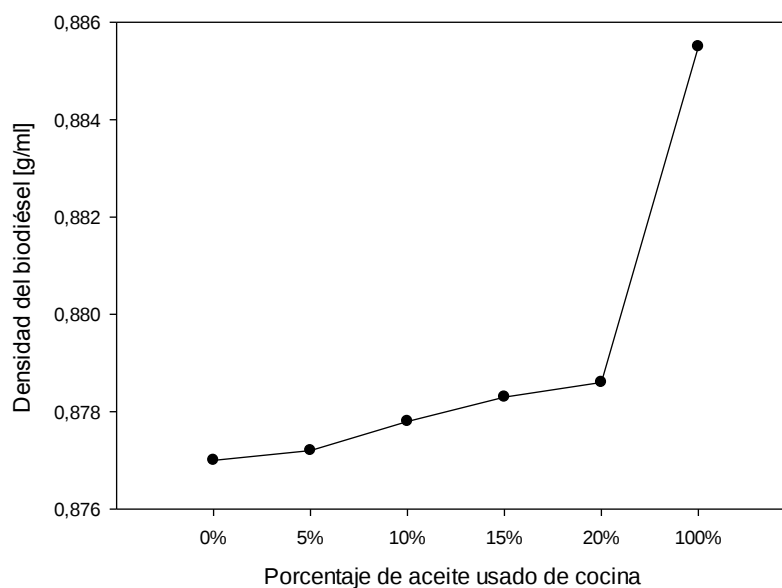
3.4 CARACTERIZACIÓN DEL BIODIÉSEL

La determinación de la densidad, índice de cetanos y cromatografía de gases se realizó por parte del Laboratorio de Ingeniería Química de la Universidad Nacional de Colombia.

- **Densidad**

En la gráfica 7, se presentan los resultados de la densidad del biodiésel obtenido.

Grafica 7. Comportamiento de las mezclas en la densidad del biodiésel

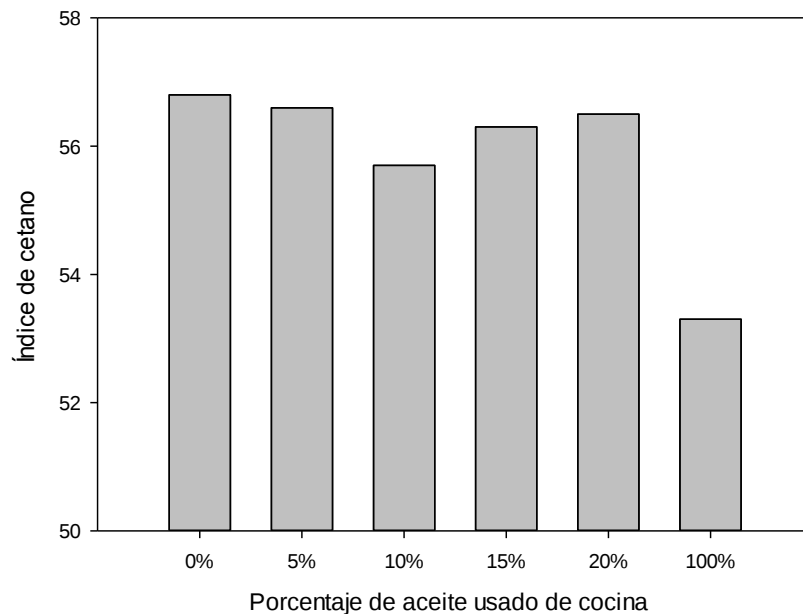


Las densidades se realizaron bajo la norma ASTM D-287 [70], la cual describe una desviación estándar de 0,02. En la gráfica 7, se puede observar que los valores de la propiedad se encuentran en un rango de 0,877 g/ml a 0,885 g/ml. De acuerdo a la literatura lo permitido por la norma NTC 5444 [12], la densidad debe estar en un valor de entre 0,866 g/ml a 0,900 g/ml, donde la los valores experimentales se encuentra dentro del rango establecido por la NTC 5444. Ahora bien, la densidad del combustible diésel es muy importante, ya que esta propiedad define la energía junto con la potencia por volumen del motor [71], por tal motivo el biodiésel obtenido en todos los ensayos generan una eficiencia considerable en cuanto a energía y potencia por volumen de motor aceptable en el país.

- **Índice de cetanos**

En la gráfica 8, se presenta los resultados del índice de cetanos para cada mezcla definida en el diseño experimental.

Grafica 8. Comportamiento de las mezclas en el índice de cetanos.



El índice de cetano se calculó de acuerdo a lo establecido por la norma ASTM D4737 [72], donde se reporta una desviación de 0,0006. El índice de cetano del biodiésel obtenido se encuentra en un valor superior a 50. La norma ASTM D-6751 establece que dicho parámetro debe estar en un valor mayor o igual que 40 donde se cumple el requisito, a su vez la norma EN 14214 establece que el parámetro debe ser $\geq$ a 51 donde también se cumple los valores experimentales [73].

La propiedad determina el tiempo que transcurre entre la inyección del carburante y el comienzo de la combustión, es decir, el intervalo de encendido. Analizando la gráfica 8, se puede observar que el mayor número de cetano se encuentra en el porcentaje del 0% aceite usado de cocina, donde se puede interpretar que es el que produce menos retraso en la ignición y la combustión más adecuada sin un ruido excesivo ni aumento en las emisiones [74]. Las demás mezclas se encuentran por debajo de dicha cantidad; sin embargo todas cumplen las normas mencionadas anteriormente.

- **Cromatografía de gases**

Los resultados de la cromatografía de gases se muestran en la tabla 15.

Tabla 20. Resultados de la cromatografía de gases

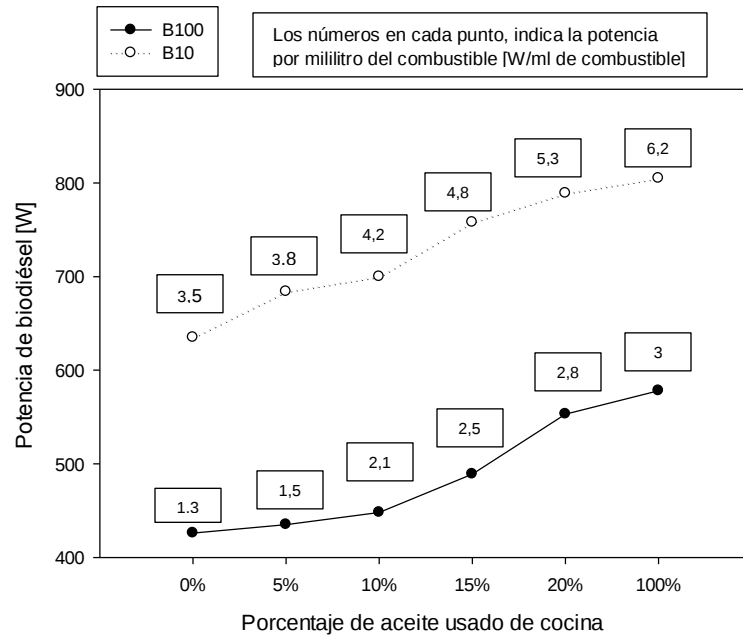
Porcentaje de aceite usado de cocina	Esteres metílicos [ME]	Monoglicéridos [MG]	diglicéridos [DG]	triglicéridos [TG]
0%	99,2	0,8	0	0
5%	99,2	0,8	0	0
10%	98,4	1,6	0	0
15%	98,7	1,3	0	0
20%	99	1	0	0
100%	98,5	1,5	0	0

A partir de este ensayo se determina la composición del biodiésel. La tabla 15, evidencia que los esterres metílicos están en un rango entre 98,4 como mínimo y 99,2 como máximo; en la literatura se encuentra reportado valores para los aceites vírgenes de 97,69 y para el aceite de cocina usado de 98,38 [75]. Por otro lado, según la norma NTC 5444; el contenido de los monoglicéridos, diglicéridos junto con triglicéridos debe ser de 0,8 y 0,2 como máximo respectivamente. Como se puede observar en la anterior tabla, los valores de ésteres metílicos obtenidos en el ensayo de cromatografía de gases tanto para el aceite de palma como para el aceite usado de cocina y sus mezclas son superiores a los establecidos en la literatura. En cuanto a los mono, di y triglicéridos los ensayos A y B cumplen con lo establecido por la norma NTC 5444 [12]. La tabla 15 demuestra que la mayoría de aceite que reacciono produjo biodiésel (ésteres metílicos) sin tener mayor cantidad de monoglicéridos, diglicéridos y triglicéridos que representan aceite sin reaccionar.

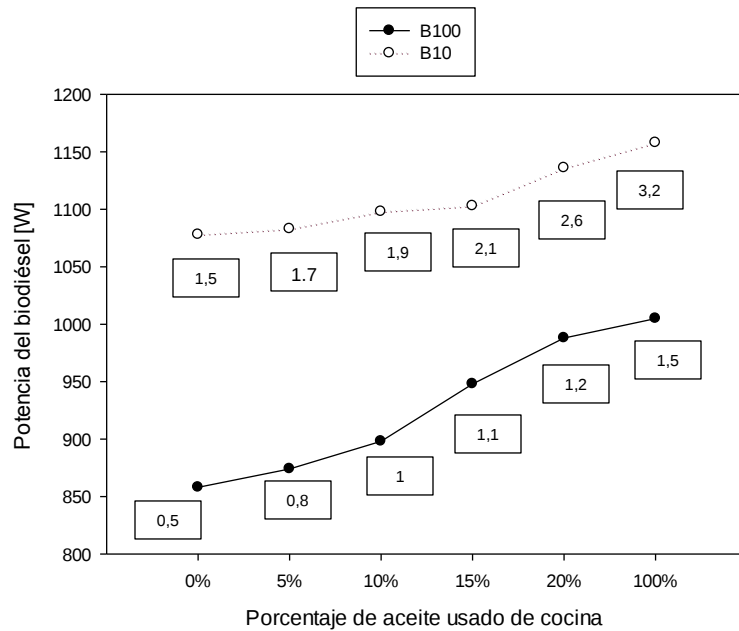
- **Prueba de potencia en motor**

Las pruebas de desempeño realizadas en motores están destinadas a medir el comportamiento del combustible principalmente en su potencia, temperatura de combustión, análisis de gases y opacidad [76]. En las gráficas 9, 10 y 11 se evidencia el comportamiento de la potencia para cada uno de los ensayos según la variación de la carga aplicada.

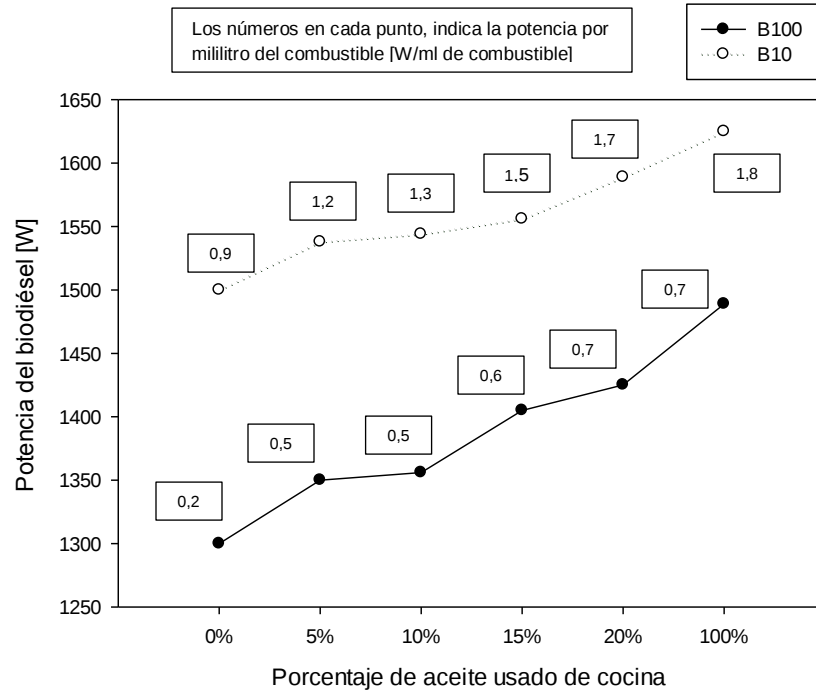
Grafica 9. Prueba de potencia a 300 watts de carga comparando la mezcla B0 con 850 Watts.



Grafica 10. Prueba de potencia a 600 watts de carga comparando la mezcla B0 con 1200 Watts.



Grafica 11. Prueba de potencia a 600 watts de carga comparando la mezcla B0 con 1789 Watts.



En las gráficas 9,10 y 11 se observa un incremento de potencia eléctrica promedio para cada mezcla. La mezcla diésel-biodiésel B10 (10% biodiésel) es la combinación con el valor más alto la cual presenta unos valores entre 600, 1 000 y 1 600 watts para las cargas de 300, 600, 900 respectivamente; tomando como referencia el combustible donado por Ecopetrol (mezcla diésel-biodiésel B0) con una cifra de 850, 1 200 y 1 789 para las cargas mencionadas anteriormente. Nascimento et al. [77] y Fazal et al. [78] manifiestan que la potencia de salida con mezclas B10, B20 y B50 de ésteres metílicos tienen un valor desde 3,5 a 8,6 de potencia por unidad de volumen (ml). Ahora bien, la mezcla B10 tiene un valor medio de 4,93 Watts/mililitro de mezcla de diésel-biodiésel comparado con la mezcla B0 con 5,48 Watts por ml de mezcla de diésel-biodiésel. Comparando el rango de 3,5 a 8,6 watts/ml de diésel-biodiésel reportado por Nascimento [77] y Fazal [78]. Como se muestra anteriormente, la mezcla B10 está dentro del rango mencionado por los autores, generando una alternativa de sustitución de materia prima sin afectar la energía transferida para realizar un trabajo mecánico o termodinámico.

- **Prueba de opacidad**

Uno de los factores para la reducción de la opacidad en los gases producidos del proceso de combustión, además de la sincronización y buena operación del motor, es la composición físico/química del combustible, la cual afecta directamente la generación de gases de escape [5]. Estudios realizados como el de Fang [79], muestran que los porcentajes del parámetro están entre el 26,98% y el 73,44% para mezclas hasta B20. La mayor reducción en la opacidad se evidencio en la mezcla diésel-biodiésel B100 el cual registro un 75% según Fang et al. [79]

En la tabla 16, se muestra los porcentajes de opacidad de acuerdo a la combinación B y a la mezcla entre los aceites.

Tabla 21. Resultado de opacidad

Mezcla	Porcentaje de aceite usado de cocina	Opacidad [%]
B0	Diésel puro de Ecopetrol	98,4
B10	0%	88,2
	5%	87,9
	10%	77,1
	15%	75,8
	20%	77,9
	100%	87,7
B100	0%	68,3
	5%	67,9
	10%	68,1
	15%	68,1
	20%	68,5
	100%	66,7

La tabla 16, muestra que la mezcla diésel-biodiésel B10 (10% biodiésel) tiene un rango de 77,1% a 88,2% de opacidad, con unos valores de disminución entre 10,2% a 21,3%, comparado con lo dicho por Fang [79] se evidencia una disminución en la propiedad. Sin embargo la mezcla B100 (100% biodiésel) muestra unas cifras entre 66,7 hasta 68,3 disminuyendo aún más las cifras mostradas por Fang [79] de 70%. Adicionalmente se puede observar que entre mayor porcentaje de aceite usado de cocina esté presente en las mezclas de los aceites, la opacidad es menor.

3.5 COSTOS

Como se mencionó en la introducción y en el marco teórico presentados al inicio del documento el aceite virgen de palma tiene un valor de \$ 1 822/litro [3], frente a un valor del aceite usado de cocina sin filtrar \$ 800/litro [4] y el aceite de usado de cocina filtrado aproximadamente \$1 100/litro [4]. En la tabla 22 se muestra el valor para los aceites y las mezclas de estos correspondientes al porcentaje de aceite usado de cocina presente.

Tabla 22. Precio estimado de los aceites y las mezclas de ellos

Porcentaje de aceite usado de cocina filtrado	Precio por litro
0%	\$ 1 822
5%	\$ 1 782
10%	\$ 1 742
15%	\$ 1 702
20%	\$ 1 662
100%	\$ 1 100

A partir de la tabla 22 se puede apreciar que los costos de materia prima disminuyen en un rango de 2% a 10% utilizando mezclas de aceite de palma y aceite usado de cocina, generando así una reducción a nivel industrial en los costos de producción de biodiésel en Colombia. Si bien el costo parece ser bajo, si se tiene en cuenta que el nivel de producción de una planta de biodiesel es de 100 000 ton/año, si el ahorro fuera de \$ 40/litro tomando como base el menor porcentaje evaluado en este trabajo el ahorro sería de \$ 4 000 millones de pesos/año. Lo anterior es una evidencia importante de los avances presentados en este trabajo y es un punto de inicio para el escalamiento y posterior implementación a nivel industrial.

4. CONCLUSIONES

- Mediante la implementación de mezclas de aceite usado y aceite virgen de palma se obtuvo biodiesel, el cual cumplió la Norma NTC 5444.
- En las propiedades densidad, viscosidad, índice de acidez, índice de yodo e índice de saponificación que se utilizaron para la caracterización de la materia prima, el aceite de palma cumple con la norma NTC.
- Los rendimientos de la reacción de transesterificación a nivel reactor fue superior al 92% y a nivel planta fueron superiores a 95% en todos los ensayos, siendo la mezcla de aceite 95% aceite de palma y 5% aceite usado de cocina la más eficiente en los dos casos con un rendimiento superior al 97%.
- Las mezclas diésel-biodiésel B10 y B100 tuvieron una reducción de potencia de 10% y 79% respectivamente, comparados con la mezcla B0 (diésel puro), donde se evidencia de antemano que la mezcla B10 genera una reducción de potencia mínima pero a su vez genera menor contaminación ambiental. Por tal motivo se concluye que la mejor mezcla diésel-biodiésel en el criterio de potencia eléctrica generada es la B10.
- Las mezclas diésel-biodiésel B10 y B100 evaluadas en la prueba de opacidad tuvieron un decrecimiento de generación de material particulado (hollín) de 12% a 32% comparadas con la mezcla B0 (diésel puro). Frente a la normatividad nacional de emisión Resolución 910 MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL se encontró una reducción de opacidad entre el 30% al 80% por debajo de lo exigido por la norma que es 40% de opacidad.
- Los costos de materia prima en la obtención de biodiésel se reducen de 2% a 10% utilizando mezclas de aceite usado de cocina y aceite de palma (Entre mayor porcentaje de aceite usado de cocina este presente en la mezcla, menor es el costo de la materia prima) generando así una disminución considerable a nivel industrial en los costos de producción de biodiésel en Colombia. El costo parece ser bajo, si se tiene en cuenta que el nivel de producción de una planta de biodiesel es de 100 000 ton/año, si el ahorro fuera de \$ 40/litro tomando como base el menor porcentaje evaluado en este trabajo el ahorro sería de \$ 4 000 millones de

pesos/año. Lo anterior es una evidencia importante de los avances presentados en este trabajo y es un punto de inicio para el escalamiento y posterior implementación a nivel industrial.

- Los resultados obtenidos en este trabajo, demuestran la factibilidad, viabilidad y sustentabilidad en el proceso de obtención y utilización de biodiésel; y se busca despertar la conciencia en las personas ya que reutilizando el aceite usado de cocina se contribuiría a disminuir los índices de contaminación en las ciudades del país, de esta manera se favorecería la salud humana y el entorno natural.

5. RECOMENDACIONES

- En la producción de biodiésel, se recomienda adquirir o construir un equipo de lavado y secado del biocombustible, ya que al no ser exacto se afecta la calidad de producción de éste.
- Se recomienda realizar un estudio de recolección de aceite usado de cocina para saber qué porcentaje de dicho aceite se puede utilizar en la producción de biodiésel a partir de mezclas de aceite usado de cocina y aceite de palma.
- Es considerable realizar un análisis de gases, con el cual se daría un referente sobre las emisiones de estos y la contaminación que produciría el biodiésel obtenido.

Bibliografía

- [1] MINISTERIO DE MINAS Y ENERGIA, «Ley 939 de 2004,» 31 Diciembre 2004. [En línea]. Available: http://www.minminas.gov.co/minminas/kernel/usuario_externo_normatividad/form_consultar_normas.jsp?parametro=647&site=17. [Último acceso: 6 Julio 2014].
- [2] FEDEBIOCOMBUSTIBLES, «Cifras informativas del sector biocombustibles,» Diciembre 2012. [En línea]. Available: [http://www.fedebiocombustibles.com/files/Cifras%20Informativas%20del%20Sector%20Biocombustibles%20-%20BIODIÉSEL\(41\).pdf](http://www.fedebiocombustibles.com/files/Cifras%20Informativas%20del%20Sector%20Biocombustibles%20-%20BIODIÉSEL(41).pdf). [Último acceso: 2013 Septiembre 28].
- [3] FEDEPALMA, «Precios de referencia,» 3 Octubre 2013. [En línea]. Available: <http://web.fedepalma.org/precios-de-referencia-del-fondo-de-fomento-palmero>. [Último acceso: 2013 Octubre 5].
- [4] J. PAEZ, Interviewee, *Precio del aceite usado de cocina para recoleccion*. [Entrevista]. 25 Julio 2014.
- [5] C. QUINTERO y S. MORENO, Caracterizacion del desempeño de un motor diésel a partir de la implementacion de diferentes mezclas biocombustible/diésel, Bogotá: Universidad Santo Tomas, 2014.
- [6] Y. KHAN, A. BADRUDDIN y A. BADARUDIN, «Recent scenario and technologies to utilize non-edible oils for biodiésel production,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 37, p. 840–851, 2014.
- [7] H. ALVAREZ, M. BLANCO, M. FAJARDO y P. THEVENET, «La produccion de biocombustibles con eficiencia, estabilidad y equidad,» Octubre 2007. [En línea]. Available: http://www.ceid.edu.ar/biblioteca/biocombustibles/alvarez_blanco_fajardo_sanchez_thevenet_biodiésel_a_parti.pdf. [Último acceso: 14 Noviembre 2013].
- [8] M. ZHENGWEI y Z. CHUNYI, «Analyzing the factors that influence Chinese consumers' adoption of the biodiésel: The private vehicles owner's investigating in Beijing,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 37, pp. 199-206, 2014.
- [9] N. KESSEL, «ASTM establece las normas para el biodiésel,» ASTM Standardization News, Febrero 2009. [En línea]. Available: http://www.astm.org/SNEWS/SPANISH/SPJF09/nelson_spjf09.html. [Último acceso: 10 Enero 2014].
- [10] E. ROCHA, S. FOLLEGATTI, S. DUVOISIN y M. AZNAR, «Liquid–liquid equilibria for ternary systems containing ethylic palm oil biodiésel + ethanol + glycerol/water: Experimental data at 298.15 and 323.15 K and thermodynamic modeling,» *Fuel*, vol. 128, pp. 356-365, 2014.
- [11] L. DENNIS, W. XUAN y L. M.K.H., «A review on biodiésel production using catalyzed transesterification,» *Applied Energy*, vol. 87, nº 4, p. 1083–1095, 2010.
- [12] INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACION, Biodiésel para uso en motores diésel. Especificaciones. NTC 5444, Bogota: ICONTEC, 2006.
- [13] BIODISOL, «Energías alternativas, energías renovables, energías limpias, bioenergías,» Biodisol, 14 Enero 2014. [En línea]. Available: <http://www.biodisol.com/biodiésel-que-es-el>

- biodiésel-definicion-de-biodiésel-materias-primas-mas-comunes/biodiésel-materias-primas-con-que-se-fabrica-biodiésel-aceites-y-grasas-produccion/. [Último acceso: 3 Julio 2014].
- [14] L. LOPEZ, Obtención de biodiésel a partir de aceites usados de cocina del club de suboficiales de las fuerzas militares por transesterificación con catálisis ácida-básica, Bogotá: Universidad de America, 2012.
 - [15] J. P. TEXO, C. I. BENTACUR y J. P. DUQUE, Perspectivas generales de desarrollo de la industria de los biocombustibles en el Uruguay, Montevideo: Universidad de la republica, 2009.
 - [16] J. H. GARY y G. E. HANDWERK, Refino de petróleo, Barcelona: Reverte S.A., 2003.
 - [17] ASTM D975-13a, Standard Specification for Diésel FUEL Oils, West Conshohocken: ASTM, 2013.
 - [18] IICA ARPEL, Manual de biocombustibles, San jose: IICA, 2005.
 - [19] MINISTERIO DE MINAS Y ENERGIA, «Biocombustibles en Colombia,» Abril 2009. [En línea]. Available: http://www.upme.gov.co/Docs/Biocombustibles_Colombia.pdf. [Último acceso: 21 Diciembre 2013].
 - [20] O. VALENTE, M. DA SILVA, V. PASA, C. BELCHIOR y J. SODRÉ, «Fuel consumption and emissions from a diésel power generator fuelled with castor oil and soybean biodiésel,» *Fuel*, vol. 89, nº 12, p. 3637–3642, 2010.
 - [21] E. KATES y W. LUCK, Motores diésel y de gas de alta compresion, Barcelona: Reverte S.A., 2003.
 - [22] R. FINESSO y E. SPESSA, «Ignition delay prediction of multiple injections in diésel engines,» *Fuel*, vol. 119, nº 1, p. 170–190, 2014.
 - [23] J. LOPEZ, Evaluacion de las propiedades fisico-quimicas del biodiésel obtenido a partir de palma y etanol, como combustible alternativo del diésel 2D, Guatemala: Universidad San Carlos de Guatemala, 2003.
 - [24] J. GONZALES, Biodiésel, Mexico: Comision nacional para el ahorro de energia, 2007.
 - [25] A. RAHMAN, H. H. MASJUKI, M. A. KALAM, M. J. ABEDIN, A. SANJID y S. IMTENAN, «Effect of idling on fuel consumption and emissions of a diésel engine fueled by Jatropha biodiésel blends,» *Journal of Cleaner Production*, vol. 69, nº 15, p. 208–215, 2014.
 - [26] M. BOLLA, D. FARRACE, Y. WRIGHT y K. BOULOUCHOS, «Modelling of soot formation in a heavy-duty diésel engine with conditional moment closure,» *Fuel*, vol. 117, nº 1, p. 309–325, 2014.
 - [27] Z.-H. SHANG y R. BALASUBRAMANIAN, «Influence of butanol addition to diésel–biodiésel blend on engine performance and particulate emissions of a stationary diésel engine,» *Applied Energy*, vol. 119, pp. 530–536, 2014.
 - [28] Y. MA, M. ZHU y D. ZHANG, «Effect of a homogeneous combustion catalyst on the characteristics of diésel soot emitted from a compression ignition engine,» *Applied Energy*, vol. 113, p. 751–757, 2014.
 - [29] Y.-C. LIN, C.-F. LEE y T. FANG, «Characterization of particle size distribution from diésel engines fueled with palm-biodiésel blends and paraffinic fuel blends,» *Atmospheric Environment*, vol. 42, nº 6, pp. 1133–1143, 2008.
 - [30] MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL, Resolucion 910 de 2008,

Bogotá: Ministerio de ambiente, 2008.

- [31] A. RAHMAN, H. MASJUKI, M. KALAM, M. ABEDIN, A. SANJID y H. SAJJAD, «Production of palm and Calophyllum inophyllum based biodiesel and investigation of blend performance and exhaust emission in an unmodified diesel engine at high idling conditions,» *Energy Conversion and Management*, vol. 76, pp. 362-367, 2013.
- [32] Z. L, Z. W, L. W y Z. HUANG, «Experimental study on particulate and NOx emissions of a diesel engine fueled with ultra low sulfur diesel, RME-diesel blends and PME-diesel blends,» *Elsevier*, vol. 408, nº 1055, pp. 50-64, 2010.
- [33] M. ROY, W. WANG y J. BUJOLD, «La producción de biodiesel y la comparación de las emisiones de un motor diesel DI funciona con biodiesel-diesel y aceite de canola-diesel mezclas en operaciones de alto ralentí,» *Energía Aplicada*, vol. 106, pp. 198-208, 2013|.
- [34] BIOFUELS DIGEST, Mandatos para mezclas en el mundo, Madrid: Biofuels, 2011.
- [35] L. KOSAKA, «Global biodiesel market:,» *Palmas*, vol. 31, nº 2, pp. 340-348, 2010.
- [36] FEDEBIOCOMBUSTIBLES, «Colombia sube producción y mezcla obligatoria de Biocombustibles,» Reporte energia , 14 Abril 2013. [En línea]. Available: <http://www.fedebiocombustibles.com/v3/nota-web-id-1413.htm>. [Último acceso: 18 Abril 2014].
- [37] FEDEBIOCOMBUSTIBLES, «Preguntas frecuentes sobre los biocombustibles,» Fedebiocombustibles, 28 Julio 2014. [En línea]. Available: <http://www.fedebiocombustibles.com/v3/nota-web-id-923.htm>. [Último acceso: 30 Julio 2014].
- [38] CONSORCIO CUE, «Evaluacion del ciclo de vida de la cadena de produccion de biocombustible en Colombia,» Publicaciones de ministerio y energia, Medellin, 2012.
- [39] FOREIGN AGRICULTURAL SERVICE, «Global Soybean Stocks with Record Crops,» United States Department of Agriculture, Estados Unidos, 2014.
- [40] S. ESMIO, «Aceite de palma: usos, orígenes e impactos,» Amigos de la tierra, Madrid, 2008.
- [41] FEDEPALMA, «Boletin economico,» Octubre 2013. [En línea]. Available: <http://web.fedepalma.org/sites/default/files/files/Balance%202013%202Q.pdf>. [Último acceso: 14 Febrero 2014].
- [42] INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACION, Grasas y aceites. aceite crudo de aceite de palma (*Elaeis quineensis* Jacq), Bogotá: ICONTEC, 2009.
- [43] SECRETARIA GENERAL DE LA ALCALDIA MAYOR DE BOGOTA D.C., «Proyecto de acuerdo No. 329 de 2009,» 03 Septiembre 2009. [En línea]. Available: <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=37110>. [Último acceso: 20 Enero 2014].
- [44] ORGANIZACION DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACION Y LA AGRICULTURA, «Grasas y aceites en la nutricion humana,» Departamento de agricultura, Estados Unidos, 2005.
- [45] A. YAGUE, «Estudio de utilizacion de aceites para fritura en establecimientos alimentarios de comidas preparadas,» Septiembre 2009. [En línea]. Available: <http://avdiaz.files.wordpress.com/2008/08/mangeles-aylon-blog.pdf>. [Último acceso: 21 Diciembre 2013].

- [46] M. CRLINI, S. CASTELLUCCI y S. COC, «A Pilot-Scale Study of Waste Vegetable Oil Transesterification with Alkaline and Acidic Catalysts,» *Energy Procedia*, vol. 45, pp. 198-206, 2014.
- [47] C. ZOU, P. ZHAO, L. SHI, S. HUANG y P. LUO, «Biodiésel fuel production from waste cooking oil by the inclusion complex of heteropoly acid with bridged bis-cyclodextrin,» *Bioresource Technology*, vol. 146, p. 785–788, 2013.
- [48] G. KANNAN y R. ANAND , «Effect of injection pressure and injection timing on DI diésel engine fuelled with biodiésel from waste cooking oil,» *Biomass and Bioenergy*, vol. 46, p. 343–352, 2012.
- [49] H. ZHANG , A. OZTURK, Q. WANG y Z. ZHAO , «Biodiésel produced by waste cooking oil: Review of recycling modes in China, the US and Japan,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 38, p. 677–685, 2014.
- [50] CORPODIB, «Evaluacion de las variedades mas promisorias para la produccion de aceite vegetal y su potencial implementacion en Colombia,» 10 Enero 2012. [En línea]. Available: <http://www.si3ea.gov.co/si3ea/documentos/documentacion/Biodiésel/Capitulo%202.pdf>. [Último acceso: 25 Enero 2014].
- [51] FEDEBIOCOMBUSTIBLES, «Cifras informativas sobre el sector de biocombustibles: Biodiésel de palma de aceite,» Abril 2014. [En línea]. Available: <http://www.fedebiocombustibles.com/files/Cifras%20Informativas%20del%20Sector%20Biocombustibles%20-%20BIODIÉSEL%2823%29.pdf>. [Último acceso: 20 Julio 2014].
- [52] Q. FENGXIAN, L. YIHUAI y Y. DONGYA, «Biodiésel production from mixed soybean oil and repeseed oil,» *Applied Energy*, vol. 88, pp. 50 - 60, 2010.
- [53] H. RAHEMAN, J. PRAKASH y J. SNEHAL, «El rendimiento de un motor diésel con mezclas de biodiésel (a partir de una mezcla de aceites) y diésel de alta velocidad,» *Revista Internacional de Ingeniería Ambiental y Energía*, vol. 6, pp. 4-6, 2013.
- [54] INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACION, «Grasas y aceites animales y vegetales: metodo de determinacion de la densidad,» de *Grasas y aceites animales y vegetales*, Bogota, ICONTEC, 2002.
- [55] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS, Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids (and Calculation of Dynamic Viscosity), ASTM, 2014.
- [56] INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACION, «Grasas, aceites vegetales y animales: determinacion del indice de acidez y de la acidez,» de *Grasas, aceites vegetales y animales*, Bogota, ICONTEC, 2011.
- [57] INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACION, «Grasas, Aceites y animales: metodo de determinacion de indice de yodo,» de *Grasas, Aceites y animales*, Bogota, ICONTEC, 2012.
- [58] INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACION, «Grasas, Aceites vegetales y animales: metodo de determinacion del indice de saponificacion,» de *Grasas, Aceites vegetales y animales*, Bogota, ICONTEC, 2011.
- [59] GEAMEC, *Biodiésel*, Bogota: Universidad Santo Tomas, 2012.
- [60] R. PERRY y D. GREEN, *Perry's Chemical Engineers' Handbook*, New York: McGraw-Hill, 2007.
- [61] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, Road vehicles - Engine test code -

Net power, España: Copyright ISO, 1992.

- [62] INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACION , Calidad de aire. Procedimiento de medicion y caracterizticas de los equipos de flujo parcial necesarios para evaluar las emisiones de humo generadas por las fuentes moviles accionadas con diésel. Metodo de aceleracion libre, Bogotá: ICONTEC, 2002.
- [63] J. HERRERA y J. VELEZ, Caracterizacion y aprovechamiento del aceite residual de frituras para la obtencion de un combustible, Pereira: Universidad Tecnologica de Pereira, 2008.
- [64] D. ALARCON y A. RAMIREZ, Ingeniería conceptual para la obtención de biodiésel mediante el uso de lipasas comerciales a escala laboratorio, Bogotá: Universidad de las Americas, 2011.
- [65] FEDEPALMA, «Aceite de palma,» Indupalma, [En línea]. Available: <http://www.indupalma.com/aceite-de-palma>. [Último acceso: 14 Julio 2014].
- [66] S. RINCON y D. MARTINEZ, «An Analysis of the Properties of Oil Palm in the Development of the its Industry,» *Palmas*, vol. 30, nº 2, pp. 11-24, 2009.
- [67] ASOCIACION MALAYA DE REFINERIAS DE ACEITE DE PALMA, «Aceite crudo de palma. Requisitos de calidad para obtener buenos productos refinados,» *Palmas*, vol. 13, nº 3, pp. 69-77, 1992.
- [68] INDUPALMA, «Aceite de Palma,» Indupalma, [En línea]. Available: <http://www.indupalma.com/aceite-de-palma>. [Último acceso: 25 Enero 2014].
- [69] G. CHEN , R. SHAN , J. SHI y B. YAN, «Ultrasonic-assisted production of biodiésel from transesterification of palm oil over ostrich eggshell-derived CaO catalysts,» *Bioresource Technology*, vol. 171, p. 428–432, 2014.
- [70] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS, Standart test method for API gravity petroleum products, Washington: ASTM, 1995.
- [71] L. RAMIREZ, «Density and viscosity of biodiésel as a function of temperature: Empirical models,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 19, p. 652–665, 2013.
- [72] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS , Standard Test Method for Calculated Cetane Index by Four Variable Equation, Estados Unidos de America: ASTM, 2011.
- [73] N. CONTRERAS, Obtencion y caracterizacion de biodiésel a partir del aceite de palma modificado genéticamente de cultivos en el eje cafetero, Pereira: Universidad Tecnologica de Pereira, 2012.
- [74] M. TAT, «Cetane number effect on the energetic and exergetic efficiency of a diésel engine fuelled with biodiésel,» *Fuel Processing Technology*, vol. 92, nº 7, p. 1311–1321, 2011.
- [75] B. MURCIA, L. CHAVEZ, W. RODRIGUEZ, M. ANDREDY y E. ALVARADO, «Characterization of Biodiésel obtained from waste cooking oil,» *Colomb. Biotecnol*, vol. 15, nº 1, pp. 61-70, 2013.
- [76] J. G. FAJARDO, «Análisis del Desempeño de un Motogenerador al Usar Biodiésel como Combustible,» *Ingenieria de Recursos Naturales y del Ambiente*, nº 4, pp. 4-8, 2005.
- [77] M. NASCIMENTO, E. LORA y R. ANDRADE, «Biodiésel fuel in diésel micro-turbine engines: Modelling and experimental evaluation,» *Energy*, vol. 33, nº 2, pp. 233-240, 2008.
- [78] M. FAZAL, A. MASEEB y M. MASJUKI, «Biodiésel Feasibility study: An evaluation of material compatibility; performance;emission and engine durability,» *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 15, pp. 1314-1324, 2011.
- [79] Q. FANG, J. FANG, J. ZHUANG y H. ZHEN, «Effects of ethanolediéselebiodiésel blends on

combustion and emissions in premixed low temperature combustion,» *Applied Thermal Engineering*, vol. 54, pp. 541-548, 2013.

- [80] BROOKFIELD ENGINEERING LABORATORIES INC, «Manual del usuario para series LV,» [En línea]. Available: <http://www.instrument.com.cn/show/literature/c20547.pdf>. [Último acceso: 24 Diciembre 2013].

ANEXO A. Determinación de densidad

MATERIALES

- Picnómetro de 25 ml
- Balanza analítica
- Termómetro
- Placa de calentamiento

PROCEDIMIENTO

1. Teniendo los materiales requeridos, el primer paso es pesar en la balanza analítica el picnómetro vacío.
2. Se calentara el aceite en el picnómetro a una temperatura de 15°C, según la norma NTC 366.
3. Se tomara la medición del peso en la balanza analítica del aceite calentado.
4. Obtenidos los datos de las 2 masas, se procede a aplicar la siguiente fórmula para hallar la densidad deseada:

Ecuación 6. Determinación de la densidad

$$\rho = \frac{(m_l - m_v)}{V}$$

Donde

ρ : es la densidad del aceite dada en g/ml

m_l : es la masa tomada en el paso número 3 dada en g

m_v : es la masa tomada en el paso número 1 dada en g

V : es el volumen del picnómetro (25ml)

ANEXO B. Determinación de Viscosidad

La realización de estas pruebas se hicieron en base a la norma ASTM D 445 [55] Para este ensayo se empleara un viscosímetro Brookfield Engineering Laboratories LV, este aparato permite medir la viscosidad coaxial de un fluido mediante la rotación de un móvil a determinados esfuerzos cortantes. Se utiliza un factor de corrección dependiendo del tipo de sonda utilizada.

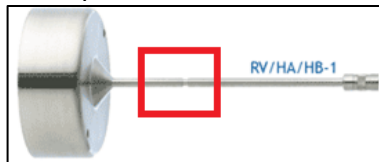
MATERIALES

- Viscosímetro
- Vaso de precipitado de 600 ml
- Placa de calentamiento

PROCEDIMIENTO

1. Se ubicara la placa de calentar con el vaso de precipitado en concordancia con el viscosímetro a utilizar
2. Dependiendo del tipo de splinder (barra en contacto con el fluido) se llenara el vaso de precipitado hasta la marquilla que se encuentra en estos accesorios (ver figura 3).

Figura 3. Splinder de viscosímetro [80].



3. Se pondrá en funcionamiento la placa de calentamiento, donde se llevara el aceite a una temperatura de 40°C.
4. Se encenderá el viscosímetro para realizar las respectivas mediciones, para la primera medición hay que dejar aproximadamente un tiempo de 30 segundos para que se estabilicen las revoluciones.
5. Teniendo la lectura que arroja el viscosímetro, hay que aplicar un factor de acuerdo al splinder escogido, sin embargo en la siguiente figura se muestra los factores que se necesitan para el respectivo calculo.

Tabla 23. Factor de cálculo de viscosidad [80].

LV Series Viscometer							
1		2		3		4	
.3	200	.3	1K	.3	4K	.3	20K
.6	100	.6	500	.6	2K	.6	10K
1.5	40	1.5	200	1.5	800	1.5	4K
3	20	3	100	3	400	3	2K
6	10	6	50	6	200	6	1K
12	5	12	25	12	100	12	500
30	2	30	10	30	40	30	200
60	1	60	5	60	20	60	100

☐ = Spindle ☒ = Spindle Speed
☐ = Factor K = 1000

6. A continuación se mostrara como aplicar el factor

Ecuación 7. Determinación de la viscosidad dinámica en cP.

$$\text{lectura del disco} * \text{factor} = \text{Viscosidad en cP (mPa} * \text{s)}$$

7. Ahora hay que aclarar que la viscosidad encontrada con el viscosímetro es la viscosidad dinámica, sin embargo debemos encontrar la viscosidad cinemática para comparar la norma con esta y saber si cumplen los rangos, por consiguiente debemos aplicar la siguiente relación:

Ecuación 8. Determinación de la viscosidad cinemática.

$$v = \frac{\mu}{\rho}$$

Donde

v : Es la viscosidad cinemática en Stokes (cm²/s)

μ : Es Viscosidad dinámica en poise (g/cm*s)

ρ : Es Densidad (g/cm³)

ANEXO C. Determinación del índice de acidez

El proceso se lleva a cabo diluyendo la muestra en una mezcla de disolventes y valoración de los ácidos grasos libres mediante una disolución etanólica de hidróxido potásico.

REACTIVOS

- Mezcla de éter dietílico y etanol de 95% (V/V), en proporción de volumen 1:1
- Disolución etanólica valorada de hidróxido potásico, 0,1 M, o en caso necesario 0,5 M
- Disolución de 10 g/l de fenolftaleína en etanol de 95-96 % (V/V)

MATERIALES

- Balanza analítica
- Matraz Erlenmeyer de 250 ml
- bureta de 10 ml con graduación de 0,05 ml

PROCEDIMIENTO

1. Tomar la muestra, según el grado de acidez previsto, de acuerdo con el siguiente cuadro:

Tabla 24. Parámetros de elección para grado de acidez

Grado de acidez previsto	Peso de la muestra [g]	Precisión en el pesaje
<1	20	0,05
1 a 4	10	0,02
4 a 15	2,5	0,01
15 a 75	0,5	0,001
>75	0,1	0,0002

2. Pesar la muestra que se encuentra en matraz Erlenmeyer en la balanza analítica
3. Disolver la muestra en 50 a 150 ml de la mezcla de éter dietílico y etanol.

NOTA: Lo anterior debe neutralizarse exactamente en el momento de la utilización.

4. Valorar, agitando, con la disolución de hidróxido potásico de 0,1 M hasta el viraje del indicador

NOTA 1: la coloración rosa de la fenolftaleína debe permanecer al menos durante 10 segundos.

NOTA 2: Si la cantidad necesaria de la solución de hidróxido potásico de 0,1M supera los 10 ml, debe utilizarse una solución de 0,5M.

5. Aplicar La acidez, expresada en porcentaje de ácido oleico con la siguiente ecuación:

Ecuación 9. Determinación del índice de acidez.

$$V * c * \frac{M}{1\ 000} * \frac{100}{P} = \frac{V * c * M}{10 * P}$$

Donde

V: Volumen en ml de la solución valorada de hidróxido potásico utilizada.

c: Concentración exacta, en moles por litro, de la solución de hidróxido potásico utilizada.

M: Peso molecular del ácido en que se expresa el resultado (ácido oleico = 282).

P: Peso en gramos de la muestra utilizada.

NOTA: Se tomará como resultado la media aritmética de dos determinaciones.

ANEXO D. Determinación de índice de yodo

Se define como el peso de yodo absorbido por la muestra en las condiciones de trabajo que se especifican. El índice de yodo se expresa en gramos de yodo por 100 g de muestra.

REACTIVOS

- Yoduro potásico, solución de 100 g/L, exento de yodatos o de yodo libre.
- Engrudo de almidón, 5g de almidón soluble en 30 ml de agua destilada.
- Solución volumétrica patrón de tiosulfato sódico, 0,1 mol/L de tiosulfato sódico, valorada.
- Cloroformo
- reactivo de Wijs, que contenga monocloruro de yodo en ácido acético. Se utilizará reactivo de Wijs comercializado

MATERIALES

- Matraces Erlenmeyer de 500 ml con boca esmerilada
- Navecillas de vidrio

PROCEDIMIENTO

1. Tomar la muestra, según el índice de yodo previsto, de acuerdo con el cuadro siguiente:

Tabla 25. Parámetros de elección para índice de yodo

Índice de yodo previsto	Peso de la muestra [g]
<5	3
5 a 20	1
21 a 50	0,4
51 a 100	0,2
101 a 150	0,13
151 a 200	0,1

2. Pesar la muestra con precisión de 0,1 mg en una navecilla de vidrio.
3. Introducir la muestra en un matraz de 500 ml
4. Añadir 10 ml del disolvente para disolver la grasa.
5. Agregar exactamente 10 ml del reactivo de Wijs, tapar el matraz, agitar el contenido y colocar el matraz al abrigo de la luz.

NOTA: No deberá utilizarse la boca para pipetear el reactivo de Wijs.

6. Preparar del mismo modo un ensayo en blanco con el disolvente y el reactivo

NOTA: Para las muestras con un índice de yodo inferior a 150, mantener los matraces en la oscuridad durante 1 hora; para las muestras con un índice de yodo superior a 150, así como en el caso de productos polimerizados o considerablemente oxidados, mantener en la oscuridad durante 2 horas.

7. Una vez transcurrido el tiempo correspondiente, agregar a cada uno de los matraces 10 ml de solución de yoduro potásico y 75 ml de agua.
8. Valorar con la disolución de tiosulfato sódico hasta que haya desaparecido casi totalmente el color amarillo producido por el yodo.
9. Añadir unas gotas de engrudo de almidón y continuar la valoración hasta el momento preciso en que desaparezca el color azul después de una agitación muy intensa.
10. Aplicar la expresión del índice de yodo de la siguiente manera:

Ecuación 10. Determinación del índice de yodo.

$$\text{Índice de yodo} = \frac{12,69 * c * (V_1 - V_2)}{P}$$

Donde

c : Valor numérico de la concentración exacta, expresada en moles por litro, de la solución volumétrica patrón de tiosulfato sódico utilizada

V_1 : Valor numérico del volumen, expresado en mililitros, de la solución de tiosulfato sódico utilizada para el ensayo en blanco.

V_2 : Valor numérico del volumen, expresado en mililitros, de la solución de tiosulfato sódico utilizada para la determinación.

P : Valor numérico del peso, expresado en gramos, de la muestra problema.

ANEXO E. Determinación de índice de saponificación

REACTIVOS

- Hidróxido de potasio, $c(\text{KOH})$ aproximado 0,5 mol/l solución en 95% (V/V) etanol.
- Ácido Clorhídrico, solución volumétrica estándar, $c(\text{HCl}) = 0,5 \text{ mol/l}$
- Fenolftaleína 10 g/l solución 95% (V/V) etanol. O azul de metileno 20 g/l solución en 95% (V/V) etanol.

MATERIALES

- matraz cónico o Erlenmeyer de 250 ml con cuello esmerilado
- Condensador de reflujo
- Placa de calentamiento
- Bureta de 50 ml graduada en divisiones de 0,1 ml
- Pipeta de 25 ml

PROCEDIMIENTO

1. Pesar 2 gramos de muestra en un Erlenmeyer u matraz cónico de 250 ml esmerilado.
2. Añadir 25 ml de la solución etanolica de hidróxido de potasio y adaptar el condensador de reflujo.
3. Colocar sobre la placa de calentamiento.
4. Llevar a ebullición y mantenerla durante 60 minutos.
5. Retirar de la fuente de calor y añadir 0,5 ml de solución fenolftaleína.
6. Titular cuando todavía está caliente con la solución volumétrica de ácido clorhídrico estándar.
7. Realizar un ensayo en blanco en las mismas condiciones.
8. Aplicar la expresión de índice de saponificación mostrada a continuación:

Ecuación 11. Determinación del índice de saponificación.

$$\text{indice de saponificacion } (I_s) = \frac{56,1 * c * (V_0 - V_1)}{m}$$

Donde

c : Es la concentración exacta en moles por litro, de la solución volumétrica estándar de ácido clorhídrico

V_0 : Volumen utilizado (en ml) de la solución volumétrica normalizada de ácido clorhídrico que se usa para el ensayo en blanco.

V_1 : Volumen utilizado (en ml) de la solución volumétrica estándar de ácido clorhídrico que se usa en el ensayo de la muestra.

m : Es la masa, en gramos, de la muestra en el ensayo.

ANEXO F. Obtención de biodiésel a nivel laboratorio

MATERIALES

- Vaso de precipitado de 250 ml.
- Reactor de vidrio.
- Baño termostático
- 5 litros de aceite de palma (para todas las mezclas).
- 5 litros de aceite de cocina usado filtrado (para todas las mezclas).
- Guantes de látex.
- Máscara con filtro para gases orgánicos.
- 5 litros de mezcla de KOH y etanol (para todas las mezclas).
- Embudo de decantación de 250 ml.
- Placa de calentamiento.
- 6 Tubos eppendorf.
- Placa de agitación.
- 2 jeringas de 60 ml.
- 2 jeringa de 20 ml.
- Termómetro.

PROCEDIMIENTO

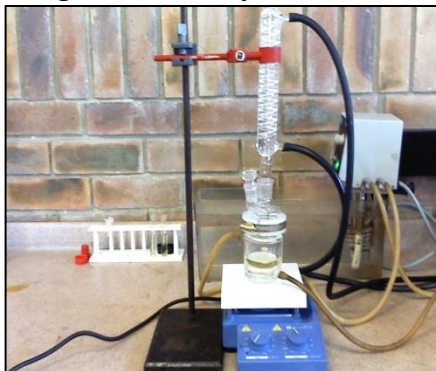
1. Asegurarse que los recipientes estén en perfecto estado y limpios.
2. Se añadirá con una jeringa de 60 ml, el aceite usado de cocina y el aceite de palma o higuierilla teniendo 60 mililitros de mezcla entre estos dos aceites; las mezclas a realizar se verán reflejadas en la siguiente tabla (por cada mezcla se realizara el protocolo).

Tabla 26. Volumen para realizar las mezclas según porcentaje de aceite.

Mezcla	Volumen de aceite de palma [ml]	Volumen de aceite usado de cocina [ml]	Aceite de palma[% de la mezcla]	Aceite usado de cocina[% de la mezcla]
1	60	0	100	0
2	57	3	95	5
3	54	6	90	10
4	51	9	85	15
5	48	12	80	20
6	0	60	0	100

3. Realizar el montaje que aparece en la Figura 4.

Figura 4. Montaje del reactor



4. Se procederá a calentar el reactor con el termostato, para garantizar una temperatura de 60°C para la reacción. Colocar la barra magnética en el reactor.
5. Colocar el montaje sobre la placa de calentamiento
6. Colocar una agitación de 200 rpm. NO encender la calefacción.
7. Insertar el termómetro en el reactor por la parte del tapón, para garantizar que la temperatura este en 60°C.

Figura 5. Tapón del reactor



8. En una jeringa de 20 ml, se aspirara 15,6 mililitros de mezcla de KOH y metanol.
9. Introducir los 15,6 mililitros de mezcla de KOH y metanol en la parte superior del reactor (ver figura 6).

Figura 6. Parte superior del reactor



10. Dejar en agitación durante 2 horas.
11. Apagar el reactor después de las 2 horas.
12. Dejar enfriar el reactor. Tener cuidado de no colocar el reactor sobre una superficie fría, ya que puede ocasionar la ruptura de este.
13. Una vez la mezcla de reacción se encuentra a temperatura ambiente, Llevar esta al embudo de decantación y adicionar 20 ml de agua destilada.
14. Esperar la generación de 3 fases: glicerina, agua y biodiésel (ver figura 7).

Figura 7. Fases de separación en el destilador.



15. Dejar 24 horas en fase de separación, para garantizar la pureza del producto.
16. Lavar el biodiésel con agua ($\frac{1}{3}$ de volumen del biocombustible obtenido por cada lavado) de 3 a 5 veces, dejar decantar durante 15 minutos y verificar que se tenga

un PH de 7, de no ser así aumentar el lavado hasta obtener el PH mencionado anteriormente.

17. Colocar el biodiésel obtenido después del lavado en un vaso de precipitado de 250 mililitros y calentar en la placa de calefacción a una temperatura de 110 °C, arriba del punto de ebullición del agua para eliminarla, con la ayuda de perlas de ebullición y dejar el biodiésel en su estado más puro.
18. Apagar la placa y dejar enfriar el vaso de precipitado de 250 ml.
19. Tomar las muestras de los tubos eppendorf con una jeringa de 20 ml limpia.
20. Marcar las muestra de acuerdo a la especificación requeridas para las pruebas a realizar y asegurarse que el tubo eppendorf este sellado.
21. Almacenar la muestra en una nevera.

ANEXO G. Prueba de potencia eléctrica generada

Esta prueba se realizó en base por lo establecido en la norma ISO 1585. El banco de prueba de potencia eléctrica generada de la Universidad Santo Tomas se conforma de: una planta eléctrica marca Kipor E6500, un tablero de control de potencia y toma de datos por medio de amperímetros, un medidor de variación de consumo y resistencias de carga.

MATERIALES

- Planta eléctrica.
- 2 amperímetros.
- Tablero de control.
- Probeta.
- Resistencias.

PROCEDIMIENTO

1. Conectar el tablero de control a la planta eléctrica (ver figura 8).

Figura 8. Tablero de control y planta eléctrica.



2. Conectar las resistencias al tablero de control (ver figura 9).

Figura 9. Resistencias y conectores al tablero de control.



3. Ensamblar la probeta al punto de alimentación de combustible como se muestra en la figura 10.

Figura 10. Ensamblaje de la probeta a la planta eléctrica.



4. Colocar un litro de biodiésel en la probeta.
5. Encender la planta eléctrica.
6. Encender la fase 1 y 2 del tablero de control (ver figura 11).

Figura 11. Fases del tablero de control.



7. Conectar los 2 amperímetros en los zócalos de medición de voltaje como se muestra en la figura 12.

Figura 12. Pinzas voltiamperimetricas.



8. Anotar el voltaje y el volumen consumido en una hoja transcurridos 3 minutos
9. Aplicar la expresión de potencia mostrada a continuación:

Ecuación 12. Determinación de la potencia eléctrica generada.

$$P = \frac{V^2}{R}$$

Donde

P : Es la potencia expresada en Watts (W).

V : Es el voltaje en la línea 1 y la línea 2 en voltios.

R : Es la resistencia de la línea 1 y la línea 2, en ohmios (Ω).

10. Aplicar la relación de potencia generada por volumen de biodiésel consumido mostrada a continuación:

Ecuación 13. Relación de potencia por volumen consumido

$$\frac{P}{V_c}$$

Donde

P : Es la potencia expresada en Watts (W).

V_c : Es el volumen consumido de biodiésel, en mililitros (ml).

ANEXO H. Prueba de opacidad

El procedimiento de medición de opacidad se basó en la técnica para toma de pruebas de Motorysa la cual se encuentra basada en la norma NTC 4231.

MATERIALES

- Opacímetro
- Planta eléctrica

PROCEDIMIENTO

1. Encender equipo de opacidad (Ver figura 13).

Figura 13. Equipo de medición de opacidad.



2. Calentar el equipo durante 120 segundos y hacer click en el panel de control (ver figura 14).

Figura 14. Panel de control del equipo de opacidad



3. Seguir el procedimiento mostrado en el panel de control para el conteo de calentamiento de la sonda del equipo de opacidad.
4. Iniciar diagnostico

5. Introducir la sonda en el exosto de la planta eléctrica como se muestra en la figura 15.

Figura 15. Sonda y exosto de planta eléctrica.



6. Tomar el porcentaje de opacidad en ralentí (Prueba en vacío de planta eléctrica).
7. Tomar la velocidad gobernada (Carga máxima que resiste la planta).
8. Colocar la planta eléctrica en velocidad neutral.
11. Acelerar a fondo (aplicar carga máxima de la planta) durante 9 segundos hasta que lo indique el equipo de opacidad, esta operación se repite 5 veces.
12. Volver a velocidad ralentí (quitar carga aplicada en la planta eléctrica) durante 15 segundos.
13. Retirar el reporte de resultados de opacidad que el equipo imprime de la prueba.