



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

Trabajo de fin de carrera titulado:

**DISEÑO DE UN PROCESO PARA LA OBTENCIÓN DE BIODIÉSEL A PARTIR
DEL ACEITE *Jatropha curcas* CON METIL ACETATO EN CONDICIONES
SUPERCRÍTICAS EN PRESENCIA DE ZnO COMO CATALIZADOR DE
REACCIÓN**

Realizado por:

EMERSON GERARDO REYES NARVÁEZ

Director del proyecto:

EDILBERTO ANTONIO LLANES CEDEÑO

Como requisito para la obtención del título de:

MAGISTER EN DISEÑO INDUSTRIAL Y DE PROCESOS

QUITO, 27 de enero de 2022

DECLARACIÓN JURAMENTADA

Yo, Emerson Gerardo Reyes Narváez, con cédula de identidad N° 040155305-2, declaro bajo juramento que el trabajo aquí desarrollado es de mi autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y que se ha consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento. A través de la presente declaración, cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente.

.....

Emerson Gerardo Reyes Narváez

C.I.: 040155305-2

DECLARATORIA DEL DIRECTOR DE TESIS

El presente trabajo de investigación titulado:

**DISEÑO DE UN PROCESO PARA LA OBTENCIÓN DE BIODIÉSEL A PARTIR
DEL ACEITE *Jatropha curcas* CON METIL ACETATO EN CONDICIONES
SUPERCRÍTICAS EN PRESENCIA DE ZnO COMO CATALIZADOR DE
REACCIÓN**

Realizado por:

EMERSON GERARDO REYES NARVÁEZ

Como Requisito para la Obtención del Título de:

MAGISTER EN DISEÑO INDUSTRIAL Y DE PROCESOS

ha sido dirigido por el profesor:

EDILBERTO ANTONIO LLANES CEDEÑO

Quien considera que constituye un trabajo original de su autor.

.....

FIRMA

LOS PROFESORES INFORMANTES

Los Profesores Informantes:

JOHANNA LUCIA MEDRANO BARBOZA

ALBERTO ALEJANDRO AGUIRRE BRAVO

Después de revisar el trabajo presentado, lo han calificado como apto para su defensa oral
ante el tribunal examinador

.....

FIRMA

MSc. Johanna Lucia Medrano Barboza

.....

FIRMA

Ph.D. Alberto Alejandro Aguirre Bravo

Quito, 27 de enero de 2022

DECLARACIÓN DE AUTORÍA DEL ESTUDIANTE

Declaro que este trabajo es original, de mi autoría, que se han citado las fuentes correspondientes y que en su ejecución se respetaron las disposiciones legales que protegen los derechos de autor vigentes.

.....
Emerson Gerardo Reyes Narváez

C.I.: 040155305-2

AGRADECIMIENTOS

A Dios por sus infinitas bendiciones.

A Liliana Guzmán Beckman y a todo el personal del Laboratorio de Combustibles Biocombustibles y Aceites Lubricantes – LACBAL, por su ayuda incondicional en el proceso de validación experimental llevado a cabo en el presente trabajo.

A Edilberto Antonio Llanes Cedeño por su conocimiento, guía y tiempo.

DEDICATORIA

A mi familia, la luz de mi vida.

Índice de Contenidos

CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Antecedentes.....	2
1.3. Problemática	3
1.4. Justificación	4
1.5. Objetivo General.....	4
1.6. Objetivos Específicos	5
1.7. Estado del Arte	5
1.7.1. <i>Jatropha curcas</i>	7
1.7.2. Composición de ácidos grasos del aceite de <i>Jatropha curcas</i>	9
1.7.3. Propiedades físico – químicas del aceite de <i>Jatropha curcas</i>	11
1.7.4. Producción de biodiésel a partir del aceite de <i>Jatropha curcas</i>	13
1.7.5. Uso de óxidos metálicos como catalizadores de reacción.....	15
1.7.6. Calidad del biodiésel producido a partir del aceite de <i>Jatropha curcas</i>	16
1.7.7. Calidad de las mezclas de diésel / biodiésel de <i>Jatropha curcas</i>	18
CAPÍTULO II METODOLOGÍA	20
2.1. Tipo de Estudio.....	20
2.2. Modalidad de investigación.....	20
2.3. Diseño del proceso de obtención de biodiésel.....	21
2.4. Validación del proceso de obtención de biodiésel.....	21

2.5. Materias primas	22
2.5.1. Aceite de <i>Jatropha curcas</i>	22
2.5.1.1. Agua y sedimentos	24
2.5.1.2. Contenido de azufre	25
2.5.1.3. Densidad	25
2.5.1.4. Índice de acidez	26
2.5.1.5. Índice de peróxido	28
2.5.1.6. Índice de saponificación	29
2.5.1.7. Índice de yodo	29
2.5.1.8. Punto de inflamación.....	30
2.5.1.9. Viscosidad cinemática a 40 °C	31
2.5.2. Metil Acetato	32
2.5.3. Óxido de Zinc	32
2.6. Condiciones de reacción.....	33
2.7. Operaciones de separación y purificación del producto final	35
2.8. Caracterización de diésel premium, biodiésel B100, mezclas diésel / biodiésel en diferentes porcentajes.....	36
2.8.1. Agua y sedimentos.....	37
2.8.2. Cloud point / pour point	37
2.8.3. Contenido de azufre.....	38
2.8.4. Corrosión en la lámina de cobre	38

2.8.5. Densidad.....	39
2.8.6. Índice de acidez.....	40
2.8.7. Poder calórico.....	40
2.8.8. Punto de inflamación.....	40
2.8.9. Viscosidad cinemática a 40 °C del biodiésel	41
CAPÍTULO III RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	42
3.1. Diseño del proceso de producción de biodiésel.....	42
3.2. Validación del Proceso de obtención de Biodiésel.....	43
3.2.1. Materias Primas.....	43
3.2.2. Caracterización de materias primas / Cumplimiento de parámetros de calidad.....	43
3.2.3. Selección del método de obtención de biodiésel	46
3.2.4. Obtención de biodiésel	46
3.2.5. Purificación de<. biodiésel	50
3.2.6. Caracterización de diésel premium, biodiésel B100, mezclas diésel / biodiésel en diferentes porcentajes.....	52
CAPÍTULO IV CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	56
4.1. Conclusiones.....	56
4.2. Recomendaciones	57
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58
ANEXOS	68
ANEXO I.....	69
Resultados por Parámetro de la Caracterización del Aceite de <i>Jatropha curcas</i>	69

A.I.1. Agua y sedimentos	69
A.I.2. Contenido de azufre.....	69
A.I.3. Densidad.....	69
A.I.4. Índice de acidez.....	70
A.I.5. Índice de peróxido.....	71
A.I.6. Índice de saponificación.....	72
A.I.7. Índice de yodo.....	73
A.I.8. Punto de inflamación.....	73
A.I.9. Viscosidad cinemática a 40 °C.....	74
ANEXO II	75
Resultados por Parámetro de la Caracterización del Biodiésel B100, Diésel Premium y las Mezclas Diésel/Biodiésel en diferentes proporciones.	75
A.II.1. Agua y sedimentos.....	75
A.II.2. Punto de nube (Cloud point) y punto de escurrimiento (Pour point).....	75
A.II.3. Contenido de azufre.....	76
A.II.4. Corrosión a la lámina de cobre.....	78
A.II.5. Densidad a 15,6 °C.....	79
A.II.6. Índice de acidez.....	79
A.II.7. Poder calórico.....	80
A.II.8. Punto de inflamación.....	85
A.II.9. Temperatura de destilación recuperado al 90 %.....	85

Índice de Tablas

Tabla 1. <i>Resultados de la ejecución de la metodología prisma</i>	6
Tabla 2. <i>Taxonomía de la planta</i>	7
Tabla 3. <i>Característica de la especie <i>Jatropha curcas</i> que se cultiva en el país</i>	8
Tabla 4. <i>Composición de ácidos grasos del aceite de <i>Jatropha curcas</i></i>	10
Tabla 5. <i>Propiedades físico químicas del aceite de <i>Jatropha curcas</i></i>	12
Tabla 6. <i>Condiciones y variables de reacción para distintos mecanismos de esterificación para el aceite de <i>Jatropha curcas</i></i>	14
Tabla 7. <i>Parámetros de calidad del biodiésel producido a partir de aceite de <i>Jatropha curcas</i> B100</i>	17
Tabla 8. <i>Parámetros de calidad para las mezclas de diésel/biodiésel de <i>Jatropha curcas</i> en diferentes porcentajes</i>	19
Tabla 9. <i>Parámetros de caracterización del aceite de <i>Jatropha curcas</i></i>	23
Tabla 10. <i>Diseño experimental, factorial 3x5, n=1</i>	34
Tabla 11. <i>Parámetros de calidad del biodiésel B100 / mezclas producido a partir del aceite de <i>Jatropha curcas</i></i>	36
Tabla 12. <i>Resultados de la caracterización del aceite de <i>Jatropha curcas</i></i>	44
Tabla 13. <i>Perfil lipídico</i>	45
Tabla 14. <i>Resultados del diseño experimental</i>	47
Tabla 15. <i>Parámetros de calidad del biodiésel B100 / mezclas producido a partir del aceite de <i>Jatropha curcas</i></i>	54
Tabla A. 1. <i>Resultado del análisis de agua y sedimentos</i>	69
Tabla A. 2. <i>Resultados del análisis del contenido de azufre que reporta el equipo</i>	69
Tabla A. 3. <i>Resultado del análisis de densidad</i>	70

Tabla A. 4.	<i>Resultados para el índice de acidez del aceite de <i>Jatropha curcas</i></i>	70
Tabla A. 5.	<i>Resultados para el índice de peróxido del aceite de <i>Jatropha curcas</i></i>	71
Tabla A. 6.	<i>Resultados del índice de saponificación del aceite de <i>Jatropha curcas</i></i>	72
Tabla A. 7.	<i>Resultados para el índice de yodo del aceite de <i>Jatropha curcas</i></i>	73
Tabla A. 8.	<i>Resultado de las mediciones de punto de inflamación en copa abierta</i>	73
Tabla A. 9.	<i>Resultados de la viscosidad cinemática a 40 °C</i>	74
Tabla A. 10.	<i>Resultado del análisis de agua y sedimentos</i>	75
Tabla A. 12.	<i>Resultado del análisis de punto de nube y punto de escurrimiento</i>	76
Tabla A. 13.	<i>Resultados del análisis del contenido de azufre que reporta el equipo</i>	77
Tabla A. 14.	<i>Clasificación de corrosión a la lámina de cobre</i>	78
Tabla A. 15.	<i>Resultado del análisis de densidad</i>	79
Tabla A. 16.	<i>Resultados para el índice de acidez del biodiésel</i>	79
Tabla A. 17.	<i>Resultado del análisis de poder calórico</i>	81
Tabla A. 18.	<i>Resultado del análisis de densidad</i>	85
Tabla A. 19.	<i>Temperatura 90 % reportado en la destilación ASTM</i>	86

Índice de Figuras

Figura 1. <i>Definición de criterios de la metodología prisma a emplear en la revisión sistemática</i>	5
Figura 2. <i>Arbusto de <i>Jatropha curcas</i>, fruto y semillas (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, 2017)</i>	8
Figura 3. <i>Muestra de aceite de <i>Jatropha curcas</i>, extraída de las semillas (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, 2017)</i>	9
Figura 4. <i>Reacción química de interesterificación de triglicéridos con metil acetato, que produce ésteres metílicos de ácidos grasos y triacetato de glicerina (Goembira & Saka, 2013).</i>	15
Figura 5. <i>Diagrama de estrategia metodológica</i>	21
Figura 6. <i>Aceite de <i>Jatropha curcas</i> de producción nacional</i>	22
Figura 7. <i>Centrífuga Orto Alresa Digitor 21 C - LACBAL</i>	24
Figura 8. <i>Equipo Oxford X Supreme - LACBAL</i>	25
Figura 9. <i>Equipo de densidad – LACBAL</i>	26
Figura 10. <i>Titulador Automático Metrohm 855 – LACBAL</i>	27
Figura 11. <i>Balanza Analítica AXIS – LACBAL</i>	27
Figura 12. <i>Equipo ISL-PAC para la medición del punto de inflamación en copa abierta – LACBAL</i>	30
Figura 13. <i>Equipo para determinar la viscosidad cinemática a 40 °C – LACBAL</i>	32
Figura 14. <i>Reactivo grado analítico – Metil acetato</i>	32
Figura 15. <i>Reactivo grado analítico – Óxido de zinc</i>	33
Figura 16. <i>Reactor Parr 4577 – LACBAL</i>	35
Figura 17. <i>Cromatógrafo de gases Agilent DB 7098 – LACBAL</i>	35
Figura 18. <i>Equipo ILS PAC OPTICAD - LACBAL</i>	38

Figura 19. Baño termostático Normalab para el ensayo de corrosión – LACABL	39
Figura 20. Equipo HERZOQ-PAC para punto de inflamación en copa cerrada – LACBAL.	41
Figura 21. Diagrama de proceso para la producción de biodiésel	42
Figura 22. Rendimiento de metil ésteres en función del tiempo a diferentes porcentajes de ZnO	47
Figura 23. Diagrama de Pareto estandarizado para la variable de respuesta (porcentaje de rendimiento).....	48
Figura 24. Gráfica de superficie de respuesta estimada para el rendimiento de metil ésteres en función del tiempo a diferentes porcentajes de ZnO	48
Figura 25. Gráfica de contornos de la superficie de respuesta estimada para el rendimiento de metil ésteres en función del tiempo a diferentes porcentajes de ZnO.....	48
Figura 26. a) Esquema de filtración (b) Mezcla con ZnO en suspensión (c) ZnO retenido ...	50
Figura 27. a) Esquema de destilación atmosférica (b) Mezcla sin sólidos en suspensión (c) Ebullición del Metil acetato (d) Mezcla libre de solvente en un 95 %.....	51
Figura 28. (a) Esquema de destilación al vacío (b) Biodiésel B100 (derecha)	52
Figura 29. De izquierda a derecha (a) Muestra biodiésel B100 / muestra de diésel premium (b) Mezclas B5, B10, B15, B20, B30	53

RESUMEN

Actualmente, el petróleo y sus derivados cubren gran parte de la demanda de energía mundial, siendo la principal fuente de energía no renovable con reservas limitadas. En este sentido, la presente investigación tiene por objetivo el establecer un proceso para la obtención de biodiésel a partir del aceite de *Jatropha curcas* mediante el estudio y experimentación del mecanismo de interesterificación con metil acetato en condiciones supercríticas en presencia de óxido de zinc como catalizador y el cumplimiento de los parámetros de calidad de los productos (mezcla B100 y mezclas B5, B10, B15, B20, B30), para la determinación de su uso en el sector energético y de transporte. Para ello, se tomó como punto de partida la realización de una revisión bibliográfica bajo la metodología prisma para plantear un diagrama de flujo de proceso, el cual fue validado a través de la experimentación. El proceso de validación se llevó a cabo en Laboratorio de Combustibles, Biocombustibles y aceites Lubricantes – LACBAL, obteniéndose como resultados de la investigación: una caracterización físico química y de composición del aceite de *Jatropha curcas* bajo la normativa nacional INEN para aceites y grasas de origen vegetal y animal e internacional DIN 51623; el conjunto de factores experimentales que maximizan el rendimiento de metil ésteres en la reacción interesterificación supercrítica del aceite de *Jatropha curcas* con metil acetato con óxido de zinc como catalizador de reacción mediante la aplicación de un diseño experimental factorial multinivel y su posterior análisis en el software STATGRAPHICS CENTURION XVI ; la caracterización de la muestra de biodiésel B100 con base en la norma ASTM D6751-07b y finalmente la caracterización de las mezclas de diésel/ biodiésel B5, B10, B15, B20 y B30 con base en la norma INEN 1489, dando cumplimiento a los parámetros de calidad para su uso.

Palabras clave:

Aceite de *Jatropha curcas*, metil acetato, interesterificación, fluido supercrítico, metil ésteres

ABSTRACT

Currently, crude oil and its derivatives cover a large part of the world's energy demand, being the main source of non-renewable energy with limited reserves. In this sense, the objective of this research is to establish a process for obtaining biodiesel from *Jatropha curcas* oil by studying and experimenting with the transesterification mechanism with methyl acetate under supercritical conditions in the presence of zinc oxide as a catalyst and compliance with the quality parameters of finished products (mix B100 and mixes B5, B10, B15, B20, B30 biodiesel / diesel), to determine their use in the energy and transport sector. For this, a bibliographic review was taken as a starting point under the prism methodology to propose a process flow diagram, which was validated through experimentation. The validation process was carried out in the Laboratory of Fuels, Biofuels and Lubricating oils - LACBAL, obtaining as results of the research: a physical-chemical and composition characterization of the *Jatropha curcas* oil under the INEN national regulations for oils and fats of origin vegetable and animal and international DIN 51623; the set of experimental factors that maximize the yield of methyl esters in the supercritical transesterification reaction of *Jatropha curcas* oil with methyl acetate with zinc oxide as reaction catalyst by applying a multilevel factorial experimental design and its subsequent analysis in the STATGRAPHICS software CENTURION XVI; the characterization of the B100 biodiesel sample based on the ASTM D6751-07b standard and finally the characterization of the B5, B10, B15, B20 and B30 diesel / biodiesel blends based on the INEN 1489 standard, complying with the quality parameters for their use.

Keywords:

Jatropha curcas oil, methyl acetate, transesterification, supercritical fluid, methyl esters.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción

En la actualidad, el petróleo y sus derivados cubren más de la mitad de la demanda de energía mundial. Esta fuente primaria de energía no es renovable y se ha demostrado que sus reservas no son finitas (Kafuku et al., 2010). Sumado a esto, la variabilidad de los costos en el mercado, han motivado a la investigación y desarrollo de fuentes de energía renovables y alternativas, que mitiguen los impactos ambientales, reduzcan las emisiones de gases de efecto invernadero (Contran et al., 2013).

Desde el año 2000, cuando se introdujo al bioetanol y el biodiésel como combustibles verdes; la demanda y consumo de estos, se ha incrementado en forma exponencial y con ello la demanda de materia prima para ser transformada en biocombustible (Yee et al., 2011). Con base en la literatura, se conoce que la producción industrial de biocombustibles se realiza a partir de biomasa: en el caso de bioetanol, se emplea el maíz y caña de azúcar; mientras que, para el biodiésel, aceites vegetales como: palma, soja, girasol, entre otros (Juan et al., 2011).

En este sentido, se debe evaluar hasta qué punto se tiene una competencia alimentaria en materias primas y en este sentido, el interés por desarrollar procesos de producción de biocombustibles de segunda generación, donde no se toma en cuenta materias primas no comestibles, subproductos no deseados de la refinación del aceite, aceite usado, residuos agrícolas, microalgas, entre otros para ser transformados en biodiésel o bioetanol, respectivamente (Jain & Sharma, 2010; Kumar et al., 2016).

1.2. Antecedentes

Dentro de la clasificación de aceites no comestibles, el aceite de *Jatropha curcas* es una de las materias primas de mejor calidad para la producción biodiésel, debido a sus propiedades físico químicas. El aceite se extrae de las semillas ya que en su composición se tiene un porcentaje que varía de 25 a 40 %, dependiendo de las condiciones geográficas y ambientales del cultivo (Contran et al., 2013). En Ecuador, se cultiva en las provincias de Manabí y Santa Elena como parte del Proyecto Piñón, impulsado por el INIAP (Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias, 2016) y el IICA (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, 2011), con fines energéticos de uso exclusivo.

En los últimos años los investigadores que poseen un interés particular por este aceite, han generado un vasto conocimiento relacionado con la optimización de la reacción de interesterificación de los ácidos grasos presentes en aceites vegetales a etil o metil ésteres (biodiésel), reportando en sus investigaciones los parámetros de calidad y cumplimiento de los requisitos establecidos en las norma ASTM D6751 - 07b “*Standard Specification for Biodiesel Fuel Blend Stock (B100) for Middle Distillate Fuels*” (ASTM International, 2007) y la norma EN 14214:2013. “*Liquid petroleum products - Fatty acid methyl esters (FAME) for use in diesel engines and heating applications - Requirements and test methods*” (European Standards, 2013).

Si bien es cierto, en la literatura se han reportado resultados muy positivos cuando se utiliza alcoholes de cadena corta (etanol o metanol), el problema central sigue siendo la generación de glicerina que no tiene un uso energético; mientras que al emplear una reacción de interesterificación con un éster de cadena corta (metil acetato o etil acetato), se obtiene un subproducto que se utiliza en aplicaciones energéticas y que por lo tanto no requiere separación, ya que puede ser catalogado como un aditivo.

1.3. Problemática

La producción industrial de biocombustibles y las investigaciones realizadas en los últimos años, muestran el uso de materias primas de primera generación, es decir que tienen aplicaciones alimentarias, generalmente el uso de aceite de palma, que mediante transesterificación con alcoholes de cadena corta (etanol o metanol), produce ésteres alquílicos y glicerina. Para el uso energético, la glicerina es un subproducto no deseado, ya que reduce la calidad del biodiésel y por lo tanto requiere ser separado, por medio de métodos físicos o químicos (Kafuku et al., 2010; Saka & Kusdiana, 2001).

Una solución viable a la producción de glicerina en la obtención de biodiésel, es el uso de metil acetato en condiciones supercríticas, ya que se obtiene ésteres metílicos (biodiésel) y triacetato de glicerina, en lugar de glicerina. De acuerdo con Lacerda et al. (2015) el triacetato de glicerina es considerado como un aditivo que mejora las propiedades físico químicas del producto, en especial aquellas asociadas con el transporte (viscosidad cinemática) y almacenamiento (estabilidad a la oxidación); y que a su vez la mezcla triacetato de glicerina / ésteres alquílicos cumple con los parámetros de calidad establecidos en las normas técnicas ASTM D6751 - 07b (ASTM International, 2007) y la norma EN 14214:2013 (European Standards, 2013). Por lo tanto, no se requiere separar el producto del subproducto.

La principal limitante del mecanismo de interesterificación supercrítica con metil acetato, radica en sus condiciones severas de reacción: temperatura < 350 °C, presión < 18 MPa y tiempo de reacción < 1 hora para obtener un porcentaje de rendimiento de metil ésteres $> 99\%$. En este sentido Yoo et al. (2010) en su investigación afirma que el uso de óxidos metálicos en reacciones de transesterificación e interesterificación reducen las condiciones de reacción, haciendo énfasis en el tiempo del tiempo ya que se reduce hasta en un 70 %, dependiendo del óxido utilizado.

Con base en lo expuesto, se ha identificado la necesidad de diseñar un proceso para la obtención de biodiésel mediante la interesterificación del aceite de *Jatropha curcas* con acetato de metilo en condiciones supercríticas, en presencia de óxido de zinc como catalizador de reacción. El proceso considerará las fases comprendidas por: materias primas, caracterización y calidad, condiciones de obtención de biodiésel, purificación productos, caracterización y calidad del biodiésel, caracterización y calidad de mezclas.

1.4. Justificación

La información recopilada en este trabajo tiene el objetivo de sumar esfuerzos en la generación de conocimientos asociados con la transformación del aceite de *Jatropha curcas* en biodiésel. En este sentido, este trabajo pretende ser una base de estudio para que investigadores y colaboradores de otras disciplinas como son: la simulación de procesos químicos en estado estacionario y estado dinámico, la simulación de dinámica de fluidos computacional CFD, la simulación mecánica y diseño de equipos, la formulación y evaluación de proyectos, etc.; aporten sus conocimientos para el desarrollo de productos y servicios desde cada área de conocimiento. De esta manera, desarrollar procesos más eficientes, que entreguen productos que cumplan con los más altos estándares de calidad internacional y que aporten soluciones sostenibles y sustentables a los problemas ambientales causados por el uso de combustibles derivados del petróleo.

1.5. Objetivo General

Establecer un proceso para la obtención de biodiésel a partir del aceite de *Jatropha curcas* mediante el estudio y experimentación del mecanismo de interesterificación con metil acetato en condiciones supercríticas en presencia de óxido de zinc como catalizador y el cumplimiento de los parámetros de calidad de los productos terminados (mezcla B100 y

mezclas B5, B10, B15, B20, B30 biodiésel / diésel), para la determinación de su uso en el sector energético y de transporte.

1.6. Objetivos Específicos

a. Establecer un proceso para la obtención de biodiésel mediante el mecanismo de interesterificación supercrítica catalizado por ZnO, que permita dar cumplimiento a los parámetros de calidad establecidos por las normas técnicas nacionales e internacionales para los productos terminados (mezcla B100 y mezclas B5, B10, B15, B20, B30 biodiésel / diésel).

b. Validar el proceso de obtención de biodiésel mediante la experimentación y el cumplimiento de parámetros de calidad con base en las normas técnicas nacionales e internacionales.

1.7. Estado del Arte

Figura 1.

Definición de criterios de la metodología prisma a emplear en la revisión sistemática

Planteamiento	Criterios de Exclusión
<p>Definición de palabras clave: Se seleccionan relacionadas con el tema y los objetivos de la investigación.</p> <p>Revisión de literatura: Revisión de documentos de carácter científico, normas técnicas y métodos de ensayo estándar aplicables.</p> <p>Fuentes de búsqueda: Se realiza en bases de datos de documentos de divulgación de científica y bases de datos de normas técnicas y métodos de ensayo estándar.</p>	<p>Se descarta los documentos:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Que son informativos y no técnicos. - Que no utilizan como materia prima el aceite de <i>Jatropha curcas</i> salvo la excepción cuando se relacione con el uso de óxidos metálicos como catalizadores de reacción. <p>Se descarta las Normas técnicas / Métodos estándar de ensayo:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Que no sean aplicables para establecer los parámetros de calidad de: aceites de origen vegetal, metil ésteres (B100) y mezclas de diésel / biodiésel.
Criterios de Inclusión	Resultados
<p>Temática: Descrita en función de las palabras clave.</p> <p>Fecha de publicación: En función de la información disponible y su calidad</p> <p>Idioma: Inglés preferente, pero también se consideran artículos en español en función de la relevancia de la información</p> <p>Tipos de documentos: Artículos de investigación y artículos de revisión completos, que se encuentren disponibles en las principales bases de datos de divulgación científica. Normas técnicas y métodos de ensayo estándar completos, que sean aplicables para caracterizar y establecer parámetros de calidad de las materias primas y del producto final deseado.</p>	<p>Artículos:</p> <p>Bases de datos utilizadas: 7 Documentos encontrados: 176 Documentos seleccionados: 46</p> <p>Normas técnicas / Métodos estándar de ensayo:</p> <p>Bases de NT/MEs: 5 NT/ME Encontradas: 24 NT/ME Aplicables: 24</p>

Nota: Elaborado por el Autor

Se realizó una revisión bibliográfica sistemática con base en la metodología prisma (Khan et al., 2003; Nasir et al., 2013; Tsafnat et al., 2014). En el esquema que se muestra en la Figura 1, se establece los criterios y procedimiento a seguir en el desarrollo de la revisión.

En la Tabla 1 se muestran los resultados que se obtiene al ejecutar la metodología prisma. Los documentos a utilizar en esta revisión sistemática, se enmarcan únicamente en: artículos de difusión científica y normas técnicas y métodos de ensayo estándar.

Tabla 1.

Resultados de la ejecución de la metodología prisma

Documentos				Palabras clave
Base de datos	Encontrados	Seleccionados	Porcentaje	
ACS Publications	9	3	7%	Inglés: <i>Jatropha curcas</i> oil, methyl esters, physicochemical properties, B100 characterization, methyl acetate, biodiesel, supercritical fluid, interesterification, transesterification, metal oxides, ZnO, ASTM D6751, EN 14214, diesel – biodiesel blends.
One Petro	5	2	5%	
JSTOR	4	2	5%	
Scielo	12	1	2%	
Science Direct	96	25	61%	
Scopus	44	7	17%	
Taylor & Francis	6	1	2%	
Total	176	41	100%	
Normas técnicas / Métodos estándar de ensayo				Español: aceite de <i>Jatropha curcas</i> , metil ésteres, propiedades físico – químicas, caracterización B100, metil acetato, biodiésel, fluido supercrítico, interesterificación, transesterificación, óxidos metálicos, ZnO, ASTM D6751, EN 14214, mezclas diésel - biodiésel
Base de datos	Encontrados	Seleccionados	Porcentaje	
ASTM Compass	15	13	65%	
DIN	1	1	5%	
EN	1	1	5%	
ISO	2	2	10%	
NTE INEN	5	3	15%	
Total	24	20	100%	

Nota: Elaborado por el Autor

1.7.1. *Jatropha curcas*

Como se muestra en la Tabla 2, la *Jatropha curcas* es una especie que pertenece a la familia de las euforbiáceas. Este tipo de plantas tienen un origen tropical, con potencial de siembra y crecimiento en zonas con condiciones climáticas donde se presenta alta y bajo nivel de precipitaciones al año (Ang et al., 2014; Carels et al., 2012). En el país, esta planta se siembra y cultiva en la modalidad de cercos vivos, principalmente en las provincias de Guayas, Manabí y Santa Elena; debido a que sus productos no tienen aplicaciones alimenticias. El cultivo es de cosecha rápida, ya que permite su comercialización a partir del primer año de siembra (Andreo-Martínez et al., 2020).

Tabla 2.

Taxonomía de la planta

Reino	Plantae
Subreino	Tracheobionta
División	Embryophyta
Clase	Magnoliopsida
Subclase	Rosidae
Orden	Malpighiales
Familia	Euphorbiaceae
Subfamilia	Crotonoideae
Tribu	Jatropheae
Género	<i>Jatropha</i>
Especie	<i>Jatropha curcas</i>

Nota: Sistema Nacional de Vigilancia y Monitoreo de plagas (2020). Tabla modificada por el Autor.

Desde el año 2008 el Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias – INIAP impulsa proyectos para la siembra y extracción de aceite de *Jatropha curcas* y destinarlo en aplicaciones energéticas. Bajo este contexto, el proyecto icónico hace

referencia al uso del aceite en la generación eléctrica para en las Islas Galápagos como un mecanismo de conservación natural (Llanes Cedeño, 2017).

Figura 2.

Arbusto de *Jatropha curcas*, fruto y semillas



Nota: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (2011)

Las plantas que en la actualidad se encuentra en fase productiva en la región costa, poseen las características que se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3.

Característica de la especie Jatropha curcas que se cultiva en el país

Parámetro	Descripción
Tipo	arbusto
Altura	1 - 8 metros
Vida productiva	perenne, hasta los 50 años
Tallo	recto y grueso
Corteza	lisa
Hojas	ovaladas (3 - 7 óvalos), largo: 12 -24 cm, ancho: 6 - 15 cm.
Raíces	una central, 4 - 5 laterales
Semilla	ovalada de color negro (15 -20 mm de diámetro aprox.)
Fruto	ovalada de color verde/amarillo (30 mm de diámetro aprox.)

Nota: Kumar et al. (2016). Tabla modificada por el Autor.

1.7.2. Composición de ácidos grasos del aceite de *Jatropha curcas*

El aceite se obtiene de la semilla generalmente a través el proceso de compresión calefactado. El porcentaje de aceite vegetal recuperado por semilla reportado por los investigadores Jain & Sharma (2010; Lee (2012) y Oladeji & Adedipe (2012); muestra que se encuentra entre el 25 al 40 % p/p. En la Figura 3 se observa una muestra del aceite de *Jatropha curcas* filtrado, el cual puede ser destinado a la producción de biocombustibles.

Figura 3.

Muestra de aceite de Jatropha curcas, extraída de las semillas



Nota: Tomado de Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (2011)

El perfil lipídico del aceite de *Jatropha curcas* se muestra en la Tabla 4 como un resumen de resultados obtenidos por Kumar et al. (2016), Niza et al. (2013), Salar-García et al. (2016), Nakpong & Wootthikanokkhan (2010), Campanelli et al. (2010), Juan et al. (2011)), en sus investigaciones. El perfil lipídico que muestra el aceite es un punto de análisis muy importante en la producción de biodiésel, no solo porque muestra los ácidos grasos mayoritarios, el grado de insaturaciones y las propiedades de transporte que se derivan del estado físico que muestra el aceite a temperatura

ambiente; sino que también permite predecir que las propiedades que puede presentar el biodiésel. Sin olvidar que su composición corresponde a etil o metil ésteres de ácidos grasos (Meher et al., 2006; Patil et al., 2009; Prabhu et al., 2018).

Los ácidos grasos mayoritarios corresponden son: oleico, linoleico, palmítico y esteárico; estos ácidos grasos son insaturados y equivalen del 70 al 80 % de la composición del aceite. Por lo tanto, se considera como un aceite ligero y que se encuentra en estado líquido a temperatura ambiente (15 °C). Cabe mencionar que las pequeñas variaciones en los porcentajes se atribuyen a las condiciones del cultivo como son: ubicación geográfica, temperatura y humedad promedio y la cantidad de luz (Jain & Sharma, 2010).

Tabla 4.

*Composición de ácidos grasos del aceite de *Jatropha curcas**

Ácido graso	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]
Ácido Mirístico (C14:0)	<0.8		-	-	-	
Ácido Palmítico (C16:0)	14.2 – 15.2	13.3	16.8	13.8	12.8	13.4
Ácido Palmitoleico (C16:1)	-	-	-	-	-	-
Ácido Esteárico (C18:0)	6.3 – 6.9	4.9	4.6	6.8	5.0	6.4
Ácido Oleico (C18:1)	41.5 – 48.8	32.0	41.5	41.7	42.9	41.0
Ácido Linoleico (C18:2)	34.3 – 44.4	45.0	37.0	35.6	39.6	38.3
Ácido Linolénico (C18:3)	-	0.2	-	-	-	
Otros	-	4.6	0.1	-	-	0.8

Nota: [1] Kumar et al. (2016), [2] Niza et al. (2013), [3] Salar-García et al. (2016), [4] Nakpong &

Wootthikanokkhan (2010), [5] Campanelli et al. (2010), [6] Juan et al. (2011). Tabla elaborada por el Autor

1.7.3. Propiedades físico químicas del aceite de *Jatropha curcas*

En la Tabla 5 se enlistan las propiedades físico químicas reportados por Deng et al. (2011), Yee et al. (2011) y Contran et al. (2013) en el desarrollo de sus investigaciones. Los resultados de la caracterización del aceite de *Jatropha curcas* se comparan con los rangos establecidos por la norma DIN 51623:2015-12 “*Fuels for vegetable oil compatible combustion engines - Fuel from vegetable oil – Requirements and test methods*”. De acuerdo con la información, se establece que el aceite de *Jatropha curcas* es una materia prima idónea para ser transformada en biodiésel independientemente del mecanismo de reacción a emplear.

Las propiedades que diferencian a este aceite sin contar que no es comestible son: su baja viscosidad cinemática, 6.8 mm²/s más baja que la viscosidad cinemática del aceite de palma (31.3 mm²/s), una de las materias primas más utilizadas por la industria de biocombustibles; y su bajo contenido de azufre 13 mg/Kg, que permite realizar mezclas para mejorar la calidad de los combustibles fósiles reduciendo las emisiones al ambiente SO_x (Malhotra & Raje, 2003; Ozcanli et al., 2013; Prabhu et al., 2018).

Por otra parte, el índice de yodo mide la cantidad de dobles enlaces y como se vio en la composición de ácidos grasos de la Tabla 4 va acorde con el grado de insaturaciones. El índice de peróxido mide el grado de oxidación inicial del aceite, mientras que el índice de acidez la cantidad de ácidos grasos libres, estos dos parámetros establecen si aceite a emplear en el análisis no ha pasado por un periodo wdegenerativo por almacenamiento (Anitescu & Bruno, 2012).

Finalmente, el punto de escurrimiento y punto de nube, evidencian que es un aceite ligero y entrega una referencia de la calidad del biodiésel que se puede obtener

en cuanto a propiedades de transporte, arranque en frío e inyección (Herrera-Susa et al., 2020; Lacerda et al., 2015).

Tabla 5.

Propiedades físico químicas del aceite de Jatropha curcas.

Propiedad	Método de ensayo	Unidad	Rango	[1]	[2]	[3]
Agua y sedimentos	ASTM D1796-11	%	<0.05	0.052	1,4	-
Contenido de azufre	ASTM D2622-16	mg/Kg	<15	-	-	-
Densidad a 15,6 °C	ASTM D1298-12b	Kg/m ³	900-930	892	920	920 – 950
Índice de acidez	ASTM D664-17a	mg KOH/g aceite	<2.00	1.05	28	0.92 – 6.16
Índice de peróxido	ISO 3960:2013	meq O ₂ /Kg aceite	-	-	-	-
Índice de saponificación	ISO 3657:2013	mg KOH/g aceite	-	-	-	102.9 – 209.0
Índice de yodo	ISO 3961:2013	g I/100 g aceite	<125	-	-	-
Punto inflamación	ASTM D92-18	°C	>101	225	225	201 – 240
Viscosidad cinemática 40 °C	ASTM D445-17a	mm ² /s	< 35.00	24.5	24.5	-
Punto de escurrimiento	ASTM D5950-02	°C	-	-3	-3	-3
Punto de nube	ASTM D2500-17a	°C	-	-	-	2
Índice de cetano	ASTM D613	-	45 -70	51	-	38 – 51
Poder calórico	ASTM D4809-18	MJ/Kg		38.65	38.65	37.8 – 42.1

Nota: [1] Deng et al. (2011), [2] Yee et al. (2011), [3] Contran et al. (2013). Tabla elaborada por el Autor

1.7.4. Producción de biodiésel a partir del aceite de *Jatropha curcas*

En la Tabla 6 se muestra un resumen con las mejores combinaciones de factores experimentales para la producción de biodiésel a partir de aceite de *Jatropha curcas*. En los últimos años, los esfuerzos de los investigadores por generar conocimiento acerca de mecanismos de transesterificación de aceites vegetales, ha encontrado mayor impacto en los mecanismos que emplean catálisis: ácida, catálisis básica, catálisis enzimática y fluido supercrítico.

Los mecanismos de catálisis ácida y de catálisis básica, comúnmente son considerados como métodos convencionales de producción de biodiésel, ya que en la actualidad son utilizados en la producción industrial de biodiésel (Jain & Sharma, 2010; Om Tapanes et al., 2008; Saifuddin et al., 2015). Sin embargo, muestran varias limitaciones en cuanto a los requerimientos de calidad de las materias primas como: presentar un contenido de ácidos grasos libres > 2% p/p y contenido de humedad > 0.06 %, para no tener reacciones de hidrólisis y de saponificación, tiempos de reacción de 1 a 6 horas en rangos de temperatura comprendidos entre los 30 y 85 °C, para alcanzar un rendimiento sobre los ésteres de ácido graso de < 90 %, como lo han reportado los investigadores Bernal et al. (2012); Contran et al. (2013) y Juan et al. (2011) en sus trabajos.

En este sentido, los mecanismos de catálisis enzimática y de fluido supercrítico, son considerados como métodos no convencionales. El primero emplea enzimas lipasas como catalizador de reacción en condiciones normales, subcríticas y supercríticas, obteniéndose rendimientos por encima del 90 % en tiempos de reacción que varía de 20 a 30 min; mientras que el segundo, es un mecanismo autocatalítico que solo se requiere el uso del aceite y del solvente para llevar a cabo la reacción, donde

Tabla 6.

Condiciones y variables de reacción para distintos mecanismos de esterificación para el aceite de Jatropha c.

Mecanismo de esterificación	Solvente	Investigadores	Relación molar (solvente: aceite)	Cantidad de catalizador (% p/p aceite)	Condiciones de reacción	Rendimiento de ésteres alquílicos (%)	
Catálisis ácida	Metanol	Berchmans and Hirata (2008)	6.17:1	1.4 % H ₂ SO ₄	60 min, 65 °C	90	
		Jain and Sharma (2010)	9.6:1	0.55 % H ₂ SO ₄	180 min, 50 °C	90	
		(Kafuku et al., 2010)	15:1	3 % SnSO ₄	2 h, 180 °C	97	
Catálisis básica	Etanol	Tiwari et al. (2007)	6:1	2 % H ₂ SO ₄	6 h, 80 °C	88.4	
	Metanol	(Boonmee et al., 2010)	6:1	1 % NaOH	95 min., 60 °C	99.87	
		Tang et al. (2007)	24:1	0.8 % micro NaOH	30 min, 250° C	90.5	
		(Oladeji & Adedipe, 2012)	6:1	0.5 % NaOH	1 h, 60 °C	99	
Catálisis enzimática	Etanol	(Nakpong & Wootthikanokkhan, 2010)	6:1	1 % NaOH	40 min, 60 °C	98.6	
		Tapanes et al. (2008)	8:1	1 % KOH	5 h, 20 °C	90	
		Metanol	Calvo & Ladero (2010)	5:1	30 % Novozym 435	8 h, 45 °C, 6.8 MPa	38
			3:1	20% Lipasa B <i>Candida antarctica</i>	6 h, 45 °C, 13 MPa	61	
		4:1	20 % Lipasa <i>Rhizopus oryzae</i>	3 h, 45 °C, 13 MPa	99.13		
Supercrítico	Etanol	Calvo & Ladero (2010)	5:1	30 % Novozym 435	8 h, 45 °C, 6.8 MPa	41	
		Metanol	(Niza et al., 2011)	44:1	-	27 min, 358 °C, 22 MPa	89.4 - 94
			(Salar-García et al., 2016)	40:1	-	90 min. 325 °C, 35 MPa	99.5
	(Samniang et al., 2014)		40:1	-	5 min, 320 °C, 15 MPa	84.6	
	Hawash et al. (2009)		43:1	-	5 min, 320 °C, 8.4 MPa	99	
	Metil acetato	(Niza et al., 2011)	50:1	-	32 min, 400 °C, 22 MPa	71.90	
		(Campanelli et al., 2010)	42:1	-	50 min, 345 °C, 20 MPa	99.8	
	(Goembira & Saka, 2013)	42:1	-	45 min, 350 °C, 20 MPa	96.7		

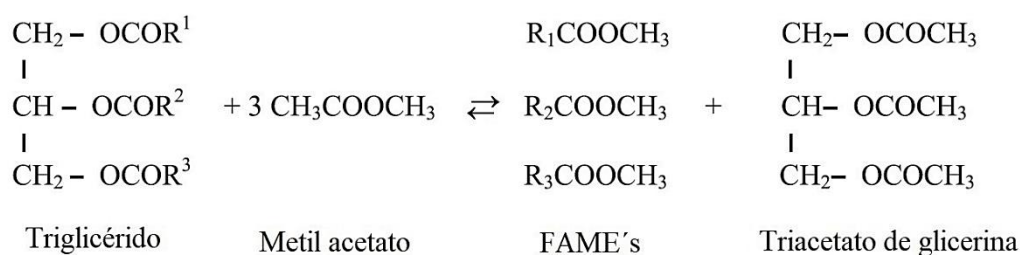
Nota: Investigaciones citas. Tabla elaborada por el Autor.

los mejores resultados se han reportado al emplear alcoholes de cadena corta como solventes en lugar de ésteres, obteniéndose rendimiento < 90 % en tiempos de reacción que va de los 22 a 32 min (Bernal et al., 2012). Dicho esto, la principal limitante que muestran los métodos no convencionales frente a los convencionales, son las condiciones severas de presión (15 – 22 MPa) y temperatura (350 – 400 °C) a las que se ejecuta la reacción, pese a que su principal ventaja es que son métodos en donde la calidad del aceite (índice de acidez, % agua) es indiferente (J. H. Lee et al., 2013; Meher et al., 2013; Montpetit & Tremblay, 2016; Yee et al., 2011).

En este punto es válido mencionar que si bien el método de interesterificación con metil acetato alcanza un rendimiento que va desde los 71.90 hasta los 99.99 %, es el único proceso que no genera glicerina (Figura 4) ya que se obtiene triacetato de glicerina, un compuesto que no requiere separación y que mejora las propiedades físico químicas del biocombustible.

Figura 4.

Reacción química de interesterificación de triglicéridos con metil acetato, que produce ésteres metílicos de ácidos grasos y triacetato de glicerina



Nota: Tomado de Goembira & Saka (2013).

1.7.5. Uso de óxidos metálicos como catalizadores de reacción

El uso de óxidos metálicos como catalizadores de la reacción de transesterificación en condiciones supercríticas ha sido estudiado por Sosa (2017). En

su investigación trabaja con aceite crudo de palma, etanol hidratado y óxido de zirconio; a condiciones supercríticas a 350 °C, 20 MPa y relación molar de etanol/aceite de 47:1. En su investigación concluye que la adición de 1,1% p/p de ZrO₂, permite aumentar el rendimiento de ésteres alquílicos de 95,1 % a 99,9% y a su vez reducir el tiempo de reacción de 30 a 15 min. Este trabajo guarda concordancia con los resultados expuestos por Yoo et al. (2010) y se evidencia una disminución significativa en las condiciones de reacción. Se toma estas investigaciones como base ya que se demuestra que el uso de óxidos metálicos favorece al proceso de obtención de biodiésel en condiciones supercríticas. Cabe mencionar, que tanto el mecanismo de transesterificación como el de interesterificación, son mecanismos de reacción por sustitución alquílica.

1.7.6. Calidad del biodiésel producido a partir del aceite de *Jatropha curcas*

La calidad de biodiésel reportada por los investigadores Nakpong & Wootthikanokkhan (2010), Boonmee et al. (2010), Deng et al. (2011) y Contran et al. (2013), se muestra en la Tabla 7. Los parámetros y rangos de calidad permitidos para mezclas B100, así como los métodos de ensayo; se toman de la norma ASTM D6751-07b “*Standard Specification for Biodiesel Fuel Blend Stock (B100) for Middle Distillate Fuels*” (ASTM Internacional, 2007) y de la norma EN 14214:2013 “*Liquid petroleum products - Fatty acid methyl esters (FAME) for use in diesel engines and heating applications - Requirements and test methods*” (European Standards, 2013). El punto de escurrimiento (PP) y el punto de nube (CP) son parámetros que se vinculan con el desempeño del combustible a temperaturas de inyección baja. Los biocombustibles por su composición (ésteres etílicos / metílicos de ácidos grasos), presentan problema de fluidez y taponamiento de inyectores, por tal razón su uso como compuesto puro B100 es limitado (Papavinasam & Street, 2015).

Tabla 7.

*Parámetros de calidad del biodiésel producido a partir de aceite de *Jatropha curcas* B100.*

Parámetros	Método de ensayo	Unidad	EN 14214	ASTM D6751	[1]	[2]	[3]	[4]
Viscosidad cinemática 40 °C	ASTM D445-17a	mm ² /s	3.5 – 5.0	1.9 – 6.0	4.34	4.36	3.89	4.51
Densidad a 15,6 °C	ASTM D1298-12b	Kg/m ³	860 – 900	860 – 900	880.3	880.5	886	870
Carbón residual	ASTM D4530-15	% p/p	-	Max. 0.05	0.06	-	0.2	-
Corrosión lámina de cobre	ASTM D130-12	Escala	-	Max. N° 3	1A	-	1A	-
Destilación T90 %	ASTM D1160-15	°C	-	Max. 360	-	-	-	-
Índice de acidez	ASTM D664-17a	mg KOH/g	-	Max. 0.5	0.27	0.27	0.15	0.28
Punto de inflamación	ASTM D93-16a	°C	-	Min. 130	>130	>206	186	181
Estabilidad a la oxidación	EN 14112	h	Min. 6.0	Min. 3.0	3.4	-	-	-
Contenido de agua	EN ISO 12937	mg/Kg	Max. 500	-	480	-	172	-
Contenido de FAME	EN14103	% p/p	Min. 96.5	-	98.6	-	-	-
Contenido de monoglicérido	EN 14105	% p/p	Max. 0.8	-	0.37	0.47	-	-
Contenido de diglicérido	EN 14105	% p/p	Max. 0.2	-	0.043	0.09	-	-
Contenido de triglicérido	EN 14105	% p/p	Max. 0.2	-	0	<0.01	-	-
Glicerol libre	EN 14105	% p/p	Max. 0.02	-	0	0.01	0.16	-
Glicerol total	EN 14105	% p/p	Max. 0.25	-	0.07	0.14	0.18	-
Índice de yodo	EN 14111	g I/100 g	Max. 120	-	62	98.41	-	-
Índice de cetano	ASTM D613	-	-	-	-	-	58	62
Contenido de azufre	ASTM D2622-16	mg/Kg	-	-	-	-	6	-
Punto de escurrimiento	ASTM D5950-02	°C	-	-	-1	-	-5	-2
Punto de nube	ASTM D2500-17a	°C	-	-	-	4.9	-	-
Poder calórico	ASTM D4809-18	MJ/Kg	-	-	39.6	-	38.7	40.64

Nota: [1] Nakpong & Wootthikanokkhan (2010), [2] Boonmee et al. (2010), [3] Deng et al. (2011), [4] Contran et al. (2013). Tabla elaborada por el Autor.

El punto de inflamación se vincula con las propiedades de almacenamiento y transporte de combustibles líquidos; en este caso se quiere obtener un punto de inflamación alto ya que indirectamente indica que su operación y manejo será seguro (Ozcanli et al., 2013).

Dentro de todo este análisis, se observa que el poder calórico del biodiésel es inferior al poder calórico reportado para un diésel convencional (42,7 MJ/kg) en un valor aproximado de 25 % (Herrera-Susa et al., 2020). Quizá la propiedad más relevante es el contenido de azufre, ya que en biocombustibles que se producen a partir de aceites vegetales, los valores que se obtienen se encuentran en el orden de 6 – 10 ppm (Montpetit & Tremblay, 2016). Por tal razón su uso se destina en mezclas de diésel / biodiésel en los porcentajes B5, B10, B15, B20 y B30 (Casas et al., 2013; Herrera-Susa et al., 2020; Llanes Cedeño, 2017).

1.7.7. Calidad de las mezclas de diésel / biodiésel de *Jatropha curcas*

La calidad de las mezclas diésel / biodiésel de *Jatropha curcas* se muestra en la Tabla 8, con base en los reportes de los investigadores Koh & Tinia (2011); Papavinasam & Street (2015) y Prabhu et al. (2018). Los parámetros y rangos de calidad se consideran la viscosidad cinemática a 40 °C en los rangos establecidos por la norma ASTM D6751-07b (ASTM Internacional, 2007) y la norma EN 14214:2013 (European Standards, 2013). Con base en la información detalla, se observa que la adición de un 20 de biodiésel de *Jatropha curcas*, no tiene un impacto significativo sobre las propiedades físico – químicas del diésel convencional.

Tabla 8.

*Parámetros de calidad para las mezclas de diésel/biodiésel de *Jatropha curcas* en diferentes porcentajes.*

Parámetros	Método de ensayo	Unidad	EN 14214	ASTM D6751	B100	B80	B60	B40	B20	Diésel
Viscosidad cinemática 40 °C	ASTM D445-17a	mm ² /s	3.5 – 5.0	1.9 – 6.0	4.23	3.98	3.64	3.41	3.02	2.87
Densidad a 15,6 °C	ASTM D1298-12b	Kg/m ³	860 – 900	860 – 900	873	866	860	854	852	850
Punto de inflamación	ASTM D93-16a	°C	-	Min. 130	148	131	119	97	88	76
Punto de escurrimiento	ASTM D5950-02	°C	-	-	4.2	3.9	3.6	3.4	3.3	3.1
Punto de nube	ASTM D2500-17a	°C	-	-	10.2	8.3	7.6	7.1	6.9	6.5
Poder calórico	ASTM D4809-18	MJ/Kg	-	-	42.8	42.9	43.0	43.5	43.8	44.0

Nota: Koh & Tinia (2011); Papavinasam & Street (2015) y Prabhu et al. (2018). Tabla elaborada por el Autor.

CAPÍTULO II

METODOLOGÍA

2.1. Tipo de Estudio

El proyecto de investigación planteado, se enmarca dentro del enfoque cuantitativo. Se da inicio con la investigación exploratoria de los métodos y técnicas de obtención de biodiésel mediante métodos convencionales y no convencionales, para así diseñar el mejor proceso de obtención de biocombustibles, libre de glicerina y que se vez cumpla con los requisitos establecidos en la normativa internacional aplicable. A continuación, este proceso se validó, en el marco de una investigación descriptiva, ya que se requiere evaluar los procesos en la obtención del biocombustible y los parámetros de calidad para establecer si el producto cumple con las características necesarias para ser utilizado en motores.

2.2. Modalidad de investigación

Se aplicó una investigación de tipo teórico experimental. El diseño del proceso de obtención de biodiésel representa la parte teórica de la investigación debido a que se sustenta en los métodos y procedimientos reportados en los artículos de difusión científica que fueron seleccionados a través de la metodología primas. Por otra parte, la validación de este proceso representa la parte experimental, ya que se llevó a cabo empleando: diseños experimentales, técnicas analíticas, métodos de ensayos estándar, pruebas reproducibilidad y repetibilidad, entre otras; con el fin de evaluar las propiedades físico - químicas y características de los reactivos y productos utilizados.

En la Figura 5 se muestra el diagrama de estrategia metodológica que se siguió en la ejecución de la presente investigación. Cabe mencionar que el primer ítem que corresponde a la revisión bibliográfica se desarrolló en el Capítulo I, en el apartado de estado del arte (1.7).

Figura 5.

Diagrama de estrategia metodológica



Nota: Diagrama elaborado por el Autor.

2.3. Diseño del proceso de obtención de biodiésel

El diseño se realizó con base en los procedimientos y metodologías estudiadas en los documentos de difusión científica seleccionados mediante la metodología primas en el apartado de estado del arte. En este sentido, se propuso un diseño de bloques del proceso en donde se incorporaron todos los requerimientos de calidad, aspectos y puntos críticos a lo largo del proceso de producción.

2.4. Validación del proceso de obtención de biodiésel

El proceso que se planteó en el apartado 2.3, se validó mediante la metodología experimental. La validación se llevó a cabo en el Laboratorio de Combustibles, Biocombustibles y Aceites Lubricantes - LACBAL, de la Escuela Politécnica Nacional

2.5. Materias primas

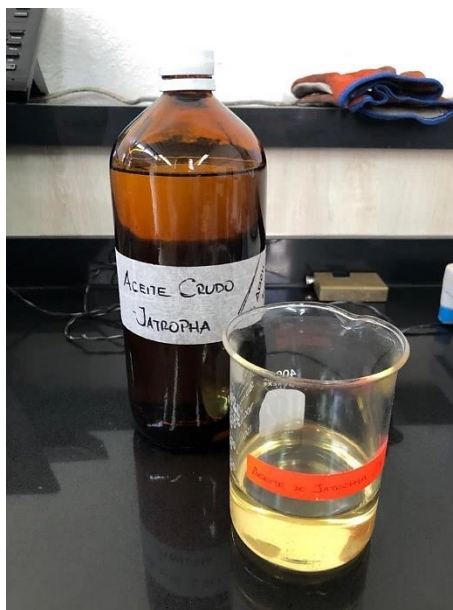
Las materias primas que se emplearon en este proyecto de investigación se detallan a continuación:

2.5.1. Aceite de *Jatropha curcas*

El aceite se obtuvo de una planta de extractora de la provincia de Manabí, cantón Portoviejo. Es un aceite ligero que se encuentra en estado líquido a temperatura ambiente (Quito, 13 °C), de un color amarillo brillante, como se muestra en la Figura 6.

Figura 6.

Aceite de Jatropha curcas de producción nacional



Nota: Fotografía tomada por el Autor.

En la Tabla 9 se muestra los parámetros de caracterización estudiados, el método de ensayo correspondiente y el rango permitido para aplicaciones de transformación en biocombustibles. Los parámetros de: agua y sedimentos, contenido de azufre, densidad, índice de acidez, punto de inflamación y viscosidad cinemática a

40 °C, se determinaron al aplicar los métodos de ensayo estándar ASTM correspondiente; mientras que los parámetros de: índice de peróxido (INEN, 2013a), índice de saponificación (INEN, 2013b) e índice de yodo (INEN, 2013c) con base en la normativa técnica ecuatoriana INEN para aceites y grasas de origen animal y vegetal.

Tabla 9.

*Parámetros de caracterización del aceite de *Jatropha curcas**

Propiedad	Método de ensayo	Unidad	Rango
Agua y sedimentos	ASTM D1796-11	%	<0.05
Contenido de azufre	ASTM D2622-16	mg/Kg	<15
Densidad a 15,6 °C	ASTM D1298-12b	Kg/m ³	900-930
Índice de acidez	ASTM D664-17a	mg KOH/g aceite	<2.00
Índice de peróxido	ISO 3960:2013	meq O ₂ /Kg aceite	-
Índice de saponificación	ISO 3657:2013	mg KOH/g aceite	-
Índice de yodo	ISO 3961:2013	g I/100 g aceite	<125
Punto inflamación	ASTM D92-18	°C	>101
Viscosidad cinemática 40 °C	ASTM D445-17a	mm ² /s	< 35.00

Nota: Métodos de prueba estándar ASTM e ISO. Tabla elaborada por el Autor.

Con base en la Tabla 9, a continuación, se describe los materiales y métodos utilizados para llevar a cabo cada parámetro de caracterización para las grasa y aceites de origen animal y vegetal. Los ensayos se realizaron en el Laboratorio de Combustibles, Biocombustibles y Aceites Lubricantes – LACBAL, de la Escuela Politécnica Nacional.

2.5.1.1. Agua y sedimentos

Método de Ensayo: ASTM D1796 - 11. Método de prueba estándar para determinación de agua y sedimentos en fuelóleos mediante el método de centrifugación (Procedimiento de Laboratorio) (ASTM International, 2016a).

El ensayo se realiza en la Centrífuga Orto Alresa Digitor 21 C que se muestra en la Figura 7, con capacidad de 0 – 600 rpm. En un tubo de vidrio de tipo zanahoria de centrifugación se colocó 50 mL de aceite de *Jatropha curcas* y 50 mL de jet fuel y se depositó en la centrífuga. El análisis se desarrolla a 60 °C y 300 rpm, con una duración estimada de 20 min. Se dejó enfriar los tubos y se observó visualmente el porcentaje de agua y sedimentos obtenido.

Figura 7.

Centrífuga Orto Alresa Digitor 21 C - LACBAL.



Nota: Fotografía tomada por el Autor.

2.5.1.2. Contenido de azufre

Método de Ensayo: ASTM D2622-16. Método de prueba estándar para el azufre en productos derivados del petróleo mediante espectrometría de fluorescencia de rayos X dispersiva (ASTM International, 2016b).

El ensayo se realiza mediante el equipo Oxford X-Supreme que se muestra en la Figura 8. El equipo utiliza fluorescencia de rayos X para determinar el contenido de azufre de las diferentes muestras. Como resultado del análisis el instrumento reporta tres mediciones, el valor promedio y la desviación estándar. Se utilizó la curva de calibración de 5 – 500 ppm. El análisis se realiza por duplicado para validar los resultados.

Figura 8.

Equipo Oxford X Supreme - LACBAL



Nota: Fotografía tomada por el Autor.

2.5.1.3. Densidad

Método de Ensayo: ASTM D1298-12b. Método de prueba estándar para determinar la densidad, la densidad relativa o la gravedad API del petróleo crudo y los productos líquidos derivados del petróleo mediante el método de densímetro (ASTM International, 2017a).

Se utilizó el equipo marca Tamson ASTM que se compone de tres copas de enfriamiento y un baño termostático que mantiene la temperatura de las muestras a 15.6 °C. Para la lectura se utiliza un hidrómetro calibrado para la escala de aceites y grasas de 19 a 31 grados API. El ensayo se realiza por triplicado en diferentes días para validar los resultados. En la Figura 9 se muestra el equipo utilizado para el análisis.

Figura 9.

Equipo de densidad Tamson ASTM – LACBAL



Nota: Fotografía tomada por el Autor.

2.5.1.4. Índice de acidez

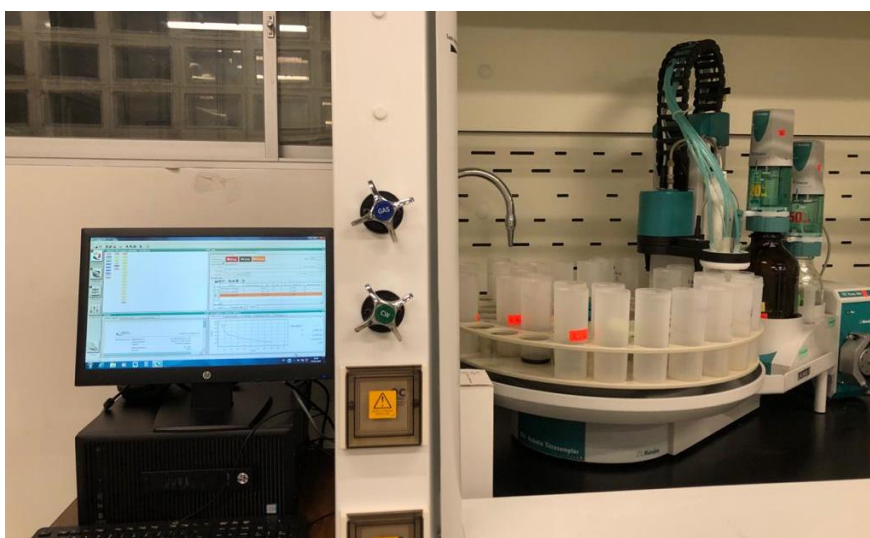
Método de Ensayo: ASTM D 664-17a. Método de prueba estándar para el número ácido de productos derivados del petróleo mediante valoración potenciométrica (ASTM International, 2017b).

El análisis se realizó en un titulador automático marca Metrohm 855, con el método de número ácido (Figura 10) y una balanza analítica AXIS de capacidad 10 mg a 220 g con cuatro decimales (Figura 11). El método consiste en una titulación potenciométrica, para ello se pesó aproximadamente 2 g de aceite de *Jatropha curcas*, se dosificó 50 mL de solvente (tolueno / propanol; 50:50 v/v) y se efectuó la titulación

potenciométrica. El equipo agrega 0,1 mL de solución de KOH 0,1 M continuamente, hasta alcanzar el punto de viraje. El instrumento reporta directamente el valor correspondiente al índice de acidez en mg KOH/g aceite. El ensayo se realiza por triplicado para validar los resultados.

Figura 10.

Titulador Automático Metrohm 855 – LACBAL



Nota: Fotografía tomada por el Autor.

Figura 11.

Balanza Analítica AXIS – LACBAL



Nota: Fotografía tomada por el Autor.

2.5.1.5. Índice de peróxido

Método de Ensayo: NTE INEN-ISO 3960:2013. Aceites y grasas de origen animal y vegetal. Determinación del índice de peróxido. Determinación yodométrica (visual) del punto final (IDT) (INEN, 2013a).

El método consiste en una doble titulación volumétrica, para ello se pesó aproximadamente 5 g de aceite de *Jatropha curcas* en un matraz Erlenmeyer de 500 mL; se adicionó 50 mL de ácido acético glacial e isoctano en una relación 50:50 v/v. Se añadió 0,6 mL de una solución de yoduro de potasio de concentración 175 g/L y se agitó vigorosamente la solución. Para la titulación inicial, se agregó 100 mL de agua destilada y se valoró con tiosulfato de sodio de concentración 0,01 M (indicador color amarillo pálido). A continuación, se añadió 0,5 mL de indicador de almidón y se valoró una vez más. El índice de peróxido se calculó en función de los parámetros detallados en la Ecuación [1]. El análisis se realizó por triplicado para validar los resultados.

$$IP = \frac{(V-V_0) \times F \times c \times 1\,000}{m} \quad [1]$$

donde:

V: es el volumen de solución de tiosulfato de sodio utilizado (mL)

V₀: es el volumen de solución de tiosulfato de sodio utilizado en el blanco = 0,15 (mL)

c: es la concentración de la solución de tiosulfato de sodio (M) = 0,01

F: es el factor de corrección de la solución = 0,97

m: es la masa de aceite empleada para el análisis (g)

2.5.1.6. Índice de saponificación

Método de Ensayo: NTE INEN-ISO 3657:2013. Aceites y grasas de origen animal y vegetal. Determinación del índice de saponificación (IDT) (INEN, 2013b).

El método establece una titulación potenciométrica, para ello se utiliza los mismos equipos que se detallan en el inciso 2.3.1.4. con la diferencia que en este caso se utilizó el método de índice de saponificación. En un balón de fondo redondo de 500 mL, se pesó 2 g de la muestra de aceite de *Jatropha curcas*. Se añadió 25 mL de una solución de KOH en etanol 0,5 M y se mantuvo durante 30 minutos en reflujo. El contenido del balón se trasvasó a un recipiente para ser valorado por el método potenciométrico. Se agregó 50 mL de etanol absoluto como solvente y se valoró con una solución de HCl 0,5 M. El equipo reporta el valor del índice de saponificación en mg KOH/g aceite. Para validar los resultados se realizó el ensayo por triplicado.

2.5.1.7. Índice de yodo

Método de Ensayo: NTE INEN-ISO 3961:2013. Aceites y grasas de origen animal y vegetal. Determinación del índice de yodo. (IDT) (INEN, 2013c).

El método contempla una doble valoración volumétrica. Se pesó cerca de 0,13 g de aceite en un matraz Erlenmeyer de 500 mL y se añadió 20 mL de una mezcla de isooctano / ácido acético glacial: 50/50 v/v como solvente, 10 mL de una solución de acetato de magnesio en ácido acético y 25 mL de reactivo de Wijs. El tiempo de reacción fue de 5 minutos. A continuación, se añadió 150 mL de agua destilada y 20 mL de una solución de yoduro de potasio de concentración 100 g/L. La mezcla resultante se tituló con una solución de tiosulfato de sodio 0,1 M. El ensayo se realizó por triplicado y se

registró el valor de gasto de tiosulfato. El índice de yodo se obtuvo con base en la Ecuación [2].

$$I_1 = \frac{12,69 \times C \times (V_1 - V_2)}{m} \quad [2]$$

donde:

I_1 : es el Índice de yodo (g yodo/100 g)

C: es la concentración de la solución de tiosulfato sódico (M) = 0,1

V_1 : es el volumen de solución tiosulfato de sodio para el blanco (mL) = 49,25

V_2 : es el volumen de solución tiosulfato de sodio empleado para la muestra (mL)

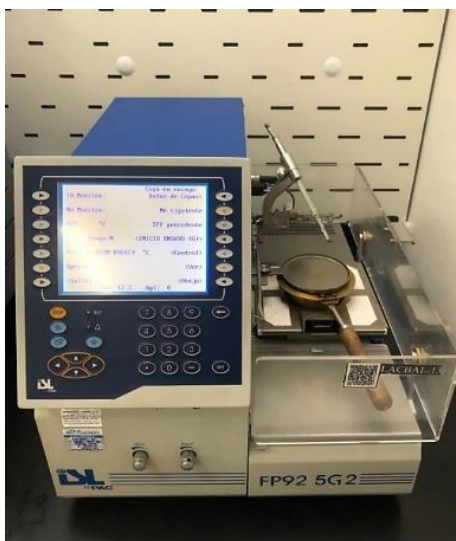
m: es la masa de aceite empleado en el análisis (g)

2.5.1.8. Punto de inflamación

Método de Ensayo: ASTM D92-18. Método de prueba estándar para determinación del punto de inflamación y de combustión según la prueba Cleveland de vaso abierto (ASTM International, 2018a).

Figura 12.

Equipo ISL-PAC para la medición del punto de inflamación en copa abierta – LACBAL



Nota: Fotografía tomada por el Autor.

El ensayo se realizó en el equipo marca ISL-PAC para la medición del punto de inflamación en copa abierta (Figura 12). Se ingresó el valor estimado de punto de inflamación (280 °C) y se colocó la muestra de aceite en la copa hasta el nivel marcado. El ensayo se realizó por triplicado para validar los resultados. Se reportó el punto de inflamación corregido a la presión atmosférica de la Quito.

2.5.1.9. Viscosidad cinemática a 40 °C

Método de Ensayo: ASTM D445-17a. Método de prueba estándar para determinación de la viscosidad cinemática de líquidos transparentes y opacos (ASTM International, 2017c).

Se utilizó un baño termostático de silicona Cannon CT-2000 (Figura 13) fijado a 40 °C y un viscosímetro Cannon-Fenske código B1377 - 200. Una vez se alcanzó el equilibrio térmico entre la muestra y el baño termostático, se registró los tiempos en segundos. El análisis se realizó por triplicado para validar los resultados.

La viscosidad cinemática se calculó con base en la Ecuación [3].

$$V = C \times t \quad [3]$$

donde:

V: es la viscosidad cinemática (mm²/s)

C: es la constante del viscosímetro (mm²/s²) = 0,0932

t: es el tiempo de flujo (s)

Figura 13.

Equipo para determinar la viscosidad cinemática a 40 °C – LACBAL



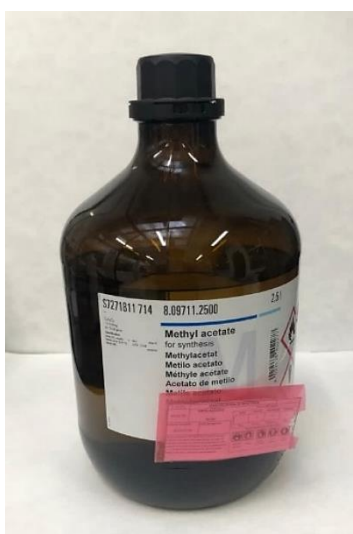
Nota: Fotografía tomada por el Autor.

2.5.2. Metil Acetato

Se utilizó como solvente, metil acetato grado analítico con una concentración >99 % v/v de la marca Merck. El reactivo posee una temperatura crítica (Tc) de 234 °C y presión crítica (Pc) de 4,69 MPa. El reactivo se muestra en la Figura 14.

Figura 14.

Reactivo grado analítico – Metil acetato



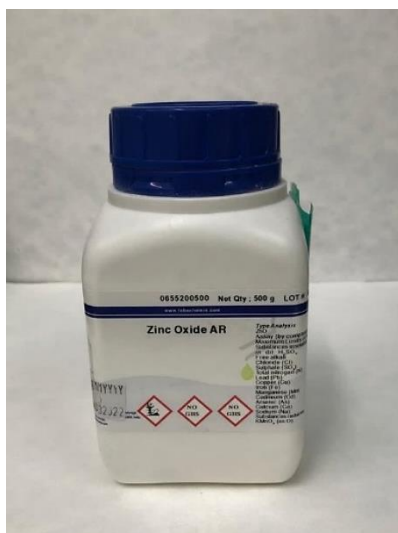
Nota: Fotografía tomada por el Autor.

2.5.3. Óxido de Zinc

Se utilizó como catalizador heterogéneo de reacción, óxido de zinc grado analítico con un porcentaje de pureza >99 % p/p de la marca Lobachem. El catalizador tiene una granulometría < 50 nm, que favorece la acción catalítica efectiva. En la Figura 15 se muestra el reactivo utilizado.

Figura 15.

Reactivo grado analítico – Óxido de zinc



Nota: Fotografía tomada por el Autor.

2.6. Condiciones de reacción

Para determinar las mejores condiciones de reacción se planteó un diseño experimental factorial 3x5 con una repetición, obteniéndose un total de 30 tratamientos experimentales y 24 grados de libertad para estimar el error experimental; como se muestra en la Tabla 10.

La reacción se llevó a cabo en un reactor PARR 4577 para procesos cinéticos supercríticos donde se alcanza una presión máxima de 5 000 psi y temperatura máxima de 500 °C (Figura 16). El reactor posee acoplado a un auto muestreador para líquidos PARR 4878, que permite tomar alícuotas del medio de reacción en función del tiempo. a diferentes tiempos.

Tabla 10.

Diseño experimental, factorial 3x5, n=1

Factores experimentales	Niveles	Variable de respuesta	Método de evaluación
Óxido metálico	ZnO		
Relación másica óxido – aceite, % p/p	0,5; 1,0 y 1,5	Rendimiento del biodiésel (%)	Contenido de ésteres metílicos de ácidos grasos (FAME's) en el biodiésel (%)
Tiempo de reacción, min	0, 10, 20, 30 y 40		
Temperatura, °C	375		
Presión, MPa	18		

Nota: Tabla elaborada por el Autor.

Las alícuotas del medio de la reacción se analizaron a continuación mediante cromatografía de gases. Para la cuantificación de los ésteres metílicos del medio de reacción, se utilizó un cromatógrafo Agilent DB 7098 con inyección automática ALS de 16 posiciones con detector de ionización de llama (FID) y gases masas, el cual se muestra en la Figura 17. Los cromatogramas obtenidos en casa punto se analizaron con el software MassHunter para determinar el rendimiento de la reacción sobre los ésteres metílicos. Finalmente, se determinó el punto óptimo para la reacción de interesterificación entre los triglicéridos y el metil acetato para el área de estudio seleccionada, mediante el uso del software STATGRAPHICS CENTURION XVI.

Una vez se obtuvo la superficie de respuesta maximizando la respuesta de metil ésteres, bajo las mismas condiciones de reacción se obtuvo un litro de biodiésel, para caracterizarlo con base en la norma ASTM D6751-07b (ASTM Internacional, 2007) y preparar las mezclas de diésel / biodiésel en los porcentajes. En este trabajo se analiza las mezclas B5, B10, B15, B20 y B30.

Figura 16.

Reactor Parr 4577 – LACBAL



Nota: Fotografía tomada por el Autor.

Figura 17.

Cromatógrafo de gases Agilent DB 7098 – LACBAL



Nota: Fotografía tomada por el Autor.

2.7. Operaciones de separación y purificación del producto final

Las operaciones de separación y purificación contemplan todos los procesos y procedimientos que se llevaron a cabo para obtener un biocombustible de calidad que cumpla

con los requisitos establecidos por la norma ASTM D6751-07b post reacción. Es oportuno mencionar que la reacción se realiza en un reactor batch, por lo tanto, se encuentran en mezcla reactivos, productos y catalizador. Esta mezcla, en función de la naturaleza de los compuestos, es susceptible a ser separada mediante procesos físicos y químicos, mismos que se consideran como parte fundamental en el diseño del proceso y que a su vez se describen en su totalidad en el CAPÍTULO III de esta investigación.

2.8. Caracterización de diésel premium, biodiésel B100, mezclas diésel / biodiésel en diferentes porcentajes.

Tabla 11.

*Parámetros de calidad del biodiésel B100 / mezclas producido a partir del aceite de *Jatropha curcas**

Parámetros	Método de ensayo	Unidad	ASTM	NTE
			D6751	INEN 1489
Viscosidad cinemática 40 °C	ASTM D445-17a	mm ² /s	1.9 – 6.0	1.3 – 2.4
Densidad a 15,6 °C	ASTM D1298-12b	Kg/m ³	860 – 900	-
Corrosión lámina de cobre	ASTM D130-12	Escala	Max. N° 3	1A
Destilación T90 %	ASTM D1160-15	°C	Max. 360	Max. 288
Índice de acidez	ASTM D664-17a	mg KOH/g	Max. 0.5	-
Punto de inflamación	ASTM D93-16a	°C	Min. 130	Min. 40
Agua y sedimentos	ASTM D1796-11	%	< 0,05	-
Contenido de azufre	ASTM D2622-16	mg/Kg	-	500
Punto de escurrimiento	ASTM D5950-02	°C	-	-
Punto de nube	ASTM D2500-17a	°C	-	-
Poder calórico	ASTM D4809-18	MJ/Kg	-	-

Nota: Métodos de ensayo de la norma ASTM D6751-07b y NTE INEN1489. Tabla elaborada por el Autor.

En la Tabla 11 se muestra los parámetros de caracterización estudiados, el método de ensayo correspondiente y el rango permitido para aplicaciones de transformación en biocombustibles.

2.8.1. Agua y sedimentos

Método de Ensayo: ASTM D1796-11. Método de prueba estándar para determinación de agua y sedimentos en fuelóleos mediante el método de centrifugación (Procedimiento de Laboratorio) (ASTM International, 2016a).

El procedimiento se realiza de forma similar al detallado en el inciso 2.5.1.1. En cada ensayo se 50 mL de biodiésel y las mezclas B5, B10, B15, B20, B30.

2.8.2. Cloud point / pour point

Método de Ensayo: ASTM D5950 – 02. Método de prueba estándar para el punto de fluidez de productos derivados del petróleo (Método de inclinación automática) (ASTM International, 2002). ASTM D2500 – 17a. Método de prueba estándar para el punto de nube de productos derivados del petróleo y combustibles líquidos (ASTM International, 2017d).

Los dos análisis se realizaron en el equipo ILS PAC OPTICAD con el método de cuantificación automática (Figura 18). Se colocó el biodiésel y las mezclas B5, B10, B15, B20, B30, en los vasos de vidrio para cada ensayo. El equipo realiza una prueba cada grado centígrado y como resultado reporta un número entero. Para validar los resultados se realiza el ensayo por duplicado.

Figura 18.

Equipo ILS PAC OPTICAD - LACBAL



Nota: Fotografía tomada por el Autor.

2.8.3. Contenido de azufre

Método de Ensayo: ASTM D 2622-16. Método de prueba estándar para el azufre en productos derivados del petróleo mediante espectrometría de fluorescencia de rayos X dispersiva (ASTM International, 2016b).

El ensayo se realizó con base en el procedimiento detallado en el inciso 2.5.1.2. tanto para el biodiésel como para las mezclas, los ensayos se realizaron por duplicado para validar los resultados.

2.8.4. Corrosión en la lámina de cobre

Método de Ensayo: ASTM D130-12. Método de prueba estándar para la corrosividad de productos derivados del petróleo sobre el cobre mediante prueba con tira de cobre (ASTM International, 2012).

El ensayo se realizó en baño termostático Normalab (Figura 19). Se colocó 30 mL de muestra (biodiésel; mezclas B5, B10, B15, B20, B30) en un tubo de ensayo, adicionalmente se añadió una lámina de cobre ASTM pulida. La temperatura del baño termostático se fijó en 50 °C, que corresponde a la temperatura a la que se realiza el ensayo. Transcurridas tres horas se analiza las láminas de cobre frente a los estándares ASTM, para clasificar el nivel de corrosión que se alcanza (Figura 19).

Figura 19.

Baño termostático Normalab para el ensayo de corrosión – LACABL



Nota: Fotografía tomada por el Autor.

2.8.5. Densidad

Método de Ensayo: ASTM D1298-12b. Método de prueba estándar para determinar la densidad, la densidad relativa o la gravedad API del petróleo crudo y los productos líquidos derivados del petróleo mediante el método de densímetro (ASTM Internacional, 2017a).

El ensayo se llevó a cabo con base en el procedimiento detallado en el inciso 2.5.1.3. Las lecturas de densidad se tomaron por triplicado en diferentes días.

2.8.6. Índice de acidez

Método de Ensayo: ASTM D664-17a. Método de prueba estándar para el número ácido de productos derivados del petróleo mediante valoración potenciométrica (ASTM Internacional, 2017b)

El ensayo se realiza con base en el procedimiento del inciso 2.5.1.4. En este caso se evalúa únicamente el índice de acidez del biodiésel. Para validar los resultados el análisis se realiza por triplicado.

2.8.7. Poder calórico

Método de Ensayo: ASTM D4809-18. Método de prueba estándar para el calor de la combustión de combustibles líquidos de hidrocarburos por calorímetro de bomba (método de precisión) (ASTM Internacional, 2018b).

El análisis de poder calórico se realizó en el Laboratorio de Análisis Instrumental del Departamento de Ingeniería Química de la Escuela Politécnica Nacional, para el biodiésel y las mezclas B5, B10, B15; B20 y B30. Los resultados tabulados corresponden a los resultados del informe entregado por dicho laboratorio.

2.8.8. Punto de inflamación

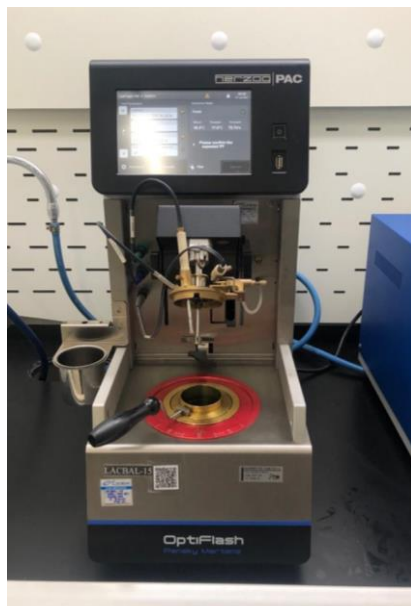
Método de Ensayo: ASTM D93 – 2016a. Método de prueba estándar para determinación del punto de inflamación por medio de analizador Pensky-Martens de vaso cerrado (ASTM Internacional, 2016c).

La medición del punto de inflamación se realizó en el equipo HERZOQ-PAC de copa cerrada (Figura 20). Se ingresó el punto de inflamación estimado y se colocó cada

muestra en la copa de bronce. El ensayo se realizó por duplicado ya que el equipo reporta valores enteros.

Figura 20.

Equipo HERZOQ-PAC para punto de inflamación en copa cerrada – LACBAL



Nota: Fotografía tomada por el Autor.

2.8.9. Viscosidad cinemática a 40 °C del biodiésel

Método de Ensayo: ASTM D445-17a. Método de prueba estándar para la determinación de la viscosidad cinemática de líquidos transparentes y opacos (ASTM Internacional, 2017c)

El ensayo se realizó con base en el procedimiento detallado en el inciso 2.5.1.9. Para el biodiésel se utilizó un viscosímetro tipo Cannon - Fenske de código 1018 – 100 ($C = 0,01540$), mientras que para las mezclas B5, B10, B15; B20 y B30, los viscosímetros Cannon – Fenske de código 75 – W987 ($C = 0.4534$) y 75 – W989 ($C = 0.4816$). Para validad los resultados se realizó cada ensayo por triplicado, lo que implica la toma de tres tiempos por cada muestra.

CAPÍTULO III

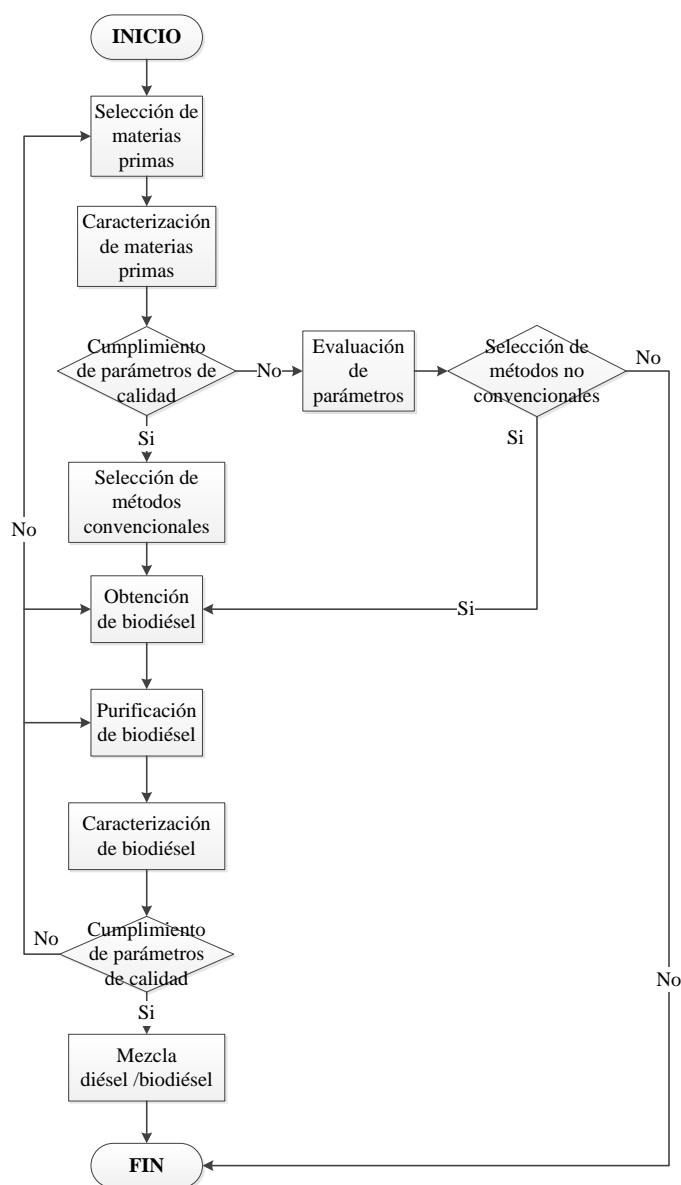
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Diseño del proceso de producción de biodiésel

El diagrama de flujo de proceso planteado para la obtención de biodiésel con base en la revisión bibliográfica se muestra en la Figura 21.

Figura 21.

Diagrama de proceso para la producción de biodiésel



Nota: Diagrama elaborado por el Autor.

Si bien el diagrama de flujo es aplicable para la producción de bicomcombustibles mediante cualquier método; en esta investigación se hace énfasis en el proceso de producción de biodiésel a partir del aceite *Jatropha curcas* con metil acetato en condiciones supercrítica en presencia de ZnO como catalizador de reacción.

3.2. Validación del Proceso de obtención de Biodiésel

3.2.1. Materias Primas

Las materias primas detalladas en el inciso 2.5: aceite de *Jatropha curcas*, metil acetato y óxido de zinc, se encuentran disponibles en el país; razón por la que es posible realizar la experimentación. De las materias primas mencionadas, tanto el metil acetato como el óxido de zinc, son reactivos certificados de laboratorio donde el fabricante garantiza un porcentaje de pureza > 99 %. Por lo tanto, la única materia prima que debe ser caracterizada para conocer sus propiedades físico químicas es el aceite de *Jatropha curcas*.

3.2.2. Caracterización de materias primas / Cumplimiento de parámetros de calidad

A partir de la información expuesta en el inciso anterior, los resultados que se detallan en la Tabla 12 corresponden a la caracterización del aceite de *Jatropha curcas* con base en la norma DIN 51623:2015-12 "*Fuels for vegetable oil compatible combustion engines - Fuel from vegetable oil - Requirements and test methods*" y las normas INEN aplicables. Cada análisis se encuentra detallado en el ANEXO I.

Los parámetros analizados muestran que el aceite de *Jatropha curcas* se encuentra dentro del rango de calidad establecido para aceites compatibles con aplicaciones energéticas, donde pueden ser transformados a biodiésel mediante

métodos convencionales (catálisis ácida, catálisis básica, catálisis enzimática) o no convencionales (fluido supercrítico, ultrasonido, etc.).

Tabla 12.

Resultados de la caracterización del aceite de Jatropha curcas

Parámetro	Método de ensayo	Aceite <i>Jatropha c.</i>	Rango	Unidad
Agua y sedimentos	ASTM D1796-11	<0,05	<0,05	%
Contenido de azufre	ASTM D2622-16	14	<15	ppm
Densidad a 15,6 °C	ASTM D1298-12b	918	900-930	kg/m ³
Índice de acidez	ASTM D664-17a	0,79	<2,00	mg KOH/g aceite
Índice de peróxido	INEN-ISO 3960:2013	2,12	-	meq O ₂ /kg aceite
Índice de saponificación	INEN-ISO 3657:2013	226,39	-	mg KOH/g aceite
Índice de yodo	INEN-ISO 3961:2013	96,09	<125	g I/100 g muestra
Punto inflamación	ASTM D92-18	294	>101	°C
Viscosidad cinemática 40 °C	ASTM D445-17a	29,1	< 35,00	mm ² /s

Nota: Tabla elaborada por el Autor.

De los parámetro de la tabla los de mayor interés son: el contenido de azufre con un valor de 14 ppm ubicándose a un punto del límite (15 ppm) que acorde con Abdulla et al.(2011) este contenido de azufre es atribuido a la composición del suelo, el uso de agroquímicos, fertilizantes y materia inorgánica que es utilizada por la planta en sus funciones biológica; la densidad y la viscosidad cinemática a 40°C que

muestran concordancia con el estado físico del aceite a temperatura ambiente, es un aceite ligero de baja viscosidad; y finalmente el índice de acidez que se asocia con el nivel de oxidación del aceite, obteniéndose un valor de 0,79 mg KOH/g aceite se tiene bajo contenido de ácidos grasos libres Koh & Tinia (2011). En la Tabla 13 se muestra los resultados para el parámetro de perfil lipídico del aceite del *Jatropha curcas*. Los resultados son cotejados con un resultado bibliográficos para la variedad de *Jatropha curcas* reportados por Kumar et al. (2016) y con un aceite crudo de palma reportado por Meher et al. (2013).

Tabla 13.

Perfil lipídico

Ácido graso	* Kumar et al. (2016)	Aceite de <i>Jatropha c.</i>	Aceite crudo de palma
Mirístico C14:0	<0,8	0,02	1,8
Palmítico C16:0	14,2 – 15,2	14,43	44,7
Estearico C18:0	6,3 – 6,9	5,65	5,4
Oleico C18:1	41,5 – 48,8	43,84	37,5
Linoleico C18:2	34,3 – 44,4	36,06	10,6

Nota: Tomado de: * Kumar, P., Srivastava, V. C., y Jha, M. K. (2016). *Jatropha curcas* phytotomy and applications: Development as a potential biofuel plant through biotechnological advancements.

En función de los resultados se establece que el aceite a emplearse, mismo que proviene de una planta extractora de la provincia de Manabí, en efecto corresponde a la variedad *Jatropha curcas* ya que su composición de ácidos grasos se encuentra dentro de los rangos reportados por Kumar et al. (2016) y los investigadores Nakpong & Wootthikanokkhan (2010) y Juan et al. (2011) citados en la Tabla 4. Respecto a la composición de ácidos grasos expresado en porcentaje, la muestra analizada presenta un 79.9 % de ácidos grasos insaturados. Por tal razón, el aceite de *Jatropha curcas* es

líquido a temperatura ambiente a diferencia del aceite crudo de palma. La composición de este último reportada por Sootchiewcharn et al. (2015) tiene presencia mayoritaria de ácidos grasos saturados 51,9 %.

3.2.3. Selección del método de obtención de biodiésel

Con base en los resultados de la caracterización del aceite de *Jatropha curcas* se evidencia que la calidad que presenta, permite al investigador seleccionar cualquier proceso de transformación debido a sus propiedades físico químicas y composición. Sin embargo, se ha seleccionado el método de obtención de biodiésel por interesterificación con metil acetato a condiciones supercríticas en presencia de óxido de zinc como catalizador de reacción.

3.2.4. Obtención de biodiésel

Se llevó a cabo el diseño experimental detallado en el inciso 2.6. Los resultados obtenidos en cada tratamiento experimental se muestran en la Tabla 14, mientras que las curvas de rendimiento promedio de metil ésteres en función del tiempo a diferentes porcentajes de catalizador, se detallan en la Figura 22.

Los porcentajes de rendimiento de cada tratamiento (Tabla 14) se ingresaron al software STATGRAPHICS CENTURION XVI, para ejecutar el análisis estadístico correspondiente, obteniéndose como resultados:

- a. Diagrama de Pareto estandarizado para el rendimiento en porcentaje (Figura 23);
- b. Gráfica de contornos de la superficie de respuesta estimada (Figura 24);
- c. Gráfica de superficie de respuesta estimada (Figura 25);
- d. El punto óptimo que maximiza el porcentaje de rendimiento; y
- e. Ecuación de modelo ajustado para los datos.

Tabla 14.

Resultados del diseño experimental

ZnO - aceite (% p/p)	Tiempo (min)	Rendimiento 1 (%)	Rendimiento 2 (%)	Promedio (%)
0,5	0	40,8	34,7	37,8
	10	64,9	52,7	58,8
	20	76,1	72,3	74,2
	30	85,3	78,4	81,9
	40	88,3	80,2	84,3
1,0	0	62,9	57,2	60,1
	10	79,5	74,4	77,0
	20	86,1	80,1	83,1
	30	89,5	85,5	87,5
	40	89,3	87,3	88,3
1,5	0	68,9	73,2	71,1
	10	84,3	85,3	84,8
	20	91,1	90,4	90,8
	30	88,5	90,6	89,6
	40	89,1	88,7	88,9

Nota: Tabla elaborada por el Autor.

Figura 22.

Rendimiento de metil ésteres en función del tiempo a diferentes porcentajes de ZnO

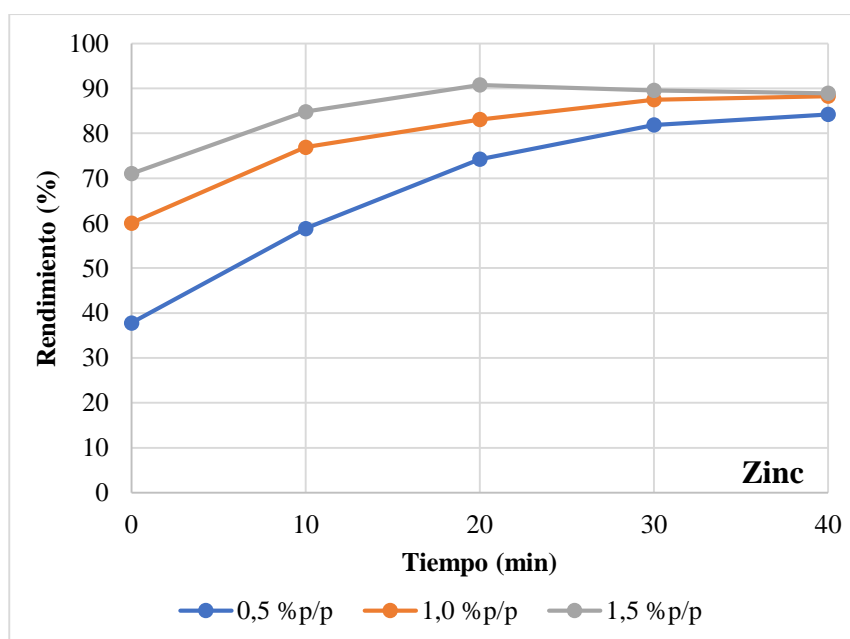


Figura 23.

Diagrama de Pareto estandarizado para la variable de respuesta (porcentaje de rendimiento)

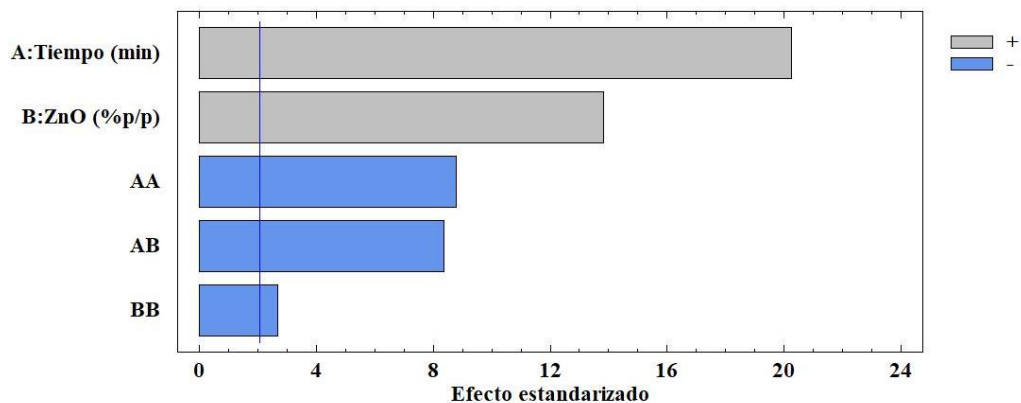


Figura 24.

Gráfica de superficie de respuesta estimada para el rendimiento de metil ésteres en función del tiempo a diferentes porcentajes de ZnO

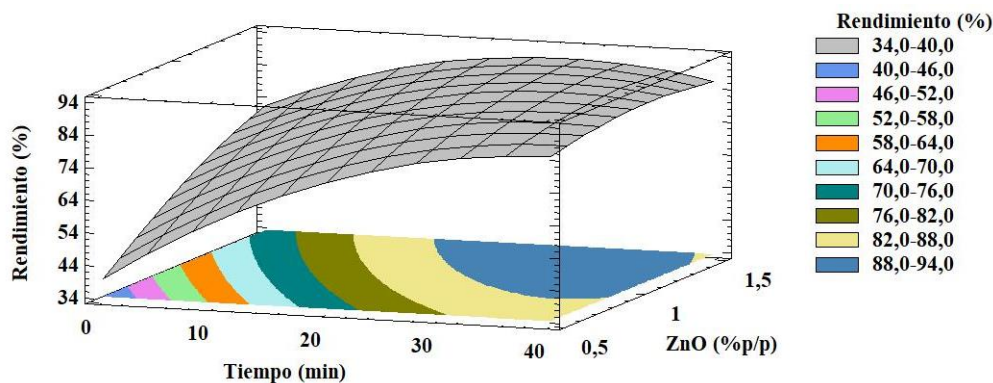
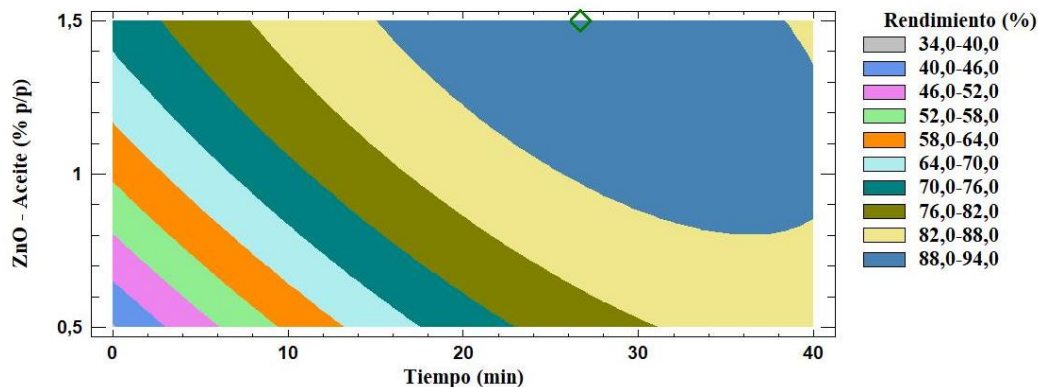


Figura 25.

Gráfica de contornos de la superficie de respuesta estimada para el rendimiento de metil ésteres en función del tiempo a diferentes porcentajes de ZnO



Respuesta Optimizada

Meta: maximizar Rendimiento (%)

Valor óptimo = 91,7152

<i>Factor</i>	<i>Bajo</i>	<i>Alto</i>	<i>Óptimo</i>
Tiempo (min)	0,0	40,0	26,705
ZnO - Aceite (% p/p)	0,5	1,5	1,5

El diagrama de Pareto muestra que las variables experimentales analizadas en el diseño: Tiempo (min), ZnO (% p/p) y sus interacciones cuadráticas, son significativas. Por lo tanto, afectan la cinética de reacción y el desplazamiento de reactivos a productos. En la gráfica de superficie de respuesta estimada se observa un comportamiento de rendimiento ascendente en función del aumento del tiempo y de la cantidad de óxido de zinc utilizada como catalizador, ubicándose el punto óptimo de la región estudiada en la gráfica de contornos de la superficie estimada en la región de 88 a 94% (color azul), con un valor de rendimiento óptimo de 91,7152 %, ajustándose el valor de las variables experimentales en Tiempo = 26,705 min y ZnO (% p/p) = 1,5 %. Finalmente, del análisis estadístico se obtuvo un modelo matemático ajustado con los datos de factores experimentales y variables de respuesta de la región experimental de estudio como se muestra a continuación.

Coef. de regresión para Rendimiento (%)

<i>Coficiente</i>	<i>Estimado</i>
constante	14,0829
A:Tiempo (min)	2,59593
B:ZnO (%p/p)	56,68
AA	-0,027369
AB	-0,756
BB	-11,96

La ecuación del modelo ajustado es

$$\text{Rendimiento (\%)} = 14,0829 + 2,59593 \cdot \text{Tiempo (min)} + 56,68 \cdot \text{ZnO (\%p/p)} - 0,027369 \cdot (\text{Tiempo (min)})^2 - 0,756 \cdot \text{Tiempo (min)} \cdot \text{ZnO (\%p/p)} - 11,96 \cdot (\text{ZnO (\%p/p)})^2$$

Se obtuvo 1 L biodiésel a las condiciones de reacción que maximizan el rendimiento de metil ésteres. La reacción se llevó a cabo en condiciones supercríticas

en el reactor PARR detallado en el inciso 2.6. Como producto de la reacción se obtiene una mezcla de compuestos que incluye: metil ésteres (biodiésel), triacetato de glicerina (subproducto de reacción), solvente que no reacciona (metil acetato), aceite que no reacciona (*Jatropha curcas*), catalizador (ZnO), otros (ácidos grasos y ésteres degradados).

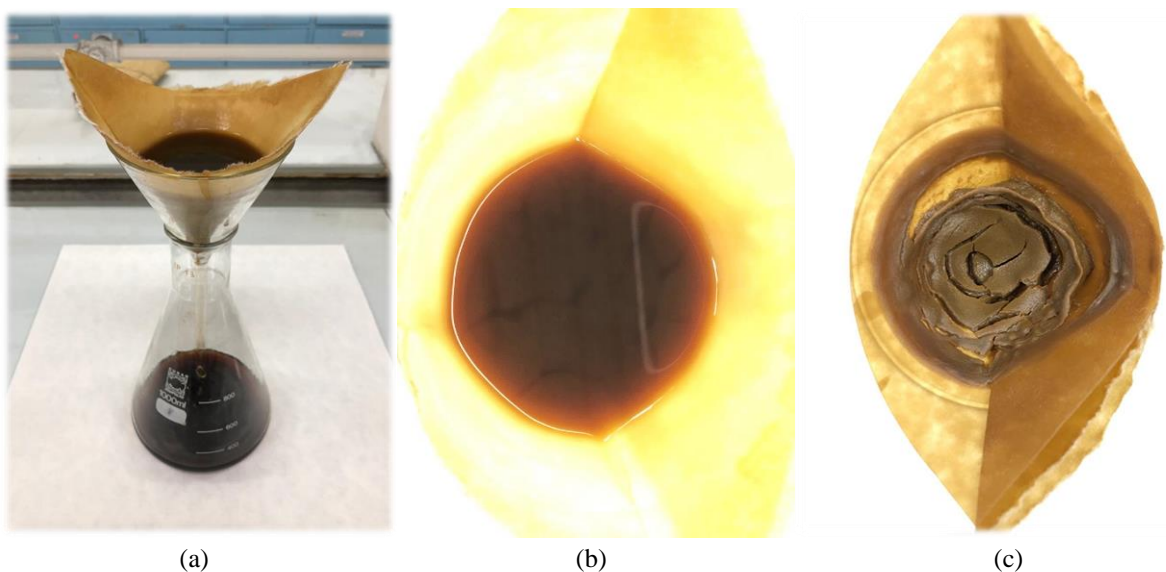
3.2.5. Purificación de biodiésel

Separación física

En este proceso aprovecha la baja solubilidad del ZnO en el biodiésel (2,67 mg / Kg de biodiésel) según lo reportado por Yoo et al. (2010) en su investigación. Se utilizó un material filtrante de tamaño de poro de 5-11 μm , para retener el catalizador con tamaño de grano de 50 μm (Figura 26). Pese a trabajar con un catalizador heterogéneo, el ZnO que se retiene el filtro no puede ser reutilizado en como catalizador de reacción directamente y requeriría un proceso de regeneración.

Figura 26.

a) Esquema de filtración (b) Mezcla con ZnO en suspensión (c) ZnO retenido



Nota: Fotografía tomada por el Autor.

Destilación atmosférica

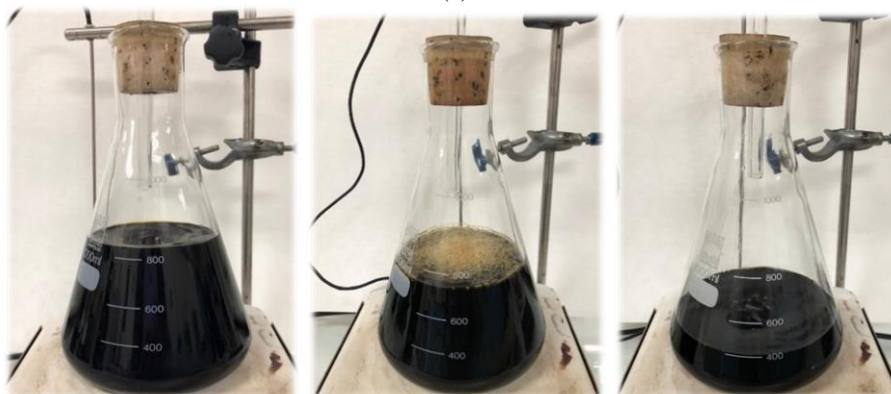
Corresponde a la recuperación del solvente (metil acetato) que no reacciona y que a su vez se encuentra en exceso con una relación molar de 40 metil acetato : 1 aceite (Figura 27). El proceso permite la recuperación del solvente libre aproximadamente en un 95 %; el 5 % restante se encuentra en equilibrio líquido - vapor ligado a la mezcla. Se aprovecha la diferencia en la temperatura de ebullición del solvente (metil acetato $T_{eb} = 57,1\text{ }^{\circ}\text{C}$); el producto (ésteres metílicos T_{eb} promedio = $350\text{ }^{\circ}\text{C}$); y subproducto (triacetato de glicerina $T_{eb} = 258\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Figura 27.

a) Esquema de destilación atmosférica (b) Mezcla sin sólidos en suspensión (c) Ebullición del Metil acetato (d) Mezcla libre de solvente en un 95 %.



(a)



(b)

(c)

(d)

Nota: Fotografía tomada por el Autor.

Destilación al vacío

Proceso final que se desarrolla a presión de vacío equivalente de 10 mm Hg (Figura 28). Permite separar: el residuo del solvente que no se logró separar mediante destilación atmosférica; los ésteres metílicos (B100) de los ácidos grasos que no reaccionaron en función de la temperatura de ebullición; y los compuestos superiores que se generan por la degradación térmica.

Figura 28.

(a) Esquema de destilación al vacío (b) Biodiésel B100 (derecha)



Nota: Fotografía tomada por el Autor.

3.2.6. Caracterización de diésel premium, biodiésel B100, mezclas diésel / biodiésel en diferentes porcentajes.

La caracterización del biodiésel B100 se realizó con base norma ASTM D6751-07b (ASTM Internacional, 2007) y la norma EN 14214:2013 (European

Standards, 2013), mientras que el diésel premium y las mezclas diésel biodiésel con base en la norma INEN 1489:2016. Productos derivados del petróleo. Diésel Requisitos (Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN), 2016). En la Figura 29. se presenta el biodiésel B100, diésel premium y sus mezclas B5, B10, B15, B20, B30. Cada análisis se encuentra desarrollado en el ANEXO II.

Figura 29.

De izquierda a derecha (a) Muestra B100 - muestra de diésel premium (b) Mezclas B5, B10, B15, B20, B30



Nota: Fotografía tomada por el Autor.

Los resultados de la caracterización se detallan en la Tabla 15. Las primeras muestras en caracterizarse con su norma técnica respectiva fueron: diésel premium y biodiésel B100. En cuanto al diésel premium, el reporte indica que el combustible es buena calidad debido a que todos los parámetros evaluados se encuentran dentro del rango de calidad establecido en la norma INEN 1489:2016. Se trabajó con un combustible de bajo contenido de azufre (49 ppm) para obtener un perfil de mezcla comparable.

El biodiésel B100 por otra parte, cumple los requisitos de calidad detallados en la norma ASTM D6751-07b. Del reporte se observa que el contenido de azufre se redujo respecto al aceite base, pues pasa de tener 14 ppm (aceite) a 6 ppm en el

Tabla 15.

Parámetros de calidad del biodiésel B100 / mezclas producido a partir del aceite de Jatropha curcas

Parámetros	Método de ensayo	Unidad	B100	B30	B20	B15	B10	B5	Diésel
Viscosidad cinemática 40 °C	ASTM D445-17a	mm ² /s	4,78	3,72	3,56	3,45	3,43	3,41	3,39
Densidad a 15,6 °C	ASTM D1298-12b	Kg/m ³	900	859	853	851	848	846	843
Corrosión lámina de cobre	ASTM D130-12	Escala	1A	1A	1A	1A	1A	1A	1A
Destilación T90 %	ASTM D1160-15	°C	355	344,7	341,9	340,9	340,4	336	335
Índice de acidez	ASTM D664-17a	mg KOH/g	0,25	-	-	-	-	-	-
Punto de inflamación	ASTM D93-16a	°C	143	65	65	65	65	65	65
Agua y sedimentos	ASTM D1796-11	%	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Contenido de azufre	ASTM D2622-16	mg/Kg	6	33,5	38,7	41,3	43,8	46,4	49
Punto de escurrimiento	ASTM D5950-02	°C	-1	-11	-11	-11	-14	-14	-17
Punto de nube	ASTM D2500-17a	°C	3	-9,9	-11,4	-11,9	-12,1	-12,7	-13,2
Poder calórico	ASTM D4809-18	MJ/Kg	38,24	43,26	43,96	44,37	44,73	45,09	45,44

Nota: Tabla elaborada por el Autor

producto (B100), por lo tanto, el biocombustible cumple con uno de sus principales objetivos es cual es reducir el contenido de azufre de los combustibles fósiles.

Respecto a sus propiedades de transporte, se debe resaltar los valores reportados para los parámetros de punto de escurrimiento (-1 °C) y punto de nube (3 °C), lo que indica que el biocombustible en mezcla no va a presentar problemas en el sistema de inyección y de arranque en frío (Herrera-Susa et al., 2020). Finalmente, el parámetro de poder calórico (38,24 MJ/Kg) se encuentra un 15.84 % por debajo del valor reportado para el diésel premium. Cabe mencionar que el valor reportado

muestra la alta calidad del biocombustible, ya que se esperaría una reducción de 15 a 20 % en biocombustibles según Malhotra & Raje (2003).

Finalmente, se analizan los parámetros de caracterización de las mezclas diésel premium – B100. En los parámetros de: agua y sedimentos, corrosión a la lámina de cobre y punto de inflamación en copa cerrada; la adición de biodiésel no afecta las propiedades frente al diésel premium. En los parámetros de: viscosidad cinemática, densidad y temperatura de destilación del 90 %; se observa que con la adición de biodiésel existe un aumento en los parámetros evaluados, sin embargo, cumple con los límites de diésel requisitos (max. 5 mm²/s, max. 360 °C). Respecto al contenido de azufre, la norma INEN 1489 establece un límite máximo de 500 ppm razón por la que todas las muestras sin excepción son aptas para el uso y comercialización a nivel nacional.

Cabe mencionar que para este caso de estudio la adición de 5 % de biodiésel redujo 5,30 % el contenido de azufre en las muestras. Las propiedades que no se incluyen en la norma y que en la investigación se tomaron en cuenta son: punto nube, punto de escurrimiento y poder calórico. Estas al ser comparadas con los resultados obtenidos por los investigadores Koh & Tinia (2011); Papavinasam & Street (2015) y Prabhu et al. (2018) que se resumen en la Tabla 8; se observa que existe una contundente mejoría en los parámetros, misma que es atribuida a la presencia de triacetato de metilo en la mezcla (Lacerda et al., 2015).

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

El proceso de obtención de biodiésel propuesto en esta investigación permite realizar una correcta selección del mecanismo de transformación (catálisis ácida, catálisis básica; catálisis enzimática, entre otros) basado en los parámetros de calidad de materia prima. No obstante, en la producción de biodiésel no basta con reportar únicamente el porcentaje de rendimiento de metil ésteres (enfoque cinético), o la caracterización del producto final; sino también agregar y detallar los procesos complementarios de separación y purificación para que la investigación cumpla con los parámetros de repetibilidad y reproducibilidad; con el único fin de entregar conocimiento que sea útil para escalar los procesos productivos.

La validación del proceso se llevó a cabo mediante el mecanismo de interesterificación en condiciones supercríticas del aceite de *Jatropha curcas* con metil acetato en presencia de óxido de zinc como catalizador de reacción.

La caracterización y evaluación de parámetros de calidad del aceite de *Jatropha curcas* evidenció que esta materia prima presenta un conjunto de propiedades fisicoquímicas y de composición para ser transformado en aplicación energéticas como biocombustible, ya que cumple satisfactoriamente con los parámetros de calidad expuestos en la normativa nacional INEN para aceites y grasas de origen vegetal y animal e internacional DIN 51623.

Mediante la aplicación del diseño experimental factorial multinivel se determinó que las condiciones de reacción óptimas en la región de estudio (aceite de *Jatropha curcas*, metil acetato, T reacción = 375 °C, P medio = 18 MPa, relación molas 40:1) fueron: 26,71 min de

reacción y 1,5 % p/p de óxido de zinc como catalizador de reacción para obtener un porcentaje de rendimiento máximo de metil ésteres de 91.72 %.

El biodiésel B100 que se obtiene después de realizar los procesos de purificación post reacción cumple con los requisitos de calidad de la norma ASTM D6751-07b; mientras que las mezclas B5, B10, B15, B20 y B30, cumplen satisfactoriamente con los parámetros de calidad de la norma INEN 1489:2016.

4.2. Recomendaciones

Desde la línea de formulación y evaluación de proyectos, es posible tomar esta investigación como base de estudio para realizar un estudio de factibilidad o prefactibilidad sobre la implementación del proceso de obtención de biodiésel a nivel piloto o industrial. Mientras que, desde el área de investigación de sistemas automotrices y eficiencia energética, resta por desarrollar el estudio de eficiencia energética y de emisiones de las mezclas B5, B10, B15, B20 y B30 en motores de combustión interna.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdulla, R., Chan, E. S., & Ravindra, P. (2011). Biodiesel production from *Jatropha curcas*: A critical review. *Critical Reviews in Biotechnology*, 31(1), 53–64.
<https://doi.org/10.3109/07388551.2010.487185>
- Andreo-Martínez, P., Ortiz-Martínez, V. M., García-Martínez, N., de los Ríos, A. P., Hernández-Fernández, F. J., & Quesada-Medina, J. (2020). Production of biodiesel under supercritical conditions: State of the art and bibliometric analysis. *Applied Energy*, 264(March), 114753. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114753>
- Ang, G. T., Tan, K. T., & Lee, K. T. (2014). Recent development and economic analysis of glycerol-free processes via supercritical fluid transesterification for biodiesel production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31, 61–70.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.11.004>
- Anitescu, G., & Bruno, T. J. (2012). Fluid properties needed in supercritical transesterification of triglyceride feedstocks to biodiesel fuels for efficient and clean combustion - A review. *Journal of Supercritical Fluids*, 63, 133–149.
<https://doi.org/10.1016/j.supflu.2011.11.020>
- ASTM International. (2002). D5950 – 02 Standard Test Method for Pour Point of Petroleum Products (Automatic Tilt Method). <https://doi.org/10.1520/D5950-02>
- ASTM International. (2007). ASTM D6751 - 07b Standard Specification for Biodiesel Fuel Blend Stock (B100) for Middle Distillate Fuels. <https://doi.org/10.1520/D6751-07B>
- ASTM International. (2012). ASTM D130-12 Standard Test Method for Corrosiveness to Copper from Petroleum Products by Copper Strip Test. <https://doi.org/10.1520/D0130->

ASTM International. (2015b). ASTM D1160-15 Standard Test Method for Distillation of Petroleum Products at Reduced Pressure. <https://doi.org/10.1520/D1160-15>

ASTM International. (2016a). ASTM D1796-11 Standard Test Method for Water and Sediment in Fuel Oils by the Centrifuge Method (Laboratory Procedure). <https://doi.org/10.1520/D1796-11R16>

ASTM International. (2016b). ASTM D2622-16b Standard Test Method for Sulfur in Petroleum Products by Wavelength Dispersive X-ray Fluorescence Spectrometry. <https://doi.org/10.1520/D2622-16>

ASTM International. (2016c). ASTM D93-16a Standard Test Methods for Flash Point by Pensky-Martens Closed Cup Tester BT - Standard Test Methods for Flash Point by Pensky-Martens Closed Cup Tester. <https://doi.org/10.1520/D0093-16A>

ASTM International. (2017a). ASTM D1298-12b Standard Test Method for Density, Relative Density, or API Gravity of Crude Petroleum and Liquid Petroleum Products by Hydrometer Method. <https://doi.org/10.1520/D1298-12BR17>

ASTM International. (2017b). ASTM D664-17a Standard Test Method for Acid Number of Petroleum Products by Potentiometric Titration. <https://doi.org/10.1520/D0664-17A>

ASTM International. (2017c). ASTM D445-17a Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids (and Calculation of Dynamic Viscosity). <https://doi.org/10.1520/D0445-17A>

ASTM International. (2017d). ASTM D2500 – 17a Standard Test Method for Cloud Point of Petroleum Products and Liquid Fuels. <https://doi.org/10.1520/D2500-17a>

- ASTM International. (2018a). ASTM D92-18 Standard Test Method for Flash and Fire Points by Cleveland Open Cup Tester. <https://doi.org/10.1520/D92-18>
- ASTM International. (2018b). ASTM D4809-18 Standard Test Method for Heat of Combustion of Liquid Hydrocarbon Fuels by Bomb Calorimeter (Precision Method). <https://doi.org/10.1520/D4832-11R18>.
- Bernal, J. M., Lozano, P., García-Verdugo, E., Burguete, M. I., Sánchez-Gómez, G., López-López, G., Pucheault, M., Vaultier, M., & Luis, S. V. (2012). Supercritical synthesis of biodiesel. *Molecules*, *17*(7), 8696–8719. <https://doi.org/10.3390/molecules17078696>
- Boonmee, K., Chuntranuluck, S., Punsuvon, V., & Silayoi, P. (2010). Optimization of biodiesel production from jatropha oil (*Jatropha curcas* L.) using response surface methodology. *Kasetsart Journal - Natural Science*, *44*(2), 290–299.
- Campanelli, P., Banchemo, M., & Manna, L. (2010). Synthesis of biodiesel from edible, non-edible and waste cooking oils via supercritical methyl acetate transesterification. *Fuel*, *89*(12), 3675–3682. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.07.033>
- Carels, N., Sujatha, M., & Bahadur, B. (2012). *Jatropha*, challenges for a new energy crop: Volume 1: Farming, economics and biofuel. *Jatropha, Challenges for a New Energy Crop: Volume 1: Farming, Economics and Biofuel*, *1*, 1–599. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-4806-8>
- Casas, A., Ramos, M. J., & Pérez, Á. (2013). Methanol-enhanced chemical interesterification of sunflower oil with methyl acetate. *Fuel*, *106*(865), 869–872. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.11.037>
- Contran, N., Chessa, L., Lubino, M., Bellavite, D., Roggero, P. P., & Enne, G. (2013). State-of-the-art of the *Jatropha curcas* productive chain: From sowing to biodiesel and by-

products. *Industrial Crops and Products*, 42(1), 202–215.

<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.05.037>

Deng, X., Fang, Z., Liu, Y. hu, & Yu, C. L. (2011). Production of biodiesel from *Jatropha* oil catalyzed by nanosized solid basic catalyst. *Energy*, 36(2), 777–784.

<https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.12.043>

European Standards. (2013). *EN 14214:2013. Liquid petroleum products - Fatty acid methyl esters (FAME) for use in diesel engines and heating applications - Requirements and test methods.*

Goembira, F., & Saka, S. (2013). Optimization of biodiesel production by supercritical methyl acetate. *Bioresource Technology*, 131, 47–52.

<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.12.130>

Herrera-Susa, D. A., Bermúdez-Santaella, J. R., & Castilla-Alvarez, C. E. (2020). Análisis del desempeño de la potencia y el torque de un motor diésel operando con mezclas de biodiesel de palma Analysis of the power and torque performance of a diesel engine operating with palm biodiesel blends "Analysis of the power and torque performa. *Ingeniería*, 25(3). <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/reving>

Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN). (2013a). NTE INEN-ISO 3960:2013 Aceites y grasas de origen animal y vegetal. Determinación del índice de peróxido.

Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN). (2013b). NTE INEN-ISO 3657:2013 Aceites y grasas de origen animal y vegetal. Determinación del índice de saponificación (IDT).

Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN). (2013c). NTE INEN-ISO 3961:2013 Aceites y grasas de origen animal y vegetal. Determinación yodo métrica. (visual) del punto final (IDT).

Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN). (2016). *NTE INEN 1489:2016*.

PRODUCTOS DERIVADOS DE PETRÓLEO. DIÉSEL. REQUISITOS. 7.

Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. (2011). *Promueven innovación en cultivo de jatropha para impulsar producción de biocombustibles | Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura*.

<https://iica.int/es/prensa/noticias/promueven-innovaci%25C3%25B3n-en-cultivo-de-jatropha-para-impulsar-producci%25C3%25B3n-de>

Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias. (2016). *INIAP e INER unen esfuerzos para el desarrollo del estudio de Aprovechamiento Energético de Biomasa Residual del Proyecto “Piñón para Galápagos”*. – Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias. <http://www.iniap.gob.ec/pruebav3/iniap-e-iner-unen-esfuerzos-para-el-desarrollo-del-estudio-de-aprovechamiento-energetico-de-biomasa-residual-del-proyecto-pinon-para-galapagos/>

ISO. (2014). PD ISO / TS 17307 : 2014. Animal and vegetable fats and oils - Gas chromatography of fatty acid methyl esters.

ISO. (2016). PD ISO / TS 17307 : 2016 BSI Standards Publication Petroleum products — Biodiesel — Determination of total esters content by gas chromatography.

Jain, S., & Sharma, M. P. (2010). Prospects of biodiesel from *Jatropha* in India: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14*(2), 763–771. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.10.005>

Juan, J. C., Kartika, D. A., Wu, T. Y., & Hin, T. Y. Y. (2011). Biodiesel production from *jatropha* oil by catalytic and non-catalytic approaches: An overview. *Bioresource Technology, 102*(2), 452–460. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.09.093>

- Kafuku, G., Lee, K. T., & Mbarawa, M. (2010). The use of sulfated tin oxide as solid superacid catalyst for heterogeneous transesterification of *Jatropha curcas* oil. *Chemical Papers*, 64(6), 734–740. <https://doi.org/10.2478/s11696-010-0063-1>
- Khan, K. S., Kunz, R., Kleijnen, J., & Antes, G. (2003). Five steps to conducting a systematic review. *Journal of the Royal Society of Medicine*, 96(3), 118. <https://doi.org/10.1258/JRSM.96.3.118>
- Koh, M. Y., & Tinia, T. I. (2011). A review of biodiesel production from *Jatropha curcas* L. oil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(5), 2240–2251. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.02.013>
- Kumar, P., Srivastava, V. C., & Jha, M. K. (2016). *Jatropha curcas* phytotomy and applications: Development as a potential biofuel plant through biotechnological advancements. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59, 818–838. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.358>
- Lacerda, C. V., Carvalho, M. J. S., Ratton, A. R., Soares, I. P., & Borges, L. E. P. (2015). Synthesis of Triacetin and Evaluation on Motor. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 26(8), 1625–1631. <https://doi.org/10.5935/0103-5053.20150133>
- Lee, J. H., Kim, S. B., Yoo, H. Y., Suh, Y. J., Kang, G. B., Jang, W. I., Kang, J., Park, C., & Kim, S. W. (2013). Biodiesel production by enzymatic process using *Jatropha* oil and waste soybean oil. *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, 18(4), 703–708. <https://doi.org/10.1007/s12257-012-0805-8>
- Lee, J. W. (2012). Advanced biofuels and bioproducts. *Advanced Biofuels and Bioproducts*, 9781461433, 1–1122. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-3348-4>
- Llanes Cedeño, E. A. (2017). Producción e Impacto del Biodiesel: Una Revisión. *INNOVA*

Research Journal, 2(7), 59–76. <https://doi.org/10.33890/innova.v2.n7.2017.229>

Malhotra, R. K., & Raje, N. R. (2003). Bio Fuels as Blending Components for Gasoline and Diesel Fuels. *SAE Technical Papers, 2003-Janua*(January).

<https://doi.org/10.4271/2003-26-0011>

Meher, L. C., Churamani, C. P., Arif, M., Ahmed, Z., & Naik, S. N. (2013). *Jatropha curcas* as a renewable source for bio-fuels - A review. *Renewable and Sustainable Energy*

Reviews, 26, 397–407. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.065>

Meher, L. C., Vidya Sagar, D., & Naik, S. N. (2006). Technical aspects of biodiesel production by transesterification - A review. *Renewable and Sustainable Energy*

Reviews, 10(3), 248–268. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2004.09.002>

Montpetit, A., & Tremblay, A. Y. (2016). A Quantitative Method of Analysis for Sterol Glycosides in Biodiesel and FAME Using GC-FID. *JAACS, Journal of the American Oil*

Chemists' Society, 93(4), 479–487. <https://doi.org/10.1007/s11746-016-2798-5>

Nakpong, P., & Wootthikanokkhan, S. (2010). Optimization of biodiesel production from *Jatropha curcas* L . oil via alkali-catalyzed methanolysis. *Journal of Sustainable Energy and Environment*, 1, 105–109.

Nasir, N. F., Daud, W. R. W., Kamarudin, S. K., & Yaakob, Z. (2013). Process system engineering in biodiesel production: A review. *Renewable and Sustainable Energy*

Reviews, 22, 631–639. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.01.036>

Niza, N. M., Tan, K. T., Ahmad, Z., & Lee, K. T. (2011). Comparison and optimisation of biodiesel production from *Jatropha curcas* oil using supercritical methyl acetate and methanol. *Chemical Papers*, 65(5), 721–729. <https://doi.org/10.2478/s11696-011-0063-9>

- Niza, N. M., Tan, K. T., Lee, K. T., & Ahmad, Z. (2013). Influence of impurities on biodiesel production from *Jatropha curcas* L. by supercritical methyl acetate process. *Journal of Supercritical Fluids*, 79, 73–75. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2013.02.021>
- Oladeji, A., & Adedipe, O. (2012). Production of biodiesel from *Jatropha* oil (Curcas Oil). *Nigerian Journal of Technological Research*, 7(2), 30–33. <https://doi.org/10.4314/njtr.v7i2.83777>
- Om Tapanes, N. C., Gomes Aranda, D. A., de Mesquita Carneiro, J. W., & Ceva Antunes, O. A. (2008). Transesterification of *Jatropha curcas* oil glycerides: Theoretical and experimental studies of biodiesel reaction. *Fuel*, 87(10–11), 2286–2295. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2007.12.006>
- Ozcanli, M., Gungor, C., & Aydin, K. (2013). Biodiesel fuel specifications: A review. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, 35(7), 635–647. <https://doi.org/10.1080/15567036.2010.503229>
- Papavinasam, S., & Street, C. (2015). Assessment of Microbiologically Influenced Corrosion of Metals in Biodiesel from *Jatropha curcas*. *NACE International*, 5772, 1–14.
- Patil, P. D., Gude, V. G., & Deng, S. (2009). Biodiesel production from *jatropha curcas*, waste cooking, and camelina sativa oils. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 48(24), 10850–10856. <https://doi.org/10.1021/ie901146c>
- Prabhu, A., Venkata Ramanan, M., & Jayaprabakar, J. (2018). Production, properties and engine characteristics of *Jatropha* biodiesel – a review. *International Journal of Ambient Energy*, 0(0), 1–5. <https://doi.org/10.1080/01430750.2018.1557548>
- Saifuddin, N., Samiuddin, A., & Kumaran, P. (2015). A Review on Processing Technology for Biodiesel Production. *Trends in Applied Sciences Research*, 10(1), 1–37.

<https://doi.org/10.3923/tasr.2015.1.37>

Saka, S., & Kusdiana, D. (2001). Biodiesel fuel from rapeseed oil as prepared in supercritical methanol. *Fuel*, 80(2), 225–231. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(00\)00083-1](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(00)00083-1)

Salar-García, M. J., Ortiz-Martínez, V. M., Olivares-Carrillo, P., Quesada-Medina, J., De Los Ríos, A. P., & Hernández-Fernández, F. J. (2016). Analysis of optimal conditions for biodiesel production from *Jatropha* oil in supercritical methanol: Quantification of thermal decomposition degree and analysis of FAMES. *Journal of Supercritical Fluids*, 112, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2016.02.004>

Samniang, A., Tipachan, C., & Kajorncheappun-ngam, S. (2014). Comparison of biodiesel production from crude *Jatropha* oil and Krating oil by supercritical methanol transesterification. *Renewable Energy*, 68, 351–355. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.01.039>

Sistema Nacional de Vigilancia y Monitoreo de plagas [SINAVIMO]. (2020). *Jatropha curcas*. <https://www.sinavimo.gob.ar/cultivo/jatropha-curcas>

Sootchiewcharn, N., Attanatho, L., & Reubroycharoen, P. (2015). Biodiesel Production from Refined Palm Oil using Supercritical Ethyl Acetate in A Microreactor. In *Energy Procedia* (Vol. 79). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.560>

Sosa, D. (2017). Estudio de la transesterificación del aceite crudo de palma con etanol hidratado a condiciones supercríticas en presencia del óxido de zirconio. Escuela Politécnica Nacional. Ecuador, Quito.

Tsafnat, G., Glasziou, P., Choong, M. K., Dunn, A., Galgani, F., & Coiera, E. (2014). Systematic review automation technologies. In *Systematic Reviews* (Vol. 3, Issue 1, p. 74). BioMed Central Ltd. <https://doi.org/10.1186/2046-4053-3-74>

Yee, K. F., Lee, K. T., Ceccato, R., & Abdullah, A. Z. (2011). Production of biodiesel from *Jatropha curcas* L. oil catalyzed by SO₄²⁻/ZrO₂ catalyst: Effect of interaction between process variables. *Bioresource Technology*, *102*(5), 4285–4289.

<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.12.048>

Yoo, S. J., Lee, H. shik, Veriansyah, B., Kim, J., Kim, J. D., & Lee, Y. W. (2010). Synthesis of biodiesel from rapeseed oil using supercritical methanol with metal oxide catalysts.

Bioresource Technology, *101*(22), 8686–8689.

<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.06.073>

ANEXOS

ANEXO I

Resultados por Parámetro de la Caracterización del Aceite de *Jatropha curcas*

A.I.1. Agua y sedimentos

En la Tabla A.1. se resume el resultado del análisis.

16

Resultado del análisis de agua y sedimentos

Muestra	Resultado %
Aceite de <i>Jatropha curcas</i>	< 0,05

A.I.2. Contenido de azufre

En la Tabla A.2. se muestran los resultados reportados por el equipo Oxford X Supreme para la cuantificación de azufre.

17

Resultados del análisis del contenido de azufre que reporta el equipo

Muestra	Contenido de azufre (ppm)	Promedio (ppm)
	14	
<i>Jatropha curcas</i>	14	14
	14	

A.I.3. Densidad

El resultado obtenido se muestra en la Tabla A.3.

18

Resultado del análisis de densidad

Muestra	Resultado (kg/m³)
Aceite de <i>Jatropha curcas</i>	919

A.I.4. Índice de acidez

Se realizó tres mediciones con tres muestras diferentes y se calculó el valor promedio como se detalla en la Tabla A. 4.

19

*Resultados para el índice de acidez del aceite de *Jatropha curcas**

Medición	Masa de la muestra (g)	Índice de acidez (mg KOH/g)	Promedio (mg KOH/g)
1	2,0400	0,786	
2	2,0145	0,795	0,790
3	2,0046	0,790	

Datos de la Muestra

ID1 aceite jatropa 02
 Sample size 2,0145 g

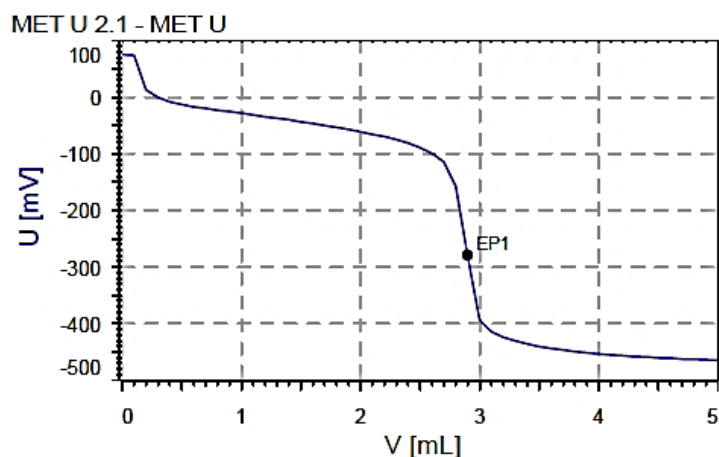
End points

MET U MET U 2.1

EP1 -278,9 mV 2,8978 mL

Results

Total Acid Number 0,795 mg KOH/g



Reporte del equipo Metrohm 855 para el método de índice de acidez

A.I.5. Índice de peróxido

En la Tabla A.5. se reportan los resultados correspondientes al índice de peróxido, mismos que se calculan con base en la Ecuación [1] que se muestra en el inciso 2.5.1.5.

20

Resultados para el índice de peróxido del aceite de Jatropha curcas

Medición	Masa de la muestra (g)	V solución tiosulfato de sodio (mL)	Índice de peróxido (meqO ₂ /kg)	Promedio (meq O ₂ /kg)
1	5,0018	1,23	2,10	
2	4,9852	1,29	2,09	2,12
3	5,1005	1,26	2,17	

A.I.6. Índice de saponificación

Tabla A.6. se muestran los resultados obtenidos para el índice de saponificación, con base en la Ecuación [2] del inciso 2.5.1.6.

21

Resultados del índice de saponificación del aceite de Jatropha curcas

Medición	Masa de análisis (g)	V solución HCl (mL)	Índice de saponificación (mg KOH/g)	Promedio (mg KOH/g)
1	2,1246	10,3750		
2	2,0284	10,8014	228,662	226,39
3	2,0921	10,2163		

Datos de la Muestra

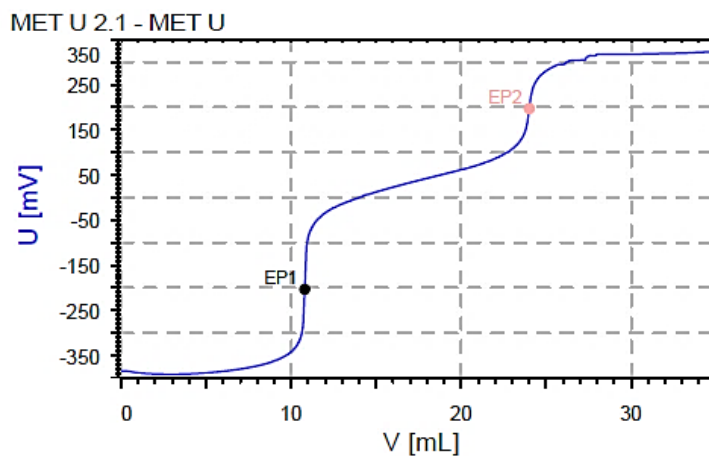
ID1 Saponificacion Jatropha 01
 Sample size 2,0284 g

End points

MET U MET U 2.1
 EP1 -203,4 mV 10,8014 mL
 EP2 197,3 mV 24,0081 mL

Results

Índice de saponificacion 228,662 g/mol



Reporte del equipo Metrohm 855 para el método de índice de saponificación

A.I.7. Índice de yodo

En la Tabla A.7 se muestran los resultados obtenidos para el índice de yodo, con base en la Ecuación [3] que se muestra en el inciso 2.5.1.7.

22

Resultados para el índice de yodo del aceite de Jatropha curcas

Medición	Masa de análisis (g)	V solución tiosulfato de sodio (mL)	Índice de yodo (g yodo/100 g)	Promedio (g yodo/100 g)
1	0,1358	38,68	98,77	
2	0,1392	39,65	87,52	96,09
3	0,1324	38,71	101,98	

A.I.8. Punto de inflamación

En la Tabla A.8. se muestran los resultados del análisis y su valor promedio.

23

Resultado de las mediciones de punto de inflamación en copa abierta

Medición	Punto de inflamación corregido (°C)	Promedio (°C)
1	296	
2	291	294
3	295	

A.I.9. Viscosidad cinemática a 40 °C

En la Tabla A.9. se muestra los resultados del análisis de viscosidad cinemática y su valor promedio. Se realizó dos mediciones de tiempo empleándose un viscosímetro tipo Cannon-Fenske código B1377 – 200 de constante 0,0932 mm²/s².

24

Resultados de la viscosidad cinemática a 40 °C

Medición	Tiempo (s)	Viscosidad cinemática 40 °C (mm²/s)	Promedio viscosidad a 40 °C (mm²/s)
1	312,466	29,12	29,10
2	312,037	29,08	

ANEXO II

Resultados por Parámetro de la Caracterización del Biodiésel B100, Diésel Premium y las Mezclas Diésel/Biodiésel en diferentes proporciones.

A.II.1. Agua y sedimentos

En la Tabla A.10. se resume el resultado del análisis.

25

Resultado del análisis de agua y sedimentos

Muestra	Resultado %
Biodiésel B100	< 0,05
B5	< 0,05
B10	< 0,05
B15	< 0,05
B20	< 0,05
B30	< 0,05
Diésel Premium	< 0,05

A.II.2. Punto de nube (Cloud point) y punto de escurrimiento (Pour point)

Para cada muestra se realizaron dos mediciones, obteniéndose resultados similares. En la Tabla A.11. se muestra los resultados obtenidos.

26

Resultado del análisis de punto de nube y punto de escurrimiento

Punto de nube	
Muestra	Temperatura (°C)
Biodiésel B100	3,0
B5	-12,7
B10	-12,1
B15	-11,9
B20	-11,4
B30	-9,9
Diésel Premium	-13,2
Punto de escurrimiento	
Muestra	Temperatura (°C)
Biodiésel B100	-1,0
B5	-14,0
B10	-14,0
B15	-11,0
B20	-11,0
B30	-11,0
Diésel Premium	-17,0

A.II.3. Contenido de azufre

En la Tabla A.12. se muestran los resultados reportados por el equipo Oxford X Supreme para la cuantificación de azufre.

Resultados del análisis del contenido de azufre que reporta el equipo

Muestra	Medición de contenido de azufre (ppm)	Promedio (ppm)
	6,0	
Biodiésel B100	6,0	6,0
	6,0	
	46,5	
B5	46,4	46,4
	46,4	
	43,8	
B10	43,7	43,8
	43,8	
	41,3	
B15	41,3	41,3
	41,2	
	38,7	
B20	38,7	38,7
	38,8	
	33,5	
B30	33,4	33,5
	33,5	
	49,0	
Diésel Premium	49,0	49,0
	49,0	

A.II.4. Corrosión a la lámina de cobre

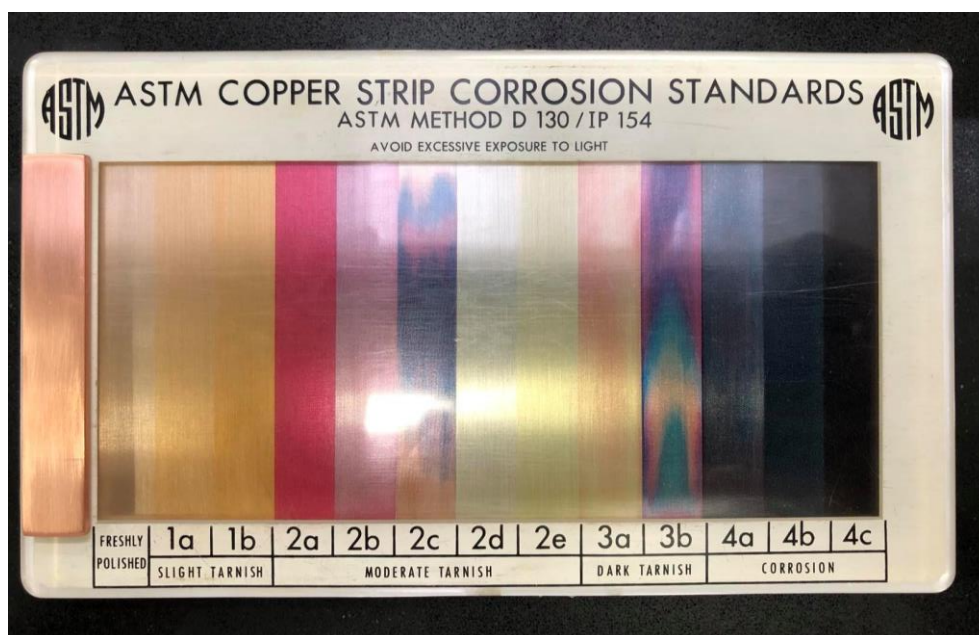
La clasificación de corrosión a la lámina de cobre obtenido de la muestra se detalla en la

Tabla A. 13.

28

Clasificación de corrosión a la lámina de cobre

Muestra	Corrosión a la lámina de cobre
Biodiésel B100	1A
B5	1A
B10	1A
B15	1A
B20	1A
B30	1A
Diésel Premium	1A



Comparación de estándares de la lámina de cobre con los estándares - LACBAL

A.II.5. Densidad a 15,6 °C

El resultado obtenido se muestra en la Tabla A.14.

29

Resultado del análisis de densidad

Muestra	Resultado (kg/m³)
Biodiésel B100	900
B5	846
B10	848
B15	851
B20	853
B30	859
Diésel Premium	843

A.II.6. Índice de acidez

Se realizó tres mediciones y se calculó el promedio como se detalla en la Tabla A.15.

30

Resultados para el índice de acidez del biodiésel

Medición	Masa de la muestra (g)	Índice de acidez (mgKOH/g)	Promedio (mgKOH/g)
1	2,1663	0,202	
2	2,3399	0,215	0,205
3	2,0382	0,208	

Datos de la Muestra

ID1 BJ_1_ER
Sample size 2,0382 g

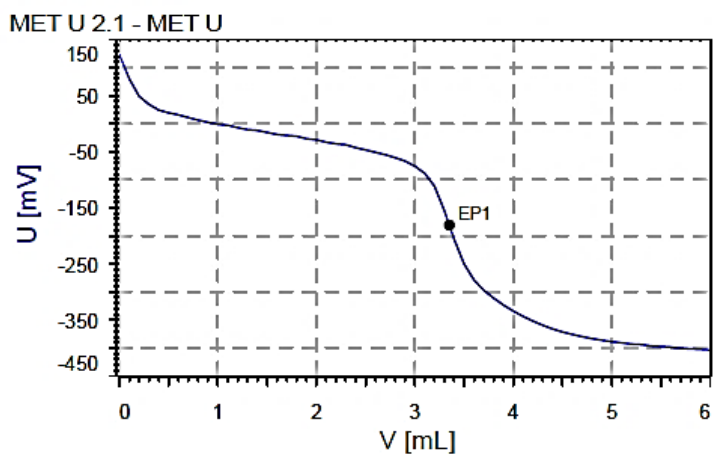
End points

MET U MET U 2.1

EP1 -180,8 mV 3,3499 mL

Results

Total Acid Number 0,208 mg KOH/g



Reporte del equipo Metrohm 855 para el método de índice de acidez

A.II.7. Poder calórico

El ensayo de poder calórico fue realizado por el Laboratorio de Análisis Instrumental de la Escuela Politécnica Nacional. La Tabla A.16. muestra el resumen de resultados obtenidos.

Resultado del análisis de poder calórico

Muestra	Poder calórico (MJ/Kg)
Biodiésel B100	38,24
B5	45,09
B10	44,73
B15	44,37
B20	43,96
B30	43,26
Diésel Premium	45,44

Orden de Trabajo No. DQ-OT10010-2021




INFORMACIÓN CLIENTE								
Cliente / Empresa:	Ing. Liliana Guzmán		Persona de contacto:	Ing. Liliana Guzmán				
Dirección / Telf.:	Ladrón de Guevara E11-253/02 2976300		E-mail:	liliana.guzman@epn.edu.ec				
PARAMETROS DE LA MUESTRA								
Identificación:	M-LAI-021-57-01		Fecha de muestreo:	*05/07/2021				
Muestra:	* Diésel Premium		Plan de muestreo:	No especificado por el cliente				
Tipo de contenedor:	Vidrio		Fecha inicio del ensayo:	15/07/2021				
Fecha de recepción:	14/07/2021		Fecha entrega informe:	21/07/2021				
CONDICIONES DE TRABAJO								
Temperatura y %HR ambiente:	19.2	°C	42	%	Norma de referencia: ASTM D 4809			
					Procedimiento interno: PE-7.2-03			
RESULTADOS								
COMPOSICIÓN DE LA MUESTRA	Azufre	* 490	ppm	0.0049	%W			
PROPIEDADES DE LA MUESTRA	Poder calórico	10854 ± 13.58	[cal/g]	45443.53 ± 56.84	kJ/kg			
DETALLE DEL ENSAYO REALIZADO			MUESTRA					
Parr 6400 Calorímetro Rev. 190314104420 ID de muestra: MLR10215701.A 07/15/ 21 09:20:53 Método Dinico Tipo Final Modo Determinación ID de la bomba 1 Temperatura 29.4803 Valor EE 930,000 Temperatura 29.7907 Incremento de 11.5709 Peso 0.91880 Peso del co 0.11730 Fusible 50.0000 # cido 8.0000 Azufre 0.00490 Calor total 10844.4 cal/g			Parr 6400 Calorímetro Rev. 190314104420 ID de muestra: MLR10215701.B 07/15/ 21 09:35:25 Método Dinico Tipo Final Modo Determinación ID de la bomba 1 Temperatura 29.6773 Valor EE 930,000 Temperatura 29.9238 Incremento de 11.4911 Peso 0.91110 Peso del co 0.11600 Fusible 50.0000 # cido 8.0000 Azufre 0.00490 Calor total 10843.6 cal/g					
* Datos proporcionados por el cliente Los ensayos fueron realizados dentro de las instalaciones del laboratorio LAL Los resultados reportados corresponden únicamente a los ítems ensayados. El laboratorio no se responsabiliza por la toma ni almacenamiento de la muestra antes de llegar a las instalaciones de la Institución. El muestreo es responsabilidad del cliente y los resultados aplican a las muestras como se recibieron. Queda prohibido la reproducción parcial o total del presente informe sin previa autorización.								
OBSERVACIONES No existe ninguna observación ni desviación durante el ensayo.								
Elaborado por:			Revisado por:					
GABRIELA VANESSA PEREZ GUIRACOCHA Digitally signed by GABRIELA VANESSA PEREZ GUIRACOCHA Date: 2021.07.21 12:50:33 -05'00'			ELIANA LIZETH PENA PONTON Firmado digitalmente por ELIANA LIZETH PENA PONTON Fecha: 2021.07.21 12:57:36 -05'00'					
Ing. Gabriela Pérez			Ing. Eliana Peña					
ANALISTA DE LABORATORIO			RESPONSABLE TÉCNICA					

DISEÑO DE UN PROCESO PARA LA OBTENCIÓN DE BIODIÉSEL A PARTIR DEL ACEITE *Jatropha curcas* CON METIL ACETATO EN CONDICIONES SUPERCRÍTICA EN PRESENCIA DE ZnO COMO CATALIZADOR

Orden de Trabajo No. DQ-OT10010-2021


INFORMACIÓN CLIENTE								
Cliente / Empresa:	Ing. Liliana Guzmán	Persona de contacto:	Ing. Liliana Guzmán					
Dirección / Telf.:	Ladrón de Guevara E11-253/ 02 2976300	E-mail:	liliana.guzman@epn.edu.ec					
PARAMETROS DE LA MUESTRA								
Identificación:	M-LAI-021-57-02	Fecha de muestreo:	*05/07/2021					
Muestra:	* Biodiésel 5%	Plan de muestreo:	No especificado por el cliente					
Tipo de contenedor:	Vidrio	Fecha inicio del ensayo:	15/07/2021					
Fecha de recepción:	14/07/2021	Fecha entrega informe:	21/07/2021					
CONDICIONES DE TRABAJO								
Temperatura y %HR ambiente:	19.4 °C	41 %	Norma de referencia:	ASTM D 4809				
			Procedimiento interno:	PE-7.2-03				
RESULTADOS								
COMPOSICIÓN DE LA MUESTRA	Azufre	* 46.40	ppm	0.0046	%W			
PROPIEDADES DE LA MUESTRA	Poder calórico	10769.9 ± 8.91	[cal/g]	45091.42 ± 37.3	kJ/kg			
DETALLE DEL ENSAYO REALIZADO			MUESTRA					
Parr 6400 Calorímetro Rev. 190314104420 ID de muestra: MLAI0215702.A 07/15/ 21 09:51:02 Método Dinámico Tipo Final Modo Determinación ID de la bomba 1 Temperatura 29.7535 Valor EE 930.000 Temperatura 29.8486 Incremento de 11.8956 Peso 0.95510 Peso del co 0.11500 Fusible 50.0000 A cido 8.0000 Azufre 0.00464 Calor total 10763.6 cal/g			Parr 6400 Calorímetro Rev. 190314104420 ID de muestra: MLAI0215702.B 07/15/ 21 10:02:36 Método Dinámico Tipo Final Modo Determinación ID de la bomba 1 Temperatura 29.6891 Valor EE 930.000 Temperatura 29.9161 Incremento de 11.6206 Peso 0.93510 Peso del co 0.10470 Fusible 50.0000 A cido 8.0000 Azufre 0.00464 Calor total 10776.2 cal/g					
DECLARATORIAS * Dato proporcionado por el cliente Los ensayos fueron realizados dentro de las instalaciones del laboratorio LAL. Los resultados reportados corresponden únicamente a los ítems ensayados. El laboratorio no se responsabiliza por la toma ni almacenamiento de la muestra antes de llegar a las instalaciones de la Institución. El muestreo es responsabilidad del cliente y los resultados aplican a las muestras como se recibieron. Queda prohibido la reproducción parcial o total del presente informe sin previa autorización.								
OBSERVACIONES No existe ninguna observación ni desviación durante el ensayo.								
Elaborado por: GABRIELA VANESSA PEREZ GUIRACOCCHA 			Revisado por: ELIANA LIZETH PENA PONTON 					
Ing. Gabriela Pérez			Ing. Eliana Peña					
ANALISTA DE LABORATORIO			RESPONSABLE TÉCNICA					

Orden de Trabajo No. DQ-OT10010-2021


INFORMACIÓN CLIENTE								
Cliente / Empresa:	Ing. Liliana Guzmán	Persona de contacto:	Ing. Liliana Guzmán					
Dirección / Telf.:	Ladrón de Guevara E11-253/ 02 2976300	E-mail:	liliana.guzman@epn.edu.ec					
PARAMETROS DE LA MUESTRA								
Identificación:	M-LAI-021-57-03	Fecha de muestreo:	*05/07/2021					
Muestra:	* Biodiésel 10%	Plan de muestreo:	No especificado por el cliente					
Tipo de contenedor:	Vidrio	Fecha inicio del ensayo:	15/07/2021					
Fecha de recepción:	14/07/2021	Fecha entrega informe:	21/07/2021					
CONDICIONES DE TRABAJO								
Temperatura y %HR ambiente:	19.6 °C	41 %	Norma de referencia:	ASTM D 4809				
			Procedimiento interno:	PE-7.2-03				
RESULTADOS								
COMPOSICIÓN DE LA MUESTRA	Azufre	* 43.80	ppm	0.0044	%W			
PROPIEDADES DE LA MUESTRA	Poder calórico	10683.3 ± 6.08	[cal/g]	44728.84 ± 25.46	kJ/kg			
DETALLE DEL ENSAYO REALIZADO			MUESTRA					
Parr 6400 Calorímetro Rev. 190314104420 ID de muestra: MLAI0215703.A 07/15/ 21 10:13:32 Método Dinámico Tipo Final Modo Determinación ID de la bomba 1 Temperatura 29.8076 Valor EE 930.000 Temperatura 29.9269 Incremento de 11.6905 Peso 0.94580 Peso del co 0.11320 Fusible 50.0000 A cido 8.0000 Azufre 0.00438 Calor total 10687.6 cal/g			Parr 6400 Calorímetro Rev. 190314104420 ID de muestra: MLAI0215703.B 07/15/ 21 10:24:19 Método Dinámico Tipo Final Modo Determinación ID de la bomba 1 Temperatura 29.8613 Valor EE 930.000 Temperatura 29.9580 Incremento de 11.1814 Peso 0.89440 Peso del co 0.12190 Fusible 50.0000 A cido 8.0000 Azufre 0.00438 Calor total 10679.0 cal/g					
DECLARATORIAS * Dato proporcionado por el cliente Los ensayos fueron realizados dentro de las instalaciones del laboratorio LAL. Los resultados reportados corresponden únicamente a los ítems ensayados. El laboratorio no se responsabiliza por la toma ni almacenamiento de la muestra antes de llegar a las instalaciones de la Institución. El muestreo es responsabilidad del cliente y los resultados aplican a las muestras como se recibieron. Queda prohibido la reproducción parcial o total del presente informe sin previa autorización.								
OBSERVACIONES No existe ninguna observación ni desviación durante el ensayo.								
Elaborado por: GABRIELA VANESSA PEREZ GUIRACOCCHA 			Revisado por: ELIANA LIZETH PENA PONTON 					
Ing. Gabriela Pérez			Ing. Eliana Peña					
ANALISTA DE LABORATORIO			RESPONSABLE TÉCNICA					

DISEÑO DE UN PROCESO PARA LA OBTENCIÓN DE BIODIÉSEL A PARTIR DEL ACEITE *Jatropha curcas* CON METIL ACETATO EN CONDICIONES SUPERCRÍTICA EN PRESENCIA DE ZnO COMO CATALIZADOR

Orden de Trabajo No. DQ-OT10010-2021


INFORMACIÓN CLIENTE								
Cliente / Empresa:	Ing. Liliana Guzmán		Persona de contacto:	Ing. Liliana Guzmán				
Dirección / Telf.:	Ladrón de Guevara E11-253/ 02 2976300		E-mail:	liliana.guzman@epn.edu.ec				
PARÁMETROS DE LA MUESTRA								
Identificación:	M-LAI-021-57-04		Fecha de muestreo:	*05/07/2021				
Muestra:	* Biodiésel 15%		Plan de muestreo:	No especificado por el cliente				
Tipo de contenedor:	Vidrio		Fecha inicio del ensayo:	15/07/2021				
Fecha de recepción:	14/07/2021		Fecha entrega informe:	21/07/2021				
CONDICIONES DE TRABAJO								
Temperatura y %HR ambiente:	19.8	°C	41	%	Norma de referencia: ASTM D 4809			
					Procedimiento interno: PE-7.2-03			
RESULTADOS								
COMPOSICIÓN DE LA MUESTRA	Azufre	* 41.30		ppm	0.0041 %W			
PROPIEDADES DE LA MUESTRA	Poder calórico	10597.3 ± 3.11		[cal/g]	44368.78 ± 13.03 kJ/kg			
DETALLE DEL ENSAYO REALIZADO			MUESTRA					
Parr 6400 Calorímetro Rev. 190314104420 ID de muestra: MLAI0215704.A 07/15/ 21 10:36:39 Método Dinico Tipo Final Modo Determinación ID de la bomba 1 Temperatura 29.8428 Valor EE 930.000 Temperatura 29.8272 Incremento de 10.3884 Peso 0.84560 Peso del co 0.10220 Fusible 50.0000 A cido 8.0000 Azufre 0.00413 Calor total 10595.1 cal/g			Parr 6400 Calorímetro Rev. 190314104420 ID de muestra: MLAI0215704.B 07/15/ 21 10:50:27 Método Dinico Tipo Final Modo Determinación ID de la bomba 1 Temperatura 29.7939 Valor EE 930.000 Temperatura 29.8651 Incremento de 11.8268 Peso 0.96270 Peso del co 0.11660 Fusible 50.0000 A cido 8.0000 Azufre 0.00413 Calor total 10599.5 cal/g					
DECLARATORIAS								
* Datos proporcionados por el cliente Los ensayos fueron realizados dentro de las instalaciones del laboratorio LAL. Los resultados reportados corresponden únicamente a los ítems ensayados. El laboratorio no se responsabiliza por la toma ni almacenamiento de la muestra antes de llegar a las instalaciones de la Institución. El muestreo es responsabilidad del cliente y los resultados aplican a las muestras como se recibieron. Queda prohibido la reproducción parcial o total del presente informe sin previa autorización.								
OBSERVACIONES								
No existe ninguna observación ni desviación durante el ensayo.								
Elaborado por:			Revisado por:					
GABRIELA VANESSA PEREZ GUIRACOCCHA Digitally signed by GABRIELA VANESSA PEREZ GUIRACOCCHA Date: 2021.07.21 12:51:01 -05'00'			ELIANA LIZETH PENA PONTON Firmado digitalmente por ELIANA LIZETH PENA PONTON Fecha: 2021.07.21 12:58:49 -05'00'					
Ing. Gabriela Pérez			Ing. Eliana Peña					
ANALISTA DE LABORATORIO			RESPONSABLE TÉCNICA					

Orden de Trabajo No. DQ-OT10010-2021


INFORMACIÓN CLIENTE								
Cliente / Empresa:	Ing. Liliana Guzmán		Persona de contacto:	Ing. Liliana Guzmán				
Dirección / Telf.:	Ladrón de Guevara E11-253/ 02 2976300		E-mail:	liliana.guzman@epn.edu.ec				
PARÁMETROS DE LA MUESTRA								
Identificación:	M-LAI-021-57-05		Fecha de muestreo:	*05/07/2021				
Muestra:	* Biodiésel 20%		Plan de muestreo:	No especificado por el cliente				
Tipo de contenedor:	Vidrio		Fecha inicio del ensayo:	15/07/2021				
Fecha de recepción:	14/07/2021		Fecha entrega informe:	21/07/2021				
CONDICIONES DE TRABAJO								
Temperatura y %HR ambiente:	19.9	°C	40	%	Norma de referencia: ASTM D 4809			
					Procedimiento interno: PE-7.2-03			
RESULTADOS								
COMPOSICIÓN DE LA MUESTRA	Azufre	* 38.70		ppm	0.0039 %W			
PROPIEDADES DE LA MUESTRA	Poder calórico	10500.25 ± 3.75		[cal/g]	43962.45 ± 15.69 kJ/kg			
DETALLE DEL ENSAYO REALIZADO			MUESTRA					
Parr 6400 Calorímetro Rev. 190314104420 ID de muestra: MLAI0215705.A 07/15/ 21 11:01:20 Método Dinico Tipo Final Modo Determinación ID de la bomba 1 Temperatura 29.8435 Valor EE 930.000 Temperatura 29.9442 Incremento de 11.1271 Peso 0.90620 Peso del co 0.13260 Fusible 50.0000 A cido 8.0000 Azufre 0.00387 Calor total 10502.9 cal/g			Parr 6400 Calorímetro Rev. 190314104420 ID de muestra: MLAI0215705.B 07/15/ 21 11:15:34 Método Dinico Tipo Final Modo Determinación ID de la bomba 1 Temperatura 29.8233 Valor EE 930.000 Temperatura 29.8917 Incremento de 10.7320 Peso 0.87970 Peso del co 0.10920 Fusible 50.0000 A cido 8.0000 Azufre 0.00387 Calor total 10497.6 cal/g					
DECLARATORIAS								
* Datos proporcionados por el cliente Los ensayos fueron realizados dentro de las instalaciones del laboratorio LAL. Los resultados reportados corresponden únicamente a los ítems ensayados. El laboratorio no se responsabiliza por la toma ni almacenamiento de la muestra antes de llegar a las instalaciones de la Institución. El muestreo es responsabilidad del cliente y los resultados aplican a las muestras como se recibieron. Queda prohibido la reproducción parcial o total del presente informe sin previa autorización.								
OBSERVACIONES								
No existe ninguna observación ni desviación durante el ensayo.								
Elaborado por:			Revisado por:					
GABRIELA VANESSA PEREZ GUIRACOCCHA Digitally signed by GABRIELA VANESSA PEREZ GUIRACOCCHA Date: 2021.07.21 12:51:01 -05'00'			ELIANA LIZETH PENA PONTON Firmado digitalmente por ELIANA LIZETH PENA PONTON Fecha: 2021.07.21 12:58:49 -05'00'					
Ing. Gabriela Pérez			Ing. Eliana Peña					
ANALISTA DE LABORATORIO			RESPONSABLE TÉCNICA					

DISEÑO DE UN PROCESO PARA LA OBTENCIÓN DE BIODIÉSEL A PARTIR DEL ACEITE *Jatropha curcas* CON METIL ACETATO EN CONDICIONES SUPERCRÍTICA EN PRESENCIA DE ZnO COMO CATALIZADOR

Orden de Trabajo No. DQ-OT10010-2021

INFORMACIÓN CLIENTE								
Cliente / Empresa:	Ing. Liliana Guzmán		Persona de contacto:	Ing. Liliana Guzmán				
Dirección / Telf.:	Ladrón de Guevara E11-253/ 02 2976300		E-mail:	liliana.guzman@epn.edu.ec				
PARAMETROS DE LA MUESTRA								
Identificación:	M-LAI-021-57-06		Fecha de muestreo:	*05/07/2021				
Muestra:	* Biodiésel 30%		Plan de muestreo:	No especificado por el cliente				
Tipo de contenedor:	Vidrio		Fecha inicio del ensayo:	15/07/2021				
Fecha de recepción:	14/07/2021		Fecha entrega informe:	21/07/2021				
CONDICIONES DE TRABAJO								
Temperatura y %HR ambiente:	20.2	°C	40	%	Norma de referencia: ASTM D 4809			
					Procedimiento interno: PE-7.2-03			
RESULTADOS								
COMPOSICIÓN DE LA MUESTRA	Azufre	* 33.50	ppm	0.0034	%W			
PROPIEDADES DE LA MUESTRA	Poder calórico	10332.7 ± 10.75	[cal/g]	43260.95 ± 45	kJ/kg			
DETALLE DEL ENSAYO REALIZADO			MUESTRA					
Parr 6400 Calorímetro Rev. 190314104420 ID de muestras: MLAI0215706.A 07/15/ 21 11:27:18 Método Dinico Tipo Final Modo Determinación ID de la bomba 1 Temperatura 29.8350 Valor EE 930.000 Temperatura 29.8953 Incremento de 11.1465 Peso 0.93380 Peso del co 0.10580 Fusible 50.0000 A cido 8.0000 Azufre 0.00335 Calor total 10325.1 cal/g			Parr 6400 Calorímetro Rev. 190314104420 ID de muestras: MLAI0215706.B 07/15/ 21 11:40:38 Método Dinico Tipo Final Modo Determinación ID de la bomba 1 Temperatura 29.8467 Valor EE 930.000 Temperatura 29.8417 Incremento de 11.4324 Peso 0.94660 Peso del co 0.09520 Fusible 50.0000 A cido 8.0000 Azufre 0.00335 Calor total 10340.3 cal/g					
DECLARATORIAS	* Dato proporcionado por el cliente Los ensayos fueron realizados dentro de las instalaciones del laboratorio LAL. Los resultados reportados corresponden únicamente a los ítems ensayados. El laboratorio no se responsabiliza por la toma ni almacenamiento de la muestra antes de llegar a las instalaciones de la Institución. El muestreo es responsabilidad del cliente y los resultados aplican a las muestras como se recibieron. Queda prohibido la reproducción parcial o total del presente informe sin previa autorización.							
OBSERVACIONES	No existe ninguna observación ni desviación durante el ensayo.							
Elaborado por:	GABRIELA VANESSA PEREZ GURACOCCHA <small>Digitally signed by GABRIELA VANESSA PEREZ GURACOCCHA Date: 2021.07.21 12:51:20 -05'00'</small>		Revisado por:	ELIANA LIZETH PENA PONTON <small>Firmado digitalmente por ELIANA LIZETH PENA PONTON Fecha: 2021.07.21 12:59:42 -05'00'</small>				
	Ing. Gabriela Pérez			Ing. Eliana Peña				
	ANALISTA DE LABORATORIO			RESPONSABLE TÉCNICA				

Orden de Trabajo No. DQ-OT10010-2021

INFORMACIÓN CLIENTE								
Cliente / Empresa:	Ing. Liliana Guzmán		Persona de contacto:	Ing. Liliana Guzmán				
Dirección / Telf.:	Ladrón de Guevara E11-253/ 02 2976300		E-mail:	liliana.guzman@epn.edu.ec				
PARAMETROS DE LA MUESTRA								
Identificación:	M-LAI-021-57-07		Fecha de muestreo:	*05/07/2021				
Muestra:	* Biodiésel 100%		Plan de muestreo:	No especificado por el cliente				
Tipo de contenedor:	Vidrio		Fecha inicio del ensayo:	15/07/2021				
Fecha de recepción:	14/07/2021		Fecha entrega informe:	21/07/2021				
CONDICIONES DE TRABAJO								
Temperatura y %HR ambiente:	20.5	°C	39	%	Norma de referencia: ASTM D 4809			
					Procedimiento interno: PE-7.2-03			
RESULTADOS								
COMPOSICIÓN DE LA MUESTRA	Azufre	* 6	ppm	0.0006	%W			
PROPIEDADES DE LA MUESTRA	Poder calórico	9135.12 ± 8.27	[cal/g]	38246.9 ± 34.61	kJ/kg			
DETALLE DEL ENSAYO REALIZADO			MUESTRA					
Parr 6400 Calorímetro Rev. 190314104420 ID de muestras: MLAI0215707.A 07/15/ 21 11:54:03 Método Dinico Tipo Final Modo Determinación ID de la bomba 1 Temperatura 29.8551 Valor EE 930.000 Temperatura 29.8834 Incremento de 8.9873 Peso 0.83500 Peso del co 0.10790 Fusible 50.0000 A cido 8.0000 Azufre 0.00060 Calor total 9129.27 cal/g			Parr 6400 Calorímetro Rev. 190314104420 ID de muestras: MLAI0215707.B 07/15/ 21 12:04:25 Método Dinico Tipo Final Modo Determinación ID de la bomba 1 Temperatura 29.8211 Valor EE 930.000 Temperatura 29.8439 Incremento de 8.8750 Peso 0.82220 Peso del co 0.11090 Fusible 50.0000 A cido 8.0000 Azufre 0.00060 Calor total 9140.96 cal/g					
DECLARATORIAS	* Dato proporcionado por el cliente Los ensayos fueron realizados dentro de las instalaciones del laboratorio LAL. Los resultados reportados corresponden únicamente a los ítems ensayados. El laboratorio no se responsabiliza por la toma ni almacenamiento de la muestra antes de llegar a las instalaciones de la Institución. El muestreo es responsabilidad del cliente y los resultados aplican a las muestras como se recibieron. Queda prohibido la reproducción parcial o total del presente informe sin previa autorización.							
OBSERVACIONES	No existe ninguna observación ni desviación durante el ensayo.							
Elaborado por:	GABRIELA VANESSA PEREZ GURACOCCHA <small>Digitally signed by GABRIELA VANESSA PEREZ GURACOCCHA Date: 2021.07.21 12:51:20 -05'00'</small>		Revisado por:	ELIANA LIZETH PENA PONTON <small>Firmado digitalmente por ELIANA LIZETH PENA PONTON Fecha: 2021.07.21 13:00:22 -05'00'</small>				
	Ing. Gabriela Pérez			Ing. Eliana Peña				
	ANALISTA DE LABORATORIO			RESPONSABLE TÉCNICA				

A.II.8. Punto de inflamación

En la Tabla A.17. se muestran los resultados del análisis y su valor promedio.

32

Resultado del análisis de densidad

Muestra	Punto de inflamación corregido (°C)
Biodiésel B100	143
B5	65
B10	65
B15	65
B20	65
B30	65
Diésel Premium	65

A.II.9. Temperatura de destilación recuperado al 90 %

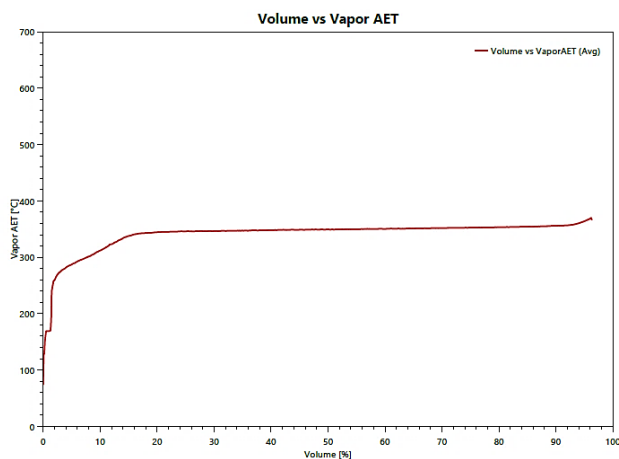
La temperatura se obtuvo de la destilación ASTM realizada en el Destilador TANAKA para determinar el contenido de carbón residual. En la Tabla A.18. se muestran los resultados del análisis

33

Temperatura 90 % reportado en la destilación ASTM

Muestra	Temperatura 90 % (°C)
Biodiésel B100	355,0
B5	336,0
B10	340,4
B15	340,9
B20	341,9
B30	344,7
Diésel Premium	335,0

Volume	AET °C	Pot °C	Pressure	Distillation Rate
IBP	223.4 °C	153.9 °C	10.1 mmHg	0.0 mL/min
5%	287.0 °C	171.8 °C	9.98 mmHg	2.2 mL/min
10%	311.9 °C	183.8 °C	9.96 mmHg	2.8 mL/min
20%	344.2 °C	197.4 °C	10.0 mmHg	10.1 mL/min
30%	346.5 °C	200.4 °C	9.96 mmHg	6.7 mL/min
40%	348.2 °C	201.5 °C	9.98 mmHg	6.9 mL/min
50%	349.3 °C	202.2 °C	10.0 mmHg	7.3 mL/min
60%	350.1 °C	203.1 °C	10.0 mmHg	6.5 mL/min
70%	351.7 °C	204.0 °C	10.0 mmHg	8.7 mL/min
80%	353.3 °C	205.1 °C	10.0 mmHg	9.5 mL/min
90%	355.8 °C	207.3 °C	10.0 mmHg	9.5 mL/min
95%	363.8 °C	212.8 °C	10.0 mmHg	4.4 mL/min



Reporte destilador al vacío para la muestra de biodiésel B100

DISEÑO DE UN PROCESO PARA LA OBTENCIÓN DE BIODIÉSEL A PARTIR DEL ACEITE *Jatropha curcas* CON METIL ACETATO EN CONDICIONES SUPERCRÍTICA EN PRESENCIA DE ZnO COMO CATALIZADOR

DISTILLATION RESULT in ad-7 (No. 1)

Operator : ER
 Sample : DIESEL P
 Date : 2021/07/02 10:04:24

Test Mode No.011
 DIESEL CARBON

Init Heat (1) 192 W
 Init Heat (2) 216 W
 Final Heat Start 93.5 %
 Final Heat (AUTO)+00 %
 Standard D86 Group4
 Thermometer ASTM-8C/F
 Expected Residue 9.9 %
 Dist Rate 4.5 %/min
 Bath Temp Setting 20.0 °C
 Receiver Temp Setting 20.0 °C
 Loss Correction Method Graphical

**** Distillation Data ****

Bath Temp 20.0 °C
 Receiver Temp 20.0 °C
 Final Heat 0 %

	Observed	Corrected
Percent Recovery	92.6 %	92.6 %
Percent Residue	9.9 %	
Percent Total Recovery	102.5 %	102.5 %
Percent Loss	0.0 %	0.0 %

Barometric Pressure 730 hPa

Rec. %	Obsv. °C	Corr. °C	Evap. °C	Rate %/min
IBP	166.2	177.4	177.4	9:42
5	200.2	212.3	212.3	69
10	211.4	223.7	223.7	4.1
15	221.7	234.3	234.3	4.2
20	229.0	241.8	241.8	4.4
30	242.3	255.4	255.4	4.5
40	253.7	267.1	267.1	4.4
50	265.1	278.8	278.8	4.5
60	275.6	289.6	289.6	4.5
70	287.3	301.6	301.6	4.4
80	301.6	316.2	316.2	4.3
85	310.2	325.1	325.1	4.5
90	323.7	338.9	338.9	4.4
95				
REC CUT (90.0%)	323.7	338.9	338.9	

Reporte destilador TANAKA para la mezcla diésel premium

DISEÑO DE UN PROCESO PARA LA OBTENCIÓN DE BIODIÉSEL A PARTIR DEL ACEITE *Jatropha curcas* CON METIL ACETATO EN CONDICIONES SUPERCRÍTICA EN PRESENCIA DE ZnO COMO CATALIZADOR

DISTILLATION RESULT in ad-7 (No. 2)

Operator : ER
 Sample : B5
 Date : 2021/07/02 10:14:25

Test Mode No.003
 DIESEL CARBON

Init Heat (1) 192 W
 Init Heat (2) 216 W
 Final Heat Start 93.5 %
 Final Heat (AUTO)+00 %
 Standard D86 Group4
 Thermometer ASTM-8C/F
 Expected Residue 9.9 %
 Dist Rate 4.5 %/min
 Bath Temp Setting 20.0 °C
 Receiver Temp Setting 20.0 °C
 Loss Correction Method Graphical

***** Distillation Data *****

Bath Temp 19.9 °C
 Receiver Temp 20.0 °C
 Final Heat 0 %

	Observed	Corrected
Percent Recovery	92.5 %	92.5 %
Percent Residue	9.9 %	
Percent Total Recovery	102.4 %	102.4 %
Percent Loss	0.0 %	0.0 %

Barometric Pressure 730 hPa

Rec. %	Obsv. °C	Corr. °C	Evap. °C	Rate %/min
IBP	146.7	157.4	157.4	9:30
5	201.1	213.2	213.2	78
10	213.1	225.5	225.5	4.2
15	222.1	234.7	234.7	4.1
20	229.9	242.7	242.7	4.5
30	244.1	257.3	257.3	4.4
40	255.9	269.4	269.4	4.5
50	267.4	281.2	281.2	4.4
60	278.8	292.9	292.9	4.4
70	291.0	305.4	305.4	4.4
80	304.4	319.1	319.1	4.4
85	312.8	327.7	327.7	4.4
90	324.3	339.5	339.5	4.4
95				
REC CUT (90.0%)	324.3	339.5	339.5	

Reporte destilador TANAKA para la mezcla B5

DISEÑO DE UN PROCESO PARA LA OBTENCIÓN DE BIODIÉSEL A PARTIR DEL ACEITE *Jatropha curcas* CON METIL ACETATO EN CONDICIONES SUPERCRÍTICA EN PRESENCIA DE ZnO COMO CATALIZADOR

DISTILLATION RESULT in ad-7 (No. 1)

Operator : ER
 Sample : B10
 Date : 2021/07/02 08:57:59

Test Mode No.011
 DIESEL CARBON

Init Heat (1) 192 W
 Init Heat (2) 216 W
 Final Heat Start 93.5 %
 Final Heat (AUTO)+00 %
 Standard D86 Group4
 Thermometer ASTM-8C/F
 Expected Residue 9.9 %
 Dist Rate 4.5 %/min
 Bath Temp Setting 20.0 °C
 Receiver Temp Setting 20.0 °C
 Loss Correction Method Graphical

**** Distillation Data ****

Bath Temp 19.9 °C
 Receiver Temp 20.0 °C
 Final Heat 0 %

	Observed	Corrected
Percent Recovery	92.4 %	92.4 %
Percent Residue	9.9 %	
Percent Total Recovery	102.3 %	102.3 %
Percent Loss	0.0 %	0.0 %

Barometric Pressure 730 hPa

Rec. %	Obsv. °C	Corr. °C	Evap. °C	Rate %/min
IBP	120.4	130.4	130.4	9:10
5	201.6	213.7	213.7	107
10	215.8	228.2	228.2	5.0
15	223.8	236.5	236.5	4.6
20	231.4	244.2	244.2	4.2
30	245.6	258.8	258.8	4.5
40	258.3	271.8	271.8	4.4
50	270.1	283.9	283.9	4.5
60	281.9	296.0	296.0	4.4
70	294.2	308.6	308.6	4.4
80	307.3	322.1	322.1	4.4
85	314.7	329.7	329.7	4.4
90	323.9	339.1	339.1	4.5
95				
REC CUT (90.0%)	323.9	339.1	339.1	

Reporte destilador TANAKA para la mezcla B10

DISEÑO DE UN PROCESO PARA LA OBTENCIÓN DE BIODIÉSEL A PARTIR DEL ACEITE *Jatropha curcas* CON METIL ACETATO EN CONDICIONES SUPERCRÍTICA EN PRESENCIA DE ZnO COMO CATALIZADOR

DISTILLATION RESULT in ad-7 (No. 2)

Operator : ER
 Sample : B15
 Date : 2021/07/02 09:08:52

Test Mode No.003
 DIESEL CARBON

Init Heat (1) 192 W
 Init Heat (2) 216 W
 Final Heat Start 93.5 %
 Final Heat (AUTO)+00 %
 Standard D86 Group4
 Thermometer ASTM-8C/F
 Expected Residue 9.9 %
 Dist Rate 4.5 %/min
 Bath Temp Setting 20.0 °C
 Receiver Temp Setting 20.0 °C
 Loss Correction Method Graphical

***** Distillation Data *****

Bath Temp 20.0 °C
 Receiver Temp 20.0 °C
 Final Heat 0 %

	Observed	Corrected
Percent Recovery	92.8 %	92.8 %
Percent Residue	9.9 %	
Percent Total Recovery	102.7 %	102.7 %
Percent Loss	0.0 %	0.0 %

Barometric Pressure 730 hPa

Rec. %	Obsv. °C	Corr. °C	Evap. °C	Rate %/min
IBP	108.3	118.0	118.0	8:43
5	205.1	217.3	217.3	124
10	211.3	223.6	223.6	4.2
15	224.8	237.5	237.5	4.3
20	233.4	246.3	246.3	4.4
30	248.4	261.7	261.7	4.5
40	260.8	274.4	274.4	4.4
50	272.6	286.5	286.5	4.5
60	284.1	298.3	298.3	4.5
70	296.7	311.2	311.2	4.4
80	308.4	323.2	323.2	4.5
85	315.5	330.5	330.5	4.3
90	323.0	338.2	338.2	4.4
95				
REC CUT (90.0%)	323.0	338.2	338.2	

Reporte destilador TANAKA para la mezcla B15

DISEÑO DE UN PROCESO PARA LA OBTENCIÓN DE BIODIÉSEL A PARTIR DEL ACEITE *Jatropha curcas* CON METIL ACETATO EN CONDICIONES SUPERCRÍTICA EN PRESENCIA DE ZnO COMO CATALIZADOR

DISTILLATION RESULT in ad-7 (No. 1)

Operator : ER
 Sample : B20
 Date : 2021/07/02 11:02:11

Test Mode No.011
 DIESEL CARBON

Init Heat (1) 192 W
 Init Heat (2) 216 W
 Final Heat Start 93.5 %
 Final Heat (AUTO)+00 %
 Standard D86 Group4
 Thermometer ASTM-8C/F
 Expected Residue 9.9 %
 Dist Rate 4.5 %/min
 Bath Temp Setting 20.0 °C
 Receiver Temp Setting 20.0 °C
 Loss Correction Method Graphical

***** Distillation Data *****

Bath Temp 19.9 °C
 Receiver Temp 20.0 °C
 Final Heat 0 %

	Observed	Corrected
Percent Recovery	92.4 %	92.4 %
Percent Residue	9.9 %	
Percent Total Recovery	102.3 %	102.3 %
Percent Loss	0.0 %	0.0 %

Barometric Pressure 729 hPa

Rec. %	Obsv. °C	Corr. °C	Evap. °C	Rate %/min
IBP	108.9	118.7	118.7	8:47
5	205.2	217.4	217.4	120
10	213.2	225.6	225.6	5.0
15	225.9	238.7	238.7	4.5
20	234.4	247.4	247.4	4.2
30	250.4	263.8	263.8	4.4
40	262.6	276.3	276.3	4.5
50	275.9	289.9	289.9	4.5
60	288.9	303.3	303.3	4.4
70	300.9	315.6	315.6	4.4
80	312.1	327.1	327.1	4.5
85	317.9	333.0	333.0	4.4
90	325.6	340.9	340.9	4.3
95				
REC CUT (90.0%)	325.6	340.9	340.9	

Reporte destilador TANAKA para la mezcla B20

DISEÑO DE UN PROCESO PARA LA OBTENCIÓN DE BIODIÉSEL A PARTIR DEL ACEITE *Jatropha curcas* CON METIL ACETATO EN CONDICIONES SUPERCRÍTICA EN PRESENCIA DE ZnO COMO CATALIZADOR

DISTILLATION RESULT in ad-7 (No. 2)

Operator : ER
 Sample : B30
 Date : 2021/07/02 11:09:38

Test Mode No.003
 DIESEL CARBON

Init Heat (1) 192 W
 Init Heat (2) 216 W
 Final Heat Start 93.5 %
 Final Heat (AUTO)+00 %
 Standard D86 Group4
 Thermometer ASTM-8C/F
 Expected Residue 9.9 %
 Dist Rate 4.5 %/min
 Bath Temp Setting 20.0 °C
 Receiver Temp Setting 20.0 °C
 Loss Correction Method Graphical

***** Distillation Data *****

Bath Temp 20.0 °C
 Receiver Temp 20.0 °C
 Final Heat 0 %

	Observed	Corrected
Percent Recovery	92.2 %	92.2 %
Percent Residue	9.9 %	
Percent Total Recovery	102.1 %	102.1 %
Percent Loss	0.0 %	0.0 %

Barometric Pressure 729 hPa

Rec. %	Obsv. °C	Corr. °C	Evap. °C	Rate %/min
IBP	114.7	124.6	124.6	8:36
5	205.2	217.4	217.4	116
10	218.7	231.3	231.3	7.3
15	227.5	240.3	240.3	4.5
20	237.7	250.8	250.8	3.9
30	256.3	269.8	269.8	4.3
40	271.2	285.1	285.1	4.4
50	283.7	297.9	297.9	4.5
60	296.1	310.6	310.6	4.5
70	306.6	321.4	321.4	4.4
80	316.5	331.6	331.6	4.5
85	321.5	336.7	336.7	4.4
90	327.3	342.6	342.6	4.3
95				
REC CUT (90.0%)	327.3	342.6	342.6	
Hesitation Point (12.3%)	216.4	228.9	228.9	

Reporte destilador TANAKA para la mezcla B30