

PROPUESTA PARA DESARROLLAR UN MÉTODO DE FILTRACIÓN PARA
DISMINUIR PARTÍCULAS CONTAMINANTES PRESENTES EN EL BIODIÉSEL
DE RECEPCIÓN POR LA EMPRESA IDAE INGENIERÍA S.A.S.

LAURA CAMILA LASPRILLA BLANCO

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ, D. C.
2019

PROPUESTA PARA DESARROLLAR UN MÉTODO DE FILTRACIÓN PARA
DISMINUIR PARTÍCULAS CONTAMINANTES PRESENTES EN EL BIODIÉSEL
DE RECEPCIÓN POR LA EMPRESA IDAE INGENIERÍA S.A.S.

LAURA CAMILA LASPRILLA BLANCO

Proyecto integral para optar el título de:

INGENIERO QUÍMICO

Director
Helmer Acevedo
Ingeniero Mecánico

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ, D. C.
2019

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá D.C., Febrero 2019

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. Jaime Posada Díaz

Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos

Dr. Luis Jaime Posada García-Peña

Vicerrector Académico y de Posgrados

Dra. Ana Josefa Herrera Vargas

Decano de Facultad de Ingenierías

Ing. Julio Cesar Fuentes Arismendi

Director del Departamento de Ingeniería Química

Ing. Leonardo de Jesús Herrera Gutiérrez

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y los docentes no son responsables por las ideas y conceptos emitidos en el presente documento. Estos corresponden únicamente al autor.

DEDICATORIA

Agradezco primero a Dios por permitirme culminar este proyecto, a mi familia por apoyarme en cada momento e incentivar-me a ser mejor profesional y mejor persona, dedico este título a mis padres que me dieron la vida, educación, y todos sus consejos. Mi papá José Luis por su ejemplo de superación, fortaleza y dedicación, a mi mamá Elizabeth que desde el cielo me guía y bendice, a mi mamá Fanny por el apoyo, consejos y motivación a lo largo de mi carrera, a mis hermanos Alejandra, Felipe, Xiomara y Karen, por su respaldo y admiración. A todas y cada una de las personas que han hecho parte de este proceso y que me han acompañado en cada paso, a todos aquellos que han visto mi esfuerzo para culminar de la mejor manera este objetivo para lograr una de las metas más importantes en mi vida, a mis amigos Isis, Sara, Santiago, Daniela, Yuzuly, Victoria, Lina, kathleen, Yuliana, Natalia y Nicolás, compañeros y colegas, con los que he compartido historias, alegrías y tristezas; no podría haber pedido mejores personas, mejor respaldo y amistad en mi vida.

AGRADECIMIENTOS

Finalizando este trabajo de grado ofrezco mi más sincero agradecimiento a todas las personas que directa o indirectamente participaron leyendo, opinando y corrigiendo cada uno de los avances presentados durante la realización de este proyecto.

A la Fundación Universidad de América, especialmente a los docentes del programa de ingeniería química, que me han permitido a través de sus conocimientos, crecer intelectual y humanamente, marcando cada etapa de mi camino universitario y profesional.

A la empresa IDEA INGENIERÍA S.A.S y al ingeniero Miguel Ángel Sánchez, por la oportunidad de desarrollar el trabajo de grado, por el apoyo y facilidades que me fueron otorgadas en la empresa y por su gran colaboración en la fase experimental del proyecto.

Al Ingeniero Óscar Lombana, quien, con su conocimiento y apoyo dirigió la realización de este proyecto.

Al químico industrial Marcus Avendaño, por proporcionar los elementos de laboratorio para realizar con éxito esta investigación.

A mi familia por brindarme el apoyo económico y moral, que fue lo más importante en este proceso, gracias a ellos por su esfuerzo y ánimo para finalizar con éxito este proyecto.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	19
OBJETIVOS	20
1. GENERALIDADES	21
1.1 BODIESEL	21
1.1.1 Biodiesel en Colombia.	22
1.2 PRODUCCIÓN DE BODIESEL A PARTIR DEL ACEITE DE PALMA	24
1.2.1 Reacción de transesterificación	25
1.3 CONTAMINACIÓN TOTAL DEL BODIESEL	28
1.4 CÓDIGO ISO 4406	29
2. PROCESO DE PRODUCCIÓN DEL BODIESEL	31
2.1 CARACTERIZACIÓN DEL BODIESEL	31
2.1.1 Densidad	32
2.1.2 Viscosidad cinemática.	32
2.1.3 Contenido de humedad	33
2.1.4 Contaminación total.	33
2.1.5 Punto de destilación o final de ebullición	34
2.1.6 Índice de Yodo.	35
2.1.7 Glicerina libre y total	35
2.1.8 Contenido de mono-, di-, triglicéridos.	36
2.1.9 Contenido de metanol	36
2.1.10 Contenido de metilésteres	37
3. SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS DE FILTRACIÓN PARA DISMINUIR PARTÍCULAS CONTAMINANTES.	39
3.1 FILTRACIÓN DE REMOJO EN FRÍO	39
3.2 FILTRACIÓN POR CARTUCHOS	40
3.3 FILTRACIÓN POR MANGA O BOLSA	41
3.4 MATRIZ DE SELECCIÓN	42
3.5 DESARROLLO EXPERIMENTAL	45
3.5.1 Identificación de las variables	45
3.5.1.1 Características del medio filtrante High Flow.	48
3.5.1.2 Verificación del medio filtrante	48
3.5.2 Resultados y análisis de resultados	53
3.5.2.1 Contaminación total del biodiesel	53
3.5.2.2 Caracterización de B100-2	55
4. DISEÑO CONCEPTUAL DE LA FILTRACIÓN POR CARTUCHOS	61
4.1 DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PROCESO DE FILTRACIÓN POR CARTUCHOS	61

4.2 BALANCE DE MASA.	61
4.3 ESCALAMIENTO A NIVEL INDUSTRIAL	64
5. CONCLUSIONES	76
6. RECOMENDACIONES	77
BIBLIOGRAFÍA	78
ANEXOS	81

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Código de contaminación sólida ISO	29
Tabla 2. Recopilación de la caracterización de B100-1	37
Tabla 3. Criterios de selección del método de filtración	44
Tabla 4. Prueba con los materiales de filtración	46
Tabla 5. Contaminación total de los experimentos B100-1 y B100-2	54
Tabla 6. Densidad de B100-1 y B100-2	56
Tabla 7. Comparación de viscosidades del B100-1 y B100-2	57
Tabla 8. Ejemplo de la variabilidad de la humedad con respecto a la temperatura	58
Tabla 9. Comparación de contenido de humedad de B100-1 y B100-2	58
Tabla 10. Comparación del punto final de ebullición de las muestras de B100-1 y B100-2	59
Tabla 11. Comparación de los resultados de la caracterización de las muestras de B100-1, B100-2	60
Tabla 12. Resultados del balance de masa del sistema de filtración	63
Tabla 13. Requerimientos de operación del biodiesel	64
Tabla 14. Inversión inicial de los cuatro tamaños de carcasa	65
Tabla 15. Resumen del diseño conceptual	69
Tabla 16. VPN para carcasa de un cartucho	73
Tabla 17. VPN para carcasa de tres cartuchos	73
Tabla 18. VPN para carcasa de cinco cartuchos	73
Tabla 19. VPN para carcasa de ocho cartuchos	74
Tabla 20. Registro de datos experimentales	90

LISTA DE GRÁFICAS

	pág.
Gráfica 1. Variación de la contaminación total del B100-1.	34
Gráfica 2. Contaminación total de las muestras de B100-1 y B10-2.	55
Gráfica 3. Distribución de densidad del B100-1 y B100-2.	56
Gráfica 4. Dispersión de viscosidades de las muestras B100-1 y B100-2.	57
Gráfica 5. Dispersión del contenido de la humedad de B100-1 y B100-2	58
Gráfica 6. Punto final de ebullición de las muestras B100-1 y B100-2.	59
Gráfica 7. Dirt load Vs flujo para cada tamaño de carcasa	67
Gráfica 8. Distribución de densidad B100-1.	92
Gráfica 9. Dispersión de viscosidades de la muestra B100-1.	92
Gráfica 10. Dispersión del contenido de la humedad de B100-1.	93
Gráfica 11. Punto final de ebullición de la muestra B100-1.	93

LISTA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1. Balance global de masa	62
Ecuación 2. Despeje de la variable conocida	62
Ecuación 3. Balance global por componente	63
Ecuación 4. Estimación de galones/ año	66
Ecuación 5. Estimación de la masa eliminada	66
Ecuación 6. Estimación del número de cartuchos por carcasa	68
Ecuación 7. Valor presente neto	69
Ecuación 8. Gradiente geométrico de CFA	70
Ecuación 9. Costo de mantenimiento y operación (CMO)	71
Ecuación 10. Fórmula de Contaminantes Totales.	90

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Distribución de la mezcla de diésel-biodiesel en Colombia.	23
Figura 2. Distribución del área de cultivo con oleaginosas en Colombia 2008	24
Figura 3. Reacción global de Transesterificación.	25
Figura 4. Fases de la reacción de transesterificación.	26
Figura 5. Mecanismo de reacción con catalizadores básicos.	27
Figura 6. Diagrama de bloques del proceso de producción de Biodiesel	31
Figura 7. Diseño del medio filtrante High Flow	48
Figura 8. Montaje experimental guía de laboratorio.	49
Figura 9. Diagrama de bloques del proceso de filtración por	61
Figura 10. Balance en flujos másicos	62

LISTA DE ILUSTRACIONES

	pág.
Ilustración 1. Enfriamiento del biodiésel.	50
Ilustración 2. Pesado beaker vacío. Agitación y calentamiento del biodiesel.	51
Ilustración 3. Caja Petri en el horno y desecador de silica gel.	52
Ilustración 4. Fijación del filtro y Ajuste de la copa de filtración.	52
Ilustración 5. Equipo de Karl Fischer.	82
Ilustración 6. Equipo para punto de destilación	82
Ilustración 7. Densímetro.	82

LISTA DE CUADROS

pág.

Cuadro 1. Ventajas y desventajas del biodiesel.

22

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Equipos utilizados en la caracterización de B100-1 y B100-2.	82
Anexo B. Guía de laboratorio para determinación de contaminación total	83
Anexo C. Cálculos para la determinación de la contaminación total	90
Anexo D. Ficha técnica del biodiesel	91
Anexo E. Gráficas de las propiedades fisicoquímicas del B100-1	92

GLOSARIO

ACEITE DE PALMA: es un aceite que se extrae de la pulpa del fruto de varias palmas (Arecaceae). El aceite de palma es alto en grasa saturada y caroteno.

B100: combustible de origen vegetal en estado 100 % puro.

BIOCOMBUSTIBLE: es el término con el cual se denomina a cualquier tipo de combustible que derive de la biomasa directa o indirectamente.

BIODIESEL: biocombustible para uso en motores diésel producido mediante transesterificación de grasas orgánicas mezcladas con alcohol (etanol o metanol) en presencia de un catalizador. Se puede usar como reemplazo del diésel.

CONTAMINACIÓN TOTAL: representa el contenido de sustancias no disueltas de tamaño mayor a 0,8 micrones, y se expresa en mg/kg.

FAME: son ésteres metílicos de los ácidos grasos, denominados, son productos de origen vegetal o animal, cuya composición y propiedades son similares al diésel convencional.

HAZE: es un sólido precipitado que se forma a temperaturas cercanas al punto de nube del biodiésel. Estos sedimentos se miden por el parámetro de Contaminación Total

MATERIAL INSOLUBLE: sólidos que no pueden disolverse, ni diluirse en el biodiésel, por ejemplo, el estéril glucósido.

PUNTO NUBE: es la temperatura a la cual se empieza a formar cristales de cera. Esta propiedad está relacionada directamente con la naturaleza química de los ácidos grasos esterificados.

SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES: son la porción de sólidos retenidos por un filtro de fibra de vidrio que posteriormente se seca a 103 – 105 °C hasta peso constante.

TRANSESTERIFICACIÓN: consiste en la reacción de un lípido con un alcohol, para producir un éster, y un subproducto, el glicerol. El proceso global se desarrolla en tres reacciones reversibles y consecutivas.

RESUMEN

La evaluación de diferentes métodos de purificación para disminuir contaminantes sólidos en el biodiesel se ha convertido en una estrategia global para comercialización de biodiesel, con el propósito de reducir los costos de venta, aumentar el rendimiento y disminuir la contaminación ambiental.

En el presente trabajo se evaluó el método de filtración por cartuchos para disminuir el material particulado en el biodiesel. Se realizó una caracterización de propiedades fisicoquímicas del biodiesel tratado, de acuerdo a las normas ASTM vigentes para cada uno, con el propósito de conocer el estado del producto a tratar. Por medio de una matriz de selección, se expusieron tres métodos de filtración: filtración remojo en frío, filtración por cartuchos y filtración por mangas los cuales fueron ponderados basándose en tres criterios como la eficiencia, tamaño de partículas y costos en general, obteniendo como resultado la filtración por cartuchos.

Posteriormente se realiza un desarrollo experimental en el cual se encontró que el mejor medio filtrante para la alternativa seleccionada era High Flow, debido a que presentaba un valor bajo del código de limpieza ISO 4406 con respecto a los otros materiales filtrantes de prueba.

Finalmente se realiza la caracterización del biodiesel empleando la filtración por cartuchos, haciendo uso de gráficas y tablas, las cuales muestran una comparación de los dos biodiesel evaluados; al inicio (B100-1) y al final (B100-2), donde los resultados de esta investigación muestran que el método de filtración seleccionado es adecuado y acorde a las condiciones de la empresa, ya que se obtuvo una diferencia de concentración de contaminación total de 13,8 mg /kg, por lo cual su implementación industrial es conveniente de acuerdo con la evaluación económica que se realizó.

Palabras claves: Contaminación total, ISO 4406, Biodiesel, Filtración, Cartuchos.

INTRODUCCIÓN

La creciente problemática de la contaminación ambiental, la alta demanda energética y los elevados costos de combustibles fósiles, han generado la escasez de los recursos naturales. Por lo tanto, se hace necesario enfocarse en la búsqueda de fuentes renovables que contribuyan a prescindir el incremento de dicha contaminación a un menor costo. Una de las alternativas que se plantean hoy en día es la producción de biocombustibles, como es el caso del biodiesel.

El gobierno colombiano expidió la Ley 939 en diciembre de 2004 para implementar el uso de biocombustibles con origen vegetal o animal en el sector transporte, con el propósito de impulsar la producción y comercialización¹. Del mismo modo Colombia es considerado el cuarto productor de aceite de palma en el mundo y el primero en América, dando la posibilidad de avanzar en la mezcla de biodiesel².

Actualmente la industria de biocombustibles se enfrenta a grandes desafíos en cuanto a la calidad del producto terminado. Debido a que la implementación de biodiesel como combustible genera taponamiento en los sistemas de inyección de los motores diésel, esto se debe a que el biodiesel contiene partículas contaminantes que generan inconvenientes a la industria; además la mitigación de este problema presenta costos elevados. Es por eso que para mejorar la eficiencia se debe eliminar las fallas que reducen la eficacia del producto.

Debido a esto se hace necesario buscar alternativas de purificación que disminuyan las partículas contaminantes que se encuentran en el biodiesel, uno de ellos es el proceso de filtración por cartuchos empleando la tecnología High Flow para una carcasa con cinco cartuchos.

¹ Ministerio de Minas y energía. El programa de biocombustibles en Colombia. Julio de 2007. <http://www.minminas.gov.co/documents/10180/488888/Programa.pdf/38a0085e-b892-42b2-bc56-86085488cb5c>. (Visitada agosto 2018).

² Colombia, cuarto productor de aceite de palma en el mundo. (SEPTIEMBRE 18 DE 2014). Portafolio. Recuperado de <http://www.portafolio.co/economia/finanzas/colombiacuarto-productor-aceite-palma-mundo-59140>

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un método de filtración para disminuir contaminantes sólidos presentes en el biodiésel de recepción por la empresa IDAE INGENIERÍA S.A.S.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diagnosticar las condiciones actuales de producción y calidad del biodiesel de recepción por la empresa IDAE INGENIERÍA S.A.S.
- Seleccionar alternativas de filtración para disminuir contaminantes sólidos presentes en el biodiesel, a través de un desarrollo experimental.
- Realizar el diseño conceptual de la alternativa seleccionada.
- Establecer los costos de inversión y operación del sistema de filtración seleccionado.

1. GENERALIDADES

En este capítulo se tratarán los conceptos principales para el entendimiento y desarrollo del tratamiento de purificación que recibe el biodiesel mediante varios métodos entre ellos el de filtración, con el propósito de implementar el biodiesel como una alternativa de combustible renovable en Colombia, del mismo modo se muestra el estado actual del biodiesel en el país.

1.1 BODIESEL

Según la ASTM (American Society for Testing and Materials), define al biodiesel como un compuesto de ésteres monoalquílicos de ácidos grasos de cadena larga derivados de aceites vegetales como; soya, palma africana, girasol o maní y grasas animales que se han sometido a un proceso químico para extraer la glicerina³. Los ésteres metílicos derivados de los aceites vegetales tienen características fisicoquímicas parecidas al gasóleo, lo que permite mezclarlos en cualquier proporción y usarlos en los vehículos Diésel, sin tener que realizar modificaciones en el diseño básico del motor⁴.

Este combustible puede usarse como sustituto total (B100); también mezclado con diésel, por ejemplo (B30); o en una proporción más baja, considerado como aditivo ya que solo representa del 1 al 5% de la mezcla. Las denominaciones B5, B10, B20, B30, etc. Indican la proporción (%) de biodiesel utilizado⁵.

En la actualidad, el biodiesel se ha convertido en la opción más viable para reemplazar los combustibles fósiles, aunque del mismo modo presenta ventajas y desventajas (ver **Cuadro 1**).

³ Nelson, Kessel. ASTM establece las normas para biodiésel [en línea]. <https://www.astm.org/SNEWS/SPANISH/SPJF09/nelson_spjf09.html>. [citado en Marzo de 2018]

⁴ MILIARIUM Ingeniería civil y Medio ambiente. Aplicaciones del biodiesel [en línea]. <<http://www.miliarium.com/Bibliografia/Monografias/Biocombustibles/AplicacionesBiodiesel.asp>> [citado en marzo de 2018]

⁵ Gómez, M. El aceite de palma africana *elae guineensis*: Alternativa de recurso energético para la producción de biodiesel en Colombia y su impacto ambiental. En: Prospect [en línea]. No. 1 (2014). Recuperado desde <<http://www.scielo.org.co/pdf/prosp/v12n1/v12n1a11.pdf>> [citado en Marzo de 2018]

Cuadro 1. Ventajas y desventajas del biodiesel

Ventajas	Desventajas
Renovable, bajas emisiones, reducción de la polución urbana.	Alta viscosidad
No tóxico y velocidad de degradación mayor a la del petrodiesel.	Oxidación menor comparada con la del diésel. Se acidifica con el tiempo pero se puede controlar con aditivos
Alto número cetánico y excelente lubricación.	Tiene 5% menos energía por galón.
Alto punto de inflamación (>149°C)	Puede causar taponamiento en los filtros a bajas temperaturas.
No es necesario modificaciones en los motores	Presenta un bajo comportamiento de flujo en frío, en comparación con el diésel.
Mejora la eficiencia de combustión debido al contenido de oxígeno que poseen los ésteres monoalquílicos.	Altas emisiones de óxido de nitrógeno (NO _x)
Bajo contenido de azufre y compuestos aromáticos.	
Reducción en la importación de diésel	

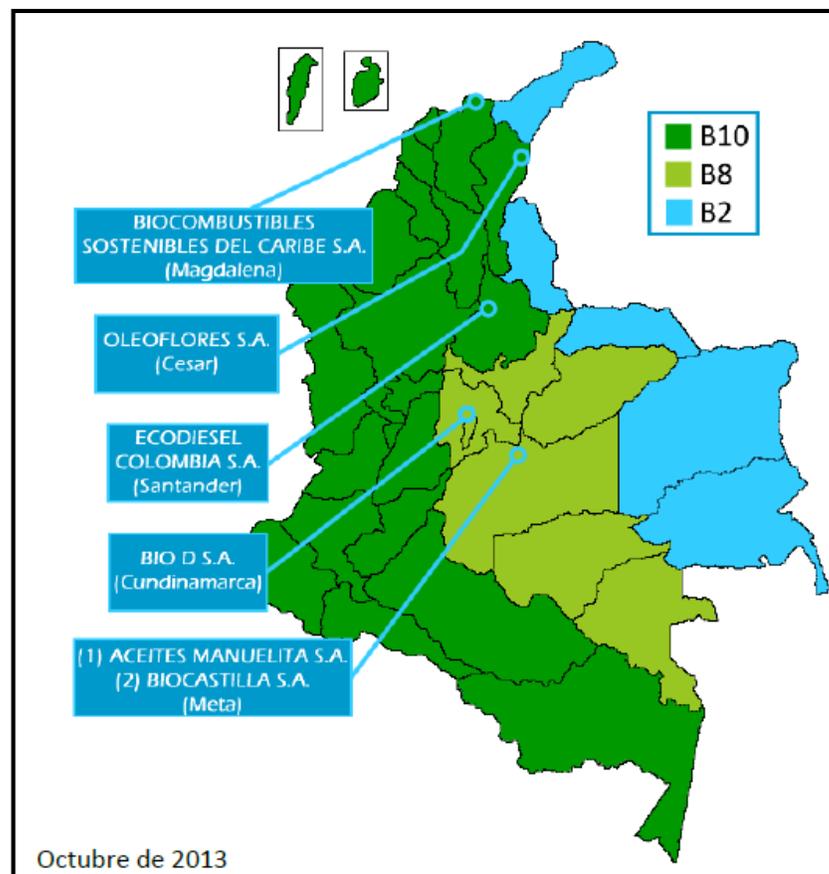
Fuente: DEMIRBAS, A. "Biodiesel production via non-catalytic SCF method and biodiesel fuel characteristics". 47, 2006, Energy Convers Manage, p. 2271–82

1.1.1 Biodiesel en Colombia. Colombia demanda ciertos requerimientos del biodiésel, por lo tanto, es necesario conocer la demanda de diésel y el porcentaje de mezcla que se reglamenta mediante la ley 939 de 2004, la cual incentiva la producción y comercialización de biocombustibles de origen vegetal o animal para uso en motores diésel; a nivel nacional están en funcionamiento 9 plantas de producción de biodiésel, las cuales han ido aumentando su nivel de producción anual desde la aprobación de esta ley. La producción de biodiésel a partir de aceite de palma es la más utilizada en Colombia ya que cuenta con grandes cantidades de cultivo. "Colombia cuenta con 4 zonas productoras de aceite de palma las cuales son: la zona norte, la cual comprende departamentos de Magdalena, norte del Cesar, Atlántico y Guajira; la zona central con los departamentos de Santander, norte de Santander, sur del Cesar y Bolívar; la oriental con los departamentos de

Meta, Cundinamarca, Casanare, Caquetá; y occidental con el departamento de Nariño.”⁶

El departamento que más aceite de palma siembra es el Meta. Colombia entró en el mercado de la producción de biodiésel gracias a la implementación de leyes ambientales, que regulan y obligan a los productores de diésel a mezclar este con biodiésel para reducir las emisiones de gases, razón por la cual la producción de biodiésel va en aumento, en la Figura 1., se muestra la distribución actual de la mezcla diésel-biodiésel en el país. Se proyecta que para el año 2020 Colombia está produciendo 2.271,45 Ton/día de biodiésel.⁷

Figura 1. Distribución de la mezcla de diésel-biodiésel en Colombia.



Fuente: FEDEBIOCOMBUSTIBLES. Producción de biodiésel en Colombia. [en línea]
<<http://www.fedebiocombustibles.com/estadistica-precios-titulo-Biodiesel.htm>>. [Consultado el 20 Agosto de 2018]

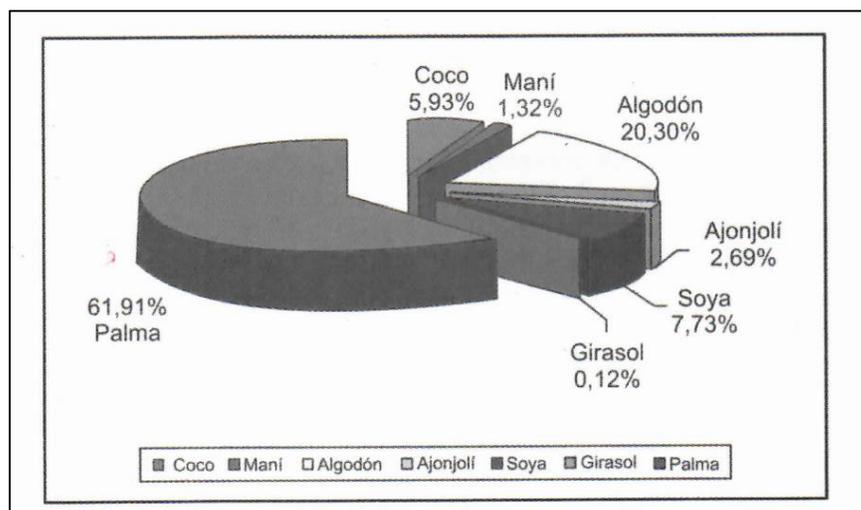
⁶ CARDONA ALZATE Carlos Ariel, ORREGO ALZATE Carlos Eduardo, GUTIERREZ MOSQUERA Luis Fernando, Biodiésel, Materias Primas, Primera edición, Manizales, Caldas, Colombia, Universidad Nacional de Colombia sede Manizales, 2009, página 22

⁷Ibid., p. 70.

1.2 PRODUCCIÓN DE BIODIESEL A PARTIR DEL ACEITE DE PALMA

El aceite de palma es una de las oleaginosas que tiene un excelente movimiento dentro del mercado de aceites vegetales en la compra y venta, llega a tener una proporción entre (6 – 10) mayor de las ventas de otros aceites vegetales como lo puede ser el aceite de soya y colza. El aceite de palma se encuentra dentro de las fuentes vegetales con mayor uso a nivel nacional debido a las características específicas del cultivo (ver Figura 2)⁸.

Figura 2. Distribución del área de cultivo con oleaginosas en Colombia 2008



Fuente: MINISTERIO DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL – REPÚBLICA DE COLOMBIA. Ministerio de agricultura y Desarrollo rural, Observatorio Agrocadenas. Colombia. [Consultado el 20 agosto de 2018]. Disponible en: <http://www.agrocadenas.gov.co/>. [Online] 2008.

El aceite de palma usado en la producción de biodiesel es considerado como uno de los aceites más rentables debido a su capacidad de extracción, puesto que en comparación a otros tiene una mayor eficiencia. “Colombia cuenta con más de 300.000 hectáreas sembradas en palma de aceite, por lo que constituye una fuente estable de gran parte de la oferta de aceite vegetal”⁹. El cultivo de palma de aceite tiene lugar en climas cálidos, y su crecimiento ha sido de forma exponencial y distribuida principalmente en cuatro zonas productivas, siendo el Meta el departamento que cuenta con mayor área cultivada. Se debe contar con tres factores principales para conseguir un cultivo adulto ideal, en donde la producción obtenida es aproximadamente “siete toneladas anuales de aceite crudo”¹⁰, estos

⁸ Ibid., p.20.

⁹ CARDONA, ORREGO y GUTIÉRREZ, Op. cit., p. 21

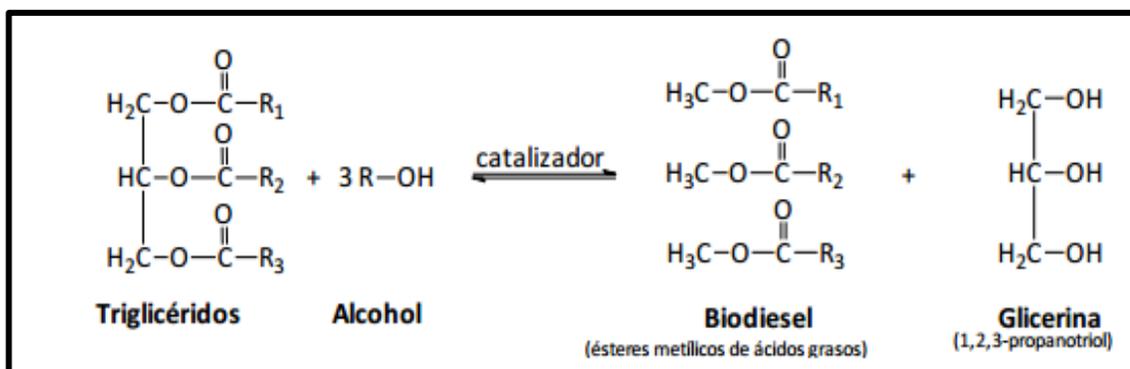
¹⁰ Ibid., p. 44

factores son: el material genético usado en el cultivo, un buen nivel de manejo tecnológico y una adecuada calidad de suelo.

En el proceso de obtención del aceite de palma, se tiene en cuenta el fruto que crece en la parte superior, es donde está depositado el producto de interés de tal manera que en la coraza de fruto (mesocarpio) se produce aceite con alto contenido de ácidos palmíticos y en la almendra se produce ácidos láurico¹¹. Lo ideal para este proceso es tener una planta cercana al lugar donde se tiene el cultivo, con el motivo de procesar el fruto lo más rápido posible para evitar el daño del producto de interés¹².

1.2.1 Reacción de transesterificación. En la reacción de transesterificación de un aceite o grasa animal; reacciona un alcohol con los triglicéridos, para producir ésteres los cuales son considerados biodiesel y glicerina, la presencia de un catalizador es indispensable para que esta reacción se dé a una velocidad adecuada (ver Figura 3).

Figura 3. Reacción global de Transesterificación.



Fuente: PARDAL, V, DINIS A. "Obtención de biodiesel por transesterificación de aceites vegetales: nuevos métodos de síntesis". Tesis Doctoral. Universidad de Extremadura. Facultad de Ciencias. Departamento de Ingeniería Química y Química Física. (2012), página 17.

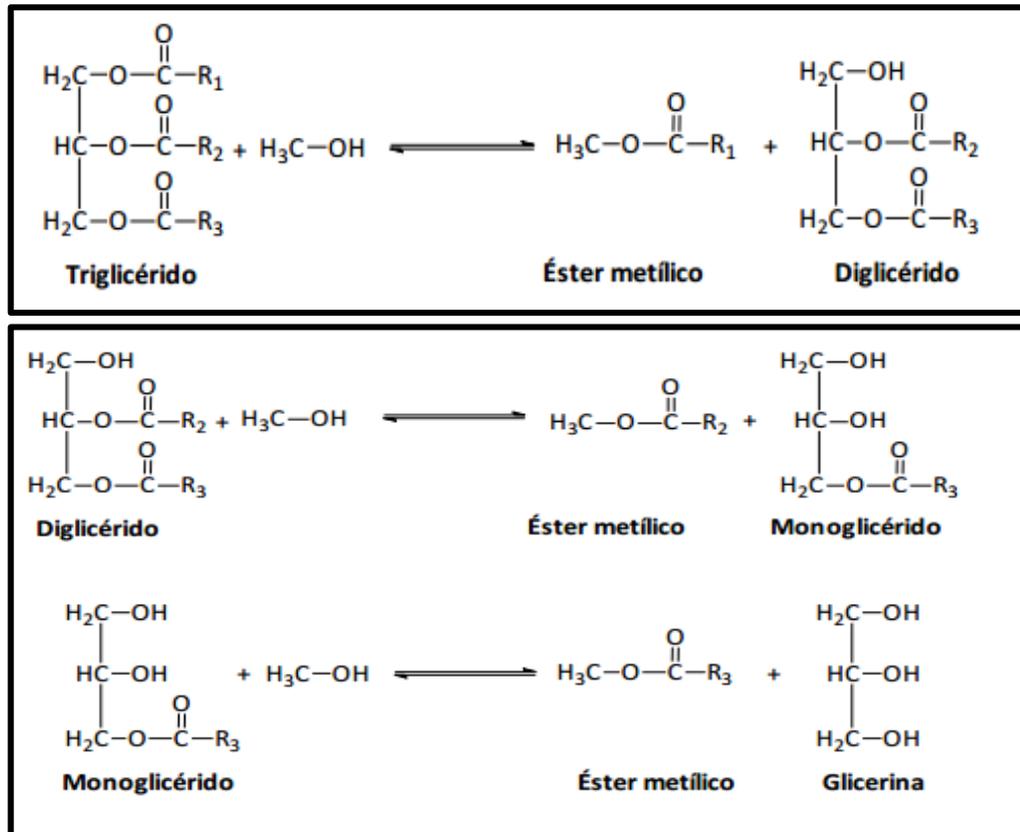
El mecanismo global del proceso de obtención de biodiesel cuenta con tres reacciones reversibles, las cuales se dan en forma secuencial. En primer lugar, los triglicéridos son convertidos en diglicéridos (ver Figura 3), posteriormente estos dan paso a la formación de los monoglicéridos (ver Figura 3) para finalmente formar glicerina (ver Figura 4), durante las tres reacciones se obtienen tres moléculas de ésteres comúnmente llamados biodiesel. "La relación estequiométrica entre el alcohol y el aceite es 3:1. Sin embargo, dado el carácter reversible de las reacciones, un exceso del alcohol es apropiado para desplazar la reacción hacia la derecha y así obtener el producto deseado"¹³.

¹¹ Ibid., p. 22

¹² Ibid., p. 43

¹³ VICENTE PARDAL, Ana Cristina Dinis. Obtención de biodiesel por transesterificación de aceites vegetales: nuevos métodos de síntesis. Tesis Doctoral. Universidad de Extremadura. Facultad de Ciencias. Departamento de Ingeniería Química y Química Física. (2012), pág 18

Figura 4. Fases de la reacción de transesterificación.



Fuente: PARDAL, V, DINIS A. "Obtención de biodiesel por transesterificación de aceites vegetales: nuevos métodos de síntesis". Tesis Doctoral. Universidad de Extremadura. Facultad de Ciencias. Departamento de Ingeniería Química y Química Física. (2012), pág. 17-18

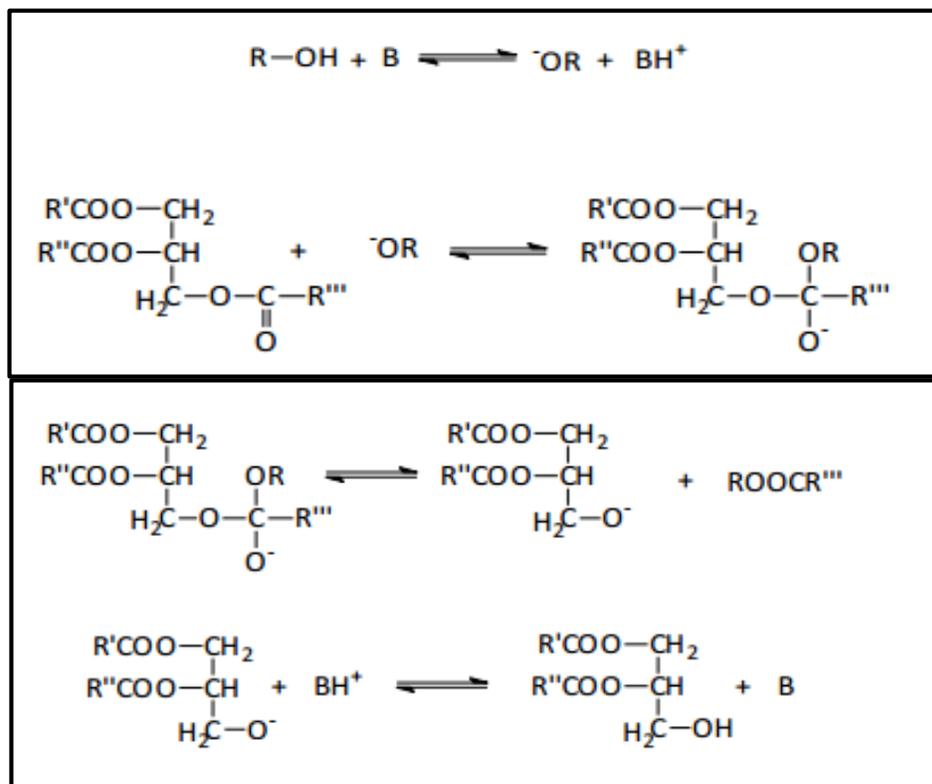
El alcohol que suele usarse para el proceso de transesterificación es el metanol ya que presenta ventajas físico-químicas; cómo reaccionar de forma rápida y a baja temperatura con los triglicéridos, su costo es bajo y se disuelve de forma fácil en los catalizadores alcalinos. Además, los ésteres metílicos dan mayor potencia en los motores. La influencia de la temperatura en la reacción de transesterificación y el rendimiento del biodiesel es evidente, ya que, a una temperatura elevada, la viscosidad del aceite es menor, mejorando la velocidad y tiempo de reacción. A pesar de esto, si la temperatura aumenta pasa el rango afectando la conversión del producto deseado (biodiesel), acelerando la reacción de saponificación del ácido palmítico. La temperatura está limitada por el punto de ebullición del alcohol, para asegurar que no habrá pérdidas de alcohol por la evaporación del mismo.

La reacción de transesterificación necesita un catalizador adecuado para lograr una velocidad adecuada. Básicamente se emplean catalizadores homogéneos básicos (NaOH , KOH) los cuales son los más comunes y dando como resultado un biodiesel

de mayor rendimiento y calidad, el tiempo de conversión es corto para aceites con un contenido bajo de ácidos grasos libres, en comparación a los catalizadores ácidos los básicos son menos corrosivos. Teniendo una serie de desventajas como; difícil separación y/o recuperación, aparición de un producto no deseado como el jabón, no son compatibles con ácidos grasos libres ya que el catalizador se inactiva al reaccionar con estos.

El mecanismo de reacción con catalizadores básicos, donde inicialmente reacciona la base con el alcohol, produciendo un alcóxido y la base protonada. El ataque nucleofílico del alcóxido al grupo carbonilo del triglicérido genera un intermediario tetraédrico, formando el éster alquílico y el anión del diglicérido. “El último desprotona el catalizador, regenerando la especie activa, la cual ahora es apta de reaccionar con una segunda molécula del alcohol, a partir de otro ciclo catalítico. Diglicéridos y monoglicéridos son convertidos por el mismo mecanismo a una mezcla de ésteres de alquilo y glicerina” (ver Figura 5)¹⁴

Figura 5. Mecanismo de reacción con catalizadores básicos.



Fuente: PARDAL, V, DINIS A. “Obtención de biodiesel por transesterificación de aceites vegetales: nuevos métodos de síntesis”. Tesis Doctoral. Universidad de Extremadura. Facultad de Ciencias. Departamento de Ingeniería Química y Química Física. (2012), pág. 17-

¹⁴ PARDAL, DINIS, Op. cit., p. 32

1.3 CONTAMINACIÓN TOTAL DEL BIODIESEL

El biodiesel es un biocombustible que se produce a través de una reacción de transesterificación en presencia de un alcohol, se emplea como materia prima aceites vegetales o grasas animales. Este combustible puede usarse como sustituto total (B100); también mezclado con diésel, por ejemplo (B30); o en una proporción más baja, considerado como aditivo ya que solo representa del 1 al 5% de la mezcla. Las denominaciones B5, B10, B20, B30, etc. Indican la proporción (%) de biodiesel utilizado¹⁵.

Las propiedades del biodiesel se ven afectadas por los subproductos que se generan tales como los acil estéril glucósidos, los cuales liberan el grupo acilo denominado estéril glucósido (SG) que es un componente común de los aceites vegetales, estos subproductos son insolubles en el biodiesel, debido a esto se cristalizan lentamente formando aglomerados de diferentes tamaños de partícula de 10-15 micras y dependiendo de la temperatura se acelera la aparición de los precipitados. Estas partículas promueven la cristalización de otros compuestos¹⁶. Todos estos sedimentos que se forman en el fondo del tanque de almacenamiento después de 24 horas que se elabora el biodiesel, se les denomina como "Haze", el cual es un sólido que se forma a temperaturas cercanas al punto de nube del biodiesel, y también depende de factores secundarios como el contenido de agua, de jabones, de monoglicéridos y estéril glucósidos que se miden por el parámetro de contaminación total.

La contaminación total en combustibles y biocombustibles es la medida del material insoluble de tamaño mayor a 0,8 micrones. Las muestras de FAME con altas cantidades de materiales insolubles, tienden a causar taponamiento en los tanques de almacenamiento, en los filtros de los motores y las bombas de inyección. Las acumulaciones de jabones y de sedimentos se asocian con la presencia de concentraciones altas de contaminación total. Se determina por medio de la norma en 12662-08 la cual establece un Max de 24 mg/kg.

Actualmente en la industria existen diversos métodos para descontaminar el biodiesel, uno de ellos, se realiza por hidrólisis enzimática, la cual consiste en usar enzimas (lipasas) y un reactivo, que son capaces de retirar SG; las enzimas pueden ser reutilizadas en procesos continuos de purificación, el único inconveniente de este método es el costo, debido a que la enzima debe ser importada. Otro modo, es la clarificación, la cual emplea un copolímero a una determinada concentración de alfa oleína y anhídrido hidrazida que reacciona con una amina o un alcohol, la reacción de estos dos compuestos resulta ser el clarificador, que posteriormente se mezcla con el biodiesel reduciendo los contaminantes por medio de una separación

¹⁵ GÓMEZ, Op. cit., p. 12

¹⁶ WILHARM, Thomas M. Sedimentos que afectan la calidad. En: Palmas, 2010. Vol. 31 No. Especial, Tomo II. Alemania: ASG Analytik-Service GmbH. p. 5.

por gravedad, finalmente el biodiesel se pasa por un filtro y se decanta en un tanque. Finalmente se encuentra el método de filtración el cual permite separar los sólidos presentes en un fluido, a través de un medio poroso, los poros de dicho medio deben tener un tamaño menor al de las partículas que se desea retirar, este proceso puede suceder de dos formas uno por acción de gravedad y el otro usando vacío, con el fin de facilitar el paso del fluido; es uno de los métodos más sencillos y económicos para reducir contaminantes sólidos.

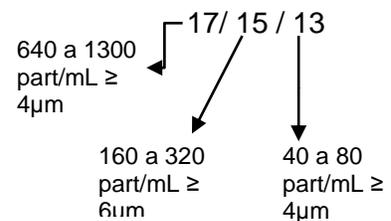
1.4 CÓDIGO ISO 4406

En Colombia se emplea la norma NTC 5444 la cual establece los requisitos de calidad del biocombustible para uso en motores diésel, de combustible diésel (ACPM) y su mezcla. Para poder cumplir con los parámetros establecidos por la norma NTC mencionada, se implementa el código ISO 4406 (XX / YY / ZZ), el cual corresponde a la cantidad de partículas de contaminación sólida contadas en diferentes rangos de tamaño en micrones mayores a 4, 6 y 14 (ver Tabla 1); es decir, **X** hace referencia a la cantidad de partículas mayores a 4 micras, **Y** a la cantidad de partículas mayores a 6 micras y **Z** a la cantidad de partículas mayores a 14 micras.

Tabla 1. Código de contaminación sólida ISO

Código ISO	Rango de tamaño (part/mL)
6	0,32 - 0,64
7	0,64 - 1,3
8	1,3 - 2,5
9	2,5 - 5
10	5 - 10
11	10 - 20
12	20 - 40
13	40 - 80
14	80 - 160
15	160 - 320
16	320 - 640
17	640 - 1.300
18	1.300 - 2.500
19	2.500 - 5.000
20	5.000 - 10.000
21	10.000 - 20.000
22	20.000 - 40.000
23	40.000 - 80.000
24	80.000 - 160.000
25	160.000 - 320.000
26	320.000 - 640.000

Ejemplo código ISO 4406



Fuente: RIAÑO, A y ACEVEDO, H. "SELECCIÓN FILTRO HF". 2017, IDEA INGENIERIA S.A.S. innovación en soluciones energéticas, p. 3

Estas partículas son contadas por un método de contador óptico láser, el cual consiste en una barrera laser que está compuesta por un diodo laser, y un resistor dependiente de la luz (LDR). El sensor del contador de partículas abarca todos los componentes ópticos, este sensor transmite una luz por medio de un diodo láser, cuyo rayo se moldea a través de una serie de lentes, esta luz es absorbida por un receptor de luz y conducida a un sector de análisis. Cuando una partícula es detectada por el rango del sensor, se dispersa la luz del rayo láser. La luz dispersada se concentra, mediante un espejo, en una fotocélula. La amplitud de la señal eléctrica producida por la fotocélula depende del tamaño de la partícula en el sector de análisis; esta variación detectada por el sistema es la forma de conteo y clasificación de tamaño de partículas¹⁷.

La unidad de medida del conteo de partículas es de partículas por mililitro de muestra, el valor de este código puede ayudar a determinar el nivel general de limpieza de un sistema bajo monitoreo, además de ser un factor importante para entrar a competir en un mercado mundial tan disputado, donde el producto de interés puede llegar a importarse a un bajo costo comparado con la producción nacional. Es por esto que es importante mantener un nivel óptimo de confiabilidad con el propósito de conservar los costos a niveles manejables y el estado adecuado de los equipos, de esta forma los fluidos libres de contaminantes sólidos extenderán el tiempo de vida útil tanto de los costos como el de los equipos¹⁸.

¹⁷ PCE Inst. contadores de partículas. [en línea]. < <https://www.pce-iberica.es/instrumentos-de-medida/medidores/contadores-particulas.htm>>. [citado en noviembre de 2018]

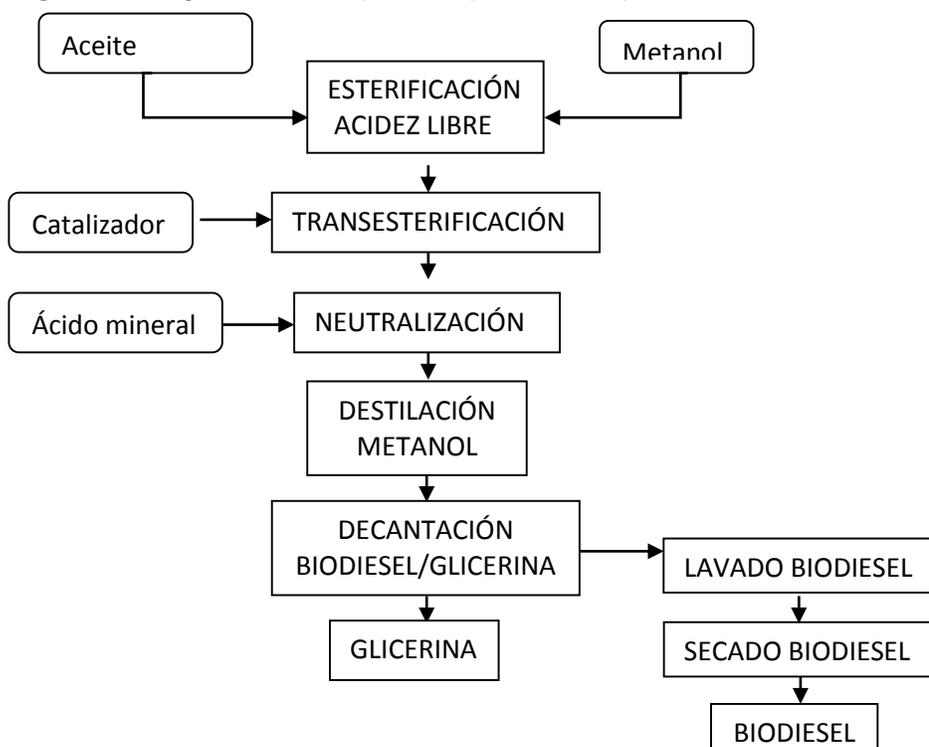
¹⁸ Alfonso, Francisco. ¿Qué tan importante es el código de contaminación sólida ISO 4406:99? Noria Latín América, [en línea]. Disponible en Web: <http://noria.mx/lublearn/que-tan-importante-es-el-codigo-decontaminacion-solida-iso-440699/>

2. PROCESO DE PRODUCCIÓN DEL BIODIESEL

La producción de biodiesel a partir de aceite de palma es un proceso conformado por etapas elementales de producción de transesterificación, neutralización, separación de ésteres, purificación de éster y obtención de biodiesel y glicerina, como se observa en la Figura 6.

Es importante resaltar que la empresa IDAE ingeniería S.A.S, no produce biodiesel, la empresa se encarga de realizar los procesos de filtración y mejora del control de calidad del producto terminado, para la comercialización y distribución de ésteres metílicos de ácidos grasos para el uso en motores diésel.

Figura 6. Diagrama de bloques del proceso de producción de Biodiesel



Fuente: CARDONA, C, ORREGO, C, GUTIÉRREZ, L. "Biodiésel, Materias Primas". Primera edición, Manizales, Caldas, Colombia. Universidad Nacional de Colombia sede Manizales, 2009, p 78

2.1 CARACTERIZACIÓN DEL BIODIESEL

En Colombia se establecen ciertos requisitos de calidad para biocombustibles entre ellos se encuentran las propiedades fisicoquímicas, las cuales se caracterizaron para poder determinar la calidad inicial del biodiesel (B100-1). A continuación se mencionan las propiedades que fueron evaluadas en el desarrollo de esta investigación, se debe tener en cuenta que las propiedades como el índice de yodo,

contenido de glicerol libre y total, contenido de mono-, di-, triglicéridos, contenido de metanol y contenido de metilésteres, corresponden a valores encontrados en referencias bibliográficas (información secundaria)¹⁹, debido a que no se contaba con los equipos necesarios para determinar dichas propiedades.

2.1.1 Densidad. Es una propiedad física de fácil medición, decrece linealmente con el aumento de la temperatura y sirve como correlación para evaluar el desempeño de los combustibles en motores diésel, ya que determina si se lleva a cabo una combustión completa del carburante del motor diésel de inyección directa, del mismo modo relaciona la eficiencia del motor y el nivel de emisiones de partículas²⁰. Además, la densidad está vinculada con el gasto de combustible y el poder calorífico liberado en la combustión. Una densidad menor a 860 kg/m³ repercute en un alto consumo de combustible y una densidad mayor a 900 kg/m³ incrementa la producción de hollín, este rango de densidad se encuentra establecido por la norma ASTM D4052²¹.

Para determinar esta propiedad se empleó una probeta de 1000 ml con muestras de biodiesel durante un periodo de diez días, se introdujo un densímetro de flotación (ver Anexo A) manteniendo una temperatura de 25 °C. Una vez se estabilizó y alcanzó el equilibrio térmico se procedió a registrar los respectivos valores del densímetro (ver Anexo E). Se obtuvo un valor experimental promedio de 862,4 kg/m³, el cual cumple a cabalidad con los requisitos de la norma mencionada anteriormente

2.1.2 Viscosidad cinemática. Es la medida de la resistencia al flujo de líquido debido a la fricción interna, la viscosidad del combustible se vincula con la eficiencia del proceso de atomización, el diseño y la operación de los sistemas de inyección. Una viscosidad mayor 6,0 mm²/s afecta la atomización en la inyección de combustible en la cámara de combustión provocando daños en el motor, y una viscosidad menor de 1,9 mm²/s presenta pérdidas en la potencia del motor, generando fugas en la bomba y los inyectores²². La viscosidad aumenta con la longitud de la cadena, y a mayor grado de instauración²³.

El cálculo de la viscosidad se realizó de acuerdo a la norma ASTM D445. La cual consistió en llevar a cabo una comparación entre el biodiesel y agua destilada. El agua destilada se emplea debido a que es un fluido con viscosidad conocida. El procedimiento consistió en medir los tiempos que se demoran los fluidos en

¹⁹ Informe emitido por oleoflores S.A.S., laboratorios de ensayos con acreditación ONAC vigente a la fecha, con código de acreditación 14-LAB-0-40, bajo la norma ISO/IEC 17025:2005.

²⁰ Riba J, Esteban B, Baquero G, Puig R, Rius A. Characterization of physical properties of vegetable oils to be used as fuel in diesel engines. *Afinidad* 66(546), 101-102, 2010.

²¹ Benjumea P, Agudelo R, Ríos A. Biodiésel: producción, calidad y caracterización. Universidad de Antioquia, pág 72, 2009.

²² Y. Sharma, B. Singh, & S. Upadhyay, *Advancements in development and characterization of biodiesel: A review*. *Fuel*, 87(12) 2008, pp. 2355-2373. doi: 10.1016/j.fuel.2008.01.014.

²³ G. Knothe. Dependence of biodiesel fuel properties on the structure of fatty acid alkyl esters. *Fuel Processing Technology*, 86(10) 2005, pp.1059-1070. doi: 10.1016/j.fuproc. 2004.11.002.

descender por el viscosímetro capilar donde la fuerza impulsora es la gravedad²⁴. Se obtuvo un valor experimental promedio de 4,454 mm²/s; este valor se halló midiendo las viscosidades de muestras de biodiesel inicial durante diez días (ver Anexo E). Según la norma, establece un rango de 1,9 mm²/s a 6,0 mm²/s; el valor experimental promedio registrado se encuentra dentro del rango que la norma exige.

2.1.3 Contenido de humedad. Es la cantidad de agua presente en el combustible, expresada como un porcentaje del peso. El biodiesel por naturaleza es higroscópico, el agua se presenta emulsificada como glóbulos microscópicos dispersos en una suspensión estable. El porcentaje de humedad es de gran importancia en los sistemas de combustión, debido a que un contenido mayor de 500 ppm de humedad puede producir reducción de la eficiencia del sistema, disminuye la temperatura de combustión, dando como resultado una combustión incompleta, la cual a su vez provoca la emisión de alquitranes que pueden condensarse en la salida de humos, la chimenea sufre de corrosión y acumulación de material que puede llegar a bloquearla eventualmente o en el peor de los casos generar un incendio²⁵.

Para hallar el contenido de humedad se realizó el procedimiento de acuerdo con la Norma ISO 12937, la cual emplea el método de Karl Fischer (ver **Anexo A**) para determinar la cantidad de agua libre, emulsionada y disuelta presente en la muestra. El proceso consiste en inyectar una muestra de biodiesel de 0,5 ml, la cual posteriormente reacciona con el reactivo titulador generado electroquímicamente en la celda de titulación, la celda está compuesta por un ánodo que contiene dióxido de azufre (SO²), yoduro (I⁻) e imidazol; se emplea metanol como solvente. La cantidad de agua en la muestra se calcula midiendo la cantidad de yoduro (I₂) generado electroquímicamente²⁶.

En este caso se midió el contenido de humedad durante diez días (ver Anexo E), obteniendo un valor experimental promedio de las muestras de biodiesel de 255,6 ppm, se comparará con el valor teórico de la norma ISO 12937, la cual establece un máximo contenido de humedad de 500 ppm.

2.1.4 Contaminación total. Es la medida del material insoluble de tamaño mayor a 0,8 micrones. Las propiedades del biodiesel se ven afectadas por los subproductos que se generan tales como los acil estéril glucósidos, los cuales liberan el grupo acilo denominado estéril glucósido (SG) que es elemento común de los aceites vegetales, debido a que no son solubles en el biodiesel su cristalización es lenta formando aglomerado de diferentes tamaños de partícula de 10-15 micras y dependiendo de la temperatura se acelera la aparición de los precipitados. Estas

²⁴ Peña A. B., Céspedes J. M. (2000) Físicoquímica- Manual de Laboratorio - 1ra Edición, Universidad de Medellín, Medellín

²⁵ Hidalgo X. la humedad en la biomasa: herramientas de medida y control. Energética. [En línea] <http://www.energetica21.com>.

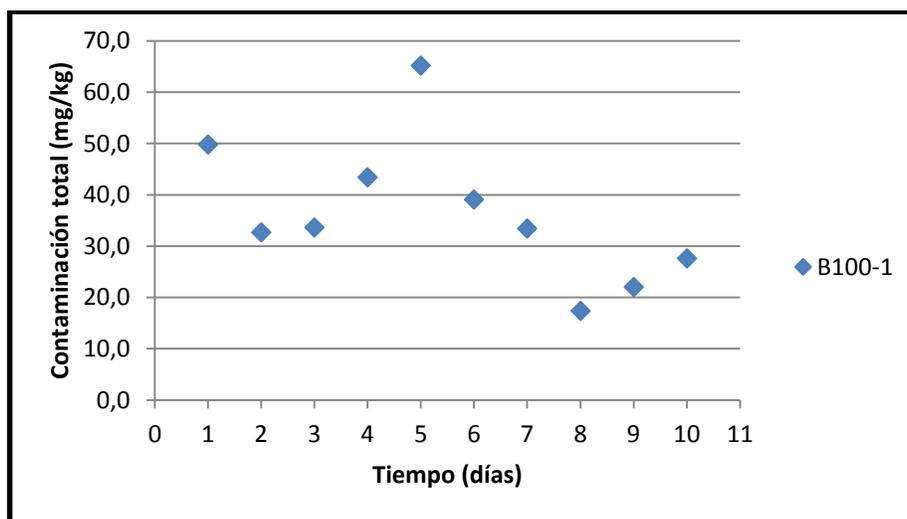
²⁶ INTERNATIONAL STANDARD. Petroleum products- Determination of Water -Coulometric Karl Fischer Titration method. ISO 12937, Standard Test, 2000.

partículas promueven la cristalización de otros compuestos²⁷. Las muestras con un alto contenido de material insoluble pueden provocar taponamiento en los tanques de almacenamiento, en los filtros de los motores y las bombas de inyección. La acumulación de los mismos se asocia con la presencia de concentraciones altas de contaminación total.

Se determina por medio de la Norma EN 12662-08 la cual establece analizar una porción de muestra de combustible la cual se pesa y se filtra a través de una membrana filtrante previamente pesada. El filtro con el residuo se lava, se seca y se pesa. La contaminación se calcula a partir de la diferencia de masa en el filtro, antes y después de la filtración²⁸.

En la Gráfica 1., se observa la problemática de calidad del producto, haciendo un seguimiento de la contaminación total durante un periodo de diez días y en donde varias muestras de B100-1 presentan niveles mayores a 24 mg/kg, sobrepasando este valor teórico que la norma EN 12662-08 establece. Se obtiene un valor promedio experimental de 36,4 mg/kg, el cual contiene 12,4 mg/kg más de contaminación total de lo permitido por la norma.

Gráfica 1. Variación de la contaminación total del B100-1.



Fuente: elaboración propia

2.1.5 Punto de destilación o final de ebullición. Es la temperatura a la cual el combustible pasa al estado de vapor manteniendo una presión reducida en cualquier punto de su masa líquida, el punto de ebullición final se incrementa a medida que el número de carbonos en la cadena se prolonga. El punto final de

²⁷ WILHARM, Thomas M. Sedimentos que afectan la calidad. En: Palmas, 2010. Vol. 31 No. Especial, Tomo II. Alemania: ASG Analytic-Service GmbH, p. 5.

²⁸ STANDARD EUROPEA. Liquid petroleum products – Determination of total contamination in middle distillates, diesel fuels and fatty acid methyl esters. EN 12662, 2008.

ebullición se utiliza para verificar que el combustible no esté adulterado con contaminantes de alto punto de ebullición, ya que generan depósitos de combustión sólidos, formación de vapores de obstrucción; también aporta información sobre las propiedades, la composición y el comportamiento del combustible durante el uso y almacenamiento.

Se determinó por medio de la norma ASTM D86, en la cual se destiló una muestra de 100 ml bajo condiciones prescritas para un grupo específico (ver Anexo A). Se realizó la destilación por lotes a presión ambiente, los valores de la temperatura y el volumen se registraron a medida que se disminuye el volumen²⁹.

El resultado obtenido al aplicar esta prueba al B100-1 durante cinco días (ver Anexo E), fue un valor experimental promedio de 342 °C; por lo tanto, las muestras de B100-1 cumple con los valores que establece la norma ASTM D86-07, la cual exige un máximo de 360 °C.

2.1.6 Índice de Yodo. Indica la oxidación del biocombustible a partir del número de insaturaciones o dobles enlaces, el grado de instauración depende de la naturaleza de la materia prima empleada. Se establece un límite de ácidos grasos instaurados, para evitar la polimerización de glicéridos que forman depósitos o deterioro del combustible³⁰.

La norma EN 14111 describe la determinación de esta propiedad, la prueba consiste en disolver la muestra con cloroformo y adicionar solución de Hanus, posteriormente se guarda en lugar oscuro por un tiempo determinado. Luego se agrega yoduro de potasio (KI) y agua. El yodo liberado se titula con tiosulfato de sodio y se mide con un indicador de almidón. Para determinar el valor del índice de yodo es necesario comprar la muestra con un blanco³¹.

Se asume el valor bibliográfico de 52 g de yodo/100 g que se adquirió de una de las fichas técnicas (Anexo D) de los proveedores de biodiesel; se observa que el valor obtenido por dicho proveedor cumple con el estándar que establece la norma de un máximo de 120 g de Yodo/100g.

2.1.7 Glicerina libre y total. En la producción de biodiésel se obtiene glicerol libre y enlazado químicamente como subproducto. El glicerol libre se produce por la disociación incompleta de éster y la glicerina causada por el lavado parcial después de la transesterificación, el glicerol enlazado se produce por las moléculas de mono-, di- y triglicéridos que reaccionan parcialmente; por último, el glicerol total es la suma de la glicerina libre y la glicerina enlazada, se determinan a través de

²⁹ STANDARD AMERICAN NACIONAL. Standard test method for Distillation of petroleum products at atmospheric pressure. ASTM D86-07. Unite States, 2007.

³⁰ Mittelbach, M., Diesel fuel derived from vegetable oils, VI: specifications and quality control of biodiesel. Bioresource Technology 1996, 56, (1), 7-11.

³¹ STANDARD EUROPEAN. Method for the determination of the Iodine Value in B100 biodiesel. UNE-EN 14111, 2003.

cromatografía iónica. El contenido de glicerol produce depósitos en el inyector de combustible y obstrucciones en los filtros. Para evitar estos inconvenientes operativos, se han establecido límites máximos de 0,02 mg/100 mg y de 0,25 mg/100 mg de concentración de glicerol libre y total respectivamente mediante la norma ASTM D6584:17³².

Se muestra un valor bibliográfico menor a 0,005 mg/100 mg y 0,198 mg/100 mg tanto de la glicerina libre y total que se adquirió de una de las fichas técnicas (Anexo D) de los proveedores de biodiesel, y se realiza la comparación con el valor teórico³³ que la norma estipula, determinando que cumple con los requisitos necesarios de calidad.

2.1.8 Contenido de mono-, di-, triglicéridos. El contenido de alquil ésteres de ácidos grasos, se determina empleando las mismas técnicas de cromatografía usadas en las pruebas de glicerina libre y total. Los mono-, di-, triglicéridos son cuantificados utilizando un patrón interno distinto para cada glicérido; un contenido mayor a 0,80 mg/100 mg, 0,20 mg/100 mg y 0,20 mg/100 mg de mono-, di-, triglicéridos respectivamente pueden causar problemas operativos a corto plazo en los motores.

Se realizó una comparación entre los valores bibliográficos de 0,655 mg/100 mg, 0,136 mg/100 mg y 0,056 mg/100 mg del contenido de mono-, di-, triglicéridos del biodiesel (Anexo D) respectivamente y los valores teóricos que la norma ASTM D6584:17³⁴ estipula, determinando que cumple con los requisitos necesarios de calidad del biodiesel para uso de biocombustible.

2.1.9 Contenido de metanol. El metanol es uno de los reactivos utilizados en el proceso de producción de biodiesel. Para que la reacción sea total se utiliza un exceso de metanol, debido a esto el metanol debe eliminarse del biodiesel, para garantizar la calidad del combustible. A través de la norma EN 14110, se determina el contenido de metanol calentado las muestras de biodiesel a una temperatura de 60 °C, durante un tiempo determinado. Por medio de una cromatografía de gases combinada con un sistema de inyección se establece el volumen de metanol que se evaporó debido a su bajo punto de ebullición.

Se confronta el valor bibliográfico (Anexo D) de 0,01 mg/100 mg con el valor teórico³⁵ que la norma establece, se determina que el valor bibliográfico cumple a cabalidad con lo que la norma estipula.

³² Gerpen, J. V.; Shanks, B.; Pruszko, R.; Clements, D.; Knothe, G. Biodiesel Analytical Methods. <http://www.nrel.gov/docs/fy04osti/36240.pdf> (24 of March of 2009),

³³ AMERICAN STANDARD TEST METHOD. Determination of Total Monoglycerides, Total Diglycerides, Total Triglycerides, and Free and Total Glycerin in B-100 Biodiesel. ASTM D6584, 2017.

³⁴ AMERICAN STANDARD TEST METHOD. Determination of Total Monoglycerides, Total Diglycerides, Total Triglycerides, and Free and Total Glycerin in B-100 Biodiesel. ASTM D6584, 2017.

³⁵ STANDARD EUROPEAN. Determination of Methanol Content in Pure Biodiesel. EN 14110:2003

2.1.10 Contenido de metilésteres. Esta propiedad demuestra la pureza del biodiesel, para determinar este parámetro se realiza el procedimiento que la norma EN 14103 indica. A través de cromatografía gaseosa con una columna de composición polar como fase estacionaria, los metilésteres se separan de acuerdo a la longitud de las cadenas de carbono y el número de enlaces dobles. Si el nivel de metilésteres es menor de 96,5 mg/100 mg, significa que el biodiesel no cumple con los requisitos de calidad. Mediante una comparación entre el valor bibliográfico (Anexo D) y teórico³⁶ del biodiesel, se deduce que el B100-1 cumple con los requisitos que la norma demanda.

En la Tabla 2., se muestra el resumen del contraste entre los valores experimentales promedio, bibliográficos y teóricos de acuerdo a las normas establecidas para la caracterización de la muestra de biodiesel inicial evaluada (B100-1), con el fin de observar de forma clara los valores mencionados anteriormente.

Tabla 2. Recopilación de la caracterización de B100-1.

Propiedad	Norma	Limites		Valor experimental Promedio	Valor bibliográfico
		Min	Max		
Densidad (Kg/m ³)	ASTM D4052	860	900	862,4	-
Viscosidad (mm ² /s)	ASTM D445	1,9	6,0	4,454	-
Contenido de humedad (mg/kg)	EN ISO 12937	-	500	255,6	-
Contaminación total (mg/kg)	EN 12662	-	24	36,4	-
Punto final de ebullición (°C)	ASTM D86	-	360	342	-
índice de yodo (g l / 100 g)	EN 14111	-	120	-	52
Glicerina libre % (m/m)	ASTM D6584	-	0,02	-	< 0,005
Glicerina total % (m/m)	ASTM D6584	-	0,25	-	0,198
Contenido de monoglicéridos % (m/m)	ASTM D6584	-	0,80	-	0,655
Contenido de diglicéridos % (m/m)	ASTM D6584	-	0,20	-	0,136
Contenido de triglicéridos % (m/m)	ASTM D6584	-	0,20	-	0,056
Contenido de metanol % (m/m)	EN 14110	-	0,20	-	0,01
Contenido de metilésteres % (m/m)	EN 14103	96,5	-	-	97,6

Fuente: elaboración propia

³⁶ STANDARD EUROPEAN. Determination of Total FAME and Linoleic Acid Methyl Esters in Biodiesel. EN 14103:2003

De acuerdo con lo anterior, se caracterizaron algunas propiedades fisicoquímicas iniciales del biodiesel, las cuales se compararon con valores que establecen las respectivas normas mencionadas previamente, se evidencian que en su gran mayoría las condiciones de entrada del biodiesel cumple con la normatividad vigente de calidad, la diferencia entre los valores experimentales promedio y teóricos de la densidad, viscosidad, contenido de humedad y punto final de ebullición, se encuentran dentro del rango de los límites superiores e inferiores que la norma establece (ver Tabla 2), a excepción de la contaminación total, la cual registra un valor superior de 24 mg/kg, sobrepasando 12,6 mg/kg el valor límite que la norma permite.

La divergencia de los valores bibliográficos de glicerina total, contenido de monoglicéridos, contenido de diglicéridos y contenido de metilésteres, es mínima con respecto al valor máximo que la normativa exige, ya que varían 0,052 mg/100g, 0,145 mg/100 mg, 0,064 mg/100 mg, y 1,1 mg/100 mg respectivamente. Por otro lado, las propiedades como el índice de yodo, la glicerina libre, el contenido de triglicéridos y el contenido de metanol presentan una variación significativa de 68 g de yodo /100 g, 0,015 mg/ 100 mg, 0,144 mg/ 100 mg y 0,019 mg/ 100 mg respectivamente entre los valores bibliográficos y normativos.

3. SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS DE FILTRACIÓN PARA DISMINUIR PARTÍCULAS CONTAMINANTES

En este capítulo se muestran procesos de filtración que se escogieron mediante una recopilación bibliográfica, los cuales su función principal es disminuir los sedimentos que se encuentran en el biodiesel. Las alternativas se plantean según las características del producto, los factores económicos y la infraestructura de la empresa. Se selecciona la alternativa más viable para un desarrollo experimental e industrial.

3.1 FILTRACIÓN DE REMOJO EN FRÍO

Este ensayo fue desarrollado recientemente, e incorporado en la norma ASTM D-6751 en el año 2008 como un anexo, debido a la problemática que surgió con los sedimentos que se formaban en el biodiesel puro y en las mezclas con diésel hasta un 20%, en las cuales se generaban los sedimentos con un cambio en la temperatura o porque el biodiesel duraba almacenado un tiempo largo; posteriormente se publicó una norma específica para su implementación.

El método consiste en enfriar una muestra de 300 ml de biodiesel durante un periodo de 16 horas a una temperatura de 4°C, después de que la muestra de biodiesel logra alcanzar la temperatura estipulada anteriormente, se deja enfriar hasta que alcance la temperatura ambiente de 20 a 22 °C sin utilizar una calefacción exterior; luego que la muestra de biodiesel cumpla con esta temperatura se debe agitar brevemente para dispersar los precipitados que se hallan formado por el choque térmico en el fondo del recipiente.

Posteriormente se realiza un procedimiento de filtración según la norma ASTM D-675, la cual consiste en verter la muestra de biodiesel en un embudo de acero inoxidable de 650 ml, empleando un filtro de fibra de vidrio Whatman GF/F de 47 mm de diámetro y un tamaño de poro de 0,7 µm, sujetado por un soporte de filtro de acero inoxidable, seguido se aplica un vacío entre 71,1 y 84,7 kPa y se mide el tiempo que el 300 ml de biodiesel se demora en pasar por el filtro. Hay dos límites de tiempo de filtración, uno es de 360 segundos o menos para biodiesel puro (B100) y el otro es de 200 segundos o menos para un biodiesel mezclado con cierto porcentaje de diésel (Bx) y que deba operar a temperaturas de -12°C o menos. El resultado de esta filtración depende de la pureza del biodiesel, la calidad de la materia prima utilizada, la glicerina total, entre otras. Cuanto mayor sea los SG mayor será el tiempo de la filtración de remojo en frío³⁷.

³⁷ Fan, X., Burton, R. & Austic, G. (2009). Preparation and Characterization of Biodiesel Produced from Recycled Canola Oil. The Open Fuels & Energy Science Journal, Vol.2, pp. 113-118. ISSN: 1876-973X. 17.06.2010. Available from: www.benthamscience.com/open/toefj/articles/V002/113TOEFJ.pdf.

Esta filtración se ha incluido recientemente en los estándares de calidad de biodiesel, en la actualidad hay muy pocos casos reportados acerca de este parámetro³⁸.

Para llevar a cabo esta filtración a nivel industrial es necesario emplear intercambiadores de calor de agua para disminuir la temperatura del biodiesel, al igual que un tanque donde se pueda depositar el biodiesel enfriado para que los sedimentos que se hallan formado se pueda precipitar es necesario mantener la temperatura en el tanque para que se pueda generar la mayor cantidad de contaminantes, posteriormente se finaliza el proceso de limpieza implementando un filtro de hojas para eliminar las partículas finales.

El método tiene una efectividad de filtración del 99% el cual se considera como una muy buena estimación para un proceso de filtración, sin embargo, los costos de operación de los equipos aumentan progresivamente debido al consumo de energía, instalación y adquisición; del mismo modo los costos de mantenimiento son elevados ya que se debe ser riguroso para evitar problemas progresivos de rendimiento e inactividad del equipo por acumulación de contaminación³⁹.

3.2 FILTRACIÓN POR CARTUCHOS

Consiste en hacer circular, mediante presión, un fluido por el interior de un porta-cartuchos en el que se encuentran alojados los cartuchos filtrantes. El fluido atraviesa el cartucho filtrante con un filtro de filamento enrollado dejando retenidos niveles de contaminación inferiores de 100 mg/kg.

La filtración por cartuchos es la técnica de filtración más aconsejada para cumplir los requisitos más exigentes de la separación de la contaminación, de la calidad y la seguridad, pero con bajas cargas de sólidos en suspensión. Los cartuchos filtrantes pueden estar fabricados en diferentes materiales como: polipropileno, polietersulfona, ptfе, celulosa, nylon, acero inoxidable entre otros, se determina el material dependiendo de las características del fluido que se vaya a filtrar y de la calidad que se desee.

El medio filtrante puede filtrar partículas de tamaño de 5 a 50 micras; este método de filtración se destaca por su alta capacidad de retención de partículas contaminantes con poca pérdida de presión, caudales altos y un tiempo operatorio prolongado⁴⁰.

³⁸ István Barabás, Ioan-Adrian Todoruț. Biodiesel Quality, Standards and Properties. Technical, University of Cluj-Napoca, Romania, pág, 21, 2011.

³⁹ Hass, Michael, Barr, Meredith, Phillips, John y Wagner, Karen. A Simple Standardization Method for the Biodiesel Cold Soak Filtration Apparatus. Journal of the American Oil Chemists' Society 92(9), Agosto 2015.

⁴⁰ Vataavuk, William. Filtros y casa de bolsas. Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, pág 1-8, diciembre de 1998.

El filtro de cartucho puede ser de superficie o de profundidad, los filtros de profundidad atrapan partículas y contaminantes por medio del espesor total del medio, tienen un área de superficie limitada, pero una profundidad alta; mientras que los filtros de superficie las partículas están bloqueadas en la superficie del filtro, estos filtros aumentan su eficiencia si las partículas que se filtran tienen un tamaño similar; los costos de estos equipos varía según el diseño y material, pero tienden a ser económicos.

Si se aumenta la superficie del filtro es posible filtrar flujos mayores, la vida útil aumenta (20 años en uso continuo para el portacartuchos. Sin embargo, los filtros tienen una vida útil limitada de 3-6 meses), al igual que la capacidad de retención de partículas, se estima que la eficiencia de retención es de alrededor del 99.9%⁴¹. Estos filtros no se deben limpiar, debido a que resulta dañino este proceso de limpieza y el efecto de filtrado se pierde, por esta razón están diseñados como desechables por lo que deben cambiarse cuando el filtro llegue a su capacidad máxima⁴².

Aunque esta propiedad sea buena, los costos de operación y mantenimiento dependen del costo de los filtros y del sueldo del operador, ya que es el encargado de reemplazar los filtros cuando se saturan, para ello se debe drenar la carcasa, hacer disposición final a un tanque de desperdicios y una limpieza general de la carcasa. Si son carcasas verticales se debe tener en cuenta una plataforma y equipo de seguridad para el operador en caso del cambio de filtros. Por último, se debe tener en cuenta unos diques para el control de derrames.

3.3 FILTRACIÓN POR MANGA O BOLSA

Está diseñado para fluidos que poseen específicas y diferentes concentraciones de partículas contaminantes, para ello el medio filtrante debe ser fácil de utilizar, que admita grandes caudales y con un costo de filtración lo más económico posible; se debe tener en cuenta que la construcción de estos filtros ofrecen una superficie de filtración inferior que la filtración de cartuchos, pero son capaces de acumular la cantidad necesaria de sedimentos⁴³.

Consiste en hacer circular el fluido a filtrar a través de una manga que se encuentra alojada en un porta-bolsas, quedando el material particulado contaminante retenido en la misma. El flujo va desde el exterior hacia el interior del filtro, dándose la separación de partículas en la superficie del filtro. Normalmente las partículas quedan atrapadas en la superficie del filtro de bolsa; la bolsa puede elegirse entre

⁴¹Especificaciones del filtro. Filtro 3M. Disponible en internet: >https://www.3m.com.co/3M/es_CO/inicio/todos-los-productos-3m/~/?Filtro=3M-serie-High-Flow-/?N=5002385+3294453927&rt=rud> [Citado el: 31 de agosto de 2018]

⁴² Purificación de fluidos. Selfiltra purificación de fluidos. Disponible en internet: www.selfitra.com. [Citado el: 31 de agosto de 2018].

⁴³ Sistema de filtración por bolsa Eaton®, la mejor opción en el mercado. Quiminet. Disponible en línea ><https://www.quiminet.com/articulos/sistema-de-filtracion-por-bolsa-eaton-la-mejor-opcion-en-el-mercado-3728237.htm>>. [Citado en agosto 2018]

una amplia gama de tamaños y materiales de construcción (polipropileno, poliéster) aprobados por la FDA y con un amplio rango de filtración de 1 a 1000 micras⁴⁴.

Los porta-bolsas están diseñados en aleaciones especiales, acero inoxidable, acero al carbono y materiales poliméricos. Por lo general, los filtros no están diseñados para cambiarse cuando están obstruidos, en su mayoría los filtros de bolsa son filtros de superficie y usualmente son desechables, aunque en algunos casos estos pueden lavarse a contracorriente y limpiarse más fácilmente para poder ser reutilizables.

La selección de telas es asistida por las pruebas de filtración a escala de laboratorio para investigar los efectos de la tela sobre la caída de presión, la liberación de la pasta durante la limpieza, y la eficiencia de recolección, la cual se encuentra dentro de un rango del 96-90% dependiendo del material seleccionado, la vida útil del porta-bolsas es de 15 años aproximadamente en uso continuo y el del filtro de bolsa se encuentra en un rango de 1 a 3 meses, este periodo de tiempo depende de la cantidad de contaminantes que desea reducir y el mantenimiento que se le da a los respectivos equipos⁴⁵.

3.4 MATRIZ DE SELECCIÓN

Para escoger un sistema de filtración es necesario un estudio de las especificaciones y objetivos del proceso que se desea realizar. Para ello a continuación, se menciona varios aspectos o variables que se debe tener en cuenta durante la selección de un sistema de filtración:

- No hay estereotipos industriales de diseño o dimensionamientos de los equipos de filtración, es decir tanto el área superficial de filtración y la fabricación de los equipos necesarios para cubrir dicha área son muy importantes, debido a que el dimensionamiento de los equipos perjudica la pérdida de presión y la regularidad de limpieza que se debe realizar al sistema. Además, se debe considerar el tamaño de partícula que se desea filtrar para determinar el área de filtración necesaria y el tamaño tanto de los equipos como del medio filtrante.
- Lo más económico no siempre resulta ser la mejor opción; aunque el costo es un factor importante, la decisión de compra no debe estar basada solo en este criterio. Por ejemplo, un sistema de filtración con un costo de adquisición bajo puede terminar aumentando su precio a largo plazo, debido a que puede presentar inconvenientes de mantenimiento, un diseño o uso inadecuado. Por eso debe realizar una estimación de costos, en donde se tiene en cuenta ciertos aspectos como: costo del medio filtrante, costos de adquisición y vida útil del equipo, los costos de mantenimiento (mano de obra para el cambio de los medios

⁴⁴ Soluciones de tratamiento. LENNTECH. Disponible en internet: <https://www.lenntech.com>. [Citado el: 31 de agosto de 2018]

⁴⁵ VATAVUK, Op. cit., p. 1-13.

filtrantes, piezas que necesiten cambio, tiempos de parada, etc.), costos de operación (mano de obra, electricidad entre otras) y costos de instalación y acondicionamiento⁴⁶.

- Con el equipo en funcionamiento el mantenimiento preventivo debe ser continuo, normalmente un sistema de filtración funciona con un tiempo de vida útil, inclusive si el equipo es automático no se puede solo ajustar y aparcarse. Por eso es necesario tener en cuenta que el mantenimiento de los equipos va desde la lubricación de válvulas, revisión de manómetros hasta la revisión y cambio de filtros. Una forma de verificar que el sistema de filtración necesita cambio ya sea por acumulación de contaminantes o porque no funciona correctamente es mediante el diferencial de presión⁴⁷.
- Los requerimientos de la eficiencia de separación esta entrelazada con el tamaño de poro del medio filtrante, la cantidad de contaminación que retiene, el flujo del fluido, si es un proceso continuo o intermitente; el cual a su vez influye en el aumento o disminución de la vida útil del equipo⁴⁸.

A continuación, en la Tabla 3., se presentan ciertos criterios para decidir que alternativa de filtración es mejor; estos parámetros se escogieron basándose en la información descrita en el párrafo anterior.

⁴⁶ ¿QUE BUSCAR AL SELECCIONAR UN SISTEMA DE FILTRACION? Yardney water filtration systems. Pág, 01, 2014. Disponible en línea: ><https://www.yardneyfilters.com/files/technical/Filtration%20System%20Guidelines/What%20to%20look%20for-SPAN.pdf>. [Citado en diciembre 2018]

⁴⁷ Factores para el diseño y selección de procesos de filtración. Disponible en internet http://sgpwe.izt.uam.mx/files/users/uami/favela/Notas_Filtracion.pdf. [Citado diciembre 2018]

⁴⁸lib,

Tabla 3. Criterios de selección del método de filtración.

Criterio	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
	Filtración remojo en frío	Filtración por cartuchos	Filtración por manga
Eficiencia	99 %	>99%	96 - 90 %
Tamaño de partículas	0,7 μm	5 – 50 μm	1 – 1000 μm
Costos	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Intercambiador de calor a escala industrial. ✓ Tanque de almacenamiento ✓ Filtro de hojas o de vidrio. ✓ Vida útil de 15 a 20 años para el intercambiador de calor y tanque de almacenamiento. ✓ Vida útil de filtro de 2 - 4 meses. ✓ Consumo de energía. ✓ Mantenimiento de los equipos. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Porta cartuchos ✓ Cartuchos filtrantes ✓ Vida útil del porta cartuchos de 20 años en uso continuo y de 3 a 6 meses el cartucho filtrante. ✓ Sueldo del operador. ✓ Diques para el control de derrames. ✓ Instalación en la línea de biodiesel. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Porta- bolsa ✓ Bolsas de filtro ✓ Vida útil del Porta- bolsa 10 años y de 1 a 3 meses bolsas de filtro ✓ Turno del operario. ✓ Instalación en la línea de biodiesel.

Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con la información plasmada en la Tabla 3., se procede a escoger que método de filtración es el mejor, se determina que la filtración por cartuchos es la alternativa más conveniente, debido a que es un proceso sencillo a nivel industrial, la vida útil de los medios filtrantes es más prolongada con respecto a las bolsas de filtro y el filtro de hojas; además, posee una eficiencia mayor a 99%. Cabe resaltar que tanto la vida útil como la eficiencia dependen del tamaño de partícula de los sedimentos contaminantes que posea el fluido.

3.5 DESARROLLO EXPERIMENTAL

Mediante un procedimiento de filtración del biodiesel a nivel de laboratorio, empleando cinco diferentes materiales filtrantes para escoger la tecnología del mecanismo de remoción de partículas contaminantes del biodiesel, y poder demostrar que es una opción viable para la filtración por cartuchos y la disminución de sedimentos contaminantes del biodiesel.; posteriormente se mostrara una caracterización final del biodiesel (B100-2) empleando este método de filtración.

3.5.1 Identificación de las variables

- **Factores o variables:** Para este caso se considera como variable el material del medio filtrante, debido a que representa la tecnología del filtro, por lo tanto, se considera un factor estudiado, debido a que se va a tratar de mirar cómo afecta el material de filtración en la variable respuesta.
- **Niveles de los factores:** Son cinco niveles que corresponden a cinco diferentes materiales de filtración, estos corresponden a las unidades experimentales que se van analizar.
- **Variable respuesta:** Esta variable determina el objetivo del diseño, que en este caso es obtener la denominación más baja del código ISO 4406, la cual determina que tan limpio se encuentra el biodiesel; es decir, que tantas partículas por mililitro se encuentran en un rango de tamaño en micrones mayores a 4, 6 y 14 (ver **Tabla 1**) en una muestra de biodiesel.
- **Experimentación del proceso de selección del filtro.** Este proceso se divide en dos partes; en la primera sección, se plasma la experimentación que se realizó por cada material, utilizando una muestra de biodiesel, con el fin de observar la eficiencia de retención de contaminación sólida, basándose en los criterios del código ISO 4406, luego se define las características del material de filtración seleccionado. La segunda parte consiste en la implementación del material seleccionado en diferentes muestras de biodiesel, a las cuales se les determina la contaminación total, con el propósito de verificar la eficiencia del filtro seleccionado.

Primera etapa: se evalúa una muestra de 25 ml de biodiesel en cinco distintos materiales de filtración como lo indica la Tabla 4., el criterio para seleccionar el mejor material de filtración, se determina de acuerdo a la cantidad de partículas filtradas, la cual se refleja a través de los códigos ISO que arrojó la experimentación, teniendo en cuenta que entre menor es la numeración del código ISO, mejor es la filtración de partículas/ml.

Tabla 4. Prueba con los materiales de filtración.

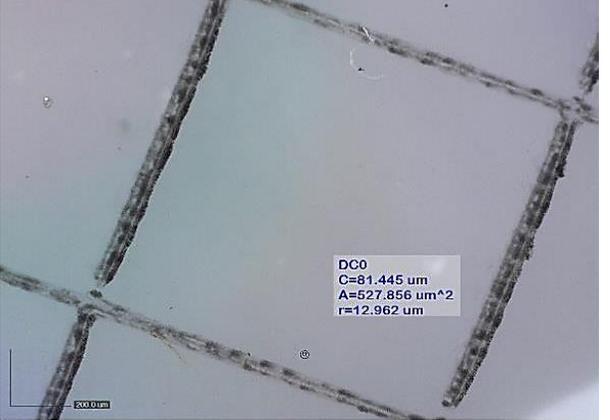
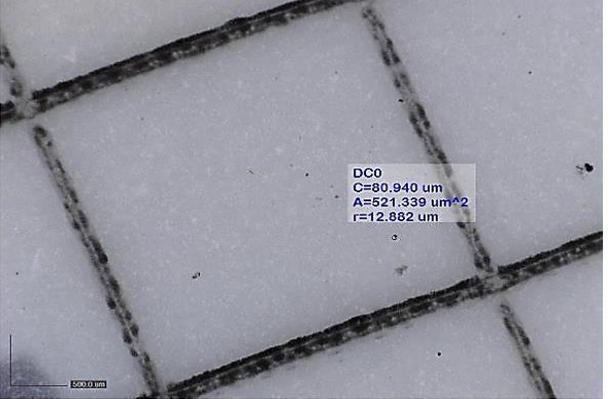
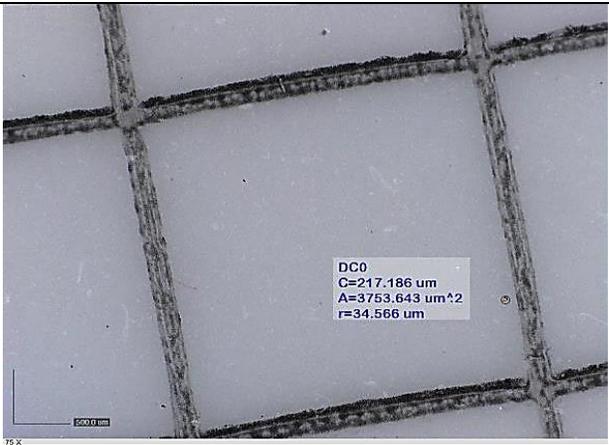
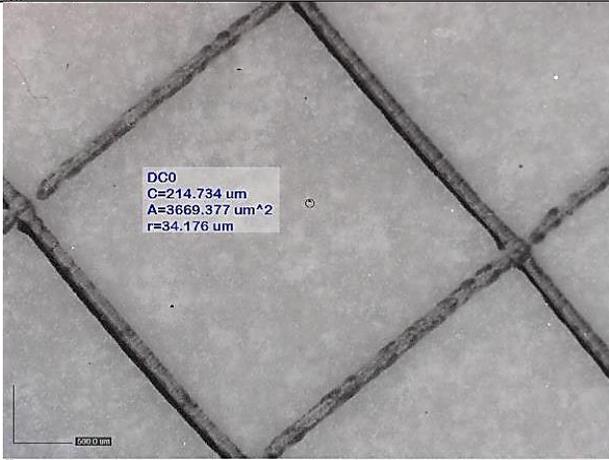
Medio filtrante	Código ISO 44006	Imagen microscópica
Betafine	17/15/13	
Zetaplus 10C	17/15/13	
Betapure BK	19/16/14	

Tabla 4. (Continuación)

Medio filtrante	Código ISO 44006	Imagen microscópica
Zetaplus 30S	19/16/14	
High Flow 1 micra	17/15/12	

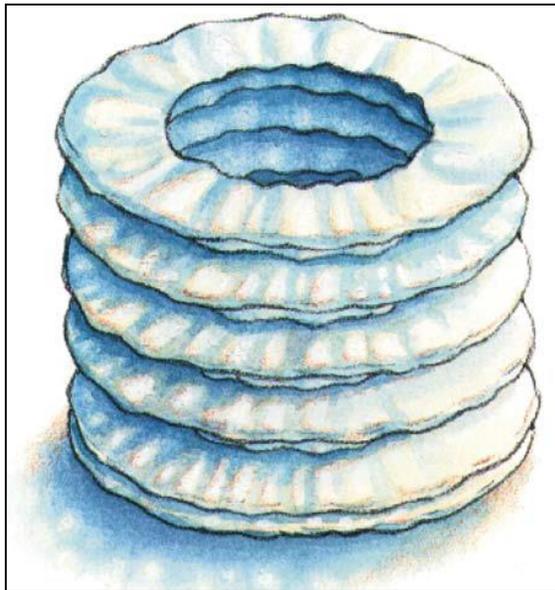
Fuente: RIAÑO, A y ACEVEDO, H. “SELECCIÓN FILTRO HF”. 2018, IDEA INGENIERIA S.A.S. innovación en soluciones energéticas, p. 5-6

Conforme con los resultados de la experimentación que se realizó para determinar el tipo de medio filtrante, se escogió la tecnología High Flow con base en la cantidad de partículas retenidas presentando un código de limpieza ISO 4406 más bajo con respecto a los otros cuatro medios filtrantes.

Según los resultados, se obtuvo un código 17/15/12 y de acuerdo con la Tabla 1., la muestra de biodiesel analizada presenta un rango de 640 - 1.300 partículas mayores a 4 micras, de 160 - 320 partículas mayores a 6 micras y de 20 - 40 partículas mayores a 14 micras, comparado con el código 19/16/14 del material zetaplus 30S el cual se encuentra dentro de un rango de 2.500 – 5.000 partículas mayores a 4 micras, de 320 – 640 partículas mayores a 6 micras y 80 - 160 partículas mayores a 14 micras, como se puede observar el medio filtrante High Flow es efectivo debido a que reduce el contenido de partículas y mejora la limpieza en el biodiesel.

3.5.1.1 Características del medio filtrante High Flow. La tecnología que emplea este sistema de filtración, está diseñada para optimizar el rendimiento y la calidad del fluido, se utiliza un diseño de pliegues radiales compuestos (ver Figura 7), maximizando la superficie útil del medio filtrante para proporcionar una capacidad de retención absoluta.; a su vez las características de diseño permiten manejar un flujo de filtrado de 500 gpm, el material de construcción (polipropileno) es compatible con varios fluidos, se emplea un mecanismo de fijación llamado “twist to lock” el cual asegura un sellado positivo y es de fácil inserción y retiro.

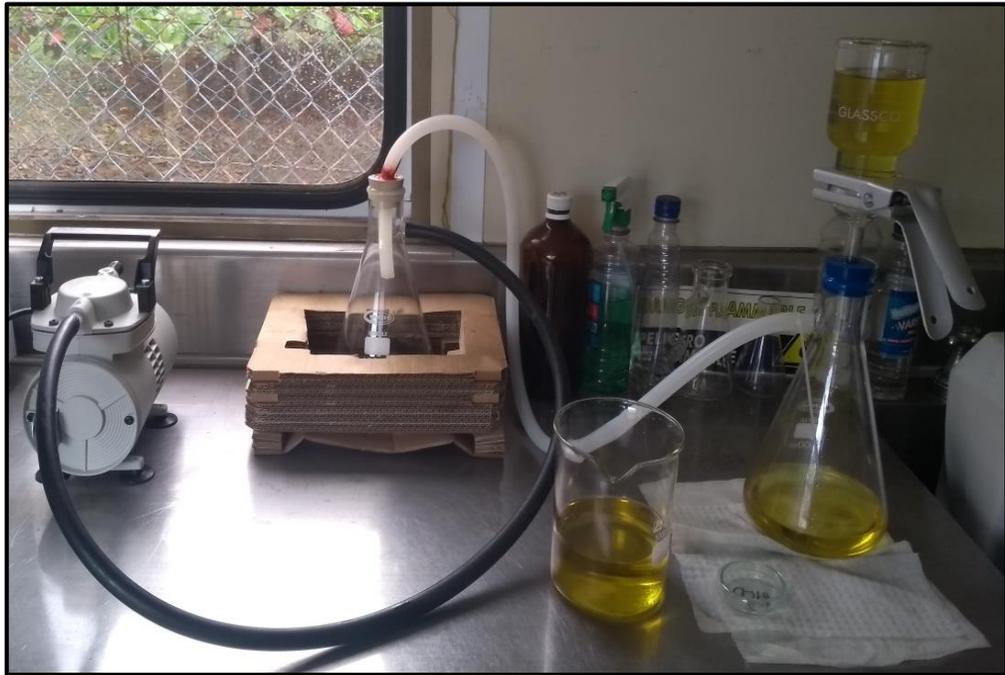
Figura 7.Diseño del medio filtrante High Flow



Fuente: 3M PURIFICATION INC. “3M™ High flow series Filter Systems. Innovative filtration solutions. Quality, Consistency, performance”. USA, 2013.

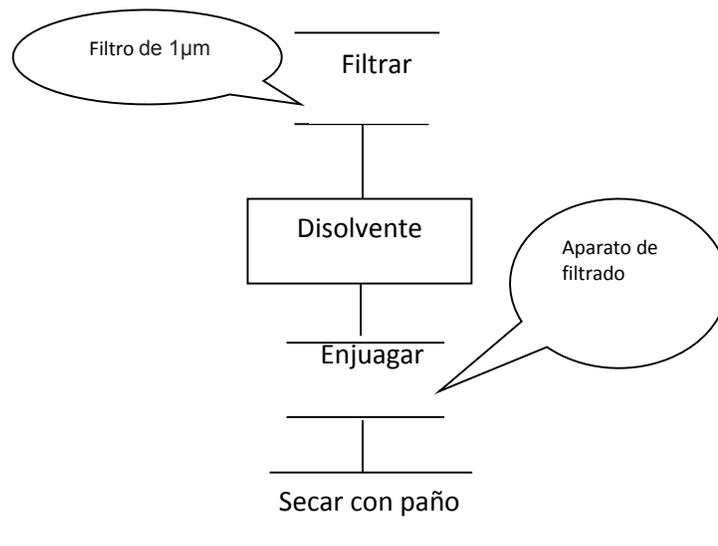
3.5.1.2 Verificación del medio filtrante. A continuación, se muestra el montaje experimental que se implementó en el desarrollo de las pruebas verificación del medio filtrante y la tecnología escogida (ver Figura 8), la parte del procedimiento que se implementó para verificar la efectividad del medio filtrante High Flow se realizó de acuerdo al Anexo B. Para determinar si el medio filtrante es efectivo, se llevó a cabo la prueba de contaminación total, empleando muestras iniciales y finales de biodiesel en un periodo de diez días; esta prueba se realizó siguiendo los estándares que establece la norma EN 12662. Por medio de diagramas de flujo e imágenes (ver Ilustraciones 1– 4) se muestra el procedimiento de los cuatro pasos esenciales para llevar a cabo la experimentación, en el Anexo B., se describe detalladamente el procedimiento, los instrumentos, equipos, materiales y reactivos que se implementaron para el desarrollo de las pruebas.

Figura 8. Montaje experimental guía de laboratorio.

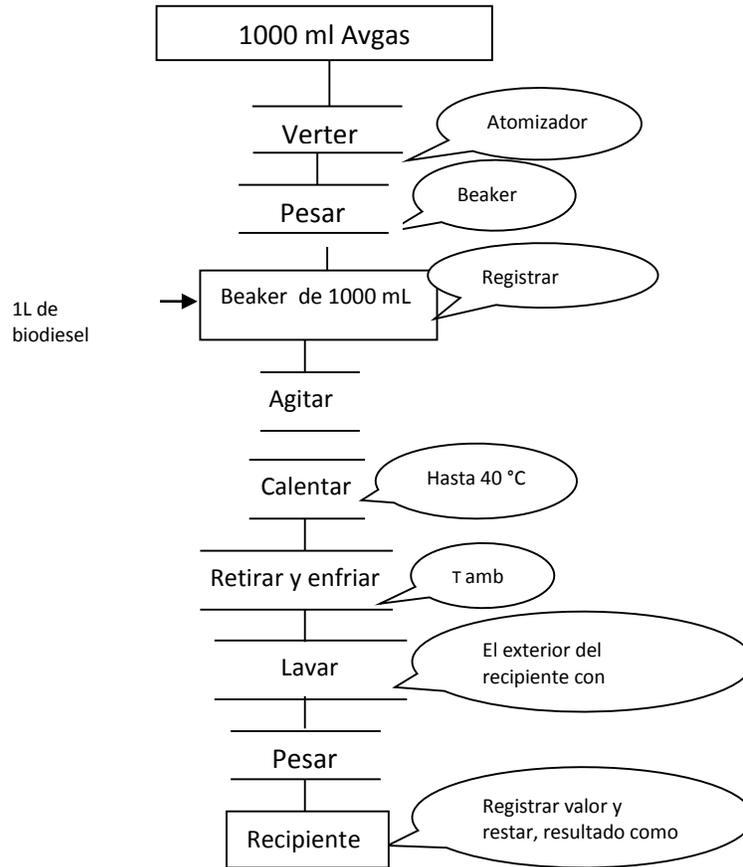


Fuente: elaboración propia

- Procedimiento para la preparación de los aparatos



- Procedimiento para la preparación de la muestra.



En la Ilustración 1 se puede observar un sistema de enfriamiento que se ideó, implementando agua fría y alcohol.

Ilustración 1. Enfriamiento del biodiésel.



Fuente: elaboración propia

A continuación, la Ilustración 2 muestra las operaciones de pesar la imagen de la izquierda, agitar y calentar la imagen de la derecha, las cuales son mencionadas en el diagrama de flujo del procedimiento de la preparación de la muestra.

Ilustración 2. Izquierda: Pesado beaker vacío. Derecha: Agitación y Calentamiento del biodiesel.



Fuente: elaboración propia

• Procedimiento para preparación del filtro.



En la Ilustración 3., se observa la muestra de biodiesel filtrada en la caja Petri introducida en el horno y el desecador la imagen de la derecha empleado para enfriar y retirar humedad de la muestra de biodiesel despues de haber cumplido con el tiempo establecido en el horno.

Ilustración 3. Caja Petri en el horno y desecador de silica gel.



Fuente: elaboración propia

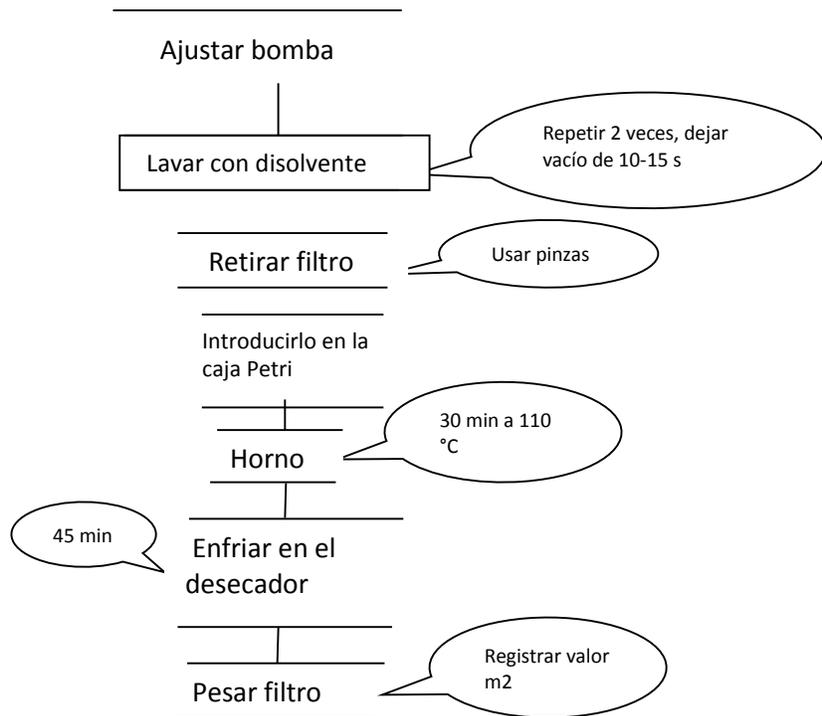
Por último, en la Ilustración 4., se observa la fijación de la copa de filtración y el ajuste que se realizó al filtro imagen de la derecha, para realizar el respectivo procedimiento de la preparación del filtro.

Ilustración 4. Fijación del filtro y Ajuste de la copa de filtración



Fuente: elaboración propia

•Procedimiento de filtrado.



3.5.2 Resultados y análisis de resultados. En este ítem se dan a conocer los resultados que se obtuvieron de la contaminación total de las 10 muestras de biodiesel inicial (B100-1) y final (B100-2), del mismo modo se realiza un análisis de la experimentación. Por último, se muestra la caracterización final de B100-2 que se obtuvo al implementar la filtración por cartuchos empleando el medio filtrante High Flow.

3.5.2.1 Contaminación total del biodiesel. En el Anexo C se muestra los cálculos que se realizaron para obtener la concentración de contaminación total (mg/kg) de B100-1 y B100-2 durante los diez días. En la Tabla 5., se observa los niveles de contaminación total (mg/kg) de las muestras analizadas para cada unidad experimental.

Tabla 5. Contaminación total de los experimentos B100-1 y B100-2.

N° de experimentos	Contaminación total (mg/kg)	
	Muestra de B100-1	Muestra de B100-2
1	49,8	32,7
2	32,7	30,4
3	33,6	23,4
4	43,4	14,1
5	65,2	40,4
6	39,1	16,4
7	33,5	30,7
8	17,4	12
9	22	18,1
10	27,6	7,5
Total	364,5	225,8
Promedio	36,4	22,6

Fuente: elaboración propia

La norma EN 12662 establece un máximo de 24 mg/kg de contaminación total, estos a su vez indican la cantidad de material particulado insoluble presente en el biodiesel, la eliminación de este material asegura la calidad del producto.

En las muestras de B100-1 y B100-2 que se analizaron, se observa que los valores de contaminación total varían con el paso de los días, algunos sobrepasan el máximo establecido por la norma. El fenómeno de variabilidad entre los datos de las dos muestras experimentales se encuentran dentro un rango de 2,3 a 29,3 mg/kg, los cuales pueden ser generados debido a que el procedimiento se realizó a temperatura ambiente (30°C) o debido a que en la recolección de la muestra se cometieron errores, esto a su vez puede alterar los niveles de contaminación.

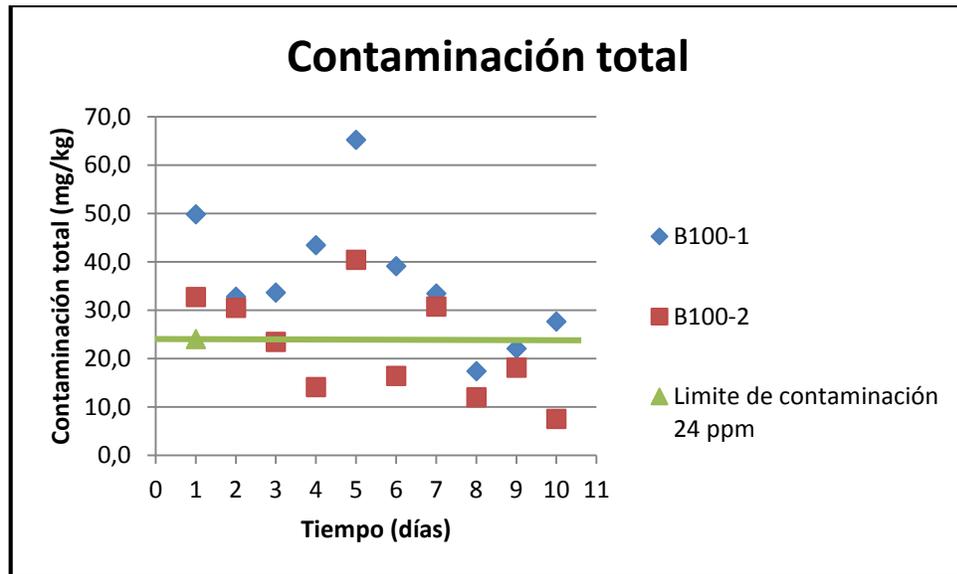
Aunque no se cumple en su totalidad con la norma, se nota que la filtración por cartuchos es efectiva y se evidencia en la diferencia del promedio de la contaminación total de las muestras B100-1 y B100-2, ya que disminuye un 13,8 mg/kg una con respecto a la otra.

En la Gráfica 2., se plasma los resultados de contaminación total de las muestras experimentales de B100-1 y B100-2 que se presentaron en la Tabla 5., así mismo se indica el límite que la norma exige. De esta manera se observa que solo seis valores experimentales de contaminación total de B100-2 y dos valores de B100-1 son los que se ajustan al máximo de contaminación total que debe tener un biocombustible.

También se deduce que en su gran mayoría los niveles de contaminación total de la muestra de B100-1 son elevados, lo que revela parte de los problemas de calidad que hay en el producto entregado. Además, como se ha mencionado anteriormente,

tener una contaminación total mayor a 24 mg/kg como es el caso de la muestra del B100-1 de los días 1 a 7 y 10; y de la muestra B100-2 de los días 1, 2, 5, y 7, ocasionan varios problemas, uno de ellos es la obstrucción en el funcionamiento de los motores de combustión interna.

Gráfica 2. Contaminación total de las muestras de B100-1 y B10-2.



Fuente: elaboración propia

3.5.2.2 Caracterización de B100-2. Para verificar que la filtración por cartuchos funciona correctamente, se analizaron las principales características fisicoquímicas de las muestras de B100-2, comparadas con las muestras iniciales B100-1, los resultados que se obtuvieron se muestran a continuación a través de tablas y gráficas:

- **Densidad.** La Gráfica 3., y la Tabla 6., dan a conocer la distribución de densidades de las dos muestras de biodiesel estudiadas, en donde se evidencia que la densidad de la muestra de B100-2 disminuye, esto pudo haber sido, debido a que, se retuvieron sedimentos sólidos durante la filtración, además se debe tener en cuenta que la densidad también se ve influenciada por la temperatura⁴⁹, lo cual afecta debido a que la densidad de las muestras se realizaron a diferentes temperaturas ambientes produciendo cambios en los valores de los biodiesel que se midieron durante 10 días.

⁴⁹ Benjumea PedroN, ChavesN, Germán y Vargas, Claudia. Efecto de la temperatura sobre la densidad del biodiesel de aceite de palma y sus mezclas con diésel convencional. Instituto de Energía, Grupo Combustibles Alternativos, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia, diciembre 2006.

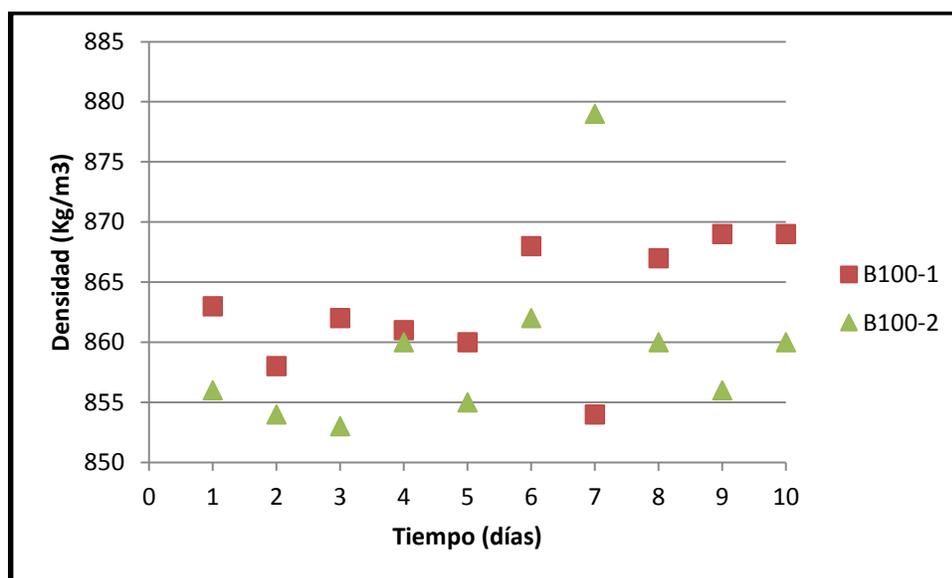
Cabe resaltar que la muestra del día 7 presenta un valor elevado debido a que se cometieron errores a la hora de realizar el muestreo. De igual forma se mantiene en el rango establecido por la norma ASTM D4052.

Tabla 6. Densidad de B100-1 y B100-2.

Muestra de B100	Valor experimental promedio Kg/m ³	Norma ASTM D4052 Kg/m ³	Desviación estándar
B100-1	862,4	Mínimo 860	4,65
B100-2	860,1	Máximo 900	7,49

Fuente: elaboración propia

Gráfica 3. Distribución de densidad del B100-1 y B100-2.



Fuente: elaboración propia

- **Viscosidad.** Los resultados que se muestran en la Gráfica 4., ilustran la distribución de viscosidades de las dos muestras de biodiesel analizadas, la muestra de B100-1 contiene 0,036 mm²/s más, con respecto a la de B100-2, esta variación entre los datos que se registraron, pueden ser debido a que la temperatura ambiente de los días era diferente, puesto que se maneja un rango de 32-36 °C, y como bien se sabe la viscosidad se modifica con la temperatura⁵⁰, no obstante, los valores que se obtuvieron varían dentro de un rango de -0,09 a

⁵⁰ Benjumea Pedro N, Álvarez, Ángela M y Molina, Alexandra P. Efecto de la temperatura sobre la viscosidad del biodiesel de aceite de palma y sus mezclas con diésel convencional. Revista energética 35, artículo de investigación, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia, mayo 2006.

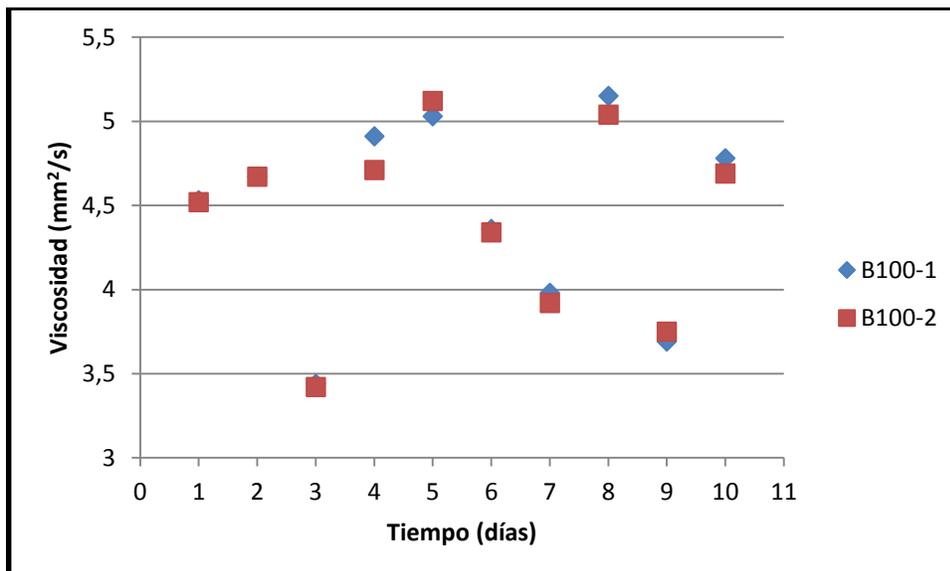
0,002 mm²/s. La Tabla 7., compara los valores experimentales promedio y teóricos de acuerdo a la norma⁵¹, de igual forma las muestras experimentales de biodiesel cumplen con los estándares establecidos.

Tabla 7. Comparación de viscosidades del B100-1 y B100-2

Muestra de B100	Valor experimental promedio mm ² /s	Norma ASTM D445 mm ² /s	Desviación estándar
B100-1	4,454	Mínimo 1,9	0,58
B100-2	4,418	Máximo 6,0	0,56

Fuente: elaboración propia

Gráfica 4. Dispersión de viscosidades de las muestras B100-1 y B100-2



Fuente: elaboración propia

- **Contenido de humedad.** Se demuestra por medio de la Tabla 9 y la Gráfica 5., que la muestra de B100-1 contiene una cantidad mayor de 15.2 mg/kg de humedad que la de B100-2, debido a que, durante el proceso de transporte, almacenamiento o al entrar en contacto con la humedad en el aire⁵², las muestras de B100-1 pudieron absorber partículas de agua aumentando la contaminación a la muestra. También hay que tener en cuenta que había días

⁵¹ STANDARD AMERICAN NACIONAL. Standard test method for kinematic viscosity of transparent and opaque liquids. ASTM D445.

⁵² Knothe, Gerhard. Calidad del combustible biodiésel y la norma astm. National center for agricultural. USA. [en línea] ><https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/download/1563/1563/>>

en los que la humedad del ambiente aumentaba considerablemente al igual que la temperatura, de este modo se pudo haber generado contaminación en las respectivas muestras analizadas, esto se puede observar debido a que, todos los días se medía la humedad y la temperatura con un Datalogger, un ejemplo claro son los resultados que se encuentran registrados en la Tabla 8.

Tabla 8. Ejemplo de la variabilidad de la humedad con respecto a la temperatura

Hora	Día	Temperatura (°C)	Humedad (% RH)
17:48	27/08/18	29,3	62,5
11:43	27/08/18	34,5	46,7
07:21	27/08/18	22,4	92,8
20:46	26/08/18	25,4	71,9
15:06	26/08/18	33,5	46,3

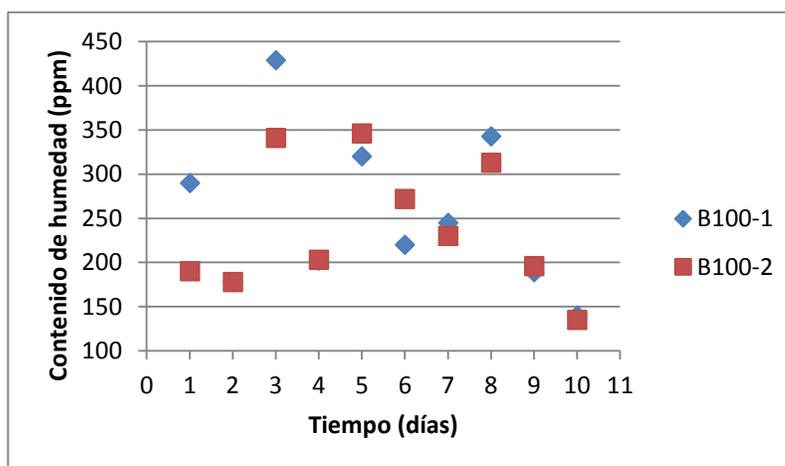
Fuente: elaboración propia

Tabla 9. Comparación de contenido de humedad de B100-1 y B100-2

Muestra de B100	Valor experimental promedio (ppm)	Norma EN ISO 12937 (ppm)	Desviación estándar
B100-1	255,6	Máximo 500	88,89
B100-2	240,4		73,46

Fuente: elaboración propia

Gráfica 5. Dispersión del contenido de la humedad de B100-1 y B100-2



Fuente: elaboración propia

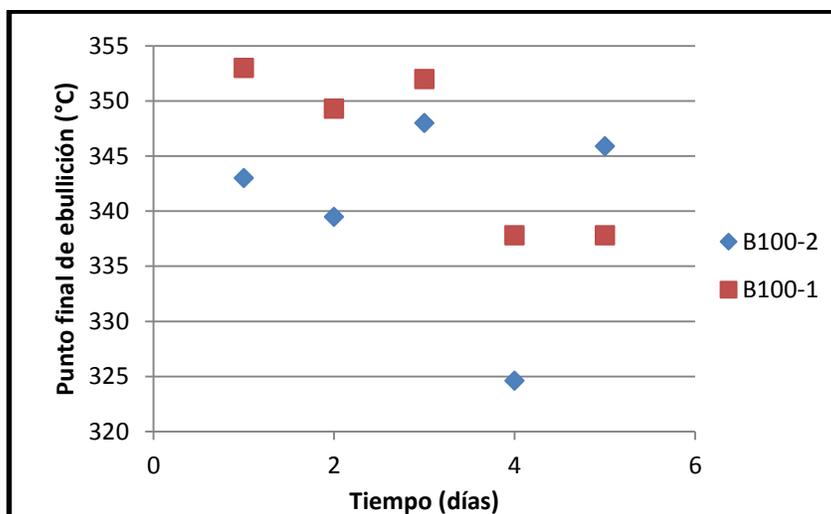
- **Punto final de ebullición.** Se observa en la Tabla 10 y en la Gráfica 6., los resultados obtenidos al aplicar esta prueba, donde se ilustra que esta propiedad cumple con los valores establecidos de la norma, donde B100-2 varía 4,8 grados de diferencia con respecto a B100-

Tabla 10. Comparación del punto final de ebullición de las muestras de B100-1 y B100-2.

Muestra de B100	Valor experimental promedio (°C)	Norma ASTM D86 (°C)	Desviación estándar
B100-1	345	Máximo 360	9,29
B100-2	340,2		7,59

Fuente: elaboración propia

Gráfica 6. Punto final de ebullición de las muestras B100-1 y B100-2.



Fuente: elaboración propia

La siguiente Tabla 11., presenta la recopilación de los resultados de las propiedades fisicoquímicas evaluadas para las muestras de B100-1 y B100-2, mediante una comparación experimentalmente y teórica; con el fin de observar claramente la efectividad del método de filtración implementado.

Tabla 11. Comparación de los resultados de la caracterización de las muestras de B100-1, B100-2.

Muestra	Pruebas					
	Densidad (kg/m ³)	Viscosidad (mm ² /s)	Contenido de humedad (mg/kg)	Contaminación total (mg/kg)	Punto final de ebullición (°C)	
B100-1	Valor experimental promedio	862,4	4,454	255,6	36,4	346
B100-2	Valor experimental promedio	860,1	4,418	240,4	22,6	340,2
	Valor teórico	860-900	1,9-6,0	< 500	< 24	<360

Fuente: elaboración propia

De acuerdo con lo anterior, se caracterizaron cinco propiedades fisicoquímicas del biodiesel final (B100-2), las cuales se compararon con valores del biodiesel inicial (B100-1), se evidencian que la implementación del método filtración por cartuchos es efectiva debido a que la contaminación total inicial se redujo un 13,8 mg/kg con respecto a la contaminación final; los valores que se registraron de las propiedades evaluadas al final disminuyeron con respecto a la caracterización inicial, la diferencia entre los valores experimentales promedio y teóricos de la densidad, viscosidad, contenido de humedad y punto final de ebullición, se encuentran dentro los límites superiores e inferiores que la norma establece.

Así mismo se puede observar que la desviación estándar del contenido de humedad es alta, lo que representa una gran dispersión en los datos que se hallaron de esta propiedad, puede ser que este alto contenido de dispersión entre los datos se deba a un error de medición o adquisición de agua por parte del ambiente.

Se realiza una comparación del biodiesel filtrado empleando la filtración por cartuchos y la filtración en frío propuesta en el trabajo de grado de Andrea Lorena Hernández⁵³, con el propósito de contrastar la efectividad de cada método en cuanto a la disminución de la contaminación total, en donde se observa que la filtración en frío disminuye 0,1 mg/kg más que la filtración por cartuchos, puesto que, se obtuvo una diferencia de 13,9 mg/kg y 13,8 mg/kg respectivamente. Dicho lo anterior queda demostrado que el método que se escogió es igual de efectivo que el método de filtración en frío.

⁵³ Hernández Martínez, Andrea Lorena. Desarrollo de una propuesta de disminución de los sedimentos (haze) generados en el proceso de fabricación de biodiésel de la empresa biodiésel de la costa para optar por el título de INGENIERO QUÍMICO, Fundación Universidad de América, facultad de ingenierías, programa ingeniería química, Bogotá D.C, 2016

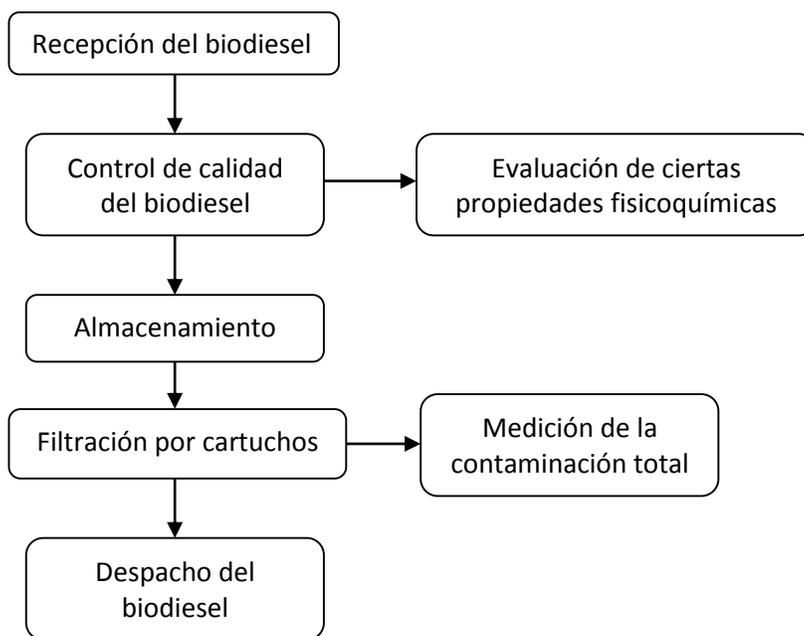
4. DISEÑO CONCEPTUAL DE LA FILTRACIÓN POR CARTUCHOS

En este capítulo se mostrará el desarrollo que se necesita para poder implementar la filtración por cartucho a escala industrial y el costo que se requiere para el funcionamiento de este método de filtración.

4.1 DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PROCESO DE FILTRACIÓN POR CARTUCHOS

En la Figura 9., se ilustra las etapas del procedimiento que se realiza al biodiesel empleando la alternativa seleccionada, que en este caso es la filtración por cartuchos.

Figura 9. Diagrama de bloques del proceso de filtración por Cartuchos



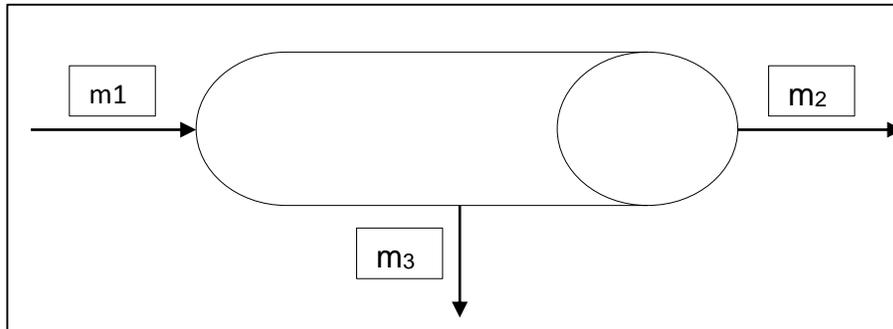
Fuente: elaboración propia

4.2 BALANCE DE MASA.

Se realiza un balance de masa para determinar el valor másico de la contaminación que se retira en el proceso de filtración por cartuchos del biodiesel, como se puede observar en la Figura 10. De acuerdo al diseño de la carcasa de filtración, se determina la cantidad de contaminación presente en el biodiesel, y de esta forma predecir la proporción de contaminación total en procesos a escala laboratorio, planta piloto y a escala industrial.

Este balance es un factor conceptual importante para la elaboración de un proceso, debido a que a través de estos balances se definen la generación de materia en un sistema definido. En este caso se implementa un balance de materia que sirve como base para establecer una aproximación de la cantidad de contaminación total en biodiesel que se retira por medio de la filtración por cartuchos.

Figura 10. Balance en flujos másicos



Fuente: elaboración propia

Balance global

Ecuación 1. Balance global de masa

$$m_1 = m_2 + m_3$$

Fuente: elaboración propia con base en, Sandoval, Juan. Balance de materia y energía, 2015

Donde:

m_1 : Carga inicial de biodiesel (1000 g)

m_2 : g de biodiesel obtenido sin soluto

m_3 : g de contaminación total retirada

Debido a que se conoce la carga inicial (m_1) se despeja m_2 en términos de m_1 , como se observa en la **Ecuación 2**

Ecuación 2. Despeje de la variable conocida

$$m_2 = m_1 - m_3$$

Fuente: elaboración propia

Del mismo modo se plantea la Ecuación 3., donde se supone un balance por la contaminación generada en la entrada, en la salida y la retención de suciedad del filtro, las cuales se encuentran representada por:

X₁: contaminación inicial del biodiesel

X₂: contaminación final del biodiesel

X₃: contaminación retirada del biodiesel

Ecuación 3. Balance global por componente

$$m_1x_1 = m_2x_2 + m_3x_3$$

Fuente: elaboración propia

Por lo tanto, se reemplaza la ecuación 2 en la 3, con el fin de hallar una de las variables desconocidas (m_2 , m_3 , X_3) en términos de las variables conocidas (m_1 , X_1 , X_2).

$$m_1x_1 = (m_1 - m_3)x_2 + m_3x_3$$

$$m_2 = \frac{m_1(x_1 - x_3)}{(x_2 + x_3)}$$

$$m_2 = \frac{1000 \text{ g}(x_1 - x_3)}{(x_2 + x_3)}$$

A continuación, en la Tabla 12., se presenta los valores de las variables conocidas (m_2 , X_1 y X_2), con estos datos que se tienen no es posible determinar las variables desconocidas (m_2 , m_3 y X_3) debido a que, existen dos ecuaciones con tres incógnitas. Por lo tanto, se deja planteado el balance de masa para un posterior estudio, en donde se halla analizado por lo menos la carga final del biodiesel.

Tabla 12. Resultados del balance de masa del sistema de filtración.

m₁ (g)	x₁ (mg/kg)	x₂ (mg/kg)
1000	49,8	32,7
1000	32,7	30,4
1000	33,6	23,4
1000	43,4	14,1
1000	65,2	40,4
1000	39,1	16,4
1000	33,5	30,7
1000	17,4	12,0
1000	22,0	18,1
1000	27,6	7,5

Fuente: elaboración propia

4.3 ESCALAMIENTO A NIVEL INDUSTRIAL

Este ítem define los parámetros necesarios para implementar la alternativa seleccionada en la planta, con el fin de llevar a cabo la propuesta, se comienza por seleccionar la carcasa de filtración que se adecue con los requerimientos de operación de la empresa, los cuales se pueden observar en la Tabla 13.

Tabla 13. Requerimientos de operación del biodiesel.

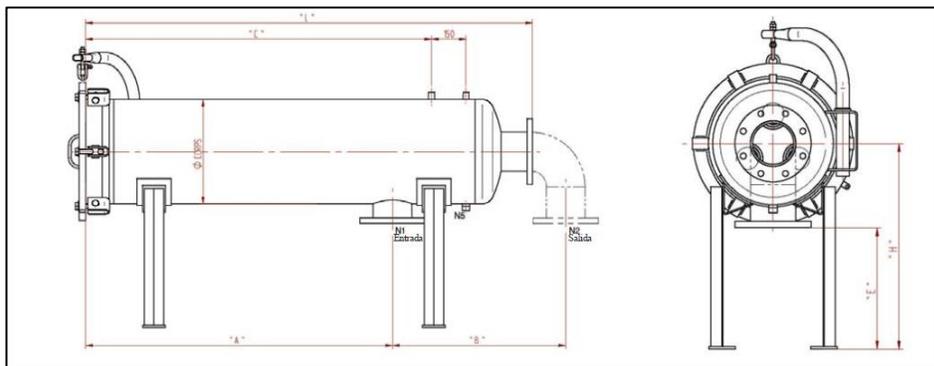
Parámetro	Especificación
Tipo de fluido	Biocombustible (biodiesel)
Flujo	50 - 150 gal/min
Tiempo de operación	15 hr diarias
Despacho	Promedio de 10.000 gal/ día

Fuente: elaboración propia

De acuerdo con las especificaciones que se mencionan en la Tabla 13., se procede a determinar el tamaño de la carcasa, teniendo en cuenta que se conoce la tecnología del cartucho, que en este caso es High Flow de 3M. Esta empresa maneja cartuchos de 40" y 60" de longitud, el parámetro para escoger entre las opciones mencionadas está dado por la retención de suciedad para un rango de flujo alto. Se debe tener en cuenta que la carga de suciedad es variable de acuerdo a la calidad del biodiesel que se esté empleando.

En este caso se escoge una carcasa horizontal para maximizar la operación, con una longitud de 60" y un diámetro de 6,5", está construido en acero inoxidable, admite un flujo máximo de 500 gpm, resiste una presión y una temperatura del fluido de 150 psig y 250 °F respectivamente, en la Figura 11., se muestra el diseño de la carcasa, las letras A, B, C, E, H y L representan las dimensiones aproximadas (mm) del portacartucho.

Figura 11. Vistas de la carcasa horizontal.



Fuente: 3M PURIFICATION INC. "3M™ High flow series Filter Systems. Innovative filtration solutions. Quality, consistency, performance". USA, 2013.

Después de haber determinado las características de diseño de la carcasa, se procede a definir la cantidad de medios filtrantes que serán introducidos en el cartucho de filtración, por medio de un criterio económico.

Se cuenta con cuatro tamaños de carcasa que dependen del número de filtros, en la Tabla 14., se muestra el precio de cada carcasa que a su vez son la inversión inicial del proyecto.

Tabla 14. Inversión inicial de los cuatro tamaños de carcasa

Carcasa	\$
1 medio filtrante	15.000.000
3 medios filtrante	28.000.000
5 medios filtrantes	36.000.000
8 medios filtrantes	45.000.000

Fuente: elaboración propia

Teniendo en cuenta el presupuesto que se requiere para implementar cada medio filtrante, se precisa determinar la cantidad de filtros que se usarán durante un periodo de 5 años, este tiempo es un supuesto de la duración del proyecto. Para realizar esta selección se hará uso de las gráficas provistas por la empresa 3M, aunque presentan ciertas limitaciones como:

- Están graficadas para una contaminación constante de 76 mg/kg
- Los ensayos realizados son para una presión máxima de 20 psi

Según lo descrito anteriormente se emplea estas graficas como referencia, debido a que los valores experimentales de contaminación que se obtuvieron de las pruebas de laboratorios, fluctúan entre 40 mg/kg y 70 mg/kg; además el diferencial de presión no afecta debido a que el flujo que se maneja es relativamente bajo.

Para ello es necesario determinar la capacidad de retención de suciedad de los filtros, para comprender cómo afecta esta capacidad a medida que aumenta o disminuye el flujo, debido a que la eliminación de partículas depende de la velocidad del flujo de biodiesel a través del filtro. De este modo se puede proyectar la vida útil del filtro individual y también determinar cuántos filtros se necesitan para cumplir con el cambio de filtros objetivos (como en número de días). A continuación, se muestran los cálculos de retención de carga másica o contaminación sólida que se debe retirar anualmente (ver Ecuación 4 y 5); se supone un escenario de 5 años y un despacho de combustible con un flujo constante.

Ecuación 4. Estimación de galones/ año

$$\frac{Gal}{año} = \left(\frac{Gal}{día}\right) * \left(\frac{Día}{semana}\right) * \left(\frac{semana}{año}\right)$$

Fuente: SÁNCHEZ, M. "SELECCIÓN CARCASA". 2018, IDEA INGENIERIA S.A.S. innovación en soluciones energéticas, p. 3

$$\frac{Gal}{día} = 10.000 ; \frac{Días}{semana} = 6 ; \frac{semana}{año} = 52$$

$$\frac{Gal}{año} = 10.000 * 6 * 52 = 3.120.000$$

Para determinar la carga másica, se emplea una contaminación de 76 mg/kg (este valor se toma de acuerdo a las Gráfica 7., debido a que es un valor muy cercano al máximo de 70 mg/kg que dio en las pruebas de experimentación). Se calcula la masa que se debe retirar de acuerdo a la Ecuación 5.

Ecuación 5. Estimación de la masa eliminada

$$Carga\ másica = \left(\frac{Gal}{año}\right) * (\text{contaminación total}) * (\rho_{biodiesel})$$

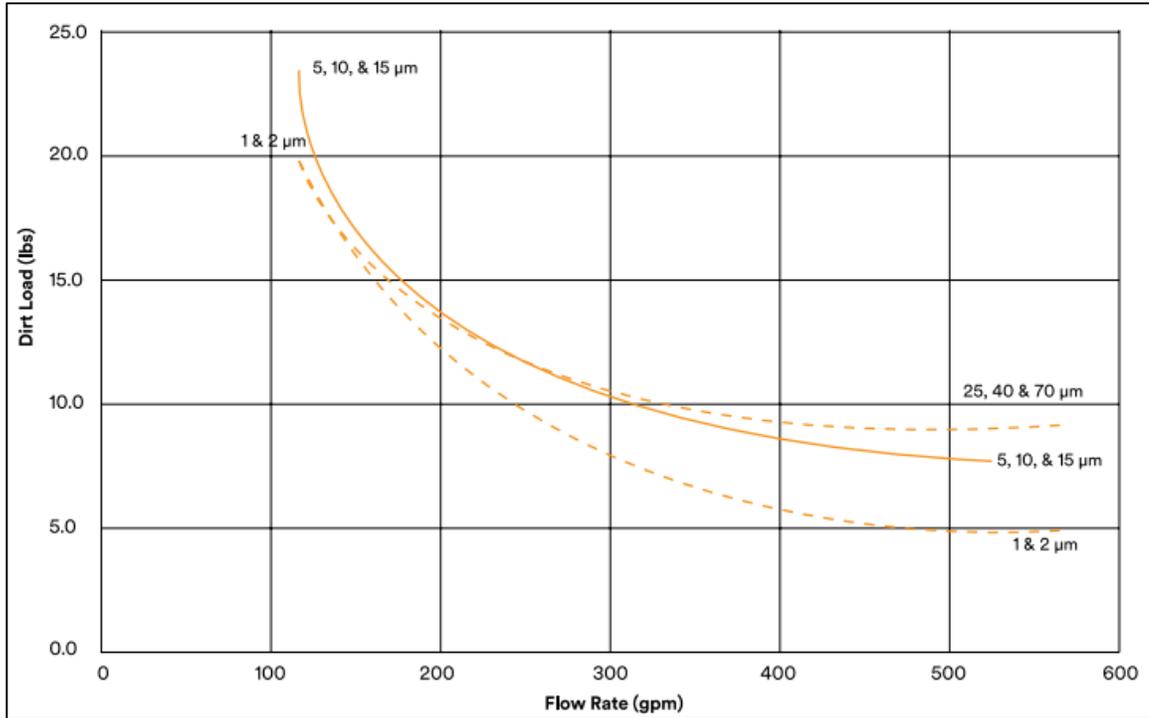
Fuente: SÁNCHEZ, M. "SELECCIÓN CARCASA". 2018, IDEA INGENIERIA S.A.S. innovación en soluciones energéticas, p. 3

$$Carga\ másica = 3.120.000\ gal * 76\ \frac{mg}{kg} * \left(860\ \frac{kg}{m^3} * \frac{3,785\ l}{1\ Gal} * \frac{1m^3}{1000\ l}\right)$$

$$Carga\ másica = 771.849.312\ mg * \frac{1mg}{1e^{-6}kg} = 771.85\ kg = 1698\ lbs$$

Calculada la carga másica, se procede a determinar el número de cartuchos que se necesitan anualmente por cada tamaño de carcasa, para ello se utiliza la Gráfica 7., donde se halla el Dirt load de cada carcasa.

Gráfica 7. Dirt load Vs flujo para cada tamaño de carcasa



Fuente: SCANLAN, T. “3M™ High flow Cartridges Dirt Loading & Filter System Sizing”. USA, 2015.

Para una carcasa de un cartucho se utilizará un flujo de diseño de 150 gpm, el cual es el máximo flujo que se emplea en la operación. Además, se va a emplear un cartucho de 40 µm para cada carcasa. Teniendo en cuenta los aspectos anteriores se procede a establecer el Dirt load para cada tamaño de carcasa de acuerdo al micraje del cartucho; estos datos se hallan mediante una extrapolación de los valores del eje Y de la Gráfica 7, teniendo en cuenta el flujo por cada cartucho.

- Carcasa de un cartucho con un flujo de 150 gpm

$$Dirt\ load\ (lbs)_{aprox} = 16\ lbs = 7,27\ kg$$

- Carcasa de tres cartuchos. El flujo para cada cartucho es un tercio del flujo total, entonces:

$$\frac{flujo}{cartucho} = \frac{1}{3} flujo\ total = \frac{1}{3} (150\ gpm) = 50\ gpm$$

$$Dirt\ load\ (lbs)_{aprox} = 25\ lbs = 11,36\ kg$$

•Carcasa de cinco cartuchos. El flujo para cada cartucho es un quinto del flujo total, entonces:

$$\frac{\text{flujo}}{\text{cartucho}} = \frac{1}{5} \text{flujo total} = \frac{1}{5} (150 \text{ gpm}) = 30 \text{ gpm}$$

$$\text{Dirt load (lbs) aprox} = 30 \text{ lbs} = 13,64 \text{ kg}$$

•Carcasa de ocho cartuchos. El flujo para cada cartucho es un octavo del flujo total, entonces:

$$\frac{\text{flujo}}{\text{cartucho}} = \frac{1}{8} \text{flujo total} = \frac{1}{8} (150 \text{ gpm}) = 19 \text{ gpm}$$

$$\text{Dirt load (lbs)} = 33 \text{ lbs} = 14,74 \text{ kg}$$

Debido a la experiencia se sabe que, a mayor caudal, el número de cartuchos requeridos aumenta, un caudal de 150 gpm no es un caudal representativo. Si se observa esta tecnología se llama High flow, lo que quiere decir que se usa para caudales elevados. Los valores registrados en la parte de arriba de Dirt Load se hallan mediante una extrapolación de los datos de la Gráfica 7. Ahora determinamos el número de cartuchos por cada carcasa según la Ecuación 6.

Ecuación 6. Estimación del número de cartuchos por carcasa

$$N^{\circ} \text{ de cartuchos} = \frac{\text{Carga másica}}{\text{Dirt Load (lbs)}}$$

Fuente: SÁNCHEZ, M. "SELECCIÓN CARCASA". 2018, IDEA INGENIERIA S.A.S. innovación en soluciones energéticas, p. 4

•Carcasa de un cartucho

$$N^{\circ} \text{ de cartuchos} = \frac{1698 \text{ lbs}}{16 \text{ lbs}} = 107$$

• Carcasa de tres cartuchos

$$N^{\circ} \text{ de cartuchos} = \frac{1698 \text{ lbs}}{25 \text{ lbs}} = 68$$

• Carcasa de cinco cartuchos

$$N^{\circ} \text{ de cartuchos} = \frac{1698 \text{ lbs}}{30 \text{ lbs}} = 57$$

- Carcasa de ocho cartuchos

$$N^{\circ} \text{ de cartuchos} = \frac{1698 \text{ lbs}}{33 \text{ lbs}} = 52$$

Tabla 15. Resumen del diseño conceptual.

Carcasa	N° de cartuchos/año	Dirt load (kg)
1 medio filtrante	107	7,27
3 medios filtrante	68	11,36
5 medios filtrantes	57	13,64
8 medios filtrantes	52	14,74

Fuente: elaboración propia

De acuerdo con los datos que se registraron en la Tabla 15., se procede a escoger la carcasa que se va utilizar en la línea de biodiesel. Para determinar la mejor alternativa se emplea el valor presente neto como indicador en la evaluación de proyectos, con el propósito de determinar la viabilidad de la inversión basándose en valores positivos y negativos, obtenidos del análisis de los ingresos y egresos. Para el análisis financiero del proyecto, los ingresos se consideraron como la cantidad de galones promedio producidos anualmente multiplicados por el precio de venta de un galón de biodiesel. Se consideró un promedio de producción diaria de 10.000 galones multiplicado por 312 días al año de operación de la planta. El valor de venta de cada galón se asumió como \$9.532,46⁵⁴.

Por otro lado, los egresos fueron considerados como el costo anual de los filtros y el costo anual de mantenimiento y operación. La inversión inicial se asumió como el costo de la carcasa (ver Tabla 14) en año cero.

A continuación, en la Ecuación 7., se muestra el resultado que se obtuvo durante la aplicación de este método financiero, en un plazo de cinco años.

Ecuación 7. Valor presente neto

$$VPN = -I + \left(\frac{In - CFA - CMO}{(1 + i)^1} \right) + \dots + \left(\frac{In - CFA - CMO}{(1 + i)^n} \right)$$

Fuente: THE TIE. Valor presente neto. [consultado el 8 de noviembre de 2018]. Disponible en: <<http://tiie.com.mx/valor-presente-neto/>>

⁵⁴ Fedebiocombustibles. Indicadores de precio del biodiesel. Noviembre 2018. [en línea] <<http://www.fedebiocombustibles.com/estadistica-precios-titulo-Biodiesel.htm>>. [citado noviembre 2018]

Donde:

I: inversión inicial

In: ingresos

CFA: costo de los filtros anuales

CMO: costos de mantenimiento y operación

n: número de períodos vencidos, que son 5 años, en los cuales se evalúa el proyecto.

i: la tasa de interés que es de un 20%, la cual representa la tasa mínima a la que la empresa realizará una inversión.

Por otra parte, se procede a determinar los diferentes aspectos que componen la Ecuación 7. Ahora veamos, la inversión inicial hace referencia a los costos que se presentaron anteriormente en la Tabla 14., los CFA se calculan empleando un gradiente geométrico, el cual estima el incremento de los costos anuales de los filtros (ver Ecuación 8); finalmente se evalúa el CMO a través del modelo de anualidades anticipadas (ver Ecuación 9).

Ecuación 8. Gradiente geométrico de CFA

$$VP = R_1 \left(\frac{(1 + G)^n * (1 + i)^{-n} - 1}{G - i} \right)$$

Fuente: FINANZAS 9 Y 6. Gradiente geométrico. [Consultado el 10 noviembre de 2018]. Disponible en: <<https://www.finanzas9y6.com/gradiente-geometrico/>>

Donde:

VP: valor presente o principal

R₁: número de flujos de efectivo del mismo monto el cual se obtiene de multiplicar el valor de un solo filtro que corresponde a \$ 500.000 por el número de cartuchos que se obtuvieron anteriormente.

G: interés de crecimiento geométrico, el cual tiene un valor de 3,10% que hace referencia a la inflación del país.

i: la tasa de interés que es de un 20%, la cual representa la tasa mínima a la que la empresa realizará una inversión.

n: número de períodos vencidos, que son 5 años, en los cuales se evalúa el proyecto.

- Carcasa de un cartucho

$$VP = \$ 53.500.000 \left(\frac{(1 + 0,0310)^5 * (1 + 0,2)^{-5} - 1}{0,0310 - 0,2} \right) = \$ 168.366.010$$

- Carcasa de tres cartuchos

$$VP = \$ 34.000.000 \left(\frac{(1 + 0,0310)^5 * (1 + 0,2)^{-5} - 1}{0,0310 - 0,2} \right) = \$ 106.998.960$$

- Carcasa de cinco cartuchos

$$VP = \$ 28.500.000 \left(\frac{(1 + 0,0310)^5 * (1 + 0,2)^{-5} - 1}{0,0310 - 0,2} \right) = \$ 89.690.304$$

- Carcasa de ocho cartuchos

$$VP = \$ 26.000.000 \left(\frac{(1 + 0,0310)^5 * (1 + 0,2)^{-5} - 1}{0,0310 - 0,2} \right) = \$ 81.822.734$$

Ecuación 9. Costo de mantenimiento y operación (CMO)

$$P = R \left(\frac{(1 + i)^n - 1}{i * (1 + i)^n} \right)$$

Fuente: FINANZAS 9 Y 6. Valor presente de una anualidad. [Consultado el 10 noviembre de 2018]. Disponible en: <<https://www.finanzas9y6.com/valor-presente-de-una-anualidad/>>

Donde:

P: valor presente

R: es el número de flujos de efectivo del mismo monto, este corresponde al 2% del valor de compra de la carcasa, estos valores de compra están plasmados en la Tabla 14

i: la tasa de interés que es de un 20%, la cual representa la tasa mínima a la que la empresa realizará una inversión.

n: número de periodos vencidos, que son 5 años, en los cuales se evalúa el proyecto.

- Carcasa de un cartucho

$$P = \$ 4.500.000 \left(\frac{(1 + 0,2)^5 - 1}{0,2 * (1 + 0,2)^5} \right) = \$ 13.457.755$$

- Carcasa de tres cartuchos

$$P = \$ 8.400.000 \left(\frac{(1 + 0,2)^5 - 1}{0,2 * (1 + 0,2)^5} \right) = \$ 25.121.142$$

- Carcasa de cinco cartuchos

$$P = \$ 10.80.000 \left(\frac{(1 + 0,2)^5 - 1}{0,2 * (1 + 0,2)^5} \right) = \$ 32.298.611$$

- Carcasa de ocho cartuchos

$$P = \$ 13.500.000 \left(\frac{(1 + 0,2)^5 - 1}{0,2 * (1 + 0,2)^5} \right) = \$ 11.250.000$$

Para determinar el VPN se realiza un flujo de caja para cada una de las carcacas (ver Tabla 16-19), con el propósito de hallar el flujo de caja libre. El flujo de caja libre, se calcula a través del flujo operativo teniendo en cuenta los costos, los ingresos y los egresos, del mismo modo se considera el flujo de inversión, el cual no se financia año a año debido a que, se realiza una única inversión inicial en el año cero.

Basándose en la suma de los parámetros mencionados anteriormente, se obtiene el flujo de caja libre y de este modo el neto de ganancias y pérdidas para cada año; estos valores resultantes se llevan al año cero, con el fin de hallar el valor presente neto. Según los resultados que obtuvieron de los respectivos VPN, se define que la carcasa más viable, es la de cinco cartuchos. Debido a que fue el VPN más bajo que se obtuvo, con respecto a las otras tres opciones evaluadas, con un valor total de **\$ 44.191.505.968,45**; al obtener un valor positivo de VPN como este, se define que es viable, debido que se recupera la inversión inicial y se generan ganancias anuales a lo largo del proyecto.

Por último, en la Figura 12., se presenta el diagrama de instalación de la carcasa con cinco cartuchos dentro de la línea de despacho de biodiesel.

Tabla 16. VPN para carcasa de un cartucho

Flujo de caja para carcasa de un cartucho						
	0	1	2	3	4	5
Galones totales Producidos (gal/Año)		1.560.000	1.560.000	1.560.000	1.560.000	1.560.000
Ingresos		\$ 14.870.637.600,00	\$ 14.870.637.600,00	\$ 14.870.637.600,00	\$ 14.870.637.600,00	\$ 14.870.637.600,00
Costo operativo y mantenimiento		-\$ 3.750.000	-\$ 6.875.000	-\$ 9.479.167	-\$ 11.649.306	-\$ 13.457.755
Costo filtros		-\$ 53.500.000,00	-\$ 82.887.847	-\$ 115.797.809	-\$ 144.072.951	-\$ 168.366.010
Flujo Operativo		\$ 14.813.387.600,00	\$ 14.774.291.998,15	\$ 14.745.360.624,59	\$ 14.714.915.343,77	\$ 14.688.813.835,25
Flujo de inversión	-\$ 15.000.000,00	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0
Flujo de caja libre VPN	-\$ 15.000.000,00	\$ 14.813.387.600,00	\$ 14.774.291.998,15	\$ 14.745.360.624,59	\$ 14.714.915.343,77	\$ 14.688.813.835,25
						\$ 44.222.027.652,13

Fuente: elaboración propia

Tabla 17. VPN para carcasa de tres cartuchos

Flujo de caja para carcasa de tres cartuchos						
	0	1	2	3	4	5
Galones totales Producidos (gal/Año)		1.560.000	1.560.000	1.560.000	1.560.000	1.560.000
Ingresos		\$ 14.870.637.600,00	\$ 14.870.637.600,00	\$ 14.870.637.600,00	\$ 14.870.637.600,00	\$ 14.870.637.600,00
Costo operativo y mantenimiento		-\$ 7.000.000	-\$ 12.833.333	-\$ 17.694.444	-\$ 21.745.370	-\$ 25.121.142
Costo filtros		-\$ 34.000.000,00	-\$ 52.676.389	-\$ 73.591.131	-\$ 91.560.380	-\$ 106.998.960
Flujo Operativo		\$ 14.810.137.600,00	\$ 14.762.628.610,80	\$ 14.737.145.346,82	\$ 14.704.819.278,96	\$ 14.677.150.447,90
Flujo de inversión	-\$ 28.000.000,00	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0
Flujo de caja libre VPN	-\$ 28.000.000,00	\$ 14.810.137.600,00	\$ 14.762.628.610,80	\$ 14.737.145.346,82	\$ 14.704.819.278,96	\$ 14.677.150.447,90
						\$ 44.195.551.151,19

Fuente: elaboración propia

Tabla 18. VPN para carcasa de cinco cartuchos

Flujo de caja para carcasa de cinco cartuchos						
	0	1	2	3	4	5
Galones totales		1.560.000	1.560.000	1.560.000	1.560.000	1.560.000
Producidos (gal/Año)						
Ingresos		\$ 14.870.637.600,00	\$ 14.870.637.600,00	\$ 14.870.637.600,00	\$ 14.870.637.600,00	\$ 14.870.637.600,00
Costo operativo y mantenimiento		-\$ 9.000.000	-\$ 16.500.000	-\$ 22.750.000	-\$ 27.958.333	-\$ 32.298.611
Costo filtros		-\$ 28.500.000,00	-\$ 44.155.208	-\$ 61.686.683	-\$ 76.749.142	-\$ 89.690.304
Flujo Operativo		\$ 14.833.137.600,00	\$ 14.794.183.780,56	\$ 14.786.200.916,84	\$ 14.765.930.124,72	\$ 14.748.648.684,43
Flujo de inversión	-\$ 36.000.000,00	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0
Flujo de caja libre	-\$ 36.000.000,00	\$ 14.833.137.600,00	\$ 14.794.183.780,56	\$ 14.786.200.916,84	\$ 14.765.930.124,72	\$ 14.748.648.684,43
VPN			\$ 44.191.505.968,45			

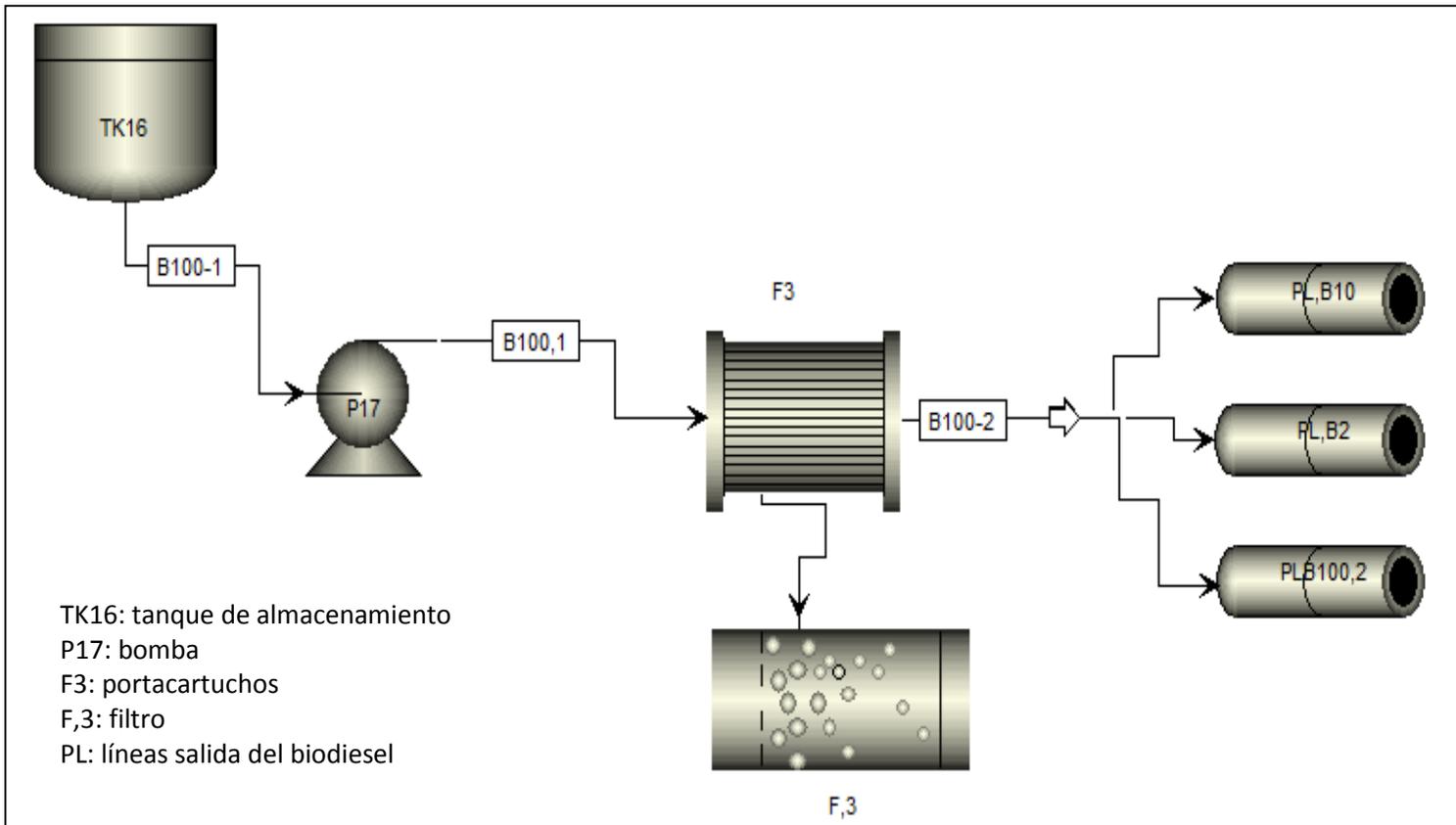
Fuente: elaboración propia

Tabla 19. VPN para carcasa de ocho cartuchos

Flujo de caja para carcasa de ocho cartuchos						
	0	1	2	3	4	5
Galones totales		1.560.000	1.560.000	1.560.000	1.560.000	1.560.000
Producidos (gal/Año)						
Ingresos		\$ 14.870.637.600,00	\$ 14.870.637.600,00	\$ 14.870.637.600,00	\$ 14.870.637.600,00	\$ 14.870.637.600,00
Costo operativo y mantenimiento		-\$ 11.250.000	-\$ 20.625.000	-\$ 28.437.500	-\$ 34.947.917	-\$ 11.250.000
Costo filtros		-\$ 26.000.000,00	-\$40.281.944	-\$56.275.571	-\$70.016.761	-\$81.822.734
Flujo Operativo		\$ 14.833.387.600,00	\$ 14.789.982.391,67	\$ 14.785.924.529,40	\$ 14.765.672.922,26	\$ 14.748.441.602,22
Flujo de inversión	-\$ 45.000.000,00	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0
Flujo de caja libre	-\$ 45.000.000,00	\$ 14.833.387.600,00	\$ 14.789.982.391,67	\$ 14.785.924.529,40	\$ 14.765.672.922,26	\$ 14.748.441.602,22
VPN			\$ 44.203.582.471,11			

Fuente: elaboración propia

Figura 12. Diagrama de flujo del proceso de filtración por cartuchos del biodiesel.



Fuente: elaboración propia

5. CONCLUSIONES

- Por medio de una caracterización del biodiesel recepcionado, se obtuvieron unas condiciones iniciales, las cuales revelaron una contaminación total de 36,4 mg/kg, lo que indica un alto contenido de material particulado en el biodiesel perjudicando la calidad del producto a tratar.
- Se implementó una matriz de selección que evaluó la eficiencia, la vida útil, los equipos y los costos de operación y mantenimiento, mediante una escala de 1 a 5 y valorándolos a través de porcentajes proporcionados por parte de la empresa y bibliográficamente, se seleccionó la alternativa de filtración por cartucho obteniendo un puntaje total de 4,1, convirtiéndola en la mejor opción que se adapta a las necesidades que actualmente requiere la empresa.
- Por otra parte, al final se compararon dos muestras de biodiesel, la primera, que corresponde al biodiesel recepcionado y el segundo que es el filtrado, se les realizó una caracterización y se detectó que el biodiesel inicial contiene una concentración de 13,8 mg/kg de contaminantes mayor que el filtrado.
- A partir del desarrollo experimental elaborado, se determinó que el mejor medio filtrante para implementarse en la filtración por cartuchos es la tecnología High Flow, con un código de limpieza ISO 4406 de 17/15/12, garantizando un medio filtrante adecuado para la retención de contaminantes sólidos presentes en el biodiesel, así como la limpieza y la mejora de la calidad del mismo.
- Se pudo concluir que la filtración por cartuchos a través de una carcasa con cinco cartuchos, es la mejor opción en cuanto a diseño, rentabilidad y calidad del producto. Teniendo en cuenta el estudio financiero de los ingresos y egresos anuales de esta alternativa, obteniendo como resultado un valor de \$ 44.191.505.968,45, y un nivel de contaminación promedio de 22,6 mg/kg del biodiesel filtrado (B100-2).

6. RECOMENDACIONES

- Se debe tener en cuenta algunos aspectos que se pueden ver afectados al momento de la implementación a nivel industrial, de las alternativas de filtración, como: la adecuación de espacio, el impacto ambiental a gran escala entre otros.
- Es importante tener en cuenta para estudios posteriores, la disposición de los contaminantes obtenidos a nivel industrial, debido a que pueden afectar el medio ambiente.
- Se sugiere revisar las alternativas de filtración de remojo en frío y filtración por mangas que no fueron aplicadas a nivel laboratorio, para posibles estudios, logrando convertir estas alternativas en opciones viables para la disminución de contaminantes sólidos del biodiesel.
- Se recomienda realizar un estudio sobre la composición orgánica e inorgánica de la contaminación total, con el fin de conocer a ciencia cierta el contenido de compuestos de dicha contaminación.
- Se sugiere evaluar diferentes métodos de purificación para disminuir contaminantes sólidos del biodiesel y estimar la viabilidad de la implementación a nivel industrial.
- Se sugiere realizar la experimentación de la filtración por cartuchos a diferentes temperaturas, para analizar la influencia de esta propiedad en la generación de los sedimentos que originan la contaminación total.
- Se recomienda para estudios posteriores desarrollar el balance de masa planteado en este proyecto y así poder determinar aproximadamente la cantidad de masa que se retira del sistema de filtración.

BIBLIOGRAFÍA

ALFONZO, Francisco. ¿Qué tan importante es el código de contaminación solida ISO 4406:99? En: Noria Latín América [en línea]. <http://noria.mx/lublearn/que-tan-importante-es-el-codigo-decontaminacion-solida-iso-440699/> [Citado en agosto 2018]

AMERICAN STANDARD TEST METHOD. Determination of Total Monoglycerides, Total Diglycerides, Total Triglycerides, and Free and Total Glycerin in B-100 Biodiesel. ASTM D6584, 2017.

BENJUMEA Pedro, AGUDELO Jhon, RÍOS Luis. Biodiésel: producción, calidad y caracterización. Universidad de Antioquia, 2009, p.72,

_____. Biodiésel, Materias Primas, Primera edición, Manizales, Caldas, Colombia, Universidad Nacional de Colombia sede Manizales, 2009, p. 22

CUÉLLAR, M. Características del biodiesel de palma y las mezclas. Foro nacional de buenas prácticas de manejo de biodiesel y sus mezclas. Fedepalma. p. 23.

DANZER, Myron, ELY, Timothy. MCCALLEY, Wayne. MOSTEK, Jhon y SCHULTES Matthew. United States Patent Danzer et al. Biodiesel cold filtration process.US 9,109,170 B2. Estados Unidos, 18 de agosto de 2015.

FEDEBIOCOMBUSTIBLES. Indicadores de precio del biodiesel. Noviembre 2018. [En línea] <<http://www.fedebiocombustibles.com/estadistica-precios-titulo-Biodiesel.htm>>. [Citado noviembre 2018]

GERPEN, J. V.; SHANKS, B.; PRUSZKO, R.; CLEMENTS, D.; KNOTHE, G. Biodiesel Analytical Methods. <http://www.nrel.gov/docs/fy04osti/36240.pdf> (24 of March of 2009)

KNOTHE, G. Dependence of biodiesel fuel properties on the structure of fatty acid alkyl esters. Fuel Processing Technology, 86(10) 2005, p.1059-1070. doi: 10.1016/j.fuproc. 2004.11.002.

GÓMEZ, M. El aceite de palma africana *elae guineensis*: Alternativa de recurso energético para la producción de biodiesel en Colombia y su impacto ambiental. En: Prospect [en línea]. No. 1 (2014). Recuperado desde <<http://www.scielo.org.co/pdf/prosp/v12n1/v12n1a11.pdf>> [Citado en marzo de 2018]

HERNÁNDEZ MARTÍNEZ, Andrea Lorena. Desarrollo de una propuesta de disminución de los sedimentos (haze) generados en el proceso de fabricación de biodiésel de la empresa biodiésel de la costa para optar por el título de INGENIERO

QUÍMICO, Fundación Universidad de América, facultad de ingenierías, programa ingeniería química, Bogotá D.C, 2016

HIDALGO Xavier. La humedad en la biomasa: herramientas de medida y control. Energética [en línea]. <http://www.energetica21.com>. [Citado Agosto 2018]

HOOKEY, Gordon J. Standard test method for density and reality desnsity of liquids. ASTM D4052. Washington D.C.: ASTM STANDARD, 1984.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Compendio de normas para trabajos escritos. NTC-1486-6166. Bogota D.C.: El instituto, 2018. ISBN 9789588585673 153 p.

INTERNATIONAL STANDARD. Petroleum products- Determination of Water - Coulometric Karl Fisher Titration method. ISO 12937, Standard Test, 2000.

3M PURIFICATION INC. “3M™ High flow series Filter Systems. Innovative filtration solutions. Quality, Consistency, performance”. USA, 2013.

MILIARIUM Ingeniería civil y Medio ambiente. Aplicaciones del biodiesel [en línea]. <http://www.miliarium.com/Bibliografia/Monografias/Biocombustibles/AplicacionesBiodiesel.asp>. [Citado en marzo de 2018]

MITTELBAACH, M., Diesel fuel derived from vegetable oils, VI: specifications and quality control of biodiesel. Bioresource Technology 1996, 56, (1), 7-11.

NELSON, Kessel. ASTM establece las normas para biodiésel [en línea]. <https://www.astm.org/SNEWS/SPANISH/SPJF09/nelson_spjf09.html>. [Citado en marzo de 2018]

PEÑA A. B., CÉSPEDES J. M. (2000) Fisicoquímica- Manual de Laboratorio - 1ra Edición, Universidad de Medellín, Medellín

Purificación de fluidos. Selfitra purificación de fluidos. Disponible en internet: www.selfitra.com. [Citado el: 31 de Agosto de 2018].

RIBA J, BAQUERO G, PUIG R, RIUS A. Characterization of physical properties of vegetable oils to be used as fuel in diesel engines. Afinidad 66(546), 101-102, 2010.

SCANLAN, T. “3M™ High flow Cartridges Dirt Loading & Filter System Sizing”. USA, 2015.

LENNTECH. Soluciones de tratamiento. Disponible en internet: <https://www.lenntech.com>. [Citado el: 31 de agosto de 2018]

STANDARD EUROPEAN. Determination of Methanol Content in Pure Biodiesel. EN 14110:2003

STANDARD EUROPEAN. Determination of Total FAME and Linolenic Acid Methyl Esters in Biodiesel. EN 14103:2003

STANDARD EUROPEAN. Liquid petroleum products – Determination of total contamination in middle distillates, diesel fuels and fatty acid methyl esters. EN 12662, 2008.

STANDARD EUROPEAN. Method for the determination of the Iodine Value in B100 biodiesel. UNE-EN 14111, 2003.

STANDARD AMERICAN NACIONAL. Standard test method for Distillation of petroleum products at atmospheric pressure. ASTM D86-07. United States, 2007.

STANDARD AMERICAN NACIONAL. Standard test method for Kinematic viscosity of transparent and opaque liquids. ASTM D445.

VATAVUK, William. Filtros y casa de bolsas. Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, pág 1-8, diciembre de 1998.

_____. Obtención de biodiesel por transesterificación de aceites vegetales: nuevos métodos de síntesis. Tesis Doctoral. Universidad de Extremadura. Facultad de Ciencias. Departamento de Ingeniería Química y Química Física. (2012), pág 18

WILHARM, Thomas M. Sedimentos que afecta la calidad. En: Palmas, 2 010. Vol. 31 No. Especial, Tomo II. Alemania: ASG Analytik-Service GmbH. p. 5.

SHARMA, Y, SINGH, B, & UPADHYAY, S. Advancements in development and characterization of biodiesel: A review. Fuel, 87(12) 2008, pp. 2355-2373. doi: 10.1016/j.fuel.2008.01.014.

ANEXOS

ANEXO A.
EQUIPOS UTILIZADOS EN LA CARACTERIZACION DE B100-1 Y B100-2.

Ilustración 5. Equipo de Karl .
Fischer



Fuente: elaboración propia

Ilustración 6. Equipo para
punto de destilación



Fuente: elaboración propia

Ilustración 7. Densímetro.



Fuente: elaboración propia

ANEXO B.
GUÍA DE LABORATORIO PARA DETERMINACIÓN DE CONTAMINACIÓN TOTAL

GUÍA DE LABORATORIO N° 01 IDAE

DETERMINACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN TOTAL EN DIÉSEL Y BIODIESEL

Objetivo general

Determinar la cantidad de contaminación total presente en el diésel (B2), biodiesel (B100) y mezcla (B10), usando métodos aproximados.

Objetivos específicos

- Determinar, a través de un equipo contador de partículas PAMAS, la distribución en tamaño de las partículas sólidas contenidas en las corrientes de B2, B100 y B10.
- Adaptar estándares internacionales con el fin de estimar la masa de contaminantes de las corrientes B2, B100 y B10.
- Establecer una correlación entre la contaminación total y el código ISO 4406.
- Proponer y evaluar alternativas de solución para establecer las causas de contaminación total presente en el biodiesel y cómo mitigarlas.

1. MARCO TEÓRICO

Colombia demanda ciertos requerimientos del biodiesel, por lo tanto, es necesario conocer la demanda de diésel y el porcentaje de mezcla que se reglamenta mediante la ley 939 de 2004 la cual incentiva la producción y comercialización de biocombustibles de origen vegetal o animal para uso en motores diésel. En Colombia el diésel es uno de los tres combustibles de origen fósil que se emplea en el sector de transporte. El diésel es un hidrocarburo líquido compuesto por parafinas el cual se obtiene por la destilación del petróleo crudo, requiere una remoción de azufre y otras sustancias, es más pesado y tiene un alto poder calorífico, generando grandes cantidades de dióxido de carbono durante su combustión.

El biodiesel es un biocombustible que se produce a través de una reacción de transesterificación en presencia de un alcohol, se emplea como materia prima aceites vegetales o grasas animal. Este biocombustible puede usarse como sustituto total (B100); también mezclado con diésel, por ejemplo (B30); o en una proporción más baja, considerado como aditivo ya que solo representa del 1 al 5%

de la mezcla. Las denominaciones B5, B10, B20, B30, etc. Indican la proporción (%) de biodiesel utilizado⁵⁵.

Las propiedades del biodiesel se ven afectadas por los subproductos que se generan tales como los acil estéril glucósidos, los cuales liberan el grupo acilo denominado estéril glucósido (SG) que es elemento común de los aceites vegetales, debido a que no son solubles en el biodiesel su cristalización es lenta formando aglomerado de diferentes tamaños de partícula de 10-15 micras y dependiendo de la temperatura se acelera la aparición de los precipitados. Estas partículas promueven la cristalización de otros compuestos⁵⁶.

Se realiza un proceso de refinación de los aceites vegetales antes y después de la producción de biodiesel, con el fin de reducir el contenido de SG que se presenta incluso cuando el biodiesel está puro. Las bajas temperaturas aceleran las aglomeraciones que se depositan en el fondo del tanque de almacenamiento afectando así la calidad del biodiesel. Todos estos sedimentos que se forman en el fondo del tanque de almacenamiento después de 24 horas de producido el biodiesel, se le conoce como “Haze”, el cual es un sólido que se forma a temperaturas cercanas al punto de nube del biodiesel, y que depende de cofactores como el contenido de monoglicéridos, de agua, de jabones y estéril glucósidos que se miden por el parámetro de Contaminación Total.

La contaminación total de combustible es la medida del material insoluble de tamaño mayor a 0,8 micrones. Las muestras de ésteres metílicos de los ácidos grasos (FAME) con altas cantidades de materiales insolubles tienden a causar taponamiento en los tanques de almacenamiento, en los filtros de los motores y las bombas de inyección. Las concentraciones de jabones y de sedimentos se asocian con la aparición de concentraciones altas de contaminación total. Se determina por medio de la Norma EN 12662-14 la cual establece un máx. De 24 mg/kg.

Para determinar la cantidad de contaminación total que existe en una muestra de combustible se pesa y se filtra a través de una membrana filtrante previamente pesada. El filtro con el residuo se lava, se seca y se pesa. La contaminación se calcula a partir de la diferencia de masa en el filtro, antes y después de la filtración (ver ecuación 1). La contaminación se expresa en relación con la masa de la muestra en $\frac{mg}{Kg_{muestra}}$.

Ecuación 1. Fórmula de Contaminantes Totales.

$$\mu = \frac{1000 (m2 - m3)}{mE}$$

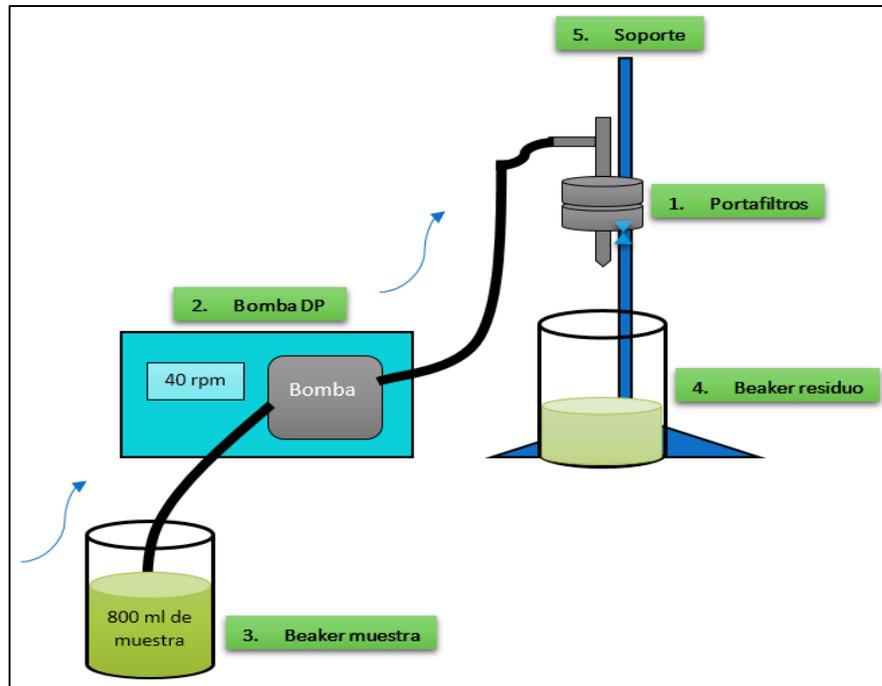
⁵⁵ Gómez, M. (2014). El aceite de palma africana *elae guineensis*: Alternativa de recurso energético para la producción de biodiesel en Colombia y su impacto ambiental. *Prospect*, 12 (1). Recuperado desde <<http://www.scielo.org.co/pdf/prosp/v12n1/v12n1a11.pdf>>

⁵⁶ WILHARM, Thomas M. Sedimentos que afectan la calidad. En: Palmas,2010. Vol. 31 No. Especial, Tomo II. Alemania: ASG Analytik-Service GmbH. p. 5.

Dónde:

- μ = Contaminación total
- m_1 = La masa del filtro, en mg.
- m_2 = La masa del filtro junto con los contaminantes sólidos, en mg.
- m_E = La masa de la porción de muestra, en g.

2. MONTAJE EXPERIMENTAL



Fuente: elaboración propia

3. MATERIALES, EQUIPOS Y REACTIVOS

3.1 MATERIALES

- Pinzas metálicas de 12 cm largo, punta plana.
- 2 Matraz kitasatos de 1000 ml
- 1 Embudo Buchner
- 1 Beakers de 1000 ml
- 1 Probeta de 1000 ml
- Cajas de Petri de 60 mm de diámetro.
- 1 Atomizador de 1000 ml
- Filtros PTFE (Zefluor) membrana de 37 mm y un tamaño de poro de 1 μm
- Toallas absorbentes

3.2 EQUIPOS

- Horno para de convección natural para operar a $(105 \pm 5) ^\circ \text{C}$
- Desecador con gel de sílice.
- Balanza analítica con una precisión de 0,001g
- Balanza analítica con precisión de 1g
- Cronómetro
- Bomba de vacío
- Porta filtros de 37 mm
- Agitador con calentador
- PAMAS 40S

3.3 REACTIVOS

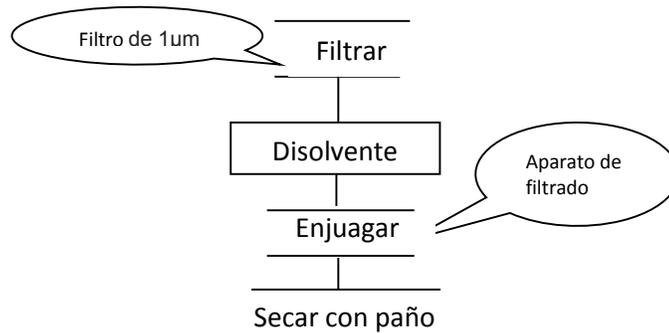
- Avgas

4. PROCEDIMIENTO

4.1 Preparación de los aparatos

Limpiar todos los componentes del aparato de filtración como se describe a continuación:

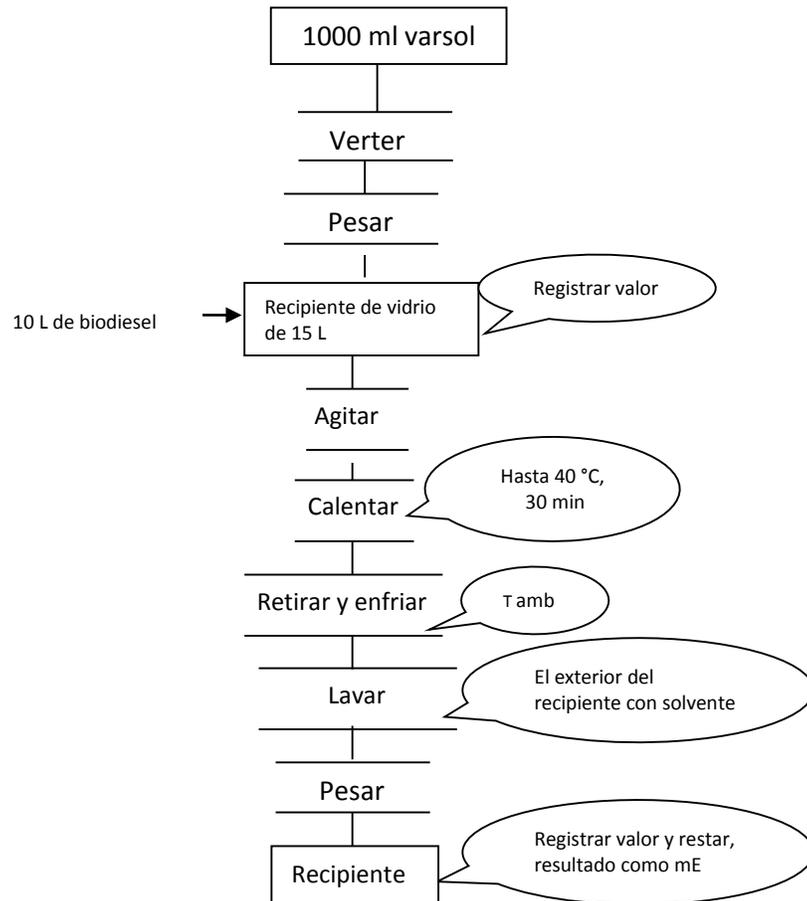
- Enjuagar completamente el aparato con Avgas previamente filtrado a través de un filtro de $1\mu\text{m}$ de tamaño de poro.
- Secar el aparato con un paño.
- Utilizar contenedores de muestra limpios. (Beakers, botellas, cajas de Petri, etc.) Lavar con el solvente.



4.2 Preparación de la muestra

- Verter 1000 ml de solvente (Avgas) filtrado en el atomizador.
- Colocar el Beaker de 1000 mL en la balanza analítica de precisión de 1 g y registrar el valor.
- Agregar 1000 mL de biodiesel en el recipiente previamente pesado.
- Colocar el recipiente con la muestra sobre un agitador y calentar hasta $40 ^\circ \text{C}$.

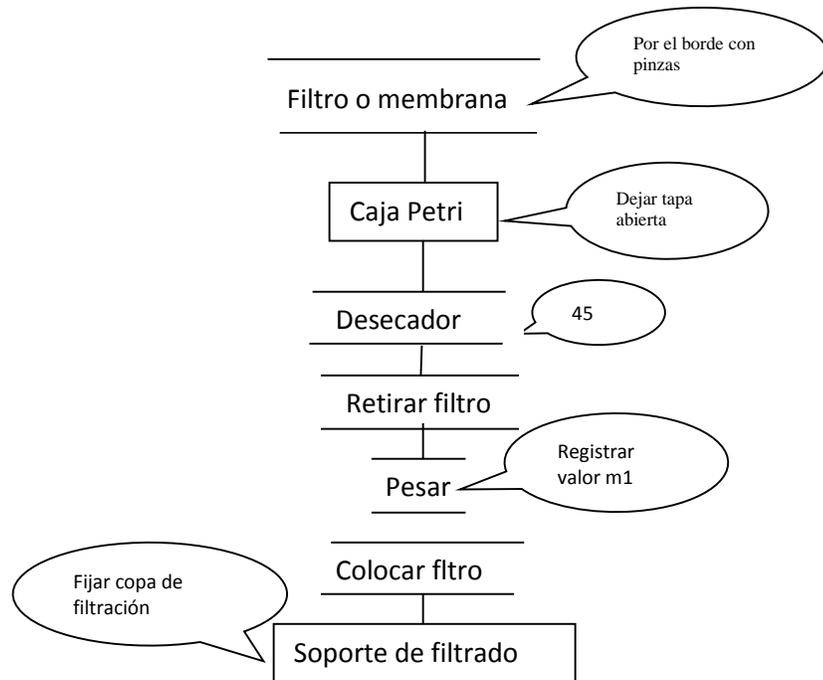
- Retirar el recipiente del agitador y dejar enfriar hasta temperatura ambiente. Lavar el exterior del recipiente con solvente.
- Colocar el recipiente en la gramera nuevamente y restar el valor hallado anteriormente con el recipiente vacío al nuevo valor, luego registrar este dato como la masa de la muestra (mE) Nota: Ver hoja de datos anexo



4.3 Preparación del filtro

- Para combustibles que contienen pocos materiales particulado, solo se requiere un filtro. Si el combustible está altamente contaminado, más de un filtro puede ser requerido.
- Para todas las operaciones, manipular el filtro o membrana por el borde, haciendo uso de pinzas.
- El filtro se introduce en la caja Petri junto con su tapa, se lleva al horno y se introduce con la tapa entreabierta durante 30 minutos a 110°C, pasado este tiempo se enfría con la tapa entreabierta durante aproximadamente 45 min en el desecador.

- Retirar el filtro de la caja Petri y empleando la balanza analítica pesar el filtro. (Se registra el valor como m_1).
- El filtro se coloca directamente en el porta filtros previamente limpio, fijándose con la copa de filtración.



4.4 Procedimiento de filtrado

- Filtrar el combustible a una tasa de flujo constante, suficiente para llevar a cabo la filtración en un tiempo prudente.
- Lavar con disolvente el sedimento presente en el recipiente de la muestra, una vez bombeada completamente. Enjuagar cuidadosamente la pared interior y la base del recipiente con Avgas y filtrar los enjuagues. Repetir la operación de lavado dos veces.
- Dejar el vacío de 10 - 15 s
- Abrir el portafiltros y retirar cuidadosamente la membrana haciendo uso de las pinzas.
- El filtro se introduce en la caja Petri junto con su tapa, se lleva al horno y se introduce con la tapa entreabierta durante 30 minutos a 110°C , pasado este tiempo se enfría con la tapa entreabierta durante aproximadamente 45 min en el desecador.
- Empleando la balanza analítica, se pesa el filtro PTFE sin la caja Petri, registrando este valor como m_2 .
- Por último, se realiza el cálculo de contaminantes totales de la prueba en cuestión usando la ecuación 1. Se expresa la fracción en masa μ en mg/kg

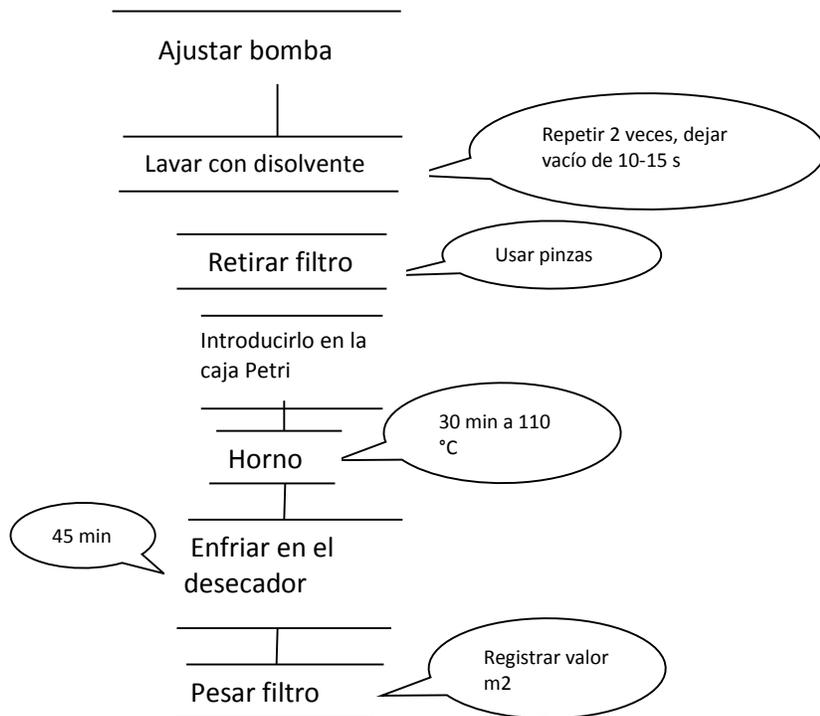


Tabla de recolección de datos

Réplica	mE (g)	$M1$ (mg)	$M2$ (mg)	Contaminación total (mg/kg)
1				
2				
3				
4				

5. BIBLIOGRAFÍA

- Norma Internacional ASTM D7321- 16a. Standard Test Method for Particulate Contamination of Biodiesel B100 Blend Stock Biodiesel Esters and Biodiesel Blends by Laboratory Filtration. United States, Agosto Del 2016.
- Norma Europea SS-EN 12662:2014. Liquid petroleum products – Determination of total contamination in middle distillates, diesel fuels and fatty acid methyl esters. Swedish standards institute, 04 Febrero Del 2014.
- Norma Europea EN 12662-2008. Liquid petroleum products – Determination of contamination in middle distillates.

ANEXO C.

CÁLCULOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN TOTAL

A través de la siguiente tabla, se muestra el registro de datos que se llevó a cabo para poder determinar la contaminación total de cada unidad experimental que se realizó. Para poder obtener la contaminación total fue necesario emplear la ecuación que se denota a continuación.

Ecuación 10. Fórmula de Contaminantes Totales.

$$\mu = \frac{1000 (m2 - m1)}{mE}$$

Fuente: STANDARD EUROPEA.
Liquid petroleum products
– Determination of total contamination in middle distillates, diesel fuels and fatty acid methyl esters.
EN 12662, 2008.

Dónde:

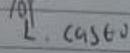
- μ = Contaminación total
- $m1$ = La masa del filtro, en mg.
- $m2$ = La masa del filtro junto con los contaminantes sólidos, en mg.
- mE = La masa de la porción de muestra, en g.

Tabla 20. Registro de datos experimentales.

N° de experimentos	mE (g)	$m1$ (mg)	$m2$ (mg)	Contaminación total (mg/kg)
1	863	213	256	49,8
	856	297	235	32,7
2	855	211	239	32,7
	854	204	230	30,4
3	863	225	254	33,6
	853	205	225	23,4
4	852	207	244	43,4
	851	208	220	14,1
5	859	201	257	65,2
	817	209	242	40,4
6	869	223	257	39,1
	822	209	248	16,4
7	807	196	223	33,5
	879	190	217	30,7
8	863	209	224	17,4
	830	204	214	12,0
9	862	208	227	22,0
	829	204	219	18,1
10	869	200	224	27,6
	799	203	209	7,5

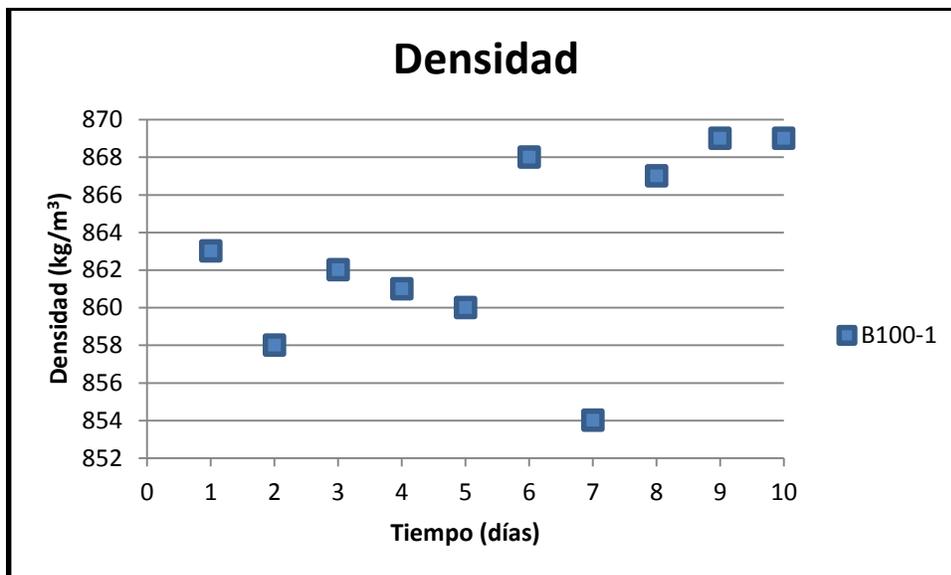
Fuente: elaboración propia

ANEXO D FICHA TÉCNICA DEL BIODIESEL

 ONAC <small>ORGANISMO NACIONAL DE ACREDITACIÓN DE COLOMBIA</small>	 Oleoflores S.A.S.	 <small>ISO 9001</small>  <small>ISO 9001:2008 SC2520-1</small>				
<small>ISO/IEC 17025:2005 14-LAB-040</small>	<small>Informe emitido por Oleoflores S.A.S., Laboratorio de Ensayos con acreditación ONAC vigente a la fecha, con código de acreditación 14-LAB-040, bajo la norma ISO/IEC 17025:2005.</small>					
INFORME DE ANÁLISIS						
Oleoflores S.A.S. – Laboratorio de Ensayos de Biodiesel						
Teléfono: 3157277615 Ext. 141 Correo electrónico Dirección Técnica: jparedes@oleoflores.com Número de informe: 20180147 Cliente: Oleoflores / Planta Biodiesel Dirección del Cliente: km 5 vía Codazzi-Valledupar Punto de muestreo (1): TK 5 Técnica de muestreo (2): ISO 5555 Volumen Observado (3): 74 859,84 Galones Descripción del estado de la muestra al recibirla: Muestra Clara y Brillante	Dirección: Kilómetro 5 vía Codazzi – Valledupar Correo electrónico Analistas: laboratoriodiesel@oleoflores.com Fecha de ejecución de análisis: 2018-08-21 Fecha de entrega de informe: 2018-08-21 Tiempo Total del Ensayo: 11 Horas Nombre de la muestra: Biodiesel Código de la muestra: BIO-18-148 Fecha de recepción de la muestra: 2018-08-21					
<small>Los siguientes resultados son válidos únicamente para las muestras identificadas con anterioridad. El laboratorio no es responsable por la representatividad de la muestra.</small>						
CONDICIONES AMBIENTALES DURANTE LOS ENSAYOS						
Temperatura: 23,2°C Humedad: 37 % HR						
CARACTERÍSTICA	UNIDAD	METODO	ESPECIFICACIÓN		RESULTADO	¿CUMPLE?
			<small>MÍNIMO</small>	<small>MÁXIMO</small>		
Apariencia *	visual	visual	NA	NA	Amarilla Brillante	SI
Densidad a 15°C.	kg/m ³	ASTM D4052-16	860,0	900,0	875,7	SI
Gravedad API a 15,6°C	°API	ASTM D4052-16	NA	NA	30,2	SI
Humedad Karl Fischer	mg/kg	EN-ISO12937-2000	NA	500	160	SI
Numero Acido	mg/ g KOH	ASTM-D664-17 Método B	NA	0,50	0,13	SI
Punto de Fluides	°C	ASTM D97-17a	NA	NA	15	SI
Glicerina Libre	mg/100 mg	ASTM-D6584-17	NA	0,02	<0,005	SI
Monoglicéridos	mg/100 mg	ASTM-D6584-17	NA	0,80	0,655	SI
Diglicéridos	mg/100 mg	ASTM-D6584-17	NA	0,20	0,136	SI
Triglicéridos	mg/100 mg	ASTM-D6584-17	NA	0,20	0,056	SI
Glicerina Total	mg/100 mg	ASTM-D6584-17	NA	0,25	0,198	SI
Contenido de Metanol/Etanol	mg/100 mg	EN 14110-2003 Método B	NA	0,20	0,01	SI
Contenido de FAME	mg/100 mg	EN 14103-2003	96,5	NA	97,6	SI
Viscosidad Cinemática a 40°C	mm ² /s	ASTM D445-17a	1,9	6,0	4,530	SI
Destilación(Punto Final de Ebullición) a 99,7 kPa	°C	ASTM D86-17	NA	360	339,5	SI
Contaminación total	mg/kg	EN 12662-2008	NA	24,0	5,1	SI
Índice de Yodo	g de Yodo/100g	EN 14111-2003	NA	120	52	SI
Observaciones: * Por fuera del alcance de la acreditación. (1), (2) y (3) corresponden a información suministrada por el cliente.						
Comentarios del cliente: Lote SAP: 890000073651						
Realizado por	Nombre	Cargo	Firma	Fecha		
Aprobado por	Jose Jorge Perez	Analista de Laboratorio		2018-08-21		
Recibido por	Juan Carlos Paredes	Director sistemas de gestión		2018-08-21		
	Luis Fernando Castro	Responsable Planta Biodiesel		2018-08-21		
Este informe no se puede reproducir de forma parcial o total sin la previa autorización del Laboratorio de ensayo de Oleoflores S.A.S.						
FIN DEL INFORME						
LABORATORIO DE OLEOFLORES S.A.S. – ÁREA DE BIODIESEL INFORME DE ANÁLISIS			Código: FI-BD-001 Fecha: 2018/04/01 Versión: 08	Página 1 de 1		

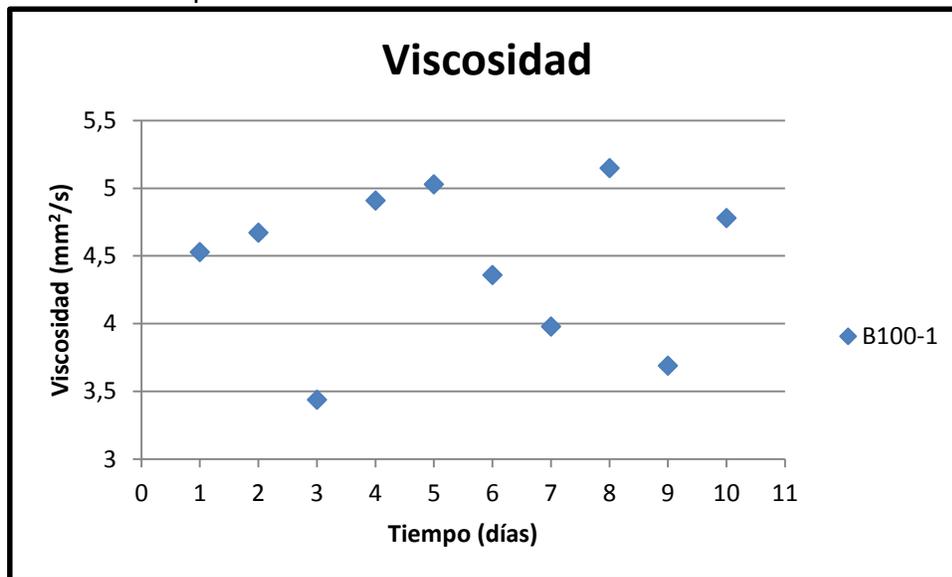
ANEXO E GRAFICAS DE LAS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DEL B100-1

Gráfica 8. Distribución de densidad B100-1.



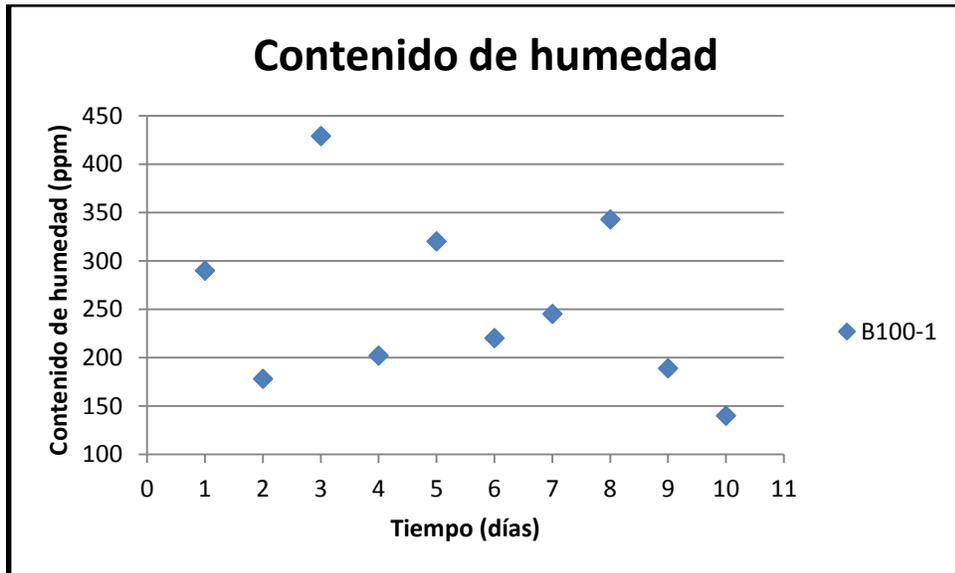
Fuente: elaboración propia

Gráfica 9. Dispersión de viscosidades de la muestra B100-1.



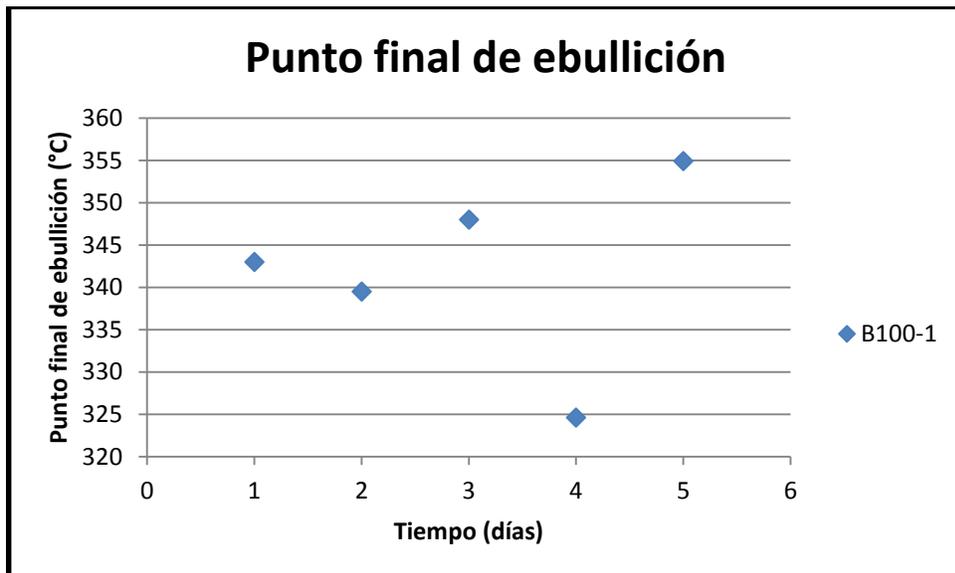
Fuente: elaboración propia

Gráfica 10. Dispersión del contenido de la humedad de B100-1.



Fuente: elaboración propia

Gráfica 11. Punto final de ebullición de la muestra B100-1.



Fuente: elaboración propia