



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO®

Instituto Tecnológico de Pabellón de Arteaga
Departamento de Ingeniería Industrial

REPORTE FINAL PARA ACREDITAR LA RESIDENCIA PROFESIONAL DE LA CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

PRESENTA:
ATZIRI VALERIA LUÉVANO CASTORENA

CARRERA:
INGENIERÍA INDUSTRIAL

***[PROPUESTA DE ESCALAMIENTO DE UN PROCESO A NIVEL
LABORATORIO DE OBTENCIÓN DE BIODIÉSEL A PARTIR DEL ACEITE
VEGETAL DE LA MALEZA BIDENS FERULIFOLIA (JACQ.) DC.]***

Laboratorio de Conversión de la Energía
Instituto Tecnológico de Pabellón de Arteaga



DR. JOSÉ ALONSO DENA AGUILAR
Asesor externo

ING. JORGE FERNANDO CARMONA ESPINOZA
Asesor interno

Diciembre de 2024

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco especialmente a Dios a mi Madre Josefina Castorena Lazarin, a mis Abuelos Albertina Lazarin, Leobardo Castorena y a mis hermanos Cesar Daniel y Emilio por hacer posible este sueño, por su amor y sacrificio, siendo mi inspiración apoyo y fortaleza cuyo apoyo incondicional y palabras de aliento me motivaron a seguir adelante en cada etapa de este proceso.

Mi gratitud también al Instituto Tecnológico de Pabellón de Arteaga, por brindarme la oportunidad de realizar mis residencias profesionales en sus instalaciones.

Agradezco especialmente al Dr. José Alonso Dena Aguilar por su guía, experiencia y conocimiento en el campo de la Ingeniería Industrial, los cuales fueron invaluable para mi aprendizaje y desarrollo profesional. Agradezco a Naidelyn Nicole Dena Rangel por su apoyo constante durante todo el periodo de prácticas.

Finalmente, agradezco a todos aquellos que, de una u otra forma, contribuyeron a que esta experiencia fuera posible y exitosa.

A todos ustedes, ¡ Muchas gracias !

RESUMEN

“PROPUESTA DE ESCALAMIENTO DE UN PROCESO A NIVEL LABORATORIO DE OBTENCIÓN DE BIODIÉSEL A PARTIR DEL ACEITE VEGETAL DE LA MALEZA *BIDENS FERULIFOLIA* (JACQ.) DC.”

Por: **ATZIRI VALERIA LUÉVANO CASTORENA**

En este estudio se muestra una propuesta de escalamiento de un proceso de obtención de biodiésel desde un nivel laboratorio a un nivel planta piloto.

Para lo anterior, se identificaron las operaciones unitarias del proceso a nivel laboratorio y se estudiaron nuevas condicionantes experimentales bajo arreglos ortogonales Taguchi, a partir de una metodología de producción de biodiésel empleando semillas de la maleza *Bidens ferulifolia* (Jacq.) DC., ya reportada en trabajos previos en donde se consideró únicamente una etapa de extracción (dividida en 2 fases), una etapa de transesterificación de una fase única (formación simultanea de metóxido y biodiésel) y una etapa de lavado (por porciones con mediciones de pH cada porción).

En particular, en este trabajo se establecieron demás operaciones unitarias como lo es, un pretratamiento de la semilla (etapa nueva), extracción de aceite vegetal (dividida en dos fases—etapa existente), una etapa de transesterificación (etapa nueva—de dos fases divididas en formación de metóxido y biodiésel por separado), una etapa de lavado (etapa nueva—donde el lavado se realizó por porciones, pero la medición de pH es al principio y al final) y una etapa de secado (etapa nueva).

Bajo los diseños experimentales por arreglos ortogonales establecidos y conforme la metodología propuesta, se lograron porcentajes de rendimientos de conversión de biodiésel entre 9 y 25% según el catalizador (NaOH y KOH) y la cantidad de alcohol en exceso (metanol) empleado.

La propuesta de escalamiento consideró únicamente el empleo de recipientes de mayor capacidad volumétrica y en donde se especificó que volúmenes de trabajo se manejarían en una planta piloto de cierta capacidad. Adicionalmente el escalamiento se sustenta en la búsqueda, a través de las referencias, documentos y libros encontrados en los diversos medios digitales, de equipo existentes en el mercado debido a que ya

están comprobados que cumplen con la función y satisfacen las necesidades requeridas para llevar a otro nivel de producción mayor al que se tiene actualmente.

Dirigido por:

Dr. José Alonso Dena Aguilar

Ing. Jorge Fernando Carmona Espinoza

ÍNDICE

	Pág.
I. GENERALIDADES DEL PROYECTO	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Descripción de la empresa u organización y del puesto o área de trabajo del residente.....	1
1.3 Problema(s) a resolver.....	3
1.4 Justificación.....	4
1.5 Objetivos.....	5
1.5.1 Objetivo general.....	5
1.5.2 Objetivos específicos.....	5
1.6 Alcances y limitaciones.....	5
II. MARCO TEÓRICO	7
2.1 BIODIÉSEL.....	7
2.2 EXTRACCIÓN DE ACEITE VEGETAL.....	8
2.3 TRANSESTERIFICACIÓN.....	9
2.4 PROCESOS A NIVEL LABORATORIO PARA LA OBTENCIÓN DE BIODIÉSEL.....	10
2.5 PROCESOS A NIVEL PLANTA PILOTO.....	12
2.6 ESCALAMIENTO INDUSTRIAL.....	14
III. DESARROLLO	16
3.1 PROCEDIMIENTO Y DESCRIPCIÓN DE LAS ACTIVIDADES REALIZADAS.....	16
3.1.1 Metodología previa.....	16
3.1.2 Metodología actualizada.....	18
3.1.3 Escalamiento de proceso de nivel laboratorio a planta piloto.....	22
3.2 CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES.....	23
V. RESULTADOS	24

	Pág.
4.1 SEPARACIÓN DE SEMILLAS DE MALEZA.....	24
4.2 PRETRATAMIENTO INICIAL A LA SEMILLA.....	25
4.3 EXTRACCIÓN SOXHLET Y DESTILACIÓN SIMPLE.....	29
4.4 TRANSESTERIFICACIÓN.....	32
4.5 SEPARACIÓN DE FASES.....	35
4.6 LAVADO Y NEUTRALIDAD.....	38
4.7 SECADO DE VOLUMEN DE BIODIÉSEL RESULTANTES.....	39
4.8 PROPUESTA DE ESCALAMIENTO.....	40
V. CONCLUSIONES.....	44
VI. COMPETENCIAS DESARROLLADAS Y/O APLICADAS.....	45
VII. FUENTES DE INFORMACIÓN.....	46
Anexo 1. Carta de aceptación por parte de la empresa para la residencia profesional.....	49
Anexo 2. Carta de terminación por parte de la empresa para la residencia profesional.....	50

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Factores y niveles experimentales de transesterificación empleados.....	17
Tabla 2. Factores y niveles experimentales de transesterificación empleados en la metodología actualizada.....	22
Tabla 3. Factores y niveles experimentales de transesterificación llevados a cabo considerando la metodología actualizada.....	32
Tabla 4. Porcentaje de conversión de biodiésel obtenido con la metodología actualizada y empleando KOH.....	33
Tabla 5. Porcentaje de conversión de biodiésel obtenido con la metodología actualizada y empleando NaOH.....	33

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Organigrama de la institución y del área de residencia.....	3
Figura 2. Aspecto de biodiésel.....	8
Figura 3. Equipo de extracción de aceite para biodiésel.....	9
Figura 4. Reacción de transesterificación.....	10
Figura 5. Análisis de biodiésel.....	12
Figura 6. Planta piloto de biodiésel.....	13
Figura 7. Producción de biodiésel.....	15
Figura 8. Biodiésel (capa superior) obtenido por [1] de la maleza <i>Bidens ferulifolia</i> (Jacq.) DC.....	17
Figura 9. Diagrama de flujo de la metodología actualizada.....	18
Figura 10. Cronograma de actividades general.....	23
Figura 11. Maleza de semilla recolectada. Se tiene semilla y ramas.....	24
Figura 12. Semilla separada de la maleza recolectada.....	24
Figura 13. Maleza sin semilla.....	25
Figura 14. Peso de la semilla a trozar en licuadora.....	26

	Pág.
Figura 15. Semilla mas solvente de hexano a trozar.....	26
Figura 16. Hexano + aceite vegetal recuperado por filtro de poro medio. Vista 1..	27
Figura 17. Hexano + aceite vegetal recuperado por filtro de poro medio. Vista 2..	27
Figura 18. Filtrado de aceite vegetal con solvente resultante de Soxhlet.....	28
Figura 19. Peso de semilla después de 4 h de secado.....	28
Figura 20. Semilla resultante después de secado en estufa y lista para poner en desecador.....	29
Figura 21. Semilla + hexano a utilizar en Soxhlet.....	30
Figura 22. Hexano recuperado por porción para Soxhlet.....	30
Figura 23. Sistema Soxhlet.....	31
Figura 24. Aceite a destilación simple.....	31
Figura 25. Aceite de transesterificación.....	34
Figura 26. Hidróxido de potasio para metóxido.....	34
Figura 27. Hidróxido de sodio para metóxido.....	35
Figura 28. Solución de metóxido de sodio preparado.....	35
Figura 29. Extracción de la separación por fases de KOH, 4 mL.....	36

	Pág.
Figura 30. Muestra de separación de fases de 4 mL de KOH.....	36
Figura 31. Extracción de separación de 3 fases de 6 mL de NaOH.....	37
Figura 32. Muestra de separación de fases de 6 mL de NaOH.....	37
Figura 33. Toma de pH a residuo de primer lavado de 4 mL de NaOH.....	38
Figura 34. Toma de pH a residuo de ultimo lavado de muestra de KOH, 4 mL.....	38
Figura 35. Muestra de ultimo lavado.....	39
Figura 36. Secado de muestra final de biodiésel.....	39
Figura 37. Muestras finales de biodiésel después de secado.....	40

I. GENERALIDADES DEL PROYECTO

1.1 Introducción

El INSTITUTO TECNOLÓGICO DE PABELLÓN DE ARTEAGA es una institución de educación superior ubicada en el Municipio de Pabellón de Arteaga del Estado de Aguascalientes y como parte de sus objetivos se encuentra el desarrollo de proyectos de innovación e investigación a través de residencias profesionales que den soluciones a problemas de la industria, de ciencia aplicada o de desarrollo tecnológico. Su laboratorio de Conversión de la Energía inicio operaciones en enero de 2019 dentro del programa de Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica que se oferta en el plantel y donde se promueven proyectos de posgrado, desarrollo tecnológico, investigación e innovación acordes a la línea de investigación de conversión de la energía. Esta línea de investigación se enfoca a procesos de conversión de la energía y energías renovables mediante el diseño e integración de procesos orientados para la generación, almacenamiento y uso eficiente de la energía.

Uno de estos proyectos se refiere a la obtención de biodiésel a partir del aceite vegetal de malezas de crecimiento en el Estado de Aguascalientes.

En este trabajo se realiza una propuesta de escalamiento de nivel laboratorio a nivel planta piloto a través de una investigación de producción de biodiésel bajo un arreglo ortogonal L4(2³) para definir la capacidad de producción de la metodología contemplada.

1.2 Descripción de la empresa y del puesto o área de trabajo del residente

El ramo económico de la institución es la educación, específicamente la educación superior, así como el desarrollo de proyectos de innovación e investigación con la industria (desarrollo tecnológico) o académicos (ciencia aplicada).

Sus políticas de misión, visión, objetivos (retos) y valores de la institución son:

Misión

Brindar un servicio de educación superior de calidad comprometido con la generación, difusión y conservación del conocimiento científico, tecnológico y humanista,

a través de programas educativos que permitan un desarrollo sustentable, conservando los principios universales en beneficio de la humanidad.

Visión

Ser una institución de educación superior reconocida a nivel nacional e internacional, líder en la formación integral de profesionistas de calidad y excelencia, que promueve el desarrollo armónico del entorno.

Objetivos de la empresa

Asegurar la calidad de todos los procesos académicos, entre los que se encuentran:

- El diseño de especialidades
- Asesoría de residencias profesionales
- Desarrollo de proyectos de innovación
- Servicios de educación continua
- Investigación educativa
- Acreditaciones de planes de estudio

Valores

A fin de guiar y orientar las acciones cotidianas de todo su personal, la institución define los siguientes valores institucionales:

- Compromiso. - lograr propósitos comunes mediante el trabajo responsable y en equipo, mejorando permanentemente el ser, hacer y tener mediante la participación activa y el liderazgo compartido.
- Responsabilidad. - decidir y actuar conforme al análisis previo de las consecuencias inmediatas o mediatas de las acciones.
- Respeto. - actitud personal y colectiva hacia la conservación, mejoramiento y protección de las diversas formas de vida, además de la aceptación de la diversidad propia de lo humano.

- Cooperación. - facilitar condiciones que allanen el trabajo de los demás, y capacitar a toda la gente para propiciar su desarrollo personal y profesional dentro y fuera de la institución.
- Honestidad. - liderazgo que toma decisiones con base en una información completa, retroalimentando directamente con resultados e impacto mutuo, dando transparencia a cada una de las acciones personales e institucionales.
- Equidad. - crear un ambiente que permita establecer un sistema de reconocimiento al esfuerzo individual y de grupo en la institución.

En la Figura 1, se presenta el organigrama de la institución, así como el área de trabajo del residente. Las funciones del residente son propias del proyecto de residencia y se enfocan al desarrollo del proyecto.

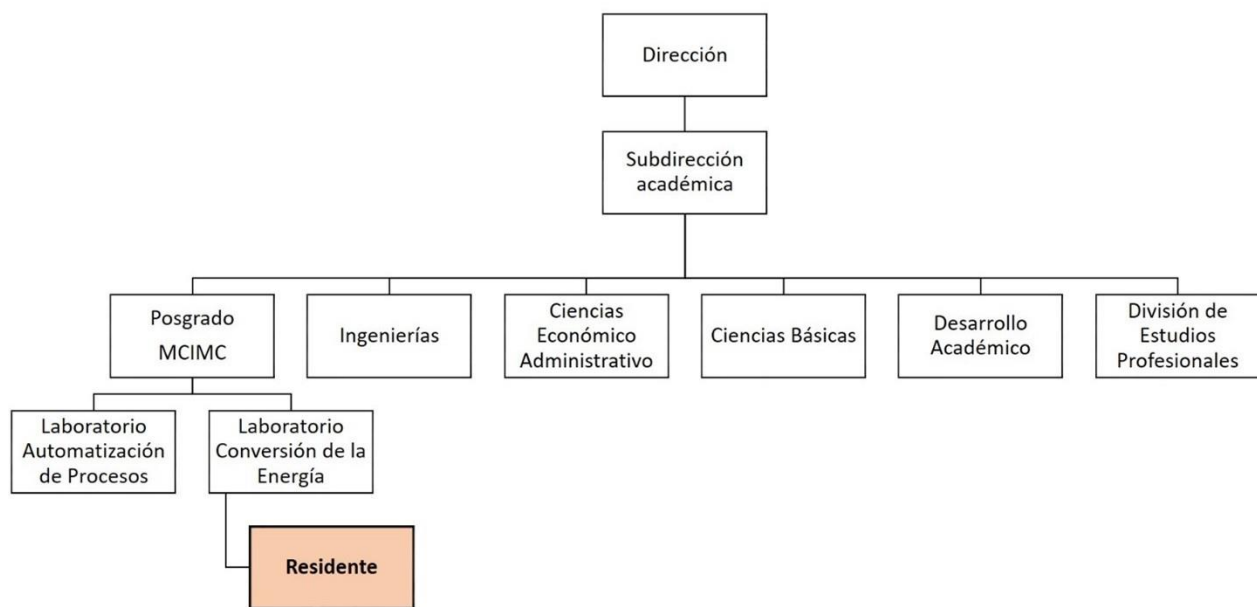


Figura 1. Organigrama de la institución y del área de residencia.

1.3 Problema(s) a resolver

Para producir biodiésel se emplean aceites vegetales o grasas. En particular los aceites vegetales pueden ser sometidos a reacciones de transesterificación para generar el biodiésel. En el trabajo de [1], ya se ha demostrado que a partir de la maleza *Bidens ferulifolia* (Jacq.) DC. se puede extraer aceite vegetal de sus semillas y por

transesterificación lograr obtener biodiésel, mas sin embargo la metodología reportada solo permite alcanzar porcentajes de conversión de biodiésel de hasta el 15%.

Derivado de lo anterior, se han detectado las siguientes áreas de oportunidad:

1.- Metodología experimental

- Estudiar nuevas condiciones de experimentación a nivel laboratorio para alcanzar porcentajes de conversión de biodiésel superiores al 15%.

2.- Escalamiento de proceso

- Sugerir una propuesta de escalamiento del proceso a nivel planta piloto para trabajos futuros.

Obtener mejores porcentajes de conversión de biodiésel a partir del aceite vegetal de la maleza *Bidens ferulifolia* (Jacq.) DC. puede otorgarles un valor agregado, sobre todo, si el proceso puede ser escalado en cantidades aceptables para su consideración como materia prima para producir el biocombustible.

1.4 Justificación

Los autores de [1] han demostrado que de la maleza *Bidens ferulifolia* (Jacq.) DC. se obtienen porcentajes de conversión de biodiésel entre 10.3 y 15.3% a partir del aceite vegetal extraído de sus semillas bajo una determinada metodología [1]. Sin embargo, en demás trabajos reportados en la literatura, como por ejemplo en [2]-[5], se reportan metodologías experimentales en los que los porcentajes de conversión de biodiésel oscilan entre el 80 y 93.3% utilizando diversas biomásas de estudio. Aunado a lo anterior, la alta disponibilidad de la maleza *Bidens ferulifolia* (Jacq.) DC. presente en la naturaleza, de hasta 0.8 kg de semilla por cada 6.0 kg de maleza [6] hacen que sea una biomasa con alta densidad por unidad de área que puede ser una materia prima con presencia abundante para producir el energético. Motivo por el cual, resulta conveniente explorar nuevas condiciones experimentales para lograr porcentajes de conversión de biodiésel

mayores al 15% a partir del aceite vegetal de la maleza *Bidens ferulifolia* (Jacq.) DC. y lograr otorgarle un valor agregado para la industria agrícola.

Adicionalmente la presente a nivel laboratorio permitirá establecer un valor a las especies arvenses con valor para el sector agroindustrial mediante una propuesta de proceso a nivel escala piloto.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Elaborar una propuesta de escalamiento de un proceso a nivel laboratorio de obtención de biodiésel a partir del aceite vegetal de la maleza *Bidens ferulifolia* (Jacq.) DC. mediante el desarrollo de una metodología experimental de extracción de aceite vegetal y transesterificación para obtener porcentajes de conversión de biodiésel superiores al 15%.

1.5.2 Objetivos específicos

- Comprender el proceso de extracción de aceite vegetal por solventes y de transesterificación mediante una revisión exhaustiva de la literatura para definir las condiciones de operación adecuadas para la obtención de biodiésel de la maleza de estudio.
- Definir un diseño experimental acorde al proceso de obtención de biodiésel mediante arreglos ortogonales de Taguchi para establecer la matriz experimental.
- Llevar a cabo procesos de extracción de aceite vegetal y de transesterificación del aceite vegetal de la maleza de estudio mediante el diseño experimental establecido para validar el proceso a escala de laboratorio propuesto.
- Realizar una propuesta del proceso a nivel planta piloto mediante el escalamiento del proceso para trabajos futuros de investigación.

1.6 Alcances y limitaciones

- Proyecto de investigación a nivel laboratorio.

- La propuesta de escalamiento solo se realiza a nivel documental por lo que ninguna actividad de escalamiento es implementada.
- Esta fuera de alcance la optimización de la experimentación del diseño de experimentos establecido.

II. MARCO TEÓRICO

2.1 BIODIÉSEL

El biodiésel es un biocombustible renovable que se produce a partir de lípidos naturales como aceites vegetales o grasas animales a través de un proceso químico llamado transesterificación. En este proceso, los triglicéridos presentes en las materias primas se convierten en ésteres metílicos o etílicos de ácidos grasos y glicerina, utilizando un alcohol (generalmente metanol o etanol) y un catalizador. El biodiésel es químicamente similar al diésel convencional derivado del petróleo, pero tiene ciertas propiedades que lo distinguen, como una mayor lubricidad, mayor punto de inflamación y biodegradabilidad.

El autor de [7] define el biodiésel como un combustible compuesto por monoalquil-ésteres de ácidos grasos de cadena larga derivados de recursos biológicos renovables como aceites vegetales o grasas animales. Estos ésteres tienen una estructura química similar a los compuestos del diésel fósil, lo que permite su uso en motores diésel convencionales sin modificaciones significativas. En [8] se destaca que el biodiésel es un combustible ecológico que puede ser mezclado en cualquier proporción con el diésel fósil, siendo completamente miscible, y es reconocido por su bajo contenido de azufre y por producir menos emisiones contaminantes.

El biodiésel se ha convertido en una alternativa atractiva a los combustibles fósiles debido a su menor impacto ambiental y su contribución a la reducción de la dependencia de los recursos no renovables. El autor de [7] señala que el biodiésel se descompone rápidamente en el medio ambiente, con un perfil de toxicidad mucho menor que el diésel convencional, lo que lo hace más seguro para el transporte y almacenamiento. El autor de [8] señala que el biodiésel genera aproximadamente un 50% menos de emisiones de CO₂ en comparación con el diésel fósil, debido a que el carbono liberado durante la combustión es en gran parte reciclado por las plantas utilizadas en su producción.

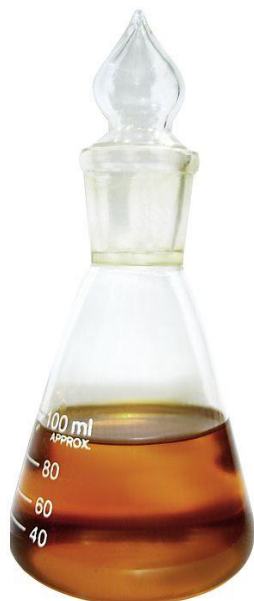


Figura 2. Aspecto de biodiésel (tomada de <https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Biodiesel.JPG>)

2.2 EXTRACCIÓN DE ACEITE VEGETAL

La extracción de aceite vegetal es un proceso crucial en la producción de biodiésel. El método Soxhlet es una técnica ampliamente utilizada para la extracción de lípidos y aceites de materiales sólidos. Este método se basa en la utilización de un solvente que, al calentarse, evapora y condensa sobre el material a extraer, disolviendo los compuestos de interés. La solución de aceite y solvente se acumula en el matraz inferior, permitiendo un proceso de extracción continuo y eficiente [9].

El empleo de la extracción Soxhlet en la producción de biodiésel es particularmente útil cuando se requiere un alto rendimiento de aceite a partir de materias primas vegetales. Este método es preferido debido a su capacidad para extraer prácticamente todo el contenido de lípidos de la muestra, lo que es fundamental para maximizar la producción de biodiésel [10].

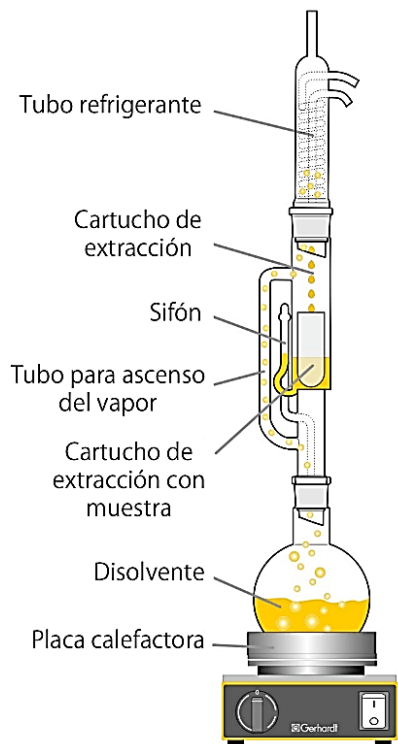


Figura 3. Equipo de extracción de aceite para biodiésel (tomada de <https://www.gerhardt.de/es/know-how/metodos-analiticos/metodos-de-extraccion-en-el-analisis-de-grasas/>).

2.3 TRANSESTERIFICACIÓN

La transesterificación es un proceso químico fundamental en la producción de biodiésel. Consiste en la reacción de triglicéridos (moléculas de aceite o grasa) con un alcohol, generalmente metanol o etanol, en presencia de un catalizador (ácido, base o enzimático) para producir ésteres metílicos o etílicos (biodiésel) y glicerol como subproducto. El proceso de transesterificación se lleva a cabo en varias etapas. Inicialmente, los triglicéridos se descomponen en diglicéridos y monoglicéridos, que luego se convierten en ésteres y glicerol. Este proceso es influenciado por varios factores, como la temperatura, la relación molar de alcohol a triglicérido, la presencia de agua y ácidos grasos libres, así como la naturaleza del catalizador empleado [11].

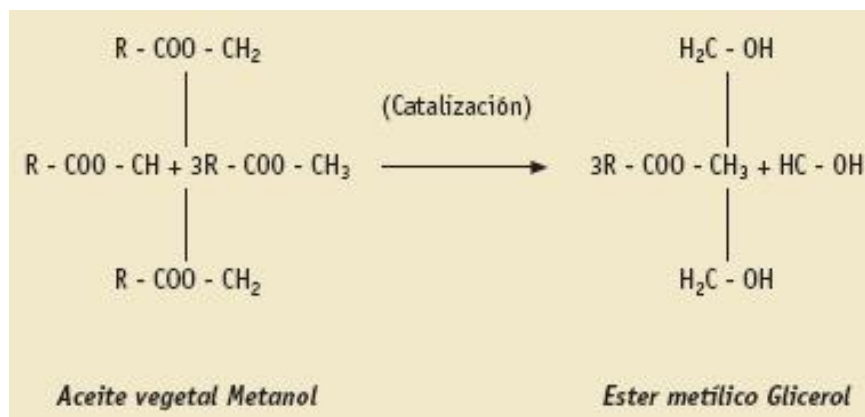


Figura 4. Reacción de transesterificación (fuente: <https://www.biodisol.com/biodiesel-que-es-el-biodiesel/la-produccion-de-biodiesel-materias-primas-procesos-calidad/>).

2.4 PROCESOS A NIVEL LABORATORIO PARA LA OBTENCIÓN DE BIODIÉSEL

El biodiésel obtenido es obtenido mediante una secuencias de operaciones unitarias para su extracción, transesterificación, purificación y caracterización.

1. La extracción de aceite vegetal es el primer paso en la producción de biodiésel, donde se obtiene el aceite de las semillas o frutas oleaginosas mediante métodos mecánicos o químicos [12]:
 - Métodos Mecánicos: Incluyen el prensado en frío o en caliente. Son simples, pero pueden dejar residuos de aceite en la materia prima.
 - Métodos Químicos: Utilizan solventes como el hexano en un extractor Soxhlet para disolver y recuperar el aceite de las semillas. Este método es más eficiente que el mecánico en cuanto a la cantidad de aceite extraído, pero implica el manejo seguro de solventes químicos
2. La transesterificación es el proceso químico en el que los triglicéridos (aceites y grasas) reaccionan con un alcohol en presencia de un catalizador para formar ésteres (biodiésel) y glicerol y considerando los siguientes parámetros [13]:
 - Catalizadores: Pueden ser básicos (como hidróxido de sodio), ácidos o enzimáticos. Los catalizadores básicos son los más comunes en el laboratorio debido a su alta eficiencia y menor costo.
 - Relación Molar: La relación molar de alcohol a triglicérido influye en la conversión, siendo típicamente de 6:1 en condiciones de laboratorio.

- Temperatura y Tiempo de Reacción: La reacción se realiza generalmente entre 60°C y 65°C durante 1-2 horas para asegurar una conversión completa [10].
3. La purificación es el proceso de separación de los contaminantes y subproductos, como el glicerol y los residuos de catalizador, del biodiésel crudo y donde se consideran las siguientes etapas operativas [15]:
- Lavado con Agua: El biodiésel se lava repetidamente con agua para eliminar restos de glicerol y catalizador. Este proceso puede ser seguido de secado para eliminar el agua residual.
 - Uso de Adsorbentes: En algunos casos, se utilizan materiales adsorbentes, como la sílica, para eliminar impurezas y mejorar la calidad del biodiésel.
 - Neutralización: Si se utilizó un catalizador básico, se puede neutralizar el biodiésel con un ácido débil para asegurar la eliminación completa de residuos alcalinos.

4. Análisis de Calidad del Biodiésel

El análisis de calidad es el conjunto de pruebas realizadas para determinar las propiedades fisicoquímicas del biodiésel y su conformidad con las normas establecidas entre las que se destacan [14]:

- Viscosidad y Densidad: Se mide para asegurar que el biodiésel cumple con las especificaciones para un rendimiento adecuado en motores.
- Punto de Nube y Punto de Obstrucción del Filtro en Frío: Estas pruebas evalúan el comportamiento del biodiésel a bajas temperaturas.
- Índice de Acidez y Contenido de Ésteres: El índice de acidez indica la cantidad de ácidos grasos libres, mientras que el contenido de ésteres refleja la eficiencia de la transesterificación.
- Espectroscopia Infrarroja (FTIR): Puede ser utilizada para confirmar la estructura química del biodiésel y detectar impurezas.



Figura 5. Análisis de biodiésel (tomada de <https://www.transportabrasil.com.br/2012/06/projeto-autoriza-uso-de-biodiesel-puro-como-combustivel/>).

2.5 PROCESOS A NIVEL PLANTA PILOTO

En una planta piloto, el proceso de extracción de aceite vegetal se escala desde el laboratorio a un entorno industrial, utilizando equipos de mayor capacidad para extraer grandes volúmenes de aceite a partir de materias primas oleaginosas. Por ejemplo, las prensas de tornillo continuas emplean prensas de tornillo continuo que permite un flujo constante de materia prima y extracción continua de aceite. En el caso de la extracción con solventes se utilizan extractores continuos que permiten la recirculación de solventes y la extracción eficiente del aceite a gran escala [16]. Para la reacción de transesterificación a escala piloto, la ampliación del proceso químico de conversión de triglicéridos en biodiésel mediante el uso de reactores de mayor capacidad y sistemas de control más sofisticados. Para lo anterior, se emplean reactores continuos que permiten la entrada continua de reactivos y la salida de productos, mejorando la eficiencia del proceso en comparación con los sistemas por lotes. De igual manera se integran controles de parámetros en donde el proceso se monitorea en tiempo real mediante sensores que controlan la temperatura, presión, y la relación molar de alcohol a triglicérido, lo que permite optimizar la reacción para obtener un biodiésel de alta calidad. De igual manera, los catalizadores heterogéneos, a diferencia del uso común de catalizadores homogéneos, se pueden utilizar para facilitar la separación del catalizador del producto final, reduciendo los costos de purificación [17]. La purificación y refinación del biodiésel a nivel de planta piloto implica la implementación de procesos a mayor

escala para la eliminación de impurezas, glicerol y catalizadores del biodiésel crudo. Entre estos procesos se considera la destilación, la cual es un método comúnmente empleado para la purificación del biodiésel que permite la eliminación de componentes volátiles y el refinamiento del producto final. El lavado en contraflujo, en lugar del lavado por lotes, se utiliza un sistema de lavado en contraflujo que mejora la eficiencia en la remoción de impurezas utilizando menos agua. El secado al vacío se utiliza para eliminar trazas de agua y metanol residual y en donde se utiliza un sistema de secado al vacío que mejora la pureza y la estabilidad del biodiésel producido [18]. Finalmente, el análisis y control de la calidad a escala piloto se realizan en tiempo real para asegurar que el biodiésel producido cumple con las normativas internacionales de calidad. Para lo anterior, el proceso es monitoreado continuamente para medir parámetros críticos como la viscosidad, densidad, índice de acidez, y contenido de ésteres. Esto asegura que cualquier desviación de las especificaciones sea corregida inmediatamente. El uso de laboratorios integrados permite realizar pruebas más complejas, como la cromatografía de gases y espectrometría de masas, para identificar y cuantificar compuestos en el biodiésel. Aunado a lo anterior, el cumplimiento de normas permite que el biodiésel producido cumpla con estándares como la norma EN 14214 (Europa) o ASTM D6751 (Estados Unidos), garantizando su viabilidad comercial [19].



Figura 6. Planta piloto de biodiésel (fuente: https://www.unl.edu.ar/noticias/news/view/desarrollaron_una_planta_piloto_de_biodiesel_para_instituto_de_ense%C3%B1anza_de_esperanza_1).

2.6 ESCALAMIENTO INDUSTRIAL

El escalamiento industrial es el proceso de trasladar las tecnologías y procesos desarrollados a nivel de laboratorio y planta piloto a una escala de producción comercial. En el contexto de la producción de biodiésel, esto implica la implementación de operaciones a gran escala que puedan producir biodiésel en volúmenes suficientes para su comercialización, cumpliendo con los estándares de calidad y eficiencia necesarios para competir en el mercado energético. Los reactores de gran capacidad para la transesterificación suelen tener capacidades de miles de litros, diseñados para operar de manera continua y eficiente. Estos reactores están equipados con sistemas avanzados de control de temperatura, presión y agitación para asegurar una conversión completa de triglicéridos a biodiésel. Los sistemas de almacenamiento y manejo de materias primas se enfocan a la gestión de grandes volúmenes de aceites vegetales, alcoholes y catalizadores requiere tanques de almacenamiento de gran capacidad, sistemas de bombeo y tuberías resistentes a químicos, diseñados para manejar las cantidades necesarias para una producción a gran escala. En la optimización de procesos, los procesos continuos, a diferencia de los sistemas por lotes utilizados en etapas anteriores, operan principalmente con procesos continuos que mejoran la eficiencia y reducen los costos de producción. Este enfoque permite una mayor capacidad de producción con un menor tiempo de inactividad. Por otro lado, la recuperación y reciclaje de reactivos, en una planta industrial, los reactivos como el metanol y los catalizadores no solo se utilizan una vez, sino que se recuperan y reciclan dentro del proceso. Esto no solo reduce costos, sino que también minimiza el impacto ambiental de la producción de biodiésel. El control de calidad automatizada, a nivel industrial, se orienta al control de calidad integral, la cual está altamente automatizada. Se emplean sistemas de monitoreo en línea que realizan pruebas constantes sobre el producto final para asegurar que cumple con los estándares internacionales, como ASTM D6751 o EN 14214. Finalmente, se toma en cuenta las consideraciones medioambientales y regulatorias ya que el tratamiento de efluentes y residuos a nivel industrial implica la gestión adecuada de subproductos y residuos, como el glicerol y el agua de lavado. Las plantas industriales deben implementar sistemas de tratamiento de efluentes para cumplir con las normativas ambientales locales e internacionales. En el caso de la reducción de emisiones, las plantas industriales de

biodiésel deben estar equipadas con tecnologías para la reducción de emisiones de gases y compuestos orgánicos volátiles, asegurando que la producción de biodiésel sea lo más limpia y sostenible posible. La operación de plantas industriales también requiere cumplir con una variedad de normativas de seguridad, medioambientales y laborales, lo que implica una planificación y gestión cuidadosas comercial [20].



Figura 7. Producción de biodiésel (tomada de <https://estrucplan.com.ar/analisis-de-la-produccion-de-biodiesel/>).

III. DESARROLLO

3.1 PROCEDIMIENTO Y DESCRIPCIÓN DE LAS ACTIVIDADES REALIZADAS

3.1.1 Metodología previa

Los autores de [1] reportan la siguiente metodología con la que alcanzaron porcentajes de conversión de biodiésel entre 10.3 y 15.3%.

- a) Pre-acondicionamiento de la semilla: separación de ramas y pétalos del receptáculo y androceo de la semilla.
- b) Acondicionamiento de la semilla: ninguno.
- c) Extracción de aceite vegetal por Soxhlet: empleo de hexano como solventes (250 mL por extracción) y de 12.5 g de semilla (semilla seca y en su forma geométrica de esfera).
- d) Destilación simple: el liquido resultante de la extracción por Soxhlet es separado del solvente aun presente en la mezcla para obtener el aceite vegetal concentrado.
- e) Transesterificación: el liquido resultante de la destilación simple es sometido a reacciones de transesterificación empleando metanol como alcohol en exceso e NaOH al 50% en solución como catalizador. En la Tabla 1, se muestra el diseño experimental ortogonal L4(2³) empleado por [1]. El aceite vegetal se lleva a una temperatura constante de 55 °C a una agitación turbulenta de 100 rpm. Una vez alcanzada la temperatura de trabajo, se añade el metanol seguido del catalizador por 30 min.
- f) Separación de fases: el liquido resultante de la transesterificación es colocado en embudo de separación por 24 h y en donde al final del tiempo se observó la formación de 2 o 3 capas.
- g) Lavado: separación de la capa superior formada y sometida a lavados con agua destilada hasta alcanzar un pH neutro.
- h) Porcentajes de conversión: el biodiésel neutralizado se cuantifica para determinar el porcentaje de conversión alcanzado.

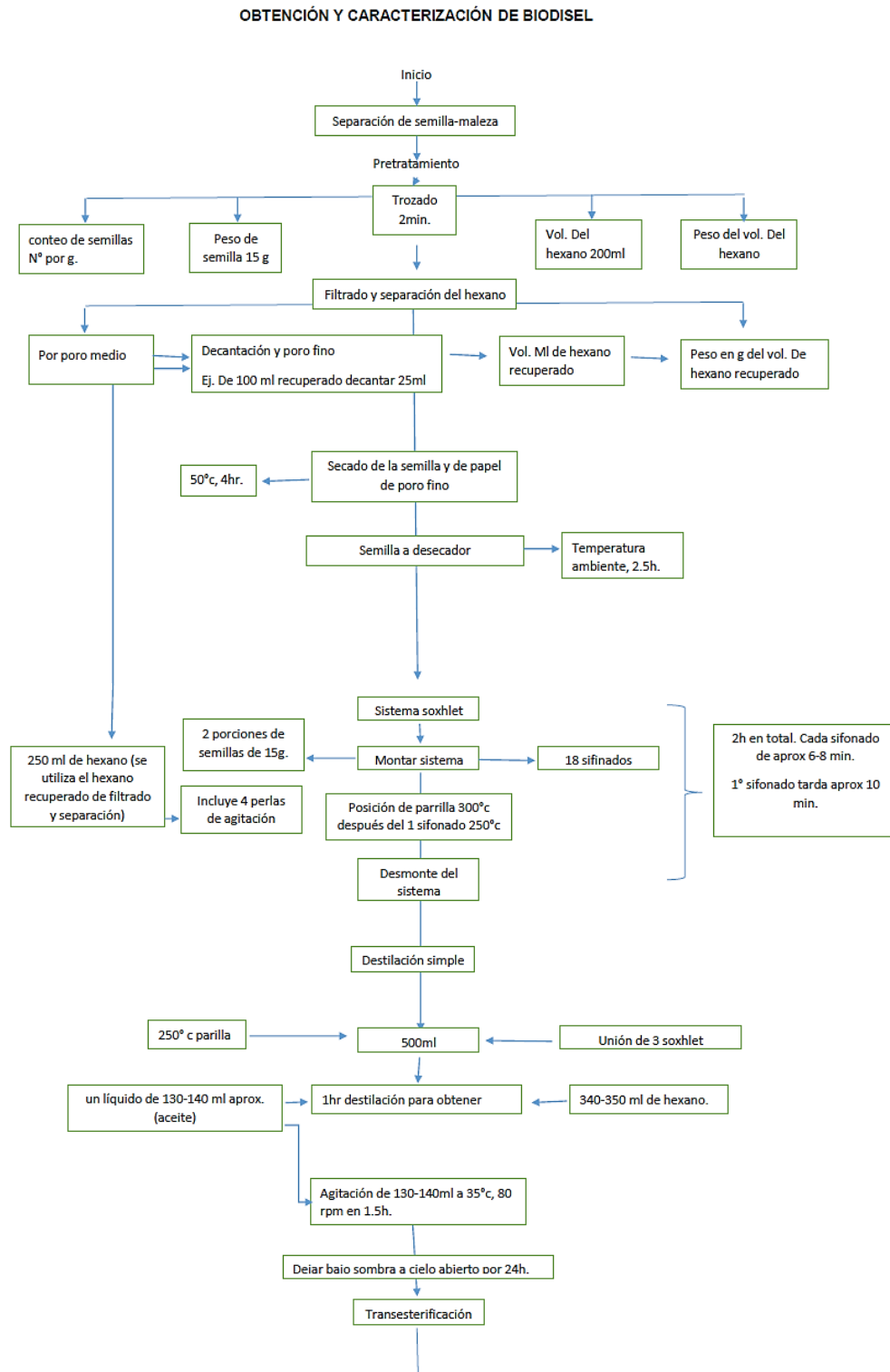
Tabla 1. Factores y niveles experimentales de transesterificación empleados [1].

Corrida	Volumen de aceite vegetal (mL)	Volumen de alcohol en exceso (mL)	Volumen de catalizador (μ L)
C2.1	20.0	4.0	46.0
C2.2	20.0	6.0	69.0
C2.3	30.0	4.0	69.0
C2.4	30.0	6.0	46.0



Figura 8. Biodiésel (capa superior) obtenido por [1] de la maleza *Bidens ferulifolia* (Jacq.) DC. (tomada de [1]).

3.1.2 Metodología actualizada



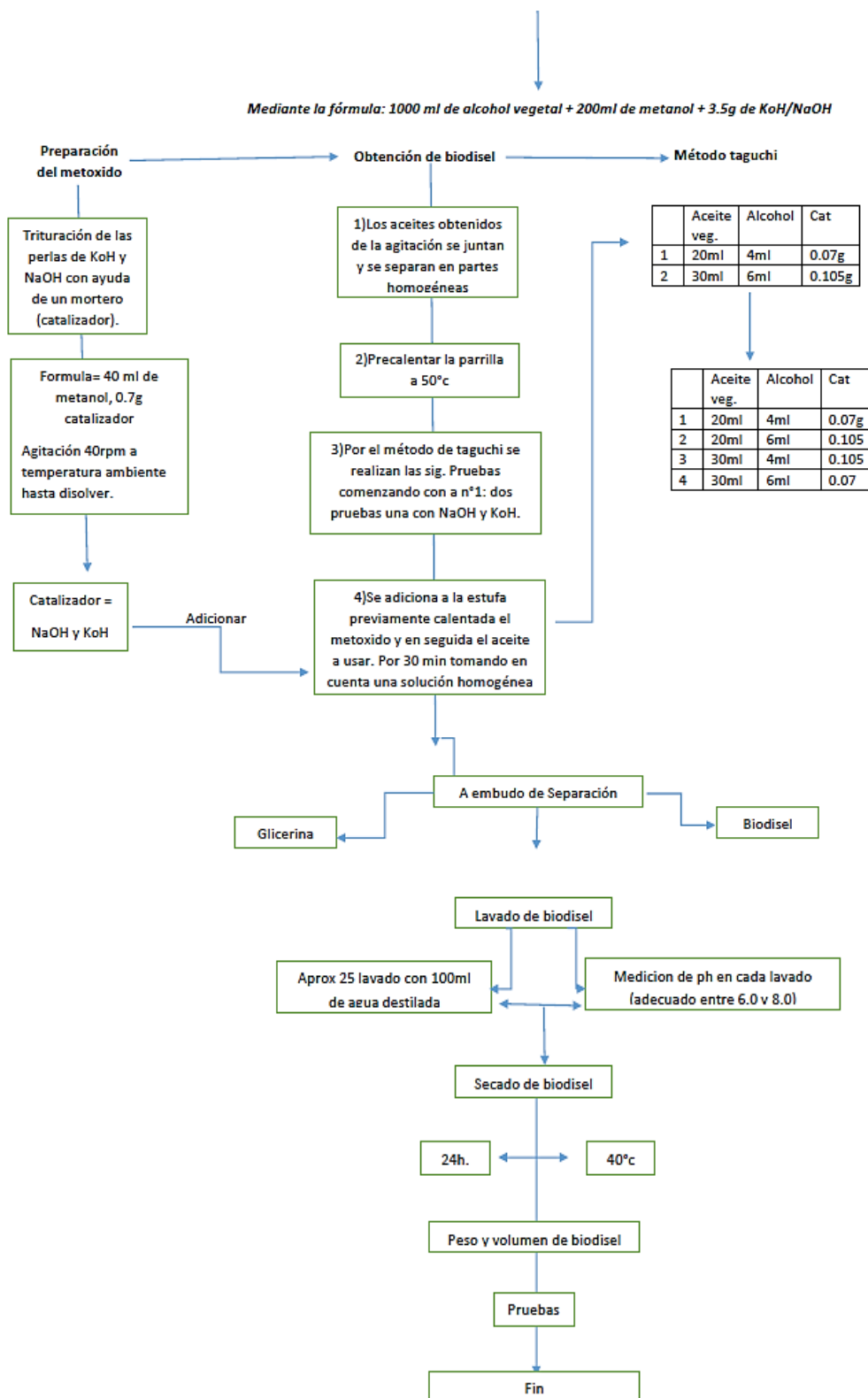


Figura 9. Diagrama de flujo de la metodología actualizada.

Principalmente tenemos lo que es la separación de semilla-maleza. La importancia de este proceso radica en asegurar la pureza del material que se utilizará en la extracción de aceite vegetal. Una separación efectiva mejora la calidad del aceite extraído, reduce el desgaste de los equipos, y aumenta la eficiencia en la producción de biodiésel. Si la maleza no se elimina adecuadamente, puede obstruir los equipos de procesamiento, introducir contaminantes que afecten la calidad del aceite, y disminuir el rendimiento del proceso de extracción. Además, mantener la semilla libre de maleza facilita el manejo del material en etapas posteriores del proceso, como la molienda y la extracción del aceite.

El pretratamiento de la semilla es un paso esencial en la producción de biodiésel, que prepara las semillas oleaginosas para la extracción eficiente del aceite; este proceso incluye varias etapas, como conteo de la semilla, peso de la semilla, peso del volumen de hexano, volumen del hexano (200 mL) y el trozado (mediante cuchillas), están diseñadas para optimizar la extracción de aceite, asegurando que solo el material deseado pase a las etapas posteriores; así mismo se realiza lo que es el filtrado y separación del hexano- semilla y el secado de la semilla.

El sistema Soxhlet es una técnica de extracción de lípidos y aceites que utiliza un extractor especializado para obtener compuestos de interés de sólidos mediante la disolución en un solvente. En el proceso Soxhlet, el material sólido se coloca en un cartucho y se somete a un ciclo continuo de extracción con un solvente, que se evapora, condensa y recircula sobre el material. Este método permite una extracción exhaustiva y eficiente del aceite o lípidos, ya que el solvente saturado con el soluto es reemplazado continuamente por solvente fresco. Es particularmente útil en la producción de biodiésel para asegurar la recuperación completa del aceite de las semillas, lo que incrementa el rendimiento del proceso y mejora la calidad del producto final.

La destilación simple es un proceso de separación que se utiliza para purificar líquidos o separar componentes en una mezcla líquida basada en sus diferentes puntos de ebullición.

En la destilación simple, la mezcla se calienta hasta que el componente con el punto de ebullición más bajo se vaporiza. Este vapor se condensa luego en un refrigerante y se recoge como un líquido separado (hexano). Este método es eficiente para purificar aceites extraídos, eliminando impurezas volátiles o solventes residuales, lo

cual es crucial en la producción de biodiésel. La destilación simple asegura que el biodiésel final cumpla con los estándares de calidad, garantizando un producto más puro y estable para su uso en motores.

La transesterificación es un proceso químico clave en la producción de biodiésel, en el cual los triglicéridos presentes en aceites y grasas reaccionan con un alcohol, generalmente metanol o etanol, para formar ésteres (biodiésel) y glicerol como subproducto.

Este proceso transforma aceites vegetales o grasas animales en biodiésel, biocombustible renovable y ecológico que puede reemplazar al diésel convencional. La transesterificación es esencial porque reduce la viscosidad del aceite, haciendo que el biodiésel sea adecuado para su uso en motores diésel sin necesidad de modificaciones.

En este caso se trabajó mediante la fórmula:

1000 mL de aceite vegetal + 200 mL de metanol + 3.5 g de KOH/NaOH

Tomando como principal la preparación del metóxido en esta ocasión iniciamos triturando las perlas de KOH y NaOH para proceder a la formula = 40 mL de metanol + 0.7 g de catalizador con agitación de 40 rpm a temperatura ambiente hasta disolver.

Posteriormente se procedió al tratamiento del aceite ya obtenido para la realización de pruebas esto por el método de Taguchi seleccionado. En la Tabla 2, se muestra el diseño experimental ortogonal L4(2³) empleado en este trabajo (metodología actualizada). realizándose solo la corrida 1 y 2 y tomando en cuenta que se realizó una prueba de NaOH y KOH de ambas colocándose respectivamente en embudos de separación par extraer glicerina y realizar los lavados correspondientes.

Tabla 2. Factores y niveles experimentales de transesterificación empleados en la metodología actualizada.

Corrida	Aceite vegetal (mL)	Alcohol (mL)	Catalizador (g)
1	20	4	0.07
2	20	6	0.105
3	30	4	0.105
4	30	6	0.07

El lavado es fundamental para asegurar que el biodiésel cumpla con los estándares de calidad y rendimiento exigidos para su uso en motores. Se realizó con agua destilada, esta siendo mezclada con el biodiésel para arrastrar las impurezas (25 veces). Posteriormente, el agua se separa y el biodiésel se seca para eliminar cualquier humedad residual. Este paso garantiza que el biodiésel final sea estable, seguro y eficiente, evitando problemas como la corrosión del motor o la formación de depósitos durante su uso.

El secado del biodiésel es el proceso final de eliminación de agua residual después del lavado, asegurando que el biodiésel esté completamente libre de humedad. Este paso es crucial para garantizar la calidad del biodiésel, ya que la presencia de agua puede causar problemas como la corrosión en motores y la formación de emulsiones que afectan su rendimiento. El secado se realizó mediante calentamiento suave a 30°C durante 24h, lo que asegura que el biodiésel cumpla con las especificaciones requeridas para su almacenamiento y uso. Un biodiésel bien seco es más estable y eficiente, lo que prolonga la vida útil del combustible y del motor.

3.1.3 Escalamiento de proceso de nivel laboratorio a planta piloto

La propuesta realizada se sustenta en la búsqueda, a través de las referencias, documentos y libros encontrados en los diversos medios digitales, de un equipo existente en el mercado debido a que ya están comprobados que cumplen con la función y satisfacen las necesidades requeridas para llevar a otro nivel de producción mayor al que se tiene actualmente.

3.2 CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

Actividades	Agosto		Septiembre		Octubre		Noviembre		Diciembre	
	1-15	16-31	1-15	16-30	1-15	16-31	1-15	16-30	1-15	16-31
Revisión bibliográfica										
Pruebas experimentales										
Análisis de escalamiento										
Propuesta de escalamiento										
Asesorías										
Evaluación y seguimiento de asesorías										
Evaluación de reporte										
Informe semestral										
Elaboración reporte técnico (productos entregables)										

Figura 10. Cronograma de actividades general.

IV. RESULTADOS

4.1 SEPARACIÓN DE SEMILLAS DE MALEZA

Como paso principal se realizó la separación de semilla- maleza teniendo un total de 1300 g de materia prima (semilla con maleza) este proceso llevo alrededor de 300 min teniendo como resultado la recuperación de 790 g de semilla siendo 15,839 totales como a continuación se muestra.



Figura 11. Maleza de semilla recolectada. Se tiene semilla y ramas.



Figura 12. Semilla separada de la maleza recolectada.



Figura 13. Maleza sin semilla.

4.2 PRETRATAMIENTO INICIAL A LA SEMILLA

El pretratamiento de la semilla es un conjunto de operaciones que preparan las semillas para la extracción de aceite de manera eficiente. A continuación, se describe el proceso paso a paso:

1. Peso y N° de semilla. Se cuentan alrededor de 350 semillas, tomando en cuenta que sean 15 g.
2. Se mide y se pesa 200 mL de hexano (132 g).
3. En una licuadora se agregan 200 mL de hexano y 15 g de semilla, una vez realizado esto se procede a licuar en la función trozar durante 2 min.
4. Después de licuar (función trozado) se filtra mediante papel filtro poro medio el material rescatando la solución en un vaso de precipitado, esta misma solución se utiliza para enjuagar 3 veces el vaso de licuadora permitiendo así rescatar cualquier residuo que se queda adherido en las paredes de la licuadora.
5. Se mide el liquido recuperado y por medio de decantación una porción de este pasa por el filtrado de poro chico para pesar el recuperado total aprox. 66.79 g.
6. El papel filtro que contiene la semilla pasa a pesarse (22.18 g) y se lleva una estufa a 50° por 4 h para secarse.
7. Por último, la semilla es colocada en el desecador por 2 h a temperatura ambiente para obtener un peso de aprox. 20.33 g.

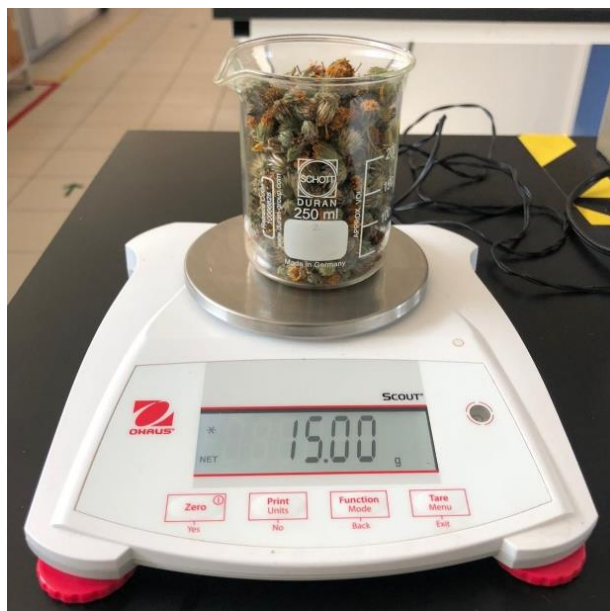


Figura 14. *Peso de la semilla a trozar en licuadora.*



Figura 15. *Semilla mas solvente de hexano a trozar.*



Figura 16. Hexano + aceite vegetal recuperado por filtro de poro medio. Vista 1.



Figura 17. Hexano + aceite vegetal recuperado por filtro de poro medio. Vista 2.

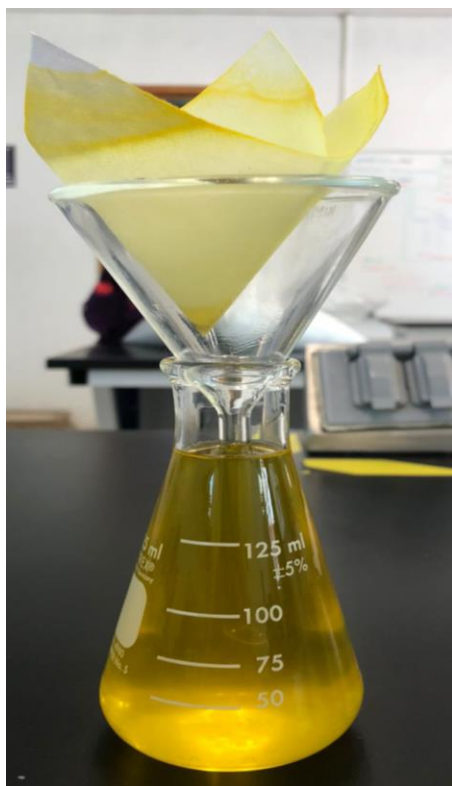


Figura 18. Filtrado de aceite vegetal con solvente resultante de Soxhlet.



Figura 19. Peso de semilla después de 4 h de secado.



Figura 20. Semilla resultante después de secado en estufa y lista para poner en desecador.

4.3 EXTRACCIÓN SOXHLET Y DESTILACIÓN SIMPLE

Soxhlet

Principalmente se miden 250 mL de hexano, tomando en cuenta lo recuperado de cada porción recuperada de la molienda respectivamente, se preparan 2 porciones de semillas de 15 g c/u agregando 4 perlas de ebullición, montado el sistema la parrilla se coloca a 300 °C para completar 18 sifonados (incluyendo ya 3 sifonados transparentes), tomando un tiempo aprox. de 2 h de 6 min cada sifonado, donde el primero tarda alrededor de 10 min. Los residuos son de aprox. 150 mL c/u.

Destilación simple

Se miden porciones de 500 mL (unión de 3 Soxhlet). La destilación dura alrededor de 1 h para obtener un líquido final de 130-140 mL con una temperatura de 250 °C. Mientras que de hexano se recuperan alrededor de 340 mL de hexano. Los 130-140 mL de aceite recuperado pasa a proceso de agitación a 35 °C, 80 rpm en 2 h. para posteriormente ser dejado bajo sombra a cielo abierto por 24 h.



Figura 21. Semilla + hexano a utilizar en Soxhlet.



Figura 22. Hexano recuperado por porción para Soxhlet.

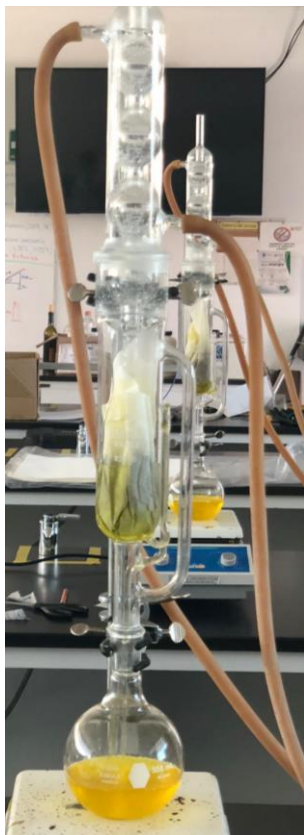


Figura 23. Sistema Soxhlet.



Figura 24. Aceite a destilación simple.

4.4 TRANSESTERIFICACIÓN

Mediante la siguiente fórmula se estableció las cantidades de reactivos de la metodología actualizada propuesta en este trabajo:

1000 mL de aceite vegetal + 200 mL de metanol + 3.5 g de NaOH/KOH

Principalmente iniciamos con la preparación del metóxido:

1. Trituración de las perlas con la ayuda de mortero.
2. Formula = 40 mL de metanol + 0.7 g de catalizador.
3. Agitación a 40 rpm a temperatura ambiente hasta disolver.

Posteriormente para la obtención del biodiesel:

1. Se junta todo el aceite recolectado por la destilación simple para tener una mezcla homogénea.
2. La parrilla se precalienta a 50°C con ayuda de termómetro para estabilizar.
3. Por el método de Taguchi se realizan las siguientes pruebas comenzando con la N°1 y seguida la N°2 tomando en cuenta que se hace una prueba con NaOH y otra con KOH. En la Tabla 3, se muestran las corridas del diseño experimental ortogonal L4(2³) empleado en este estudio con la metodología actualizada.
4. Se adiciona en la parrilla previamente calentada el metóxido y enseguida el aceite a usar por 30min con 40 rpm.
5. Una vez obtenido esto se coloca la solución resultante en un embudo de decantación lo que permite la separación de fases (glicerina y biodiesel) por densidad por 24h.

Tabla 3. Factores y niveles experimentales de transesterificación llevados a cabo considerando la metodología actualizada.

Corrida	Aceite vegetal (mL)	Alcohol (mL)	Catalizador (g)
1	20	4	0.07
2	20	6	0.105

En la Tabla 4 y 5, se expresan los resultados promedio obtenidos en función del porcentaje de obtención de biodiésel de acuerdo al catalizador empleado y considerando la siguiente formula reportada por los autores de [1]:

$$\text{Porcentaje de conversión de biodiésel (\%)} = \frac{\text{Biodiésel producido (mL)}}{\text{Aceite vegetal empleado (mL)}} \times 100$$

Tabla 4. Porcentaje de conversión de biodiésel obtenido con la metodología actualizada y empleando KOH.

Corrida	Aceite vegetal (mL)	Alcohol (mL)	Catalizador (g)	Biodiésel obtenido (mL)	% conversión
1	20	4	0.07	4.1	20.5
2	20	6	0.105	4.2	21.0

Tabla 5. Porcentaje de conversión de biodiésel obtenido con la metodología actualizada y empleando NaOH.

Corrida	Aceite vegetal (mL)	Alcohol (mL)	Catalizador (g)	Biodiésel obtenido (mL)	% conversión
1	20	4	0.07	1.8	9.0
2	20	6	0.105	5	25.0

En resumen, se considera que el catalizador homogéneo de KOH funcionó mejor con la metodología actualizada, mas sin embargo demás diseños experimentales deben estudiarse (trabajo a futuro).

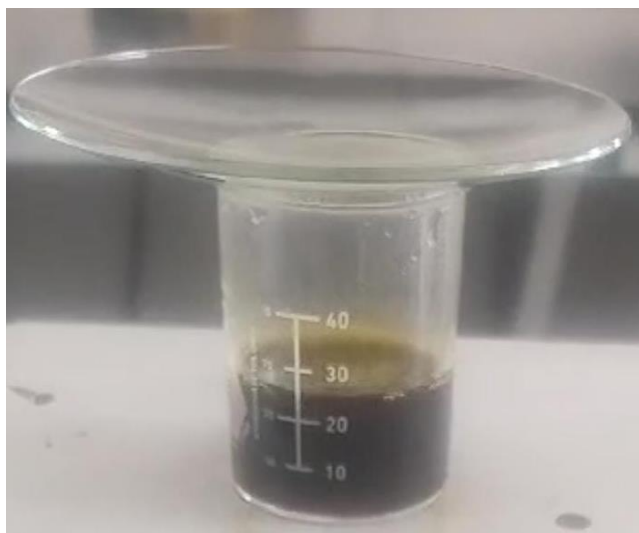


Figura 25. Aceite de transesterificación.

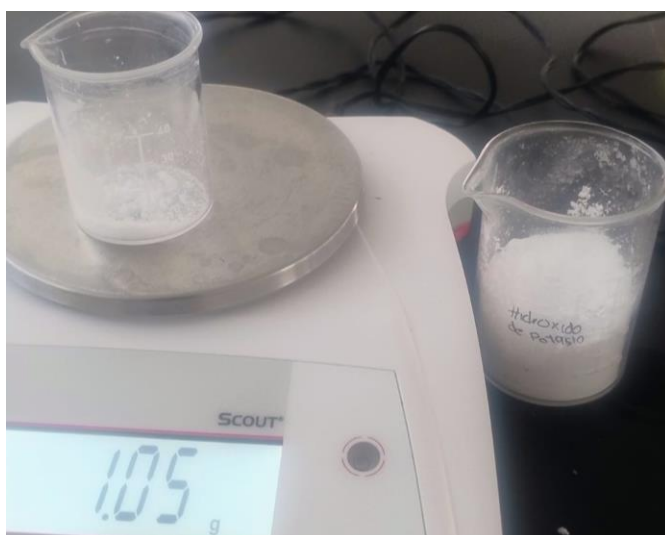


Figura 26. Hidróxido de potasio para metóxido.

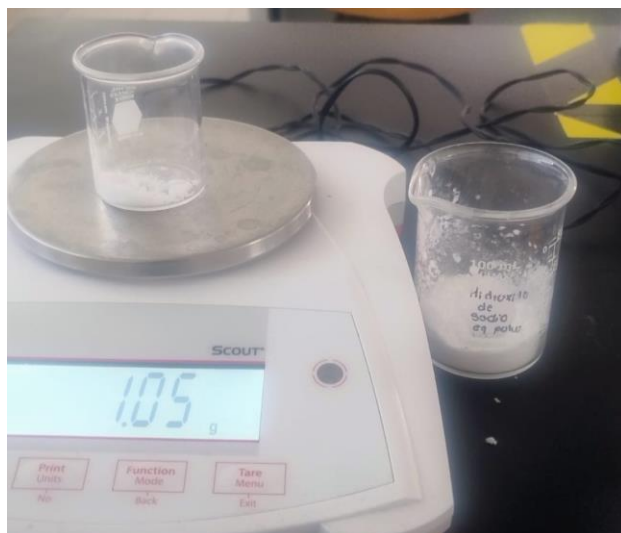


Figura 27. hidróxido de sodio para metóxido.

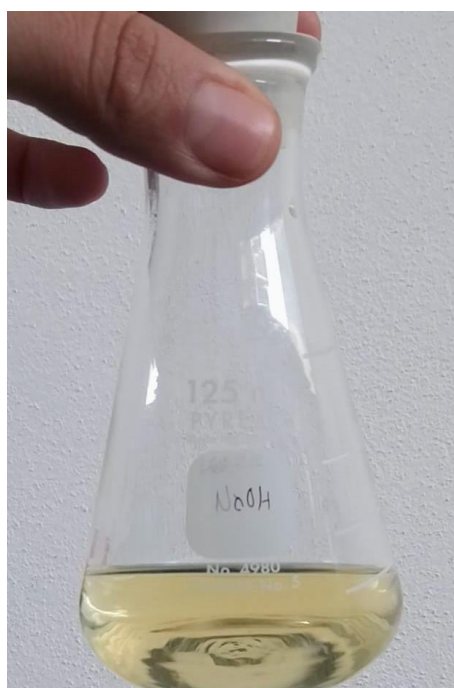


Figura 28. Solución de metóxido de sodio preparado.

4.5 SEPARACIÓN DE FASES

una vez pasado el tiempo se procede a abrir la parrilla con cuidado para poder separar la glicerina del biodiesel y para proceder a medir el volumen de glicerina y de biodiesel. En este caso se le coloca agua a la glicerina para corroborar.



Figura 29. Extracción de la separación por fases de KOH, 4 mL.



Figura 30. Muestra de separación de fases de 4 mL de KOH.



Figura 31. Extracción de separación de 3 fases de 6 mL de NaOH.

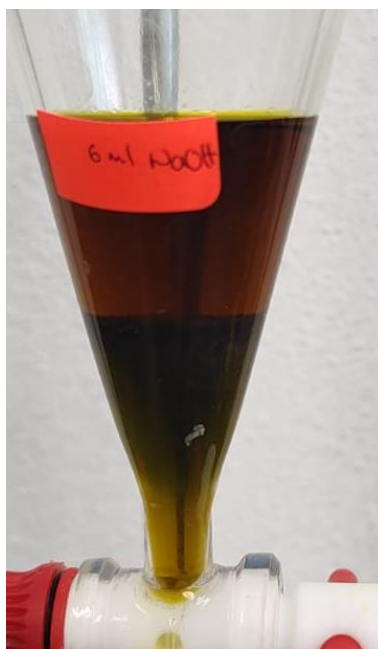


Figura 32. Muestra de separación de fases de 6 mL de NaOH.

4.6 LAVADO Y NEUTRALIDAD

Se realizan alrededor de 21 lavados de 100 mL de agua destilada a 60 °C hasta que el pH del agua de lavado sea de [6.8-7.5]; el primer lavado presenta pH de 8.45 y el último presenta un pH de 6.95 encontrando punto neutro.



Figura 33. Toma de pH a residuo de primer lavado de 4 mL de NaOH.

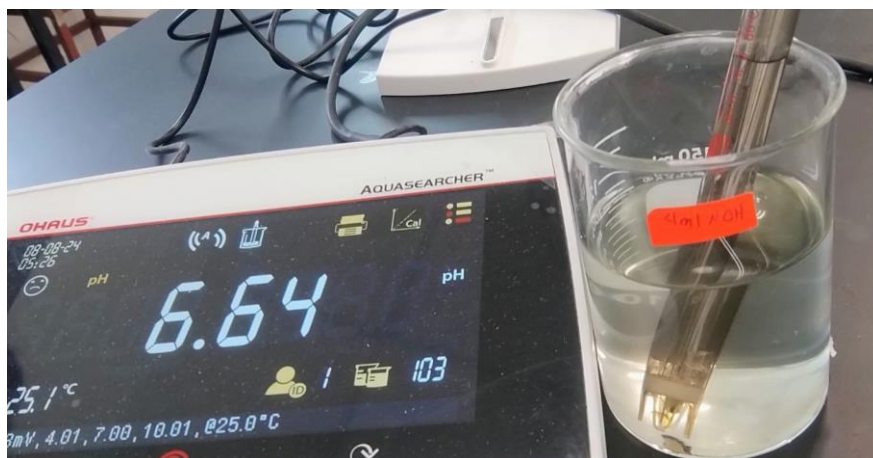


Figura 34. Toma de pH a residuo de último lavado de muestra de KOH, 4 mL.

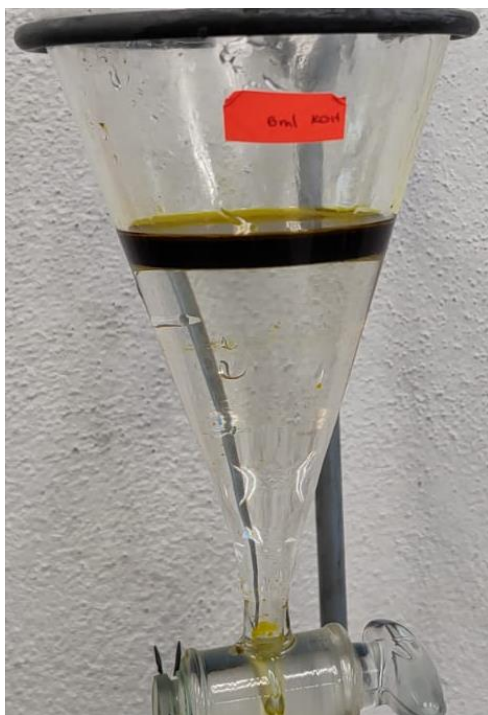


Figura 35. *Muestra de ultimo lavado.*

4.7 SECADO DE VOLUMEN DE BIODIÉSEL RESULTANTE

A continuación, el secado se realiza a 30°C en la estufa por 24h

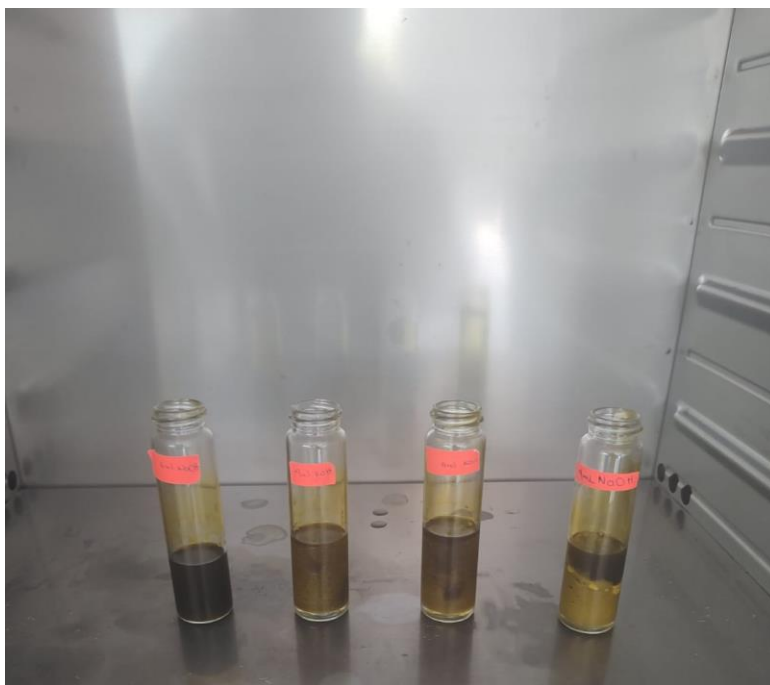


Figura 36. *Secado de muestra final de biodiésel.*



Figura 37. Muestras finales de biodiésel después de secado.

4.8 PROPUESTA DE ESCALAMIENTO

1. Producción Actual y Objetivos de Escalamiento

Capacidad Actual: 500 litros de biodiésel por día en una planta piloto.

Objetivo de Escalamiento: Aumentar la producción a 5,000 litros de biodiésel por día para satisfacer la demanda de un mercado más amplio.

2. Análisis de Infraestructura y Equipamiento

Reactores:

Actual: Reactor con capacidad de 1,000 litros, operando en lotes de 500 litros.

Propuesto: Instalación de un reactor continuo de 10,000 litros, operando de manera continua para maximizar la eficiencia.

Almacenamiento de Materias Primas:

Actual: Tanques de 2,000 litros para aceites y metanol.

Propuesto: Ampliación a tanques de 20,000 litros para manejar el mayor volumen de materia prima.

3. Propuesta de Escalamiento Numérico

Volumen de Producción:

Actual: 500 litros/día

Escalado: 5,000 litros/día

Envases y Embalaje:

Actual: Uso de bidones de 20 litros.

Propuesto:

Mantener los bidones de 20 litros para pequeños clientes y transporte.

Introducir tanques IBC (Intermediate Bulk Container) de 1,000 litros para grandes clientes industriales.

Cálculos de Envases Necesarios:

Envases Actuales:

$500 \text{ litros/día} \div 20 \text{ litros/bidón} = 25 \text{ bidones/día}$

Envases Escalados:

Bidones de 20 litros: 2,000 litros/día (aproximadamente 40% de la producción)

$2,000 \text{ litros/día} \div 20 \text{ litros/bidón} = 100 \text{ bidones/día}$

Tanques IBC de 1,000 litros: 3,000 litros/día (aproximadamente 60% de la producción)

$3,000 \text{ litros/día} \div 1,000 \text{ litros/tanque} = 3 \text{ tanques IBC/día}$

4. Requerimientos Adicionales:

Logística y Transporte:

Incremento de la flota de transporte para manejar el mayor volumen de envases.

Coordinación con clientes para la recepción de grandes volúmenes, especialmente con los tanques IBC.

Mano de Obra:

Necesidad de aumentar el personal operativo en un 20% para manejar la mayor carga de trabajo en producción, embalaje y distribución.

5. Presupuesto Estimado para el Escalamiento:

Nuevo Reactor Continuo: \$500,000 USD

Tanques de Almacenamiento: \$150,000 USD

Tanques IBC (50 unidades iniciales): \$25,000 USD

Aumento en la Flota de Transporte: \$100,000 USD

Incremento de Personal: \$50,000 USD/año

6. Cronograma de Implementación:

Mes 1-2: Adquisición de nuevos equipos y tanques.

Mes 3-4: Instalación de equipos y ajuste de la infraestructura.

Mes 5: Pruebas y ajustes de producción.

Mes 6: Inicio de la producción escalada a 5,000 litros/día.

Esta propuesta numérica de escalamiento refleja un plan estructurado para aumentar la capacidad de producción de biodiésel y satisfacer una demanda mayor, considerando factores clave como el volumen de producción y el manejo de envases.

En conclusión, el proyecto de escalamiento para aumentar la capacidad de producción de biodiésel de 500 a 5,000 litros por día está diseñado de manera integral, abordando aspectos clave de infraestructura, logística y costos. Este crecimiento permitirá satisfacer una demanda más amplia al tiempo que se optimizan los recursos y se mejora la eficiencia operativa.

Producción y Escalamiento: El plan propone un incremento significativo en la capacidad de producción mediante la transición de un reactor por lotes de 1,000 litros a un reactor continuo de 10,000 litros, lo que garantizará un flujo continuo y mayor productividad.

Infraestructura: La expansión de los tanques de almacenamiento a 20,000 litros asegura la capacidad de manejo de materias primas, crucial para sostener el incremento de producción.

Manejo de Productos y Logística: La introducción de envases diversificados (bidones de 20 litros para pequeños clientes y tanques IBC para grandes consumidores industriales) optimiza la distribución según las necesidades del mercado. Se contempla también la ampliación de la flota de transporte y mejoras en la coordinación logística.

Mano de Obra y Operaciones: El aumento del personal operativo en un 20% responde al crecimiento de las demandas en producción, embalaje y transporte.

Presupuesto y Cronograma: Con un presupuesto total estimado de \$825,000 USD y un cronograma bien definido, el proyecto se plantea como factible y ejecutable en un periodo de seis meses, desde la adquisición de los equipos hasta el inicio de la producción escalada.

Este plan no solo atiende las necesidades inmediatas del mercado, sino que también posiciona a la empresa para un crecimiento sostenible a largo plazo, mejorando su competitividad y contribuyendo a la promoción de energías renovables.

V. CONCLUSIONES

La aplicación de las estrategias académicas seleccionadas en conjunto con las actividades relacionadas con el presente proyecto permitió alcanzar los objetivos planteados. Se logró realizar pruebas de obtención de biodiésel a nivel laboratorio bajo un diseño ortogonal experimental $L4(2^3)$ en donde se definieron como variables de operación: la cantidad de volumen de aceite vegetal (mL), volumen de alcohol en exceso (mL) y cantidad de catalizador (g).

Bajo los diseños experimentales por arreglos ortogonales establecidos y conforme la metodología propuesta, se lograron porcentajes de rendimientos de conversión de biodiésel entre 9 y 25%.

De la propuesta de escalamiento se refleja un plan estructurado para aumentar la capacidad de producción de biodiésel y satisfacer una demanda mayor, considerando factores clave como el volumen de producción y el manejo de envases

El proyecto de residencia me permitió validar los conceptos teóricos y prácticos aprendidos durante mi estadía como estudiante de la carrera de Ingeniería Industrial en proyectos de investigación científica. Para llevar a cabo este proyecto se pusieron en práctica los conocimientos y habilidades a lo largo de la carrera, química, economía, control estadístico de la calidad, control estadístico de la calidad, logística y cadena de suministro, entre otras materias importantes. También se aplicó la investigación y redacción, ya que, al ser un proyecto de esta índole, se necesitan las herramientas básicas para tener un proyecto de calidad, eficiente y eficaz a su vez. En particular aprendí a adaptarme a trabajos por objetivos. Además de siempre buscar la solución más factible mediante la aplicación de un método analítico y científico para eliminar los problemas desde raíz. Mi tiempo de residencia profesional interactuando con temas de desarrollo tecnológico, investigación e innovación fue una de las mejores experiencias profesionales que he vivido y donde aprendí lo importante que es llegar a establecer soluciones viables y resolver el problema raíz de la manera más factible.

VI. COMPETENCIAS DESARROLLADAS Y/O APLICADAS

1. Aplique metodologías de la Ingeniería Industrial con base en las necesidades del proyecto de investigación científica de estudio para incrementar sus diversos indicadores de operación.
2. Aplique técnicas de procesos de fabricación, taller de investigación, simulación y administración de proyectos
3. Implementé métodos innovadores de solución de problemas de investigación a través de la experimentación a nivel laboratorio, los cuales pueden ser replicados a escala industrial.
4. Gestioné la generación del conocimiento específico para evidenciar la capacidad de acción de la Ingeniería Industrial, ejerciendo un liderazgo estratégico y un compromiso ético.
5. Coadyuve a cumplir los retos de la institución en torno al fomento de proyectos de investigación científica.
6. Utilice las nuevas tecnologías de información y comunicación de la institución, para el estado del arte del proyecto y contar con información actualizada para la mejora de los procesos de estudio y el desarrollo de la metodología del proyecto.
7. Promoví el desarrollo de la ciencia e investigación, con el fortalecimiento de las líneas de investigación de la institución.
8. Aplique métodos de investigación para desarrollar e innovar sistemas y/o procesos industriales.
9. Actúe como agente de cambio para facilitar la mejora continua en los procesos de aprendizaje de la carrera de Ingeniería Industrial de la institución.
10. Aplique métodos, técnicas y herramientas para la solución de problemas presentados durante la fase de ejecución del proyecto.

VII. FUENTES DE INFORMACIÓN

- [1] Dena-Aguilar, J. A., Díaz-Ponce, A., Frausto-Reyes, A., Villanueva-Mejía, F. y Zacarías-Moreno, E. (2024). Estudio de la producción de biodiesel a partir de especies arvenses presentes en cultivos de Aguascalientes, México. *Entreciencias*, 12(26), Art. 13, 1-15. Doi: 10.22201/enesl.20078064e.2024.26.87733
- [2] Chamola, R., Fazil-Khan, M., Raj, A., Verma, M., and Jain, S. (2019). Response surface methodology based optimized of in situ transesterification of dry algae with methanol, H₂SO₄ and NaOH. *Fuel*, 239, 511-520. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.11.038>
- [3] Onukwuli, D. O., Umeuzuegbu, J. C., U. de, C. N., and Nwobi-Okoye, C. C. (2020). Homogeneous catalyzed transesterification of neem seed oil to biodiesel and its kinetic modeling. *Biofuels, Bioproducts & Biorefining*. Doi: 10.1002/bbb.2171
- [4] Hoseini, S. S., Najafi, G., Moazzez, A. F., Hazrati, S., Ebadi, M. T., and Yusaf, T. (2020). Potential of Chrozophora tinctoria seed oil as a biodiesel resource. *Applied Sciences*, 10, 3473. Doi: 10.3390/app10103473
- [5] Jain, S., Kumar, N., Singh, V. P., Mishra, S., Sharma, N. K., Bajaj, M., and Khan, T. M. Y. (2023). Transesterification of algae oil and little amount of waste cooking oil blend at low temperature in the presence of NaOH. *Energies*, 16, 1293. Doi: <https://doi.org/10.3390/en16031293>
- [6] Hernández-Salazar, L. F. (2021). *Diseño de un proceso a escala de laboratorio de transesterificación de aceite vegetal de malezas: análisis por diseños experimentales* (Tesis de Licenciatura). Tecnológico Nacional de México Campus Pabellón de Arteaga, Pabellón de Arteaga, Aguascalientes, Méx.
- [7] Knothe, G. (2010). Biodiesel and renewable diesel: A comparison. *Progress in Energy and Combustion Science*, 36(3), 364-373. Doi: 10.1016/j.pecs.2009.11.004
- [8] Demirbas, A. (2009). Biodiesel from waste cooking oil via base-catalytic and supercritical methanol transesterification. *Energy Conversion and Management*, 50(4), 923-927. Doi: 10.1016/j.enconman.2008.12.023
- [9] Yuan, Y., and Tao, Y. (2018). Extraction of oils and fats for biodiesel production. *Journal of Cleaner Production*, 183, 361-368.

- [10] Castro, M., and Pérez, R. (2018). Técnicas de extracción de aceites vegetales: Un enfoque práctico. *Revista de Ciencias Alimentarias*, 12(3), 45-58. Recuperado de file:///C:/Users/DELL/Downloads/Monografaxtracciondeaceitesdeorigenvegetal.pdf
- [11] Fukuda, H., Kondo, A., and Noda, H. (2001). Biodiesel fuel production by transesterification of oils. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 92(5), 405-416.
- [12] Demirbas, A. (2009). Biodiesel: A Realistic Fuel Alternative for Diesel Engines. Springer.
- [13] Fukuda, H., Kondo, A., and Noda, H. (2001). Biodiesel fuel production by transesterification of oils. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 92(5), 405-416.
- [14] Meher, L. C., Vidya Sagar, D., and Naik, S. N. (2006). Technical aspects of biodiesel production by transesterification—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 10(3), 248-268. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/222554973_Technical_Aspects_of_Biodiesel_Production_by_Transesterification-A_review
- [15] Meher, L. C., Vidya-Sagar, D., and Naik, S. N. (2006). Technical aspects of biodiesel production by transesterification—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 10(3), 248-268. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/222554973_Technical_Aspects_of_Biodiesel_Production_by_Transesterification-A_review
- [16] Miao, X., and Yang, C. (2006). Biodiesel production from heterogeneous acid catalyst transesterification of waste cooking oil. *Bioresource Technology*, 97(6), 1133-1137.
- [17] Meher, L. C., Vidya-Sagar, D., and Naik, S. N. (2006). Technical aspects of biodiesel production by transesterification—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 10(3), 248-268.
- [18] Meher, L. C., Vidya Sagar, D., and Naik, S. N. (2006). Technical aspects of biodiesel production by transesterification—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 10(3), 248-268.
- [19] Couto, E. H., and Ferreira, E. A. (2019). Advances in biodiesel production and quality control. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 101, 243-256.
- [20] García, R., and López, M. (2018). Producción y escalamiento industrial de biodiésel: Fundamentos y aplicaciones. *Editorial Energías Renovables*. Recuperado de https://www.osinergmin.gob.pe/seccion/centro_documental/Institucional/Estudios_

Economicos/Libros/Osinergmin-Energias-Renovables-Experiencia-
Perspectivas.pdf

ANEXO 1

Carta de aceptación por parte de la empresa para la residencia profesional



Instituto Tecnológico de Pabellón de Arteaga
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Pabellón de Arteaga, Aguascalientes, 08/agosto/2024

Oficio No. DEPI050/2024

Asunto: Carta de aceptación de Residencias Profesionales

ANGIE JOHANNA ZAMORA LÓPEZ
JEFA DEL DEPARTAMENTO DE GESTIÓN TECNOLÓGICA Y VINCULACIÓN

PRESENTE

Por medio del presente se notifica que el(la) **C. ATZIRI VALERIA LUÉVANO CASTORENA**, estudiante de la carrera de Ingeniería Industrial, con número de control 201050291, ha sido aceptado(a) para realizar en esta Institución su Residencia Profesional a través de proyecto interno de carácter local en el ámbito de Investigación, denominado **"Propuesta de escalamiento de un proceso a nivel laboratorio de obtención de biodiésel a partir del aceite vegetal de la maleza *Bidens ferulifolia* (Jacq.) DC."** durante el periodo de agosto-diciembre 2024, cubriendo un total de 500 horas en un horario de 08:00 a 16:00 horas de lunes a viernes, bajo la supervisión de los investigadores José Alonso Dena Aguilar (asesor externo) y Jorge Fernando Carmona Espinoza (asesor interno). El proyecto será realizado en el Laboratorio de Conversión de la Energía del área de Posgrado de nuestro plantel.

El presente proyecto de Residencia Profesional es producto del proyecto TecNM 11474.21-P, "Estudio de obtención de biodiésel a partir de especies arvenses de terrenos de cultivos locales".

Sin otro particular por el momento, aprovecho la ocasión para enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE
Excelencia en Educación Tecnológica
"Tierra Siempre Fértil" ®

EDGAR ZACARÍAS MORENO
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

ccp, Archivo.
EZM/jada



Carretera a la Estación de Rincón Km. 1 C.P. 20670 Pabellón de Arteaga, Aguascalientes.
Tel. 465 958-2482 e-mail: depi_parteaga@tecnm.mx tecnemx | pabellon.tecnm.mx



ANEXO 2

Carta de terminación por parte de la empresa para la residencia profesional



Instituto Tecnológico de Pabellón de Arteaga
Subdirección Académica
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Pabellón de Arteaga, Aguascalientes, 09/diciembre/2024
Circular No. DEPI080/2024
Asunto: Carta de conclusión de Residencias Profesionales

ANGIE JOHANNA ZAMORA LÓPEZ
JEFA DEL DEPARTAMENTO DE GESTIÓN TECNOLÓGICA Y VINCULACIÓN

PRESENTE

Por medio del presente se notifica que el(la) C. ATZIRI VALERIA LUÉVANO CASTORENA, estudiante de la carrera de Ingeniería Industrial, con número de control 201050291, concluyó satisfactoriamente en esta Institución su Residencia Profesional a través de proyecto interno de carácter local en el ámbito de Investigación, denominado "Propuesta de escalamiento de un proceso a nivel laboratorio de obtención de biodiésel a partir del aceite vegetal de la maleza *Bidens ferulifolia* (Jacq.) DC." durante el periodo de agosto-diciembre 2024, cubriendo un total de 500 horas en un horario de 09:00 a 16:00 horas de lunes a viernes, bajo la supervisión de José Alonso Dena Aguilar [asesor externo] y Jorge Fernando Carmona Espinoza [asesor interno]. El proyecto fue realizado en el Laboratorio de Conversión de la Energía del área de Posgrado de nuestro plantel.

El presente proyecto de Residencia Profesional es producto del proyecto TecNM 11474.21-P, "Estudio de obtención de biodiésel a partir de especies arvenses de terrenos de cultivos locales".

Sin otro particular por el momento, aprovecho la ocasión para enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE
Excelencia en Educación Tecnológica
"Tierra Siempre Fértil"

EDGAR ZACARÍAS MORENO
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

ccp. Archivo
EZM/jada



Carretera a la Estación de Rincón Km. 1 C.P. 20670 Pabellón de Arteaga, Aguascalientes
Tel. 465 958-2482 e-mail: depi_parteaga@tecnm.mx | parteaga@tecnm.mx

