



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS SUPERIORES

UNIDAD JURIQUILLA

LICENCIATURA DE INGENIERÍA EN ENERGÍAS RENOVABLES

**ANÁLISIS DE AMPLITUD Y EL TIEMPO DE EXPOSICIÓN DE RADIACIÓN
ULTRASÓNICA DE ALTA FRECUENCIA EN LA PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL**

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
INGENIERO EN ENERGÍAS RENOVABLES

PRESENTA:

RENÉ ORLANDO PLEITEZ OVIEDO

TUTOR O TUTORES PRINCIPALES:

DR. JOSÉ DANIEL BECERRA RUIZ

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS SUPERIORES, UNIDAD JURIQUILLA.

DRA. IDANIA VALDEZ VÁZQUEZ

UNIDAD ACADÉMICA JURIQUILLA, INSTITUTO DE INGENIERÍA.

MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR:

M. en C. SAÚL LÓPEZ ORDAZ

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO, FACULTAD DE QUÍMICA.

Juriquilla, Querétaro, México. Noviembre de 2024.



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Resumen

El creciente interés en desarrollar combustibles alternativos capaces de complementar a aquellos obtenidos de recursos fósiles ha puesto al biodiésel en un foco de investigación importante, dirigido principalmente a encontrar técnicas de intensificación efectivas que permitan su producción a escala industrial. A lo largo de este trabajo se realizaron 4 actividades experimentales asociadas a la producción de dicho biocombustible tanto a escala laboratorio como escala planta piloto, convencionalmente y con asistencia por ultrasonidos, utilizando aceite residual de cocina (WCO), metanol (CH_3OH) e hidróxido de potasio (KOH) como materias primas en todos los casos; esto, para mostrar los efectos de aplicar una intensificación sonoquímica dentro de una planta piloto convencional de biodiésel, cuya capacidad de producción equivale a 170 - 200 litros en aproximadamente 10 hrs. El análisis de los resultados obtenidos determinó, a ambas escalas, una reducción de más del 50% en el tiempo de reacción al optar por un procesamiento sonoquímico y la síntesis de una mayor proporción de biodiésel, pasando de un 43.5% (laboratorio) y 82% (planta piloto) en eficiencias de conversión mediante procesamientos convencionales a valores de 80% (laboratorio) y 91.6% (planta piloto), con índices de calidad superiores; por lo anterior, se concluyó que la técnica de intensificación por ultrasonidos es altamente favorable en la producción de biodiésel a distintas escalas.

Agradecimientos y dedicatorias

Primero quiero agradecer a mis padres, que han sido un pilar de apoyo e inspiración a lo largo de mi vida y formación profesional, así como en la elaboración de este trabajo, los amo.

Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), específicamente a la Escuela Nacional de Estudios Superiores (ENES), Unidad Juriquilla, por aportarme las habilidades técnicas básicas y conocimientos teóricos que definen a un ingeniero en energías renovables.

Dr. José Daniel Becerra Ruiz, ENES Juriquilla, UNAM, tutor principal y persona responsable de iniciar colaboración con la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ) para el desarrollo de este proyecto.

Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Química, Centro de Investigación en Química para la Economía Circular (CIQEC).

M. en C. Jorge Elías Rodríguez Galindo, Facultad de Química, UAQ, responsable del Laboratorio de bioenergéticos dentro del CIQEC.

A mis amigos y seres queridos que constantemente expresan su interés en mi desarrollo personal.

ÍNDICE

Resumen	ii
Agradecimientos y dedicatorias	iii
1. Introducción.....	1
2. Antecedentes	2
2.1. ¿Qué es el biodiésel?.....	8
2.2. Materia prima.....	14
2.2.1. Aceites de cultivos alimenticios	19
2.2.2. Aceites de cultivos no alimenticios	21
2.2.3. Grasas animales y aceites residuales.....	21
2.2.4. Materiales lignocelulósicos	23
2.2.5. Aceites de microorganismos	24
2.2.6. Propiedades de las materias primas de biodiésel.....	24
2.3. Sistemas de transformación.....	27
2.3.1. Uso directo de aceites mezclados.....	28
2.3.2. Micro emulsión de aceites.....	28
2.3.3. Hidrotratamiento (HVO).....	28
2.3.4. Craqueo térmico (pirólisis) de aceites.....	28
2.3.5. Biomasa a líquido	29
2.3.6. Transesterificación	29
2.4. Alcoholes utilizados	51
2.5. Glicerol	53
2.6. Separación y purificación del biodiesel	61
2.7. Estado del arte de la intensificación del proceso de transesterificación asistida por ultrasonidos.....	67
3. Justificación	84
4. Hipótesis	85
5. Objetivo	85
6. Material y métodos.....	86
6.1. Método convencional a escala laboratorio	86
6.2. Reactor sonoquímico de tipo sonda a escala laboratorio	88
6.3. Método convencional a escala planta piloto	90
6.4. Reactor sonoquímico de celda de flujo a escala planta piloto	94

6.5.	Cálculo del índice de acidez	98
6.6.	Cálculo de cantidades requeridas de alcohol y catalizador para la reacción de transesterificación	99
6.6.1.	Método convencional a escala laboratorio	99
6.6.2.	Reactor sonoquímico de tipo sonda a escala laboratorio	101
6.6.3.	Métodos a escala planta piloto.....	102
6.7.	Pruebas de calidad del biodiesel.....	103
6.7.1.	Número ácido.....	104
6.7.2.	Contenido de jabones (cuantitativa).....	104
6.7.3.	Densidad	104
6.7.4.	Punto de inflamación (Flash Point).....	105
7.	Resultados	106
8.	Discusión	109
8.1.	Análisis de tiempos de reacción.....	109
8.2.	Análisis de eficiencias de conversión.....	110
8.3.	Análisis de la calidad del biodiesel obtenido	112
9.	Conclusiones	113
10.	Referencias.....	114
11.	Lista de figuras	120
	Figura 1. Empresas en México involucradas en la cadena de producción de biodiesel en México: productoras, recicladoras y generadoras de tecnología (Cabrera-Munguia y cols., 2022).....	120
	Figura 2. Componentes clave de la cadena de valor de los biocombustibles (Instituto Mexicano del Petróleo [IMP], 2018).....	120
	Figura 3. Ecuación general de transesterificación (Torossi Baudino, 2006).....	120
	Figura 4. Reacción de transesterificación de triglicéridos mediante metanol en medio básico (Torossi Baudino, 2006).....	120
	Figura 5. Reacciones reversibles en la transesterificación de triglicéridos (Torossi Baudino, 2006).....	120
	Figura 6. Mecanismo de transesterificación catalizada por bases (Meher y cols., 2006).....	120
	Figura 7. Mecanismo de transesterificación catalizada por ácidos (Meher y cols., 2006).....	120
	Figura 8. Esquema del diseño básico de un reactor sonoquímico discontinuo de tipo sonda (Zore y cols., 2021).....	120
	Figura 9. Representación esquemática del diseño básico de un reactor sonoquímico discontinuo de tipo baño ultrasónico (Gole & Gogate, 2012a).....	120
	Figura 10. Esquema de una celda de flujo hexagonal de triple frecuencia (Gogate y cols., 2003).....	120

Figura 11. Esquema representativo del reactor convencional a escala laboratorio.	120
Figura 12. Diagrama de embudo de decantación listo para la separación de glicerol crudo.	120
Figura 13. Diagrama de embudo de decantación tras una ronda de lavado de biodiésel con agua simple.	120
Figura 14. Esquema representativo del reactor sonoquímico de tipo sonda a escala laboratorio.	120
Figura 15. Diagrama del sistema completo de producción por método convencional.	120
Figura 16. Sección de planta piloto correspondiente a depósitos y tanque de materia prima.	120
Figura 17. Sección de planta piloto correspondiente a tanque de materia prima y reactor de transesterificación.	120
Figura 18. Sección de planta piloto correspondiente a tanques de separación y lavado.	120
Figura 19. Sección de planta piloto correspondiente a tanque de lavado y depósitos de biodiésel.	120
Figura 20. Posibles configuraciones de implementación del equipo sonoquímico al reactor de transesterificación.	120
Figura 21. Diagrama del sistema completo de producción por método sonoquímico a escala planta piloto.	120
Figura 22. Sección de planta piloto, método sonoquímico, correspondiente a tanque de materia prima y reactor de transesterificación.	120
12. Lista de tablas	121
Tabla 1. Aspectos generales de empresas en México involucradas en la cadena de producción de biodiesel (Cabrera-Munguia y cols., 2022).	121
Tabla 2. Especificaciones de estándares internacionales de biodiesel (Atadashi, Aroua, Raman y cols., 2011).	121
Tabla 3. Perfiles de FA de diferentes materias primas en porcentajes en peso (wt.%) mínimos y máximos (Ramos y cols., 2019).	121
Tabla 4. Diferentes generaciones de biodiesel y sus materias primas.	121
Tabla 5. Porcentaje de aceite y rendimiento por hectárea de distintos insumos de primera y segunda generación (Karmakar y cols., 2010).	121
Tabla 6. Cambios físico-químicos del aceite durante el proceso de freído (Meráz, 2016).	121
Tabla 7. Propiedades físico-químicas de materia prima comúnmente utilizada para producir biodiésel (Karmakar y cols., 2010).	121
Tabla 8. Factores que afectan la reacción de transesterificación (Meher y cols., 2006).	121
Tabla 9. Descripción de los procesos de transesterificación catalítica, junto con sus ventajas y desventajas (Elaboración propia con información presentada por Babadi y cols. (2022)).	121
Tabla 10. Descripción de los procesos de transesterificación catalítica, junto con sus ventajas y desventajas (Elaboración propia con información presentada por Babadi y cols. (2022)).	121

Tabla 11. Métodos de producción de metanol y biometanol (Musa, 2016).	121
Tabla 12. Aplicaciones del glicerol crudo.	121
Tabla 13. Efectos negativos de las impurezas en biodiésel y motores (Atadashi, Aroua, Raman, y cols., 2011).	121
Tabla 14. Características de los distintos tipos de lavados húmedos y secos (Atadashi, Aroua, Raman y cols., 2011).	121
Tabla 15. Efectos de la cavitación en sistemas reactivos homogéneos y heterogéneos (Zore y cols., 2021).	121
Tabla 16. Recomendaciones para la determinación de parámetros operativos del sistema ultrasónico (Gole & Gogate, 2012b).	121
Tabla 17. Revisión de estudios de transesterificación asistida por ultrasonidos con diferentes materias primas (Elaboración propia).	121
Tabla 18. Resultados obtenidos de las distintas pruebas de calidad y cumplimiento respecto a valores definidos en normas internacionales.	121

1. Introducción

Los 4 experimentos presentados en este trabajo, relacionados a la producción de biodiésel a distintas escalas por medio de reacciones de transesterificación elaboradas tanto de manera convencional como con asistencia por ultrasonidos, se realizaron en la UAQ a partir de la recolección de aceite residual de cocina proveniente de distintas cafeterías y restaurantes que cuentan con un convenio con la universidad; más aún, en todos se utilizó CH_3OH y KOH como alcohol y catalizador, respectivamente. Para los 2 que involucran un procesamiento convencional se requirió de fuentes externas de calor y agitación; en cambio, las técnicas sonoquímicas permiten la remoción de estos elementos debido a que el fenómeno de cavitación, generado dentro de un reactor de este tipo, otorga las condiciones necesarias de temperatura e intensidad de mezcla de los reactivos. Estos se hicieron para evaluar la magnitud de intensificación del proceso de transesterificación convencional en términos de reducción de tiempo de reacción, aumento de la eficiencia de conversión y mayor calidad del producto final, a distintas escalas.

Cabe resaltar que los resultados correspondientes a ambos experimentos a escala laboratorio y del experimento convencional a escala planta piloto corresponden a valores reales, obtenidos a partir de actividades asociadas a la producción de biodiésel realizadas personalmente; por otra parte, los resultados del experimento sonoquímico a escala planta piloto son valores teóricos, obtenidos con base en resultados recuperados de distintas investigaciones donde se utilizaron materias primas y equipos de procesamiento similares a los que se propone implementar dentro de la planta piloto ubicada en la UAQ, que cuenta con una capacidad de producción de entre 170 - 200 litros (L) de biodiésel en aproximadamente 10 horas. El dispositivo que se propone añadir al reactor de transesterificación convencional es un homogeneizador ultrasónico de tipo sonda con reactor de celda de flujo, que permitiría una producción similar a la actual con una reducción en tiempo del 73.33%, una mayor eficiencia de conversión (pasando de 82.08% a 91.69%) y con índices de calidad del biocombustible obtenido que permiten el cumplimiento de estándares internacionales; ahora bien, a escala laboratorio resultó que el uso de un homogeneizador de tipo sonda implica una reducción en tiempo del 55.55%, una mayor eficiencia de conversión (pasando de 43.57% a 80.03%) y una mejora en distintos índices de calidad del producto final, en relación a un proceso con un reactor convencional para la etapa de transesterificación.

2. Antecedentes

El consumo mundial de combustibles aumenta exponencialmente y en la actualidad se satisfacen las necesidades energéticas, tanto industriales como residenciales, por medio de petroquímicos, gas natural y carbón (Hingu y cols., 2010); esto, ha ocasionado que la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) y el impacto ambiental no puedan dejarse de lado, al estar asociados a conceptos de contaminación, calentamiento global, cambios climáticos y hasta propiciar determinadas enfermedades en la población (García-Muentes y cols., 2018). Ordoñez (2009) indica que han surgido grupos científicos, a partir de predicciones basadas en la teoría de Hubbert, como la Asociación para el Estudio del Pico del Petróleo y el Gas (ASPO) y la Asociación de Investigación de Energía de Cambridge (CERA) que cuentan con distintas perspectivas en relación a las fechas en que se alcanzará el pico de producción de combustibles fósiles; en esa misma línea, la ASPO considera que el pico del petróleo a nivel global ocurrió en 2010, el pico del gas natural unos años más tarde y el pico del carbón será para entre 2030-2040. La CERA estima que las reservas mundiales de petróleo alcanzan los 3.74×10^{12} barriles de petróleo (billones de barriles de petróleo), valor que representa aproximadamente tres veces más que las estimaciones de ASPO, y plantean cambiar el concepto de “pico” por el de “meseta”; esto, asumiendo que el surgimiento de nuevas tecnologías puede promover la recuperación asistida de hidrocarburos (Ordoñez, 2009). Por lo anterior, ha crecido la preocupación por la racionalización de petróleo para utilizarlo en aplicaciones cada vez más específicas donde no cumpla la función de combustible; entonces, es necesario el desarrollo de alternativas que cuenten con un menor impacto ambiental en comparación a los productos convencionales y sean capaces de complementarlos (Torossi Baudino, 2006).

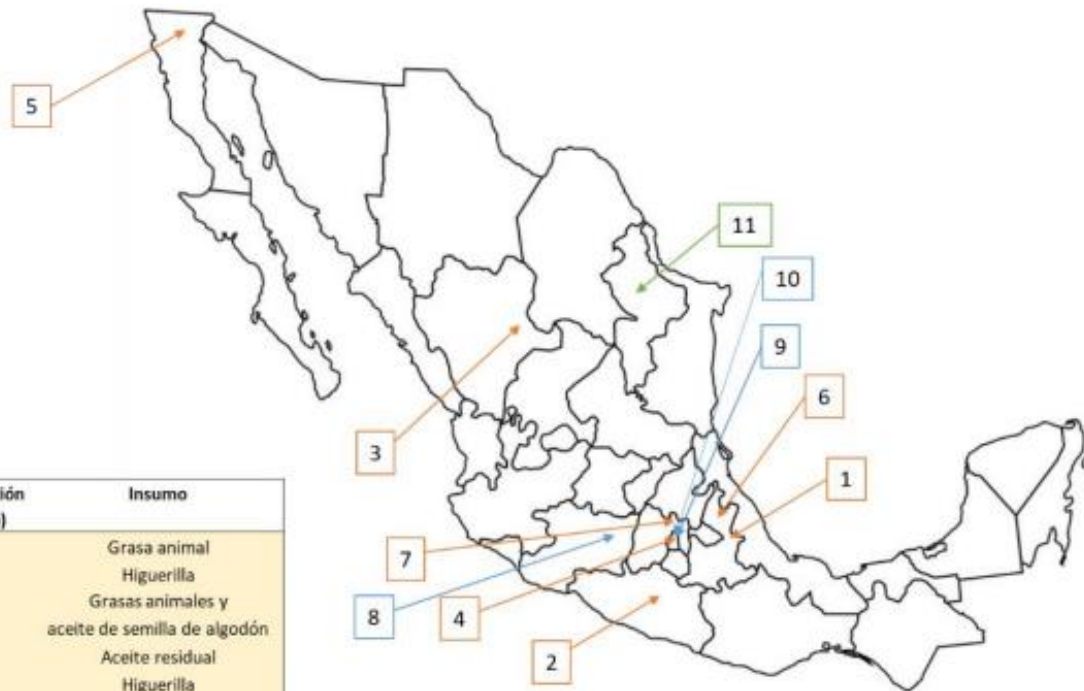
Estas alternativas deben ser técnicamente viables, económicamente competitivas, ambientalmente aceptables y fácilmente disponibles; ahora bien, recientemente se ha considerado al biodiésel como una opción prometedora frente al diésel convencional, ya que se produce mediante la transesterificación de aceites vegetales o grasas animales y cuenta con ventajas de producir una menor cantidad de humo, mayor seguridad, mejor lubricante, no contener sulfuros, menor emisión de partículas y monóxido de carbono (CO), tener un número mayor de cetanos, es biodegradable y no tóxico. Algunas desventajas de este biocombustible frente al diésel son su mayor viscosidad, menor contenido energético, mayor punto de enturbiamiento y punto de fluidez,

mayor emisión de óxidos de nitrógeno (NOx), menor velocidad y potencia del motor, coquización del inyector, difícil compatibilidad con motores, alto desgaste del motor y mayores costos de producción (Hingu y cols., 2010). El uso de biodiésel también genera beneficios sociales tales como revitalización rural, creación de nuevos empleos y una reducción en la emisión de GEI, que a su vez apoya a la reducción del calentamiento global. Se ha descubierto que una mezcla de 20% de biodiésel con 80% de diésel convencional (B20) alcanza reducciones de 10.1% de materia particulada (MP), 21.1% de hidrocarburos (HC) y 11% de CO; por otra parte, al utilizar el 100% de biodiesel se pueden llegar a reducciones de hasta 41% de MP, 31% de HC y 32.2% de CO (García-Muentes y cols., 2018).

La investigación sobre el uso de grasas animales y aceites vegetales como combustibles diésel comenzó desde antes de las crisis energéticas de 1970 y principios de 1980; no obstante, es apropiado comenzar la historia de estos con palabras del mismo Rudolf Diesel, inventor del motor que lleva su nombre, plasmadas en su libro “Die Entstehung des Dieselmotors” (“El desarrollo del motor diesel”) donde describe como objetivo desarrollar un motor eficiente y reporta que en la feria mundial de 1900, en París, utilizó con éxito aceite de cacahuete para alimentar un motor diésel, que operó exactamente como otros 4 motores alimentados por otros combustibles (Knothe y cols., 2005). Es importante resaltar que acorde a una biografía realizada por Nitske y Wilson (“Rudolf Diesel, Pioneer of the Age of Power”) y al mismo libro de Rudolf Diesel, la fuente de la idea de usar aceite de cacahuete como combustible parece haberse originado dentro del gobierno francés; por su parte, Diesel condujo experimentos relacionados en años posteriores (con aceite de ricino, aceite de tren, aceite de palma, entre otros.) al convertirse en un partidario del concepto. A partir de los antecedentes antes mencionados, surgió el interés de distintos países europeos (Bélgica, Italia, Alemania, Francia y Reino Unido) por usar aceites vegetales y grasas animales para contribuir a su autosuficiencia energética y es posible encontrar literatura relacionada a este concepto hasta la década de 1940; más aún, durante la Segunda Guerra Mundial estos fueron utilizados como combustibles de emergencia en distintos países (p.ej. Brasil y Argentina) para evitar la importación de diésel convencional. En China ya se producían tanto diésel como aceites lubricantes a partir del árbol de tung y de otros aceites vegetales (Knothe y cols., 2005).

Investigadores en la India impulsados por la posibilidad de escasez de combustibles derivados del petróleo, ocasionada por su uso creciente en la Segunda Guerra Mundial, ampliaron el desarrollo de combustibles domésticos elaborados en base a 10 aceites vegetales diferentes, pero

el trabajo concluyó cuando el diésel convencional volvió a estar fácilmente disponible a bajos costos; asimismo, el acorazado japonés “Yamato” reportó continuamente el uso de aceite de soja refinado como combustible búnker y en Estados Unidos (EEUU) surgió el proyecto de un combustible dual en la Universidad Estatal de Ohio, en el que se estudió el aceite de semilla de algodón, aceite de maíz y sus mezclas con combustible diésel convencional (Knothe y cols., 2005). Hasta este punto de la línea de tiempo parece que las perspectivas de seguridad energética son las principales impulsoras del uso de combustible diésel a base de aceite vegetal; sin embargo, los aspectos ambientales tienen un rol de igual importancia debido a que propician la creación de políticas energéticas y normativas encargadas de regular su implementación. Por ejemplo, en EEUU, las Enmiendas a la Ley de Aire Limpio de 1990 y la Ley de Política Energética de 1992 exigen el uso de combustibles alternativos en las flotas reguladas de camiones y autobuses; por otra parte, las Enmiendas a la Ley de Política Energética promulgadas en 1998 han propiciado un aumento significativo en el uso de biodiésel en dicho país (Knothe y cols., 2005). En la Unión Europea (UE), para el año 2002, hubo una producción de 1,133,800 toneladas de biodiésel en 9 países y Alemania destacó como el país líder en las estadísticas, seguido de Francia e Italia; además, todos estos países incrementaron la producción para 2003 (1,504,000 toneladas en total) y destacan Alemania e Italia como lugares de ejemplo donde la legislación favorable al biodiésel ha impactado directamente en su aceptación social (Bozbas, 2008). En relación a la situación en México, el 1 de febrero de 2008 fue publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el decreto de expedición de la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos, que plantea la elaboración de un programa de producción sustentable de insumos requeridos como materia prima, así como de desarrollo científico y tecnológico (Medina Ramírez y cols., 2012); por otro lado, actualmente se cuenta con siete empresas en operación que lideran la producción de biodiésel, con una capacidad de producción en conjunto de 5,277 m³ al año, y otras cuatro dedicadas a la recolección y reciclaje de materia prima o generación de tecnología (ver Figura 1) (Cabrera-Munguía y cols., 2022).



Numero	Empresa	Capacidad de Producción (miles de litros/año)	Insumo
1	Probioram S. de R.L. de M.I	950	Grasa animal
2	RicinoMex	1000	Higuerilla
3	Cooperativa Agrícola Luz Michell S.C. de R.L. de C.V.	1440.8	Grasas animales y aceite de semilla de algodón
4	CEDA	1095	Aceite residual
5	Enrimex	74	Higuerilla
6	Grina biodiesel	90	Aceite vegetal reciclado
7	Biorecen	628	Grasas animales
Total		5277.8	
Servicio			
8	Biodiesel Moreco	Reciclaje de aceites vegetales y grasas animales	
9	Biofuels México	Reciclaje de aceite vegetal	
10	Reoil México	Reciclaje de aceite usado de cocina	
11	Solben	Generación de tecnologías	

Figura 1. Empresas en México involucradas en la cadena de producción de biodiesel en México: productoras, recicladoras y generadoras de tecnología (Cabrera-Munguia y cols., 2022).

En la Tabla 1 se presentan aspectos generales de las empresas mencionadas anteriormente.

Tabla 1. Aspectos generales de empresas asociadas a biodiésel en México (Cabrera-Munguia y cols., 2022).

Empresa	Descripción
1. Probioram S. de R.L. de M.I	Se ubica en el estado de Puebla y comenzó a operar en 2013. Utiliza grasa animal como materia prima para producir biodiésel.
2. RicinoMex	Inaugurada en 2017 en el estado de Oaxaca. Comenzó con una iniciativa para la construcción de una bio-refinería de higuerilla y actualmente sigue impulsando la siembra de este cultivo en la región para la producción de biodiésel y aceite de ricino, con una capacidad de procesamiento de aproximadamente 60 toneladas al día.
3. Cooperativa Agrícola Luz Michell S.C. de R.L. de C.V.	Ubicada en el estado de Durango, comenzó sus operaciones en 2015. Es una de las grandes

	productoras de biodiésel en el país y utiliza grasas animales y aceite de semilla de algodón como materia prima.
4. CEDA	Se inauguró en el año 2020 dentro de la Central de Abastos (CEDA) en la alcaldía Iztapalapa, Ciudad de México (CDMX). Utiliza aceite comestible residual proveniente de hogares, restaurantes o industrias alimenticias para producir biodiésel.
5. Enrimex	Productora de biodiésel en el norte del estado de Baja California que comenzó a operar desde el año 2014. Emplea semilla de higuera como materia prima para la elaboración del bioenergético.
6. Grima biodiésel	Empresa dedicada a la producción de biodiésel que abrió sus puertas en 2010 y se localiza en el estado de Puebla; esta, ofrece consultorías de todo tipo y equipos certificados relacionados a proyectos de bioenergía enfocados al uso de biocombustibles.
7. Biorecen	Planta cuyas operaciones comenzaron en 2011 en el Estado de México, dedicada a la producción de biodiésel y a la recolección, manejo y disposición final de todo tipo de residuos.
8. Biodiésel Moreco	Formada en 2010, en Tarímbaro Michoacán, se trata de una empresa productora de biodiésel a partir de la recolección de aceites vegetales y grasas animales de desecho.
9. Biofuels México	Empresa inaugurada en 2005, localizada en la CDMX, que se dedica formalmente a recolectar aceite vegetal residual para producir biodiésel. Cuenta con el objetivo de integrar la mayor cantidad de restaurantes, a lo largo del país, en su red de recolección.

<p>10. Reoil México</p>	<p>Fundada en 2008, esta organización se encarga de recolectar aceite residual usado de cocina principalmente en CDMX y Toluca. Produce un pre aceite técnico de planta (“Pre TPO”) que a su vez exporta a la Unión Europea, donde es convertido a biodiésel.</p>
<p>11. Solben</p>	<p>Ubicada en el estado de Nuevo León, esta es una empresa que cuenta con tecnologías propias para una generación de energía basada en el aprovechamiento de biomasa (incluidas plantas de biodiésel). Además, ofrece:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Servicios para identificar la mejor opción de materia prima acorde a la función del biocombustible. • Programas de vinculación de empresas para iniciar un negocio rentable dentro de la cadena productiva de bioenergéticos. • Asesorías financieras a productores de materias primas o recolectores de aceites para encontrar oportunidades más rentables. • Alianzas con universidades, centros de investigación, clústeres de energía, etc.

La transesterificación sobresale como el método más común para la producción de biodiésel debido a su efectividad para reducir la alta viscosidad de los triglicéridos; a lo largo del proceso, el aceite vegetal o grasa animal reacciona con un alcohol en presencia de un catalizador para formar una mezcla de esteres alquílicos de ácidos grasos como producto final y glicerina como subproducto (Babadi y cols., 2022). A lo largo del tiempo se han utilizado una gran variedad de aceites comestibles como materia prima para la síntesis de biodiésel que incluyen al aceite de soja, girasol, palma, etc., pero estos cuentan con la limitante de interponerse con la seguridad alimentaria de la población y cada vez es más complicado dedicar dichos cultivos para fines energéticos; de ahí que, aceites no comestibles como de *Jatropha*, *Karanja*, *Nagchampa* y aceites de cocina usados se han considerado materiales con potencial para reemplazar a los aceites comestibles como una buena fuente de materia prima sostenible, cuya disponibilidad puede considerarse abundante (Gole

y Gogate, 2012). Los inconvenientes en la implementación de estos últimos en la reacción de transesterificación involucran la formación de jabón, limitaciones de transferencia de masa (menor rendimiento de conversión), necesidad de un enfoque de síntesis con catálisis ácida o enfoque de dos pasos (esterificación seguida de transesterificación) o síntesis bajo condiciones supercríticas de presión y temperatura, así como la etapa de purificación asociada que puede alterar el costo económico general del proceso; en consecuencia, ha surgido la necesidad de desarrollar tecnologías de intensificación para producir biodiésel en base a aceites no comestibles o de residuo.

La intensificación de procesos hace referencia a cualquier desarrollo de ingeniería química que conduce a una tecnología de menor tamaño, más limpia, segura y eficiente energéticamente; ahora bien, entre las nuevas técnicas disponibles para llevar a cabo la intensificación de la reacción de transesterificación para la síntesis de biodiesel sobresale el uso de energía de ultrasonidos, los cuales generan eventos de cavitación en el reactor (Gole y Gogate, 2012). El uso de reactores sonoquímicos puede favorecer a la reacción de manera que se tiene una mayor transferencia de masa y mezcla de interfases, aumentar la severidad de las condiciones de operación en términos de temperatura y presión, y disminuir significativamente el tiempo de reacción (Hingu y cols., 2010); sin embargo, es importante diseñar y operar estos reactores adecuadamente para asegurar una actividad cavitacional con distribución uniforme que permita maximizar los efectos de circulación de líquido con intensa turbulencia, puntos calientes locales y generación de radicales libres, para conseguir la intensificación esperada (Gole y Gogate., 2012).

2.1. ¿Qué es el biodiésel?

Los componentes principales de las grasas animales y aceites vegetales son los triacilgliceroles (TG), también conocidos como triglicéridos, que son un tipo de grasa (lípidos) en forma de ésteres derivados de ácidos grasos (FA) y glicerol (glicerina). Un TG contiene diversos tipos de FA que cuentan con distintas propiedades físicas y químicas, esto significa que distintos FA pueden unirse a una estructura de glicerol; ahora, los FA contenidos en el TG comprenden el perfil de FA o la composición de FA del aceite vegetal o grasa animal (Knothe y cols., 2005). Este último es un parámetro importante que permite determinar las propiedades físicas y químicas de los aceites y grasas que afectan el potencial de producción de biodiésel; por ejemplo, el contenido de ácidos grasos libres (FFA), contenido de humedad y otras impurezas, índice de acidez (título) y contenido calórico (Karmakar y cols., 2010).

El biodiésel se describe químicamente como un éster monoalquílico elaborado a partir de una mezcla de ésteres de alquilo (metilo y etilo principalmente) con cadenas largas de FA y se obtiene al someter la materia prima a una reacción química denominada transesterificación, en presencia de un catalizador y un alcohol, donde la mezcla del aceite o grasa con el alcohol proporcionará los ésteres de alquilo correspondientes (en caso de utilizar metanol como alcohol, los ésteres de metilo) de la mezcla de FA presente en la materia prima utilizada para llevar a cabo la reacción (Knothe y cols., 2005). Es posible producir biodiésel a partir de lípidos renovables (C12, C14, C16, C18 y C22) de una gran variedad de materias primas como aceites vegetales muy comunes (soja, semilla de algodón, palma, maní, colza/canola, girasol, cártamo, etc.), grasas animales (principalmente sebo), aceites de cocina usados (aceites de desperdicio) y microalgas (Babadi y cols., 2022). La elección de la materia prima depende en gran parte de la ubicación geográfica del lugar donde se vaya a implementar el proceso de producción del bioenergético; más aún, dependiendo del origen y calidad de la materia prima pueden ser necesarios ciertos cambios en el proceso de producción. Actualmente el metanol es el alcohol mayormente utilizado para la producción de este biocombustible por su bajo costo; sin embargo, otros alcoholes como el etanol o el isopropanol permiten obtener un biodiésel con mejores propiedades de calidad. El producto resultante de la transesterificación utilizando metanol a menudo se denomina como ésteres metílicos de ácidos grasos (FAME, por sus siglas en inglés) en vez de biodiésel y a pesar de que otros alcoholes permiten producirlo, por definición, muchos estándares están diseñados de manera que únicamente los ésteres metílicos pueden ser utilizados como biodiésel (Knothe y cols., 2005).

La Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM) considera como biodiésel a todo aquel combustible que se componga de ésteres monoalquílicos de FA de cadena larga, comúnmente producido por una reacción entre aceites vegetales o grasas animales con un alcohol y en presencia de un catalizador; por otra parte, la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos, en México, lo define como un combustible obtenido mediante la transesterificación de aceites vegetales o grasas animales. Considerando que el prefijo “bio” hace referencia a un origen biológico y la palabra “diésel” al combustible usado por este tipo de motores, en este trabajo también se considera como biodiésel a todos aquellos combustibles obtenidos a partir de procesos distintos a la transesterificación, en los que se utilice algún tipo de biomasa como materia prima, capaces de ser utilizados en vehículos de motores diésel no modificados, conocidos comúnmente como diésel verde o renovable, y de igual manera se analizarán determinados sistemas para su

producción (Instituto Mexicano del Petróleo [IMP], 2018). Es posible usar biodiésel puro (B100, conocido como ‘gasoil verde’) en cualquier motor diésel sin ningún tipo de modificación o en mezclas de diferentes concentraciones con diésel de petróleo, gracias a que es miscible con este último en todas las proporciones, representadas con la letra “B” seguida del porcentaje de biodiésel en la mezcla. De estas, la más utilizada actualmente se denomina B20, que cuenta con 20% de biodiésel y 80% de diésel convencional; por otra parte, cuando se utiliza como aditivo las proporciones no superan el 5% (B5) (Medina Ramírez y cols., 2012). El uso de este biocombustible cuenta con ventajas ambientales y sociales, en relación al uso de diésel de petróleo, siendo competitivo en la mayoría de los aspectos técnicos; tal que (Knothe y cols., 2005):

- Es una derivación de un recurso doméstico renovable, promoviendo la preservación y una reducción en la dependencia del petróleo.
- Es biodegradable.
- Reduce la mayoría de las emisiones de escape (CO₂, SO₂ e hidrocarburos), con la excepción de NO_x.
- Punto de inflamabilidad más alto, lo que conduce a una portabilidad, manipulación y almacenamiento más seguros.
- Excelentes propiedades como lubricante. Añadir biodiésel en bajas proporciones (1 – 2%) restaura la lubricidad.
- Producir una menor cantidad de humo.
- Menor emisión de partículas y CO.
- Número mayor de cetanos.
- No tóxico.
- Combustión más limpia en el motor por las cadenas largas de FA oxigenadas.
- Mayor eficiencia de combustión, disponibilidad y capacidad de renovación (Ramos y cols., 2019).
- Miscible con diésel convencional en cualquier proporción.
- No requiere modificación del motor hasta B20 (Ramos y cols., 2019).

Algunas desventajas asociadas a su uso incluyen:

- Mayores costos de producción, el precio de las materias primas representa del 70 al 95% del costo total de producción (Ramos y cols., 2019).

- Mayor viscosidad y menor estabilidad oxidativa (cuando se expone al aire).
- Menor contenido energético (valor calorífico inferior).
- Mayor punto de enturbiamiento y punto de fluidez.
- Ligero incremento en la emisión de NOx (en determinados casos).
- Menor velocidad y potencia del motor.
- Corrosivo para cobre y latón (Ramos y cols., 2019).
- Coquización del inyector.
- Difícil compatibilidad con motores en proporciones mayores a B20.
- Alto desgaste del motor
- Puede degradar juntas y mangueras de plástico y caucho natural en caso de usarse en forma pura (Ramos y cols., 2019).
- La materia prima no debe interponerse con la prioridad de consumo de alimentos.

El problema de costos de producción se combate en muchos países por medio de legislación e incentivos regulatorios o subsidios en forma de impuestos especiales reducidos; también, se puede compensar con el uso de materia prima menos costosa, lo que ha incrementado el interés en materiales como aceites para freír usados (Knothe y cols., 2005). La desventaja de interponerse con la prioridad de consumo de alimentos ha dado lugar a la clasificación del biodiésel como avanzado o convencional, donde el término convencional hace referencia a que la biomasa utilizada (aceites y grasas) proviene de fuentes comestibles y se denomina de primera generación; por otro lado, el término avanzado alude a una tecnología empleada para la producción y/o a que la materia prima consiste de biomasa no comestible desarrollada de manera sustentable, residuos agrícolas y municipales e incluso aceites obtenidos a partir de microorganismos (Instituto Mexicano del Petróleo [IMP], 2018). La selección de la materia prima es un factor importante que determinará las propiedades del biocombustible y a su vez la viabilidad de uso; esto, debido a que existen estándares de calidad que establecen rangos de valores aceptables asociados a distintas propiedades, los cuales deben cumplirse para poder utilizar biodiésel como combustible en motores de este tipo y son necesarios para confirmar un funcionamiento adecuado. Los estándares existentes más importantes son los de la ASTM y del Comité Europeo de Normalización (CEN); específicamente, la ASTM D6751 y la UNE EN14214 (ver Tabla 2) engloban parámetros para

biodiésel puro y la ASTM D7467 y EN 590 incluyen estándares para mezclas (Atadashi, Aroua, Raman y cols., 2011).

Tabla 2. Especificaciones de estándares internacionales de biodiesel (Atadashi, Aroua, Raman y cols., 2011).

Propiedades	Unidades	ASTM D6751	UNE EN14214
Contenido de éster	% (m/m)	–	96.5
Punto de inflamabilidad	°C	130	>101
Agua y sedimento	vol.%	0.050 max.	0.05
Viscosidad cinemática, 40 °C	mm ² /s	1.9–6.0	3.5–5
Ceniza sulfatada	% (m/m)	0.020 max.	0.02
Azufre	mg/kg	–	≤10
Grado S 15	ppm	15 max.	–
Grado S 500	–	500 max.	–
Corrosión de tiras de cobre	clasificación	No.3 max.	clase1
Número de cetano	–	47 min.	≥51
Punto de nube	°C	Informe	–
Residuo de carbón 100% muestra	% (m/m)	0.050 max,	–
Número de ácido	mg KOH/gm	0.50 max.	0.50 max.
Triglicéridos	% (m/m)	0.20 max.	0.20 max.
Glicerina libre	% (m/m)	0.020 max.	0.02 max.
Glicerina total	% (m/m)	0.240 max.	0.25 max.

Contenido de fósforo	masa%	0.001 max.	0.001 max.
Contenido de metanol	% (m/m)		0.20 max.
Temperatura de destilación, temperatura atmosférica equivalente, 90% recuperado	°C	360 max.	–
Sodio/potasio	ppm	5 max. combinados	5 max.
Max: máximo			
Min: mínimo			

Asegurar que el biodiésel cumpla con a distintas normativas de calidad influye directamente en dos aspectos muy importantes, tanto en el nivel de confianza del consumidor para su uso cotidiano como en el impacto del producto dentro del mercado, por lo que son fundamentales para la elaboración de un marco legal adecuado que fomente la implementación del biocombustible en distintos sectores económicos. Actualmente se utiliza biodiésel principalmente en el sector de transporte, aunque también puede emplearse en generadores para producir electricidad, como combustible de calefacción y como aditivo lubricante para combustibles diésel altamente desulfurados. Las siguientes tres etapas conforman la cadena de valor de los biocombustibles (ver Figura 2) (Instituto Mexicano del Petróleo [IMP], 2018):

- Materia prima (biomasa): sistema de producción/transformación y sistema logístico.
- Transformación: sistema de producción.
- Mercado: sistema logístico y uso final.

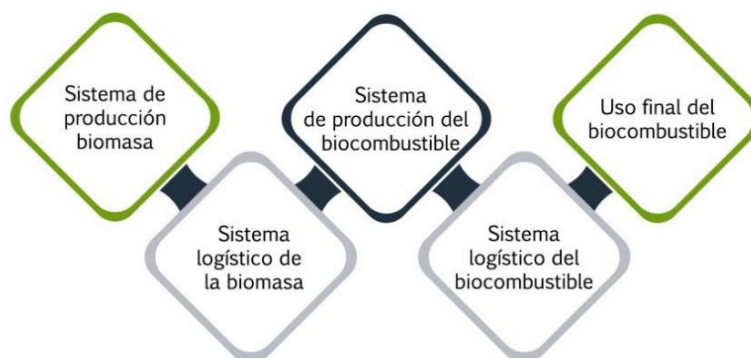


Figura 2. Cadena de valor de los biocombustibles (Instituto Mexicano del Petróleo [IMP], 2018).

En secciones posteriores de este trabajo se profundizará detalladamente en los componentes asociados a la elaboración de biodiésel comenzando con la materia prima, seguido de los sistemas de transformación, alcoholes utilizados, glicerol, métodos de separación y purificación del biodiésel y el estado del arte actual de la técnica de intensificación mediante la asistencia por ultrasonidos. Es importante resaltar que los sistemas logísticos mencionados anteriormente se refieren al transporte/distribución de los respectivos productos entre cada eslabón de la cadena de valor.

2.2. Materia prima

La producción de biodiésel comienza con la elección de una materia prima que provenga de fuentes biológicas y es posible escoger entre aceites vegetales comestibles, grasas animales, aceites de cultivos no comestibles, aceites y grasas residuales (procesamiento doméstico, comercial e industrial), así como aceites provenientes de microorganismos (Karmakar y cols., 2010); en esa misma línea, cabe mencionar que también se debe tomar en cuenta tanto la química del proceso como las condiciones geográficas del lugar de implementación del sistema, ya que se ha determinado que la materia prima representa entre el 75% - 88% del costo total de producción (Medina Ramírez y cols., 2012) y elegir la más adecuada permitirá reducirlo (Babadi y cols., 2022). La estructura química de los aceites vegetales y grasas animales es similar al estar compuestos principalmente de TG, formados por una molécula de glicerol combinada con tres moléculas de FA saturados o insaturados, con una fracción más pequeña de diglicéridos y monoglicéridos; más aún, ambas materias primas son insolubles en agua, hidrofóbicas (TG) y solubles en solventes orgánicos no polares. Las principales diferencias entre ellas son las variedades de distribución y contenidos de FA, que comprenden los distintos perfiles de FA, y los altos contenidos de FFA en las grasas y grasas animales (mayor índice de acidez) (Ramos y cols., 2019); en esa misma línea, el contenido de FFA hace referencia a la cantidad de FA (porcentaje en peso, wt.%) en la materia prima que no está conectado a la molécula de TG y se pueden formar FFA a partir del calentamiento de los aceites o grasas, rompiendo las cadenas largas de carbono. Derivado de lo anterior, en la Tabla 3 se presentan los perfiles de FA de distintos aceites vegetales y grasas animales cuya importancia radica en que las propiedades físicas y químicas del biodiésel son dependientes al contenido de FA presente en la materia prima (Karmakar y cols., 2010).

Tabla 3. Perfiles de FA de diferentes materias primas en porcentajes en peso (wt.%) mínimos y máximos (Ramos y cols., 2019).

Ácidos grasos	Aceite de colza	Aceite de soja	Aceite residual de freído (WFO)	Sebo de vaca	Manteca de cerdo	Grasas de ave		Aceites de pescado		
						Grasa de pollo	Sebo de pato	Grasa de bagre	Aceite de salmón	Aceite de anchoa
Láurico (C12:0)	-	-	nm- 0.4	-	-	nm- 1.0	-	11.5	0.1	-
Mirístico (C14:0)	-	nm- 1.0	nm- 1.1	2.6- 3.5	1.3- 1.7	0.5- 1.0	-	11.7	5.8	6.7
Miristoleico (C14:1)	-	-	-	0.5- 1.3	-	0.1- 0.2	-	2.0	-	-
Pentadecanoico (C15:0)	-	-	-	0.5- 1.0	-	-	-	1.9	-	-
Palmítico (C16:0)	3.5- 4.5	10.5- 11.0	8.4- 25.8	23.8- 27.0	23.2- 25.5	20.9- 24.7	17.0	28.1	16.9	20.2
Palmitoleico (C16:1)	nm- 0.5	-	0.2- 4.6	0.5- 4.7	2.2- 2.7	5.0- 7.7	-	-	5.4	6.6
Margárico (C17:0)	-	-	-	1.1- 2.5	nm- 0.4	-	-	-	-	0.2
Heptadecenoico (C17:1)	-	-	-	0.5- 1.7	nm- 0.4	-	-	-	-	-
Esteárico (C18:0)	0.9- 1.5	3.3- 4.8	3.7- 4.8	12.7- 34.7	10.4- 17.0	4.5- 5.8	4.0	-	4.3	4.2
Oleico (C18:1 cis)	-	22.0- 25.4	28.5- 52.9	29.9- 47.2	40.0- 42.8	38.2- 48.5	59.4	26.8	19.2	19.7
Linoleico (C18:2)	18.7- 22.3	52.3- 54.5	13.5- 50.5	0.8- 2.7	10.7- 21.0	17.3- 23.8	19.6	6.7	16.1	2.6
Linolénico (C18:3)	7.7- 9.0	5.3- 7.5	0.6- 3.5	nm- 0.8	nm- 64.7	nm- 2.5	-	-	2.8	1.6

Araquídico (C20:0)	0.4– 0.5	0.4– 0.5	0.1– 0.4	nm– 0.3	nm– 0.2	-	-	-	-	-
Ácido gadoleico (C20:1)	1.0– 2.0	nm– 0.3	0.1– 0.8	nm– 0.5	0.9– 1.0	0.5– 1.0	-	2.7	-	-
Eicosadienoico (C20:2)	-	-	-	-	0.5– 0.7	-	-	0.8	-	0.2
Eicosatrienoico (C20:3)	-	-	-	-	nm– 0.2	-	-	0.5	-	-
Eicosapentaenoico (C20:5)	nm– 0.1	-	0.2	-	-	-	-	-	15.6	10.4
Behénico (C22:0)	nm– 0.5	0.4– 0.5	nm– 0.8	-	-	-	-	-	-	-
Erúxico (C22:1)	nm– 0.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Docosapentaenoico (C22:5)	-	-	-	-	-	-	-	-	2.5	0.8
Docosahexanoico (C22:6)	-	-	-	-	-	-	-	-	11.4	21.6
Lignocérico (C24:0)	-	nm– 0.1	0.04– 0.3	-	-	-	-	-	-	-
nm – no medido										

Las grasas animales a temperatura ambiente tienden a ser sólidas debido a su alto contenido de FA saturados (enlace simple carbono-carbono); en cambio, los aceites son generalmente líquidos y al refinarse tienen un menor contenido de FFA e índice de acidez que las grasas animales, grasas residuales y aceites de desecho (Ramos y cols., 2019). Una cantidad excesiva de FFA no es favorable para la producción de biodiésel debido a que propicia la formación de jabón y agua en la reacción de transesterificación, que deben ser removidos en procesos de purificación posteriores;

por esto, existe una clasificación de la materia prima acorde al contenido de FFA en la que existen 3 grupos (Babadi y cols., 2022):

- Grupo 1: Contiene alrededor de 1.5% en peso de FFA, en este grupo se encuentra el aceite de soja, canola y de palma.
- Grupo 2: Contiene aproximadamente 4% en peso de FFA, en este grupo se encuentran los aceites de cocina, sebo y grasas de ave.
- Grupo 3: Contiene más del 20% en peso de FFA, en este grupo se encuentran las grasas y grasas animales.

Los insumos con un contenido de FFA menor al 2.5 wt.% es la más óptima para la síntesis de biodiésel; esto, porque para porcentajes en peso de FFA por encima de dicho valor normalmente es necesario implementar un proceso de pretratamiento que aumenta los costos (Babadi y cols., 2022). Como se mencionó en la sección anterior, se han definido tres categorías de materia prima que se diferencian entre sí de acuerdo a su origen y permiten clasificar el biodiesel producido en base a las mismas; en resumen, la categoría de primera generación incluye a los aceites comestibles, en los productos de segunda generación se encuentran las grasas animales y los aceites no comestibles, y finalmente la tercera generación hace referencia a los aceites obtenidos de microorganismos (Ramos y cols., 2019). En la Tabla 4 se muestran ejemplos de cada categoría y una descripción de las ventajas y desventajas principales de cada una.

Tabla 4. Diferentes generaciones de biodiesel y sus materias primas.

Categoría	Productos	Ventajas / Desventajas
Primera generación (1°) - Aceites comestibles	Soja, colza, cártamo, salvado de arroz, cebada, sorgo, trigo, maíz, coco, canola, maní, linaza, sésamo, palma, aceituna, calabaza, girasol y almendra de palma.	<p>Ventajas: el biodiesel producido a partir de estos se puede usar como una mezcla con combustibles de gasolina o puros en el motor (Babadi y cols., 2022).</p> <p>Desventajas: Su uso genera conflictos éticos al demandar recursos de tierra (degradación del suelo), agua y fertilizantes que pueden ser destinados para la</p>

		producción de alimentos (Medina Ramírez y cols., 2012).
Segunda generación (2°) – Aceites no comestibles, aceites residuales, grasas animales y materiales lignocelulósicos.	<p>Jatrofa, mahua, granos de café, camelina, semilla de algodón, festuca alta, neem, jojoba, semilla de pasión, castor (ricino), moringa, semilla de tabaco, pongamia pinnata, semilla de árbol de hule y nag champa.</p> <p>Manteca de cerdo, sebo de vaca, grasas de ave (pollo, pato, etc.) y aceites de pescado (bagre, salmón, anchoa, etc.).</p> <p>Aceites residuales de cocina.</p> <p>Materiales lignocelulósicos.</p>	<p>Ventajas: Estos son más eficientes, limpios, sin problemas de inseguridad alimentaria y requieren de una menor área de tierra, agua y fertilizantes para el cultivo (plantación más económica), en relación a los insumos de 1° generación. Cultivo de cultivos mixtos que cuentan con propiedades renovables y producen un biocombustible no corrosivo. Las grasas animales permiten obtener un biodiésel con alto índice de cetano y más estable debido a la alta concentración de FA (Babadi y cols., 2022). El uso de estas materias primas más baratas reduce los costos de producción (Ramos y cols., 2019).</p> <p>Desventajas: El alto contenido de FA en las grasas animales dificulta la transesterificación y requieren de un proceso de precalentamiento (~45°C) (Babadi y cols., 2022).</p>
Tercera generación (3°) – Aceites de microorganismos	<p>Bacterias, levaduras y hongos.</p> <p>Microalgas: chlorella prothecoides, chlorella vulgaris, botryococcus braunii y chlorella sorokiana (microalgas autótrofas y heterótrofas).</p>	<p>Ventajas: Las microalgas son capaces de producir 4 tipos de biocombustibles como biohidrógeno (fotoproducción directa), metano (digestión anaerobia), biopetróleo crudo (conversión termoquímica) y biodiesel (aceite de microalgas).</p>

	Lodos de depuradora municipal.	<p>Estas pueden sintetizar y acumular lípidos en niveles de entre 30% - 70% de su peso seco (Babadi y cols., 2022).</p> <p>Desventajas: Se requiere de grandes cultivos de microalgas para obtener cantidades sustanciales de aceite a tratar. Poca información asociada a su uso para la producción de biodiésel.</p>
--	--------------------------------	---

Una nueva aproximación en el campo de materias primas es el desarrollo de plantas modificadas genéticamente y la creación de nuevos cultivos bioenergéticos, capaces de aumentar el rendimiento de aceite de la planta (contenido de proteína y aceite) y mejorar la caracterización de la biomasa; por ejemplo, se han reportado modificaciones genéticas en plantas de maíz y canola que por esta característica ya no están asociadas a cultivos alimenticios (Babadi y cols., 2022). A continuación, se describirán más a detalle los insumos presentados en la tabla anterior.

2.2.1. Aceites de cultivos alimenticios

Estos productos de primera generación actualmente son los más estudiados y utilizados para la producción de biodiesel (Ramos y cols., 2019), de lo que destacan el aceite de soya, canola y palma. Cuentan con las ventajas de no requerir pretratamientos exhaustivos, disponibilidad a gran escala, y las posibilidades de comercialización nacional e internacional; al contrario, sus desventajas principales son la característica de ser productos alimenticios y la incertidumbre que generan en relación a una posible deforestación y/o cambios de uso de suelo asociados al incremento en su uso. Los parámetros fundamentales a considerar para la elección de un aceite comestible o no comestible como fuente de biodiésel incluyen el porcentaje de aceite y rendimiento por hectárea del cultivo (Tabla 5), así como el método requerido para extraer dicho aceite contenido en las semillas (mecánico, con solvente o enzimático) (Instituto Mexicano del Petróleo [IMP], 2018).

Tabla 5. Porcentaje de aceite y rendimiento por hectárea de distintos insumos de primera y segunda generación (Karmakar y cols., 2010).

Aceite comestible o no comestible.	Rendimiento por hectárea (L/ha)	Porcentaje de contenido de aceite (%)
Haba de soja	446	15–20
Girasol	952	25–35
Colza	1190	38–46
Aceite de semilla de palma	nm	44–65
Aceite de palma	5950	30–60
Aceite de cacahuete	1059	45–55
Aceite de oliva	1212	45–70
Maíz (Germen)	172	48
Coco	2689	63–65
Semilla de algodón	325	18–25
Linaza	nm	40–44
Karanjá	nm	27–39
Mahua	nm	35–42
Jatrofa	1892	30–40
Neem (núcleo)	nm	40–50
Salvado de arroz	828	15–23
Sésamo	696	nm
Tabaco	nm	30–43

Tung	940	16–18
Moringa oleifera	nm	35–40
Pasiflora	nm	18.5–28.3
Café	459	nm
Jojoba	1818	45–50
Aceite de castor (ricino)	1413	45–50
nm – no medido		

2.2.2. Aceites de cultivos no alimenticios

Este tipo de insumos son considerados sostenibles mientras cumplan con las condiciones de ser cultivados en tierras no destinadas a cultivos alimenticios, reducir la deforestación, ser más amigables con el ambiente y más económicamente viables que los aceites de primera generación. Existe una amplia gama de cultivos de aceites no comestibles, pero algunos más destacados son la jatrofa (*Jatropha curcas*), la higuera (*Ricinus communis*) y la camelina (*Camelina sativa*); agregando a lo anterior, estos crecen en cualquier tipo de suelo y se ha reportado que para producir altos rendimientos de biodiésel requieren de un abastecimiento adecuado de agua y de nutrientes. La jatrofa es un cultivo perenne que puede cosecharse continuamente, resistente a sequías y adaptable a distintos climas; por otro lado, la higuera cuenta con las características de ser tropical tolerar tipos de suelo variables y reducir la erosión del mismo (Instituto Mexicano del Petróleo [IMP], 2018).

2.2.3. Grasas animales y aceites residuales

Las grasas animales son desechos o subproductos de la industria procesadora de carne animal y canales de ganado como el sebo, manteca de cerdo, grasa de aves y aceites de pescado; estas, son materias primas de segunda generación y cuentan con precios relativamente bajos. En la Unión Europea, de acuerdo al CEN, los reglamentos n° 1069/2009 y n° 142/2011 establecen las normas sanitarias en materia de subproductos animales y productos derivados no destinados al consumo humano y clasifican estos materiales en tres categorías específicas de acuerdo al nivel de riesgo para la salud pública y animal (Ramos y cols., 2019):

- Categoría 1 (Mayor riesgo): Material de Riesgo Especificado (MRE) relacionado con la transmisión de encefalopatías espongiformes transmisibles (EET), esto incluye la médula espinal y el cerebro. Stock caído con MRE. Residuos de restauración y cualquier cosa manejada con categoría 1.
- Categoría 2: Material no apto para el consumo humano y riesgoso tanto para animales como para seres humanos. Stock caído sin MRE.
- Categoría 3 (Menor riesgo): Apto para el consumo humano en el punto de sacrificio.

Para recuperar las grasas de los tejidos grasos de desecho se utiliza un proceso de extracción o renderizado que depende de la categoría de riesgo, en el que todo el procesamiento de diferentes categorías de desechos y diferentes especies se realiza en líneas separadas para evitar que se contaminen entre sí. En la industria se utilizan principalmente los renderizados húmedo y seco, que involucran la aplicación de calor (en presencia o ausencia de agua), extracción de humedad y separación de la grasa; asimismo, no existe una regla sobre cuando es ideal aplicar uno u otro, pero se ha reportado que la manteca y el sebo del renderizado húmedo son mejores que los del reciclaje seco. Estos procesos también pueden realizarse utilizando un disolvente orgánico y todas las grasas, independientemente de su nivel de riesgo, pueden emplearse como materia prima para la producción de biodiésel. Las grasas recuperadas se pueden clasificar en grasa amarilla o marrón; de manera que, las amarillas tienen un nivel de FFA < 15 wt.% y las marrones > 15 wt.% (Ramos y cols., 2019).

En relación a los aceites residuales, particularmente aceites de cocina usados (WCO), cuentan con las ventajas de ser más económicos que los aceites puros, su uso no se ve afectado por políticas de uso de suelo, alta disponibilidad alrededor del mundo y pretratamientos sencillos que consisten en deshidratación y filtrado; por otro lado, presentan algunos problemas técnicos y de logística que incluyen la recolección, control, trazabilidad y procesos de acondicionamiento al tener altos contenidos de material insaponificable, agua y FFA, que pueden resultar en costos finales de producción elevados (Instituto Mexicano del Petróleo [IMP], 2018). El freído es un método popular para preparar alimentos debido a que proporciona sabor y es el medio de transferencia de calor por el cual se obtiene la cocción, cuyo elemento fundamental es el aceite; este, se calienta en presencia de aire a temperaturas en el rango de los 160 – 200 °C, por periodos relativamente prolongados. Durante el proceso del freído ocurren distintas reacciones químicas como hidrólisis, polimerización y oxidación, que modifican las propiedades físico-químicas y nutricionales de los aceites (Ramos

y cols., 2019); por lo que, en la industria alimentaria se consideran desecho una vez que fueron utilizados y en caso de no disponerse correctamente pueden representar un fuerte potencial de contaminación para el medio ambiente. Los cambios físicos y químicos que experimentan los aceites se presentan a continuación, en la Tabla 6 (Meráz, 2016).

Tabla 6. Cambios físico-químicos del aceite durante el proceso de freído (Meráz, 2016).

Físicos	Químicos
1. Incremento de la viscosidad	1. Incremento de número de acidez
2. Coloración oscura	2. Disminución del índice de yodo
3. Tendencia a la formación de espuma	3. Incremento en el contenido de agua
4. Cambios en la tensión superficial	
5. Índice de refracción	

Recientemente ha incrementado el interés por utilizar grasas animales y aceites residuales para la producción de biodiésel por su menor costo en relación a los aceites vegetales comestibles y no comestibles; ahora bien, cabe resaltar que estos cuentan con grandes contenidos de FFA (mayor índice de acidez) en porcentaje en peso (wt.%) con rangos de 2 % – 7 % para WCO, 5% - 30% para grasas animales y 40% - 100% para grasas provenientes de aguas residuales, lo que representa inconvenientes en la reacción de transesterificación. El contenido de FFA de los aceites vegetales comestibles y no comestibles es considerablemente menor, con un rango aproximado de 0.3 wt.% - 0.7 wt.%; por otro lado, los aceites refinados cuentan con porcentajes menores a 0.05 wt% (Karmakar y cols., 2010).

2.2.4. Materiales lignocelulósicos

La biomasa residual que comprende este tipo de materia prima de segunda generación incluye pastos, residuos agrícolas e industriales, residuos forestales, madera, entre otros. En general, estos insumos están comúnmente más dirigidos a la elaboración de biocombustibles sólidos o bioetanol; no obstante, también permiten obtener lípidos microbianos. Las tecnologías mediante las que se procesan estos últimos son distintas a la transesterificación, principalmente se utilizan métodos enzimáticos, y el producto final no es exactamente una mezcla de ésteres monoalquílicos de FA; sin embargo, el diésel renovable producido es químicamente equivalente al

diésel de petróleo. La principal ventaja de estos insumos es que cuentan con la característica de ser recursos renovables y relativamente abundantes, cuyo abastecimiento puede ser suplementado con pastos y cultivos forestales de rotación corta; en cambio, sus desventajas están asociadas a altos costos de producción y al estado de desarrollo actual en el que se encuentran las tecnologías de procesamiento disponibles (Instituto Mexicano del Petróleo [IMP], 2018).

2.2.5. Aceites de microorganismos

Numerosas investigaciones han reportado que los aceites de algas (micro y macro) son una excelente fuente de biodiésel, pero las microalgas sobresalen debido a su mayor contenido de aceite (puede superar el 80% en peso de biomasa seca), así como su facilidad y rapidez de crecimiento, en relación a las macroalgas; además, se ha reportado que estas pueden producir hasta 250 veces la cantidad de aceite por hectárea que la soja y los aceites provenientes de las mismas difieren de la mayoría de aceites vegetales en que son ricos en FA poliinsaturados con cuatro o más dobles enlaces (Karmakar y cols., 2010). Las microalgas se han considerado como el único insumo capaz de satisfacer la demanda mundial de combustibles para el transporte y desarrollarse sustentablemente en el futuro (Instituto Mexicano del Petróleo [IMP], 2018); asimismo, la productividad de aceite de distintos tipos de microalgas supera sustancialmente aquella de aceite proveniente de cultivos vegetales comestibles y no comestibles de mejor producción (Karmakar y cols., 2010). La principal desventaja asociada a este tipo de aceite es que posee altos costos de producción; no obstante, la investigación está orientada a la selección de cepas óptimas y el establecimiento de estrategias de cultivo robustas y estables comercialmente, en las que se administren sustentablemente los recursos de tierra, agua y nutrientes, para obtener la máxima productividad de biomasa y lípidos con microalgas (Instituto Mexicano del Petróleo [IMP], 2018).

2.2.6. Propiedades de las materias primas de biodiésel

A lo largo de esta sección se ha mencionado que los *perfiles de FA* y el *contenido de FFA de la materia prima* son propiedades importantes que permiten caracterizar la materia prima e influyen en las características del biodiésel producido; del mismo modo, otras características físicas y químicas que afectan a la calidad del biocombustible son (Karmakar y cols., 2010):

- Contenido calorífico: hace referencia al contenido energético de la materia prima, que a su vez determinará el contenido energético del biodiésel obtenido a partir de la misma. Los combustibles e insumos con mayor insaturación generalmente tienen menor energía y

aquellos con mayor saturación tienen mayor contenido energético; por otro lado, los combustibles más densos proporcionan más energía por galón (a mayor densidad, mayor energía potencial).

- Humedad, impurezas e insaponificables (MIU): este parámetro se refiere al contenido de agua, sólidos filtrables (fragmentos de huesos, partículas de comida, etc.) y otros no triglicéridos en un aceite, que no se pueden convertir en ésteres grasos monoalquílicos por esterificación o transesterificación. Es por lo anterior que las MIU deben eliminarse antes de la producción de biodiésel o durante la purificación del éster.
- Título: se le llama título a la temperatura a la que el insumo cambia de sólido a líquido. Esta característica es importante ya que el proceso de transesterificación es un proceso líquido y las materias primas con títulos altos requieren de un calentamiento previo, aumentando las necesidades energéticas y costos de producción de una planta de producción de biodiésel. Insumos con títulos altos como el aceite de palma, neem, karanja, semilla de algodón y grasa amarilla se han empleado para la síntesis de biodiésel a temperatura de 30 - 45 °C.

En la Tabla 7 se aprecian los valores de las propiedades físico-químicas de interés en distintos tipos de aceites o grasas.

Tabla 7. Propiedades físico-químicas de materia prima comúnmente utilizada para producir biodiésel (Karmakar y cols., 2010).

Aceites o grasas	Título (°C)	MIU (wt.%)	Densidad (kg/m ³)	Viscosidad cinemática a 40 °C (mm ² /s)	No. de cetano (°C)	Alto poder calorífico (MJ/kg)	Punto de inflamabilidad (°C)	Valor de saponificación	Índice de yodo
Canola	nm	0.85	911.5	34.72	37.6	39.7	246	189.80	nm
Haba de soja	22–27	0.77	913.8	28.87	37.9	39.6	254	195.30	128–143
Girasol	16–20	0.65	916.1	35.84	37.1	39.6	274	193.14	125–140
Palma	42–45	0.03	918.0	44.79	42.0	nm	267	208.63	48–58
Maní	26–32	nm	902.6	39.60	41.8	39.8	271	191.50	84–100

Maíz	14–21	1.67	909.5	30.75	37.6	39.5	277	183.06	103–128
Salvado de arroz	24–28	2.73	918.5	36.68	nm	nm	nm	201.27	90–108
Sésamo	21–24	nm	913.3	36.00	41.8	39.4	260	196.50	103–116
Semilla de algodón	32–38	nm	914.8	33.50	nm	39.4	234	198.50	103–115
Jatrofa	31	0.16	940	33.90	nm	38.65	225	200.80	82–98
Neem	35–36	2.16	918.5	50.30	nm	nm	nm	209.66	65–80
Karanjá	30–31	0.72	936.5	43.61	nm	nm	nm	188.50	81–90
Mahua	23–31	nm	960	24.50	nm	36.0	232	190.5	58–70
Linaza	19–21	0.64	923.6	25.75	34.6	39.3	241	187.63	nm
Coco	20–24	2.74	918	27.26	nm	nm	nm	267.56	7.5–10.5
Castor (ricino)	3	0.41	955	251.20	42.3	37.4	nm	191.08	83–86
Tabaco	16–18	nm	917.5	27.70	nm	nm	nm	191.50	125–154
Sebo de vaca	nm	0.84	nm	45.34	nm	nm	nm	198	nm
Grasa amarilla	41	0.68	nm	132.10	nm	nm	nm	198.36	nm
nm – no medido									

2.2.6.1. Métodos de remoción de agua (humedad)

Es necesario eliminar el contenido de agua de la reacción de transesterificación, debido a que a altas temperaturas esta puede hidrolizar los triglicéridos a diglicéridos y formar FFA; los cuales, reaccionan con el catalizador alcalino y se forman jabones. Cantidades mínimas de agua

(1%) aumentarán la producción de jabón, interponiéndose con la reacción de transesterificación; ahora, el calentamiento de la materia prima rompe cualquier emulsión entre agua y la misma, permitiendo la eliminación de agua sedimentada en el fondo del reactor donde se lleva a cabo la reacción; también, se pueden emplear centrífugas para separar el agua de los insumos. Otro método es el calentamiento de la materia prima a presión, que posteriormente se rocía en una cámara de vacío para llevar el contenido de agua a niveles muy bajos (Karmakar y cols., 2010).

2.2.6.2. Métodos de remoción de impurezas insolubles

Las impurezas insolubles o sólidos filtrables consisten de arena, suciedad, fragmentos de huesos y gomas, partículas de comida y fragmentos de semillas. La materia prima siempre debe ser filtrada antes de ingresarse al sistema de procesamiento y se recomienda el uso de filtros de al menos 100 μm , que serán suficientes para eliminar impurezas de una gran variedad de insumos; por otra parte, todo el combustible que sale de una planta de producción de biodiésel debe filtrarse a 5 μm (Karmakar y cols., 2010).

2.2.6.3. Métodos de remoción de insaponificables

Los elementos insaponificables consisten en compuestos orgánicos que no reaccionan con el catalizador para formar jabones; tal como, los esteroides, alcoholes de mayor peso molecular, ceras e hidrocarburos. Cuando el biodiésel es producido en base a aceites crudos, los insaponificables se pueden eliminar principalmente mediante el lavado con agua; pero, también se pueden separar del biocombustible en la fase de glicerol (Karmakar y cols., 2010).

2.3. Sistemas de transformación

El uso directo de aceites o grasas en motores diésel cuenta con distintos problemas asociados que incluyen la coquización y formación de trompeta en los inyectores, formación de depósitos de carbono (volatilidades bajas y combustión incompleta), pegado del anillo de aceite, espesamiento o gelificación del aceite, problemas de lubricación (alta viscosidad) y características de vaporización incorrecta (Meher y cols., 2006). Existen principalmente seis técnicas, desglosadas a continuación, por medio de las que es posible tratar la materia prima para su uso como combustible sustituto en motores diésel. Todas estas reducen la viscosidad del aceite, incrementan su estabilidad contra la oxidación y mejoran su volatilidad para que sea adecuado su uso como biodiesel; por otra parte, la técnica más común para producción de biodiesel es la alcoholisis, las demás producen un compuesto con un TGA de menor tamaño. En esta sección se describirán

brevemente las primeras cinco técnicas, profundizando detalladamente en la transesterificación (Babadi y cols., 2022).

2.3.1. Uso directo de aceites mezclados.

En esta técnica la materia prima se diluye con diésel de petróleo para mejorar la viscosidad. Esto se debe a que la viscosidad del aceite vegetal crudo es de 10 a 17 veces mayor que la del diésel convencional (Babadi y cols., 2022).

2.3.2. Micro emulsión de aceites.

Proceso de mezclar la materia prima con solventes adecuados, los más populares de estos últimos son el metanol, etanol y 1-butanol. Debido a que los alcoholes cuentan con una solubilidad limitada, se emplean compuestos anfifílicos como los fosfolípidos, el monooleato de sorbitán, n-butanol, 2-octanol y los tensioactivos de carboxilato para estabilizar la dilución y aumentar la solubilidad. El combustible resultante produce menos emisiones de óxido nítrico y CO en comparación con el aceite vegetal puro o el diésel puro (Babadi y cols., 2022).

2.3.3. Hidrotratamiento (HVO)

Este sistema de transformación consiste en la reacción de grasas animales y/o aceites vegetales con hidrógeno, con la finalidad de producir hidrocarburos parafínicos (C_nH_{2n+2}) que resultan ser químicamente similares al diésel de petróleo. La metodología para llevarlo a cabo se puede dividir en dos partes; primero, se desoxigena la materia prima y se saturan sus enlaces dobles para crear alcanos; finalmente, se realiza una isomerización de alcanos y un craqueo de los mismos para obtener el biocombustible final. A este último se le han atribuido nombres como aceite vegetal hidrotratado, aceite vegetal hidrodeseoxigenado, hidrobiodiésel, diésel renovable, diésel derivado de la hidrogenación, combustible renovable sintético, diésel verde, biocetano y hasta diésel de segunda generación (Instituto Mexicano del Petróleo [IMP], 2018).

2.3.4. Craqueo térmico (pirólisis) de aceites.

El producto principal de este método es un bio-aceite formado a partir de la condensación de vapores y aerosoles generados por la descomposición térmica de biomasa lignocelulósica o aceites (craqueo térmico o pirólisis); asimismo, se obtienen carbón y gas como subproductos. El bio-aceite mencionado anteriormente está formado por componentes orgánicos oxigenados que le atribuyen propiedades no deseadas que incluyen un bajo poder calorífico, valores de acidez fuera

de los rangos adecuados, inestabilidad e incompatibilidad con combustibles convencionales, etc. Por ello, se utilizan técnicas como el HVO o el craqueo catalítico para eliminar el oxígeno de los compuestos orgánicos y convertir el bio-aceite en un biodiésel que pueda ser utilizado en motores diésel. El HVO utiliza hidrógeno para remover el oxígeno en forma de agua (Instituto Mexicano del Petróleo [IMP], 2018) y el craqueo catalítico usa catalizadores selectivos (la sílice-alúmina y la zeolita son dos de los principales) para eliminar el oxígeno como agua y óxidos de carbono. En general se requiere de costosos equipos y remoción de oxígeno a lo largo del craqueo térmico de la materia prima; además, es importante resaltar que el biodiésel tiene una conversión incompleta, los beneficios ambientales son pocos y se producen ciertos materiales de bajo valor (Babadi y cols., 2022).

2.3.5. Biomasa a líquido

Esta técnica de transformación se basa en la producción de hidrocarburos a partir de la mezcla de monóxido de carbono con hidrógeno (síntesis Fischer-Tropsch), pero en este caso el hidrógeno es obtenido de una gasificación de biomasa. El proceso se divide en 4 etapas comenzando por el pretratamiento de la biomasa, seguido de la gasificación de la misma a gas de síntesis (syngas), extracción de hidrógeno del syngas, síntesis Fischer-Tropsch y, finalmente, tratamientos para incrementar la calidad de los líquidos obtenidos como producto de la síntesis, convirtiéndolos así en biocombustibles (Instituto Mexicano del Petróleo [IMP], 2018).

2.3.6. Transesterificación

Transesterificación es un término general que alude a todas las reacciones orgánicas donde se lleva a cabo un intercambio o sustitución del grupo acilo o alquilo de un éster:

→ Alcohólisis: En esta reacción un éster interactúa con un alcohol para sustituir su grupo alquilo por el del alcohol, en otras palabras, el éster reacciona con un alcohol para formar un nuevo éster y un nuevo alcohol.

→ Acidólisis: En esta reacción el éster interactúa con un ácido carboxílico para sustituir su grupo acilo por el del ácido.

→ Interesterificación: En esta reacción se realiza un intercambio entre los grupos acilo y alquilo de dos ésteres diferentes.

Si bien es correcto considerar que la transesterificación engloba las tres reacciones mencionadas anteriormente, conforme a la literatura, en este trabajo se utilizará en referencia a la alcoholólisis. A continuación, en la Figura 3, se presenta la ecuación general para representar una reacción de transesterificación (Torossi Baudino, 2006).

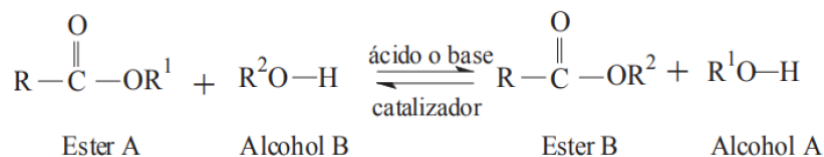


Figura 3. Ecuación general de transesterificación (Torossi Baudino, 2006).

Acorde a la materia prima y reactivos utilizados en este trabajo para la producción de biodiesel, definiremos a la transesterificación como aquella reacción donde se combinen los triglicéridos contenidos en aceites vegetales y/o grasas animales con un alcohol de bajo peso molecular y en presencia de un catalizador adecuado, en este caso metanol (CH₃OH) e hidróxido de potasio (KOH), para formar glicerina y una mezcla de ésteres grasos (Figura 4) que poseerá una estructura química y propiedades similares a aquellas del diésel convencional, conocida como biodiésel (Torossi Baudino, 2006). Cabe resaltar que otros alcoholes comúnmente utilizados en este proceso incluyen al etanol, propanol, butanol y al alcohol amílico (Babadi y cols., 2022).

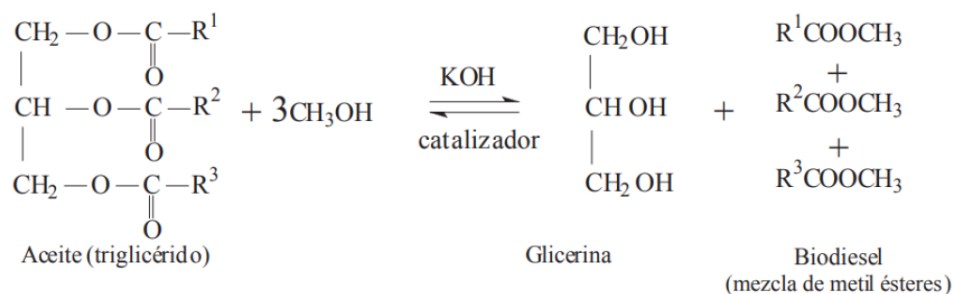


Figura 4. Reacción de transesterificación de triglicéridos mediante metanol en medio básico (Torossi Baudino, 2006).

Como se observa en la figura anterior, la estequiometría de la reacción de transesterificación indica que son necesarios 3 moles de alcohol por 1 mol de triglicérido; ahora, químicamente el mecanismo de reacción bajo el cual se producen los ésteres alquílicos consta de tres reacciones consecutivas y reversibles, partiendo de triglicéridos y alcohol, produciéndose en cada una de ellas una molécula de éster por cada glicérido involucrado y se forman como productos intermedios diglicéridos y monoglicéridos. Además, cabe mencionar que se recomienda utilizar una cantidad apenas excedente de alcohol para desplazar el equilibrio de dichas reacciones hacia la síntesis de

ésteres (Meher y cols., 2006). La Figura 5 muestra la secuencia de las reacciones mencionadas anteriormente (Torossi Baudino, 2006).

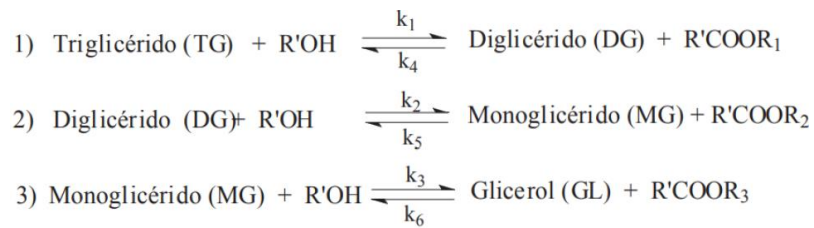


Figura 5. Reacciones reversibles en la transesterificación de triglicéridos (Torossi Baudino, 2006).

Al terminar la secuencia de reacciones se producen tres moléculas de ésteres alquílicos por una molécula de glicerol. En general este es un proceso amigable con el ambiente y capaz de convertir una gran variedad de aceites de materia prima a bajas temperaturas; por otro lado, los principales parámetros específicos que lo afectan son la temperatura, tiempo de reacción, presión, proporción de mezcla alcohol-aceite-catalizador, tipo de catalizador, velocidad de agitación, concentración y tipo de aceite de materia prima. La reacción de transesterificación puede realizarse con o sin catalizador, utilizando alcoholes alifáticos monohídricos primarios o secundarios (Babadi y cols., 2022). Se ha reportado que la transesterificación más rápida es cuando se cataliza por un compuesto alcalino (base) y en el mecanismo de reacción (Figura 6) el primer paso es el ataque del ion alcóxido al carbono carbonílico de la molécula de TG, que resulta en la formación de un intermedio tetraédrico que a su vez reaccionará con un alcohol para producir el ión alcóxido en el segundo paso. En el último paso se reordena el intermedio tetraédrico, dando lugar a un éster y un diglicérido; ahora bien, en presencia de exceso de alcohol, la reacción preliminar es de pseudo primer orden y la reacción reversible de segundo orden (Meher y cols., 2006).

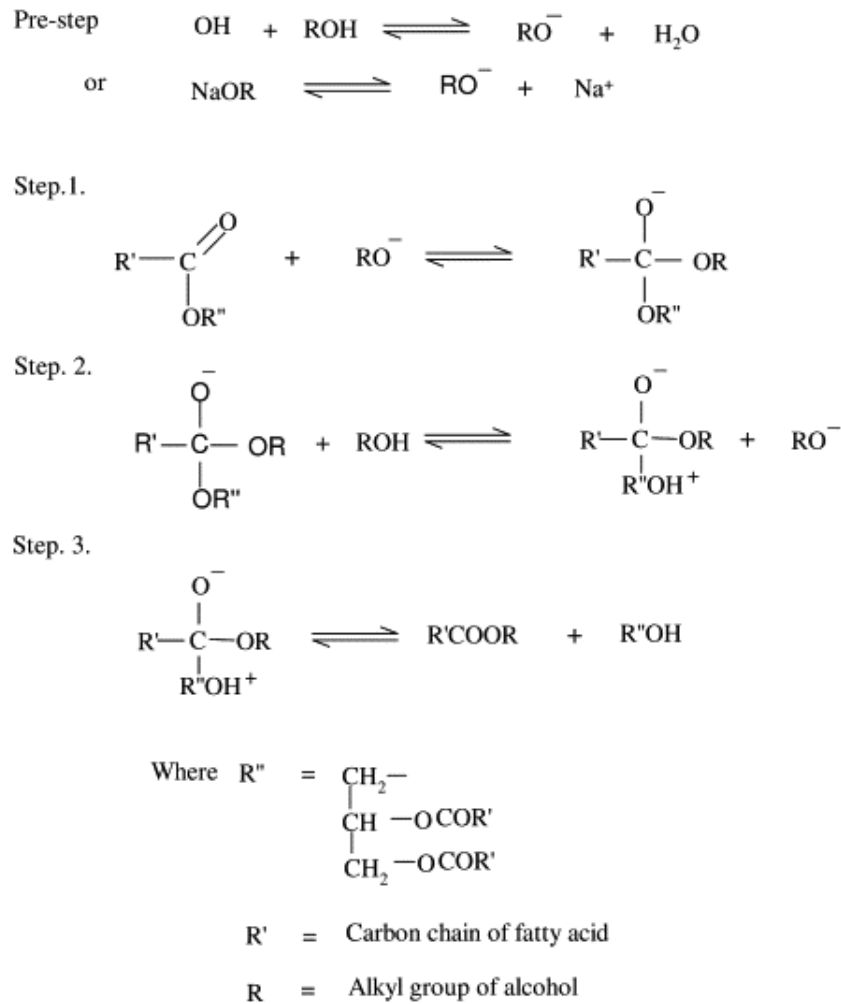


Figura 6. Mecanismo de transesterificación catalizada por bases (Meher y cols., 2006).

Los ácidos de Brønsted-Lowry, preferentemente sulfónico y sulfúrico, también pueden ser empleados para catalizar la reacción de transesterificación dando rendimientos altos de ésteres de alquilo; pero, son más lentas en comparación con el uso de catalizadores alcalinos y generalmente requieren de temperaturas que superan los 100°C, así como elevados tiempos de reacción (> 3 hrs). El mecanismo de transesterificación ácida, para un monoglicérido, se puede observar en la Figura 7; no obstante, este se puede extender para diglicéridos y triglicéridos. En resumen, la protonación del grupo carbonilo del éster da lugar a que se forme un carbo-catión que a su vez produce un intermedio tetraédrico, tras un ataque nucleofílico del alcohol, el cual elimina el glicerol para formar un nuevo éster y regenerar el catalizador (Meher y cols., 2006)

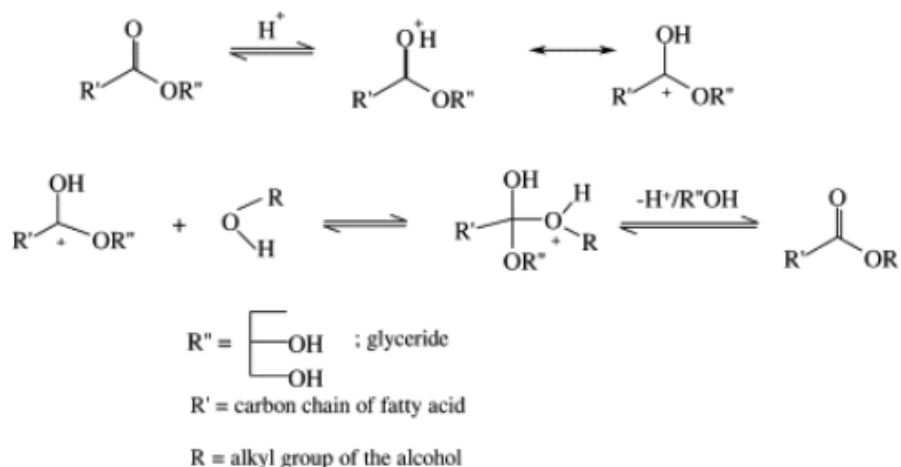


Figura 7. Mecanismo de transesterificación catalizada por ácidos (Meher y cols., 2006).

Como se mencionó anteriormente, el proceso de transesterificación se puede ver afectado por distintos factores asociados a las condiciones de reacción utilizadas, estos se mencionan en la Tabla 8 junto con una descripción de los mismos (Meher y cols., 2006).

Tabla 8. Factores que afectan la reacción de transesterificación (Meher y cols., 2006).

Factor	Descripción
Efecto de los FFA y la humedad	<p>Para llevar a cabo la reacción catalizada por una base, se necesitan valores de FFA < 3 wt.%. Cuanto mayor es la acidez de la materia prima (mayor contenido de FFA), menor será la eficiencia de conversión a biodiésel.</p> <p>En relación a la humedad, esta interfiere con la reacción de transesterificación ya que cantidades mínimas pueden provocar la formación de jabón.</p>
Tipo de catalizador y concentración	<p>Los catalizadores se clasifican en alcalinos, ácidos o enzimáticos; donde, los alcalinos destacan como los más efectivos (hidróxido de sodio, metóxido de sodio, hidróxido de potasio, metóxido de potasio, etc.).</p> <p>Si la grasa animal o aceite vegetal tiene un valor alto de FFA y más agua, es más adecuado el uso de</p>

	<p>catalizadores ácidos como ácido sulfúrico, fosfórico, clorhídrico o sulfónico orgánico.</p> <p>Tanto el exceso como la cantidad insuficiente de catalizador provocará la formación de jabones y dependiendo del tipo de catalizador empleado se afectará la etapa de purificación del biocombustible en mayor o menor medida.</p>
<p>Relación molar de alcohol a aceite y tipo de alcohol</p>	<p>Este es un factor importante que afecta el rendimiento de producción de biodiésel. La estequiometría de la reacción de transesterificación requiere de tres moles de alcohol y uno de TG para producir tres moles de ésteres alquílicos de FA; sin embargo, al requerirse un exceso de alcohol para desplazar el equilibrio hacia la formación de estos, las proporciones molares universalmente aceptadas de alcoholes a glicéridos son de 6:1 a 30:1 (dependiendo del alcohol y materia prima utilizada) (Musa, 2016).</p> <p>Es importante establecer empíricamente una relación molar ideal porque un exceso de alcohol (proporción alta) podría ralentizar y hacer más difícil la separación de fases de glicerol y biodiésel, así como el proceso de purificación del biocombustible (Musa, 2016).</p> <p>Los diferentes tipos de alcoholes utilizados incluyen metanol, butanol, etanol, iso-propanol, alcohol amílico (Babadi y cols., 2022) y bioalcoholes (Instituto Mexicano del Petróleo [IMP], 2018).</p>
<p>Efecto del tiempo de reacción y la temperatura</p>	<p>La tasa de conversión a biodiésel aumenta con el tiempo de reacción; en otras palabras, a mayor tiempo, mayor rendimiento de biocombustible.</p> <p>La transesterificación puede realizarse a diferentes temperaturas, dependiendo de la materia prima utilizada y sus características. Se ha reportado que</p>

	<p>este factor influye en la velocidad de reacción y en el rendimiento de síntesis de ésteres alquílicos.</p> <p>En distintas investigaciones se utiliza como temperatura de reacción la temperatura de ebullición del alcohol empleado.</p>
Intensidad de mezcla	<p>La importancia de este parámetro radica en que los aceites y grasas no son miscibles con una solución de catalizador-alcohol. Una vez que las dos fases llegan a un punto en el que se mezclan, ya no es necesario agitar.</p> <p>Una intensidad de la mezcla óptima puede beneficiar la etapa de purificación del biodiésel; no obstante, en ciertos casos también puede perjudicar dicha etapa.</p>

2.3.6.1. Transesterificación catalítica

Un catalizador es aquel compuesto capaz de acelerar la velocidad de reacción de la producción de biodiesel, debido a que mejora la interacción superficial. Existen tres categorías generales de catalizadores comprendidas por los homogéneos, heterogéneos y enzimáticos; de manera que, si el catalizador y el reactante permanecen en la misma fase durante la reacción el proceso es homogéneo y si el catalizador permanece en una fase distinta a la del reactante el proceso es heterogéneo. Actualmente las enzimas son objeto de investigación y se espera que provean avances graduales o disruptivos para una producción novedosa de biodiesel; además, estas son consideradas biocatalizadores renovables ya que es posible separarlas y reutilizarlas por medio de técnicas de separación adecuadas, que mantengan la estructura y funcionalidad de la enzima. Dado que las enzimas son insensibles a la cantidad de agua en el aceite de materia prima o a la longitud de los ácidos grasos libres (FFA, por sus siglas en inglés), son fuertes candidatas para mejorar la síntesis de FAME a partir aceites de cocina usados (Babadi y cols., 2022). A continuación, en la Tabla 9, se describen los distintos métodos (convencionales y recientes) empleados para la transesterificación catalítica de aceites y grasas, para poder comparar mejor las diferentes tecnologías.

Tabla 9. Descripción de los procesos de transesterificación catalítica, junto con sus ventajas y desventajas (Elaboración propia con información presentada por Babadi y cols. (2022)).

Técnicas catalíticas convencionales	Descripción	Ventajas	Desventajas
<p>Transesterificación catalítica homogénea (catalizador básico)</p>	<p>Método más comercialmente usado para la producción de biodiesel que contiene un catalizador base como el hidróxido de sodio (NaOH) o hidróxido de potasio (KOH).</p> <p>Se requiere de un proceso de precalentamiento y otro de lavado/recuperación del biodiesel/catalizador posterior a la reacción.</p> <p>Actualmente se produce biodiesel ampliamente por transesterificación con catalización alcalina por su alto rendimiento, menor corrosión de los equipos y velocidad de reacción rápida; ahora bien, esta catálisis es adecuada para aceites de materia prima de alta pureza y cuenta con el inconveniente de la reacción indeseada entre los FFA y el catalizador alcalino, que resulta en la formación de jabones que inhiben el proceso de separación de glicerol del biodiesel y reducen el rendimiento de este último. Un paso fundamental en este tipo de transesterificación es la formación de un alcóxido nucleofílico del alcohol para atacar la parte electrofílica del grupo carbonilo de los triglicéridos; asimismo, los catalizadores básicos utilizados más comunes son alcóxidos e hidróxidos de metales alcalinos y carbonatos de sodio o potasio.</p>	<p>Tiempo de reacción entre 20 – 120 min a 25 – 70 °C.</p> <p>Mayor rendimiento de conversión que con un catalizador ácido (más de 97%).</p> <p>Económicamente viable y ampliamente disponible.</p>	<p>Alto consumo de energía.</p> <p>Sensible a la presencia de agua.</p> <p>Formación de jabón.</p> <p>Adecuada únicamente para aceites vegetales puros.</p>
<p>Transesterificación catalítica homogénea (catalizador ácido)</p>	<p>La transesterificación con catalización homogénea ácida es más adecuada para aceite de materia prima de baja pureza con altos niveles de FFAs. Los catalizadores que más sobresalen son</p>	<p>Capaz de catalizar ambas reacciones de transesterificación y esterificación.</p>	<p>Sensible a la presencia de agua.</p>

	<p>el sulfúrico (H_2SO_4), clorhídrico (HCl), sulfónico ($R-S(=O)_2-OH$) y fosfórico (H_3PO_4).</p> <p>En este método el grupo carbonilo de los triglicéridos recibe un protón, de manera que el alcohol disponible en la reacción ataca al carbono protonado y crea un tetraedro intermedio; ahora, esta reacción es tan sensible a la presencia de agua en el aceite de materia prima, que 50 g de agua en la misma inhibe la transesterificación.</p>	<p>Insensible al contenido de FFA del aceite vegetal o grasa animal.</p> <p>Más económica en comparación con el método básico.</p>	<p>Tiempo de reacción prolongado y altas temperaturas.</p> <p>Relación molar alta de aceite/alcohol.</p> <p>Impacto ambiental asociado y problemas de corrosión.</p> <p>Dificultad en la separación y reciclaje del catalizador.</p>
<p>Transesterificación catalítica heterogénea (catalizador básico)</p>	<p>Los catalizadores heterogéneos actúan en una fase diferente a la del reactante, lo que hace que el proceso de separación de los mismos sea más sencillo en comparación con los catalizadores homogéneos; por otra parte, pueden ser utilizados como un sistema de reactor de lecho fijo. Bajo este método de transesterificación no se produce jabón, tolera condiciones de reacción extremas ($70-200\text{ }^\circ C$) y permite omitir el proceso de lavado/recuperación del biodiesel/catalizador.</p> <p>Los catalizadores heterogéneos se dividen en sólidos base y sólidos ácidos; asimismo, dentro de los sólidos base destacan las zeolitas, óxidos de metales alcalinotérreos, óxido de aluminio (Al_2O_3), arcilla natural y sintética (aluminosilicato), óxido de circonio (ZrO_2) e hidrotalcita, que son recubiertas sobre una gran superficie. El uso de catalizadores sólidos base fijados en lecho facilita la separación de catalizadores y biodiesel; además, la literatura confirma que estos tienen aproximadamente la misma actividad que sus contrapartes</p>	<p>Baja generación de residuos con menor impacto ambiental.</p> <p>Reciclabilidad del catalizador.</p> <p>Proceso económicamente viable y rápido, a bajas temperaturas.</p> <p>Fácil proceso de producción y purificación.</p>	<p>Alto consumo de energía.</p> <p>Recuperación difícil y costosa económicamente del glicerol.</p> <p>Los procesos de purificación posteriores son esenciales, lo que aumenta el costo del procedimiento.</p>

	<p>homogéneas. Estudios han reportado una conversión de biodiesel de 81% obtenida a partir de una relación molar de 3:1 utilizando un catalizador heterogéneo sólido base de hidrotalcita Mg-Al; por otro lado, CaO y MgO son otros dos de este tipo de catalizadores con las características de ser muy activos y económicos para la producción industrial de biodiesel. Es importante mencionar que el uso de CaO implica una filtración de este en la mezcla de reacción, que debe eliminarse por lavado del producto final. Este paso de lavado contrasta con la ventaja de los catalizadores heterogéneos de proceso posterior a la reacción simple y fácil.</p>		
<p>Transesterificación catalítica heterogénea (catalizador ácido)</p>	<p>Los catalizadores sólidos ácidos han sido usados a escala comercial a pesar de su baja actividad, por contener más sitios ácidos con diferentes fuerzas en comparación con los catalizadores ácidos homogéneos, y son capaces de catalizar simultáneamente reacciones tanto de esterificación como de transesterificación.</p> <p>Estos son menos corrosivos y tóxicos, insensibles a la concentración de FFA y más fáciles de separar del biodiesel producido; ahora bien, el nafion NR50, la zirconia sulfatada y zirconia de tungstato sobresalen como los sólidos ácidos comúnmente empleados.</p>	<p>Insensible al contenido de FFA de la materia prima.</p> <p>Baja cantidad de catalizador requerida.</p> <p>No requiere de un proceso de lavado y es amigable con el ambiente.</p> <p>Fácil separación del catalizador y proceso de purificación.</p>	<p>Tiempo de reacción prolongado (8 – 20 horas) y altas temperaturas (~200°C).</p> <p>El solvente residual reduce la actividad de los catalizadores.</p> <p>Requiere de un proceso de purificación debido a la lixiviación del catalizador, lo que aumenta el costo del procedimiento.</p>
<p>Técnicas catalíticas recientes</p>	<p>Descripción</p>	<p>Ventajas</p>	<p>Desventajas</p>

<p>Transesterificación catalizada por líquidos iónicos (ILs)</p>	<p>Se trata de sales orgánicas compuestas de cationes orgánicos y aniones orgánicos/inorgánicos que cuentan con temperaturas de fusión bajas (por debajo de los 100 °C). Estos nuevos materiales pueden considerarse “solventes verdes” reciclables capaces de disolver una amplia gama de compuestos orgánicos e inorgánicos con las ventajas de ser líquidos a temperatura ambiente, alta estabilidad química y térmica, alta actividad catalítica y baja inflamabilidad; por otra parte, las propiedades de los ILs pueden ser diseñadas acorde a la aplicación de interés a través de una alteración estructural de los cationes y aniones (afinación de estructuras y propiedades).</p> <p>Pueden emplearse como medio de reacción, soporte para enzimas, cosolvente para estabilizar enzimas o como solvente para extraer lípidos de biomasa, FFA de aceites y ésteres insaturados de biodiesel; además, es importante mencionar que estos presentan ya sea acidez o basicidad de Brønsted.</p> <p>Los ILs ácidos de Brønsted son los catalizadores frecuentemente más utilizados para la transesterificación porque ofrecen menor corrosión en los equipos y presentan menores riesgos ambientales; asimismo, se han reportado conversiones de materia prima a biodiesel superiores al 95% utilizando catalizadores de 1-bencil-1H-bencimidazol y optimizando las condiciones de reacción.</p> <p>Los ILs de basicidad de Brønsted han sido utilizados en menor medida para la síntesis de biodiesel; ahora, estudios informan que la N-metilmorfolina, el bromuro de N-butilo y el KOH tienen un rendimiento del 94% para la</p>	<p>Alta estabilidad química y térmica.</p> <p>Permite la adecuación de estructuras y propiedades.</p> <p>Alta actividad catalítica.</p> <p>Presión de vapor e inflamabilidad bajas o insignificantes.</p> <p>Menor toxicidad en relación a solventes orgánicos.</p> <p>Amplia gama de aplicaciones.</p> <p>Líquidos a temperatura ambiente y posible reciclabilidad.</p>	<p>Costo elevado de síntesis.</p> <p>Limitaciones en aplicaciones a gran escala.</p> <p>Algunos líquidos iónicos son sensibles a la humedad.</p> <p>No son biodegradables.</p> <p>Inconvenientes en el proceso de separación.</p> <p>Alta viscosidad.</p>
---	--	--	---

	<p>transesterificación de aceite de soja a 60° después de 6 horas de tiempo de reacción.</p> <p>Las desventajas en el uso de ILs incluyen elevados costos de síntesis, procedimientos de separación inconvenientes con limitaciones para aplicaciones a gran escala, así como que algunos de ellos son sensibles a la humedad, no biodegradables y altamente viscosos; no obstante, los ILs se pueden heterogeneizar por medio de materiales sólidos como una solución prometedora para las desventajas mencionadas anteriormente.</p> <p>Agregando a lo anterior, estos compuestos pueden aumentar la actividad enzimática y la reutilización de la síntesis enzimática de biodiesel.</p>		
<p>Transesterificación catalizada por solventes eutécticos profundos</p>	<p>Los solventes eutécticos profundos (DESs) son soluciones que contienen al menos dos componentes, ácidos (donantes de enlaces de hidrógeno) y bases (aceptores de enlaces de hidrógeno) de Lewis o de Brønsted, de manera que se forma una nueva mezcla eutéctica caracterizada por tener un punto de fusión menor al de cada componente (< 100 °C). Las propiedades de los DESs son similares a las de los ILs, pero difieren en tres aspectos principales:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. La producción de DESs es simple, no genera desperdicios y no requiere de procesos posteriores de purificación; mientras tanto, la preparación de ILs es complicada y los costos asociados son mayores. 2. Los DESs interactúan mediante enlaces de hidrógeno por naturaleza; en cambio, los ILs por enlaces iónicos. 	<p>Fácil preparación.</p> <p>Alta pureza.</p> <p>Bajo costo del procedimiento.</p> <p>Sin reactividad con el agua.</p> <p>No tóxico.</p> <p>Biodegradable.</p>	<p>Incertidumbre respecto a la estabilidad en usos prolongados.</p> <p>Falta de información sobre el análisis de ciclo de vida (ACV) completo.</p>

	<p>3. Algunas ventajas en el uso de DESs ante los ILs incluyen la facilidad de preparación, alta pureza, menor costo, sin reactividad con el agua, no toxicidad y biodegradabilidad</p> <p>Por las similitudes estructurales y ventajas descritas anteriormente, se ha sugerido reemplazar completamente los ILs por DESs para la producción de biodiesel.</p> <p>Pueden utilizarse como catalizadores y co-solventes, son más adecuados para la extracción de solventes durante la purificación de biodiesel crudo, facilitarían los procesos de separación y purificación al reducir reacciones secundarias como la saponificación; más aún, los DESs remueven eficientemente glicerol y remanentes de catalizador alcalino del biodiesel crudo.</p> <p>Por ejemplo, se ha reportado que el uso de cloruro de vinilo o cloroetileno (CHCl) ha reducido el contenido de glicerol de aceites de colza y soja purificados un 0.06% y 0.02% en peso, respectivamente. En caso de que el DES sea empleado como catalizador, las materias primas con alto contenido de FFA se transesterifican en dos pasos donde la transesterificación por solventes eutécticos profundos es seguida de una transesterificación catalizada con componentes alcalinos; por otro lado, en caso de que el DES cumpla la función de co-solvente permite mejorar la capacidad catalítica de otros catalizadores.</p> <p>Existen algunas limitantes en el uso de DESs para la producción de biodiesel como el hecho de que algunas reacciones enzimáticas de transesterificación con DESs se convierten en sistemas heterogéneos que involucran una</p>		
--	---	--	--

	<p>interfaz líquido-líquido complicada, hay incertidumbre sobre la estabilidad de los DESs bajo usos prolongados y falta información respecto al análisis de ciclo de vida (ACV) completo de estos compuestos. El rendimiento aceptable y bajo costo de producción de los DESs harían aún más económica la elaboración de biodiesel a partir de materia prima de bajo costo, como aceites no comestibles o de desecho de cocina.</p>		
<p>Transesterificación catalizada por enzimas</p>	<p>Las enzimas pueden usarse para la transesterificación de materia prima con alto contenido de FFA a biodiesel, estas proteínas catalíticas son amigables con el ambiente, reutilizables, fáciles de recuperar del proceso aguas abajo del producto (ya que el biocatalizador es una enzima compatible) y capaces de producir derivados a la medida con reacciones secundarias indeseables mínimas. Acorde a la literatura, las desventajas de las enzimas son su elevado costo en comparación con otros químicos y el riesgo de contaminación del producto; sin embargo, la inmovilización de enzimas es más económico que emplearlas en su forma libre ya que facilita su reutilización y recuperación.</p> <p>Las lipasas son enzimas de metanólisis (triacilglicerol hidrolasa, EC 3.1.1.3.) ampliamente usadas para hidrolizar el enlace de éster carboxílico en la molécula de triacilglicerol, lo que resulta en FFA, diglicéridos, monoglicéridos y glicerol; ahora, bajo una concentración baja de agua la reacción es reversible. Existen tres tipos de lipasas, clasificadas de acuerdo a su selectividad, primeramente las lipasas regio o posicionales,</p>	<p>Altamente selectivas y específicas.</p> <p>Reutilizables y amigables con el ambiente.</p> <p>Insensibles a grandes cantidades de FFA.</p> <p>Procesos de bajo costo.</p> <p>El biodiesel producido es puro.</p>	<p>La transesterificación heterogénea enzimática implica una interfaz líquido-líquido complicada.</p> <p>Sensibilidad a altas temperaturas y desnaturalización.</p> <p>Bajo rendimiento de conversión a biodiesel y tiempo de reacción prolongado.</p> <p>Se requiere de un solvente orgánico y agua.</p> <p>Efecto inhibitorio del glicerol.</p>

	<p>lipasas de tipo ácido graso y lipasas específicas para una cierta clase de acilglicerol (mono-, di- o triglicéridos); igualmente, cabe mencionar que estas pueden desactivarse debido a la baja solubilidad del metanol en las mismas, en concentraciones moderadas, y se reactivan mediante la adición gradual de metanol o empleando 1,4-dioxano como co-solvente para solubilizar el metanol. Recientemente se han inmovilizado lipasas a través de varios métodos, para mejorar su estabilidad y reutilización, como por adsorción, enlace covalente, atrapamiento, encapsulación y entrecruzamiento; de los cuales, la adsorción es el más común y se ha reportado en la literatura que la “C.Antartica” inmovilizada en resina acrílica es la lipasa más eficaz.</p> <p>En orden para mejorar la estabilidad enzimática, síntesis de biodiesel y tolerancia de metanol, es posible aplicar métodos de pretratamiento a las lipasas, el más estándar es la bioimpresión molecular y este ha sido ampliamente usado desde su descubrimiento en 1972 para mejorar la actividad de la enzima impresa, mientras se mantiene la enzima en su conformación activa.</p> <p>El biocatalizador de células enteras (WCB) es otro enfoque biológico que emplea microorganismos vivos naturales o modificados genéticamente durante la producción de biodiesel, se clasifica en bioprocesos de biotransformación y fermentación. Esta técnica permite el uso repetido del catalizador en reacciones secuenciales de transesterificación de hasta 10 ciclos.</p>		
<p>Transesterificación asistida por magnetismo</p>	<p>Nueva técnica de transesterificación que utiliza decantación un sistema fluidizado con recuperación magnética del catalizador, este no</p>	<p>No se limita por inconvenientes de filtración.</p>	<p>Aglomeración de catalizador magnético ácido.</p>

	<p>es limitado por las desventajas de la filtración convencional y puede llegar a acelerar el ciclo de producción.</p> <p>Se pueden aplicar tanto catalizadores orgánicos e inorgánicos, los primeros requieren de un soporte magnético para facilitar la separación y los segundos comúnmente tienen esta característica por naturaleza; además, el uso de catalizadores porosos mejora su actividad debido a que tener un área superficial específica más grande provee un sitio activo expandido.</p> <p>Los catalizadores orgánicos como de ácido carbónico, magnético a base de carbón o bambú, ácido sulfónico, carbón activado, lipasas y pseudomonas de células completas cuentan con un rango de eficiencias de conversión de entre 71% – 98.6%.</p> <p>Los catalizadores inorgánicos como el silicato de sodio, ácido clorosulfónico, nanopartículas de cuproespinela, hidróxido de potasio/zeolita sintética, óxido de zinc y sílice cuentan con un rango de eficiencias de conversión de entre 90% – 99.2%</p> <p>En la literatura se han reportado valores de conversión del 71% mediante el uso de lipasas recubiertas con nanopartículas magnéticas, lo que representa un 20% más de la conversión obtenida mediante el uso de la enzima sin recubrir (transesterificación catalizada por enzimas), con recuperación y separación del catalizador facilitadas. Otros estudios indican la producción de biodiesel en un solo paso a partir de aceite de jatrofa, utilizando nanopartículas anfóteras magnéticas de base ácida (Zn8@Fe-C400).</p>	<p>Acelera el ciclo de producción.</p> <p>Mejora la actividad de catalizadores porosos.</p> <p>Menor caída de presión.</p> <p>Procesos de separación eficientes.</p>	<p>Requiere un paso previo de recubrimiento para catalizadores orgánicos.</p>
--	--	--	---

<p>Transesterificación asistida por microondas</p>	<p>Este método acelera la reacción química gracias a la adsorción selectiva de energía de microondas por moléculas polares y/o iones, acelerando la rotación de estos elementos y generando calor por la fricción molecular intermedia.</p> <p>La frecuencia de microondas usada en la industria es de 2.45 GHz para prevenir posibles interferencias con equipos de telecomunicaciones y/o radares de microondas.</p> <p>Los beneficios de emplear esta técnica son una mejor eficiencia energética, reduce el tiempo de procesamiento, mayor rendimiento y pureza del producto final; por otra parte, la investigación reciente se ha dirigido hacia su implementación en sistemas de producción de biodiesel a partir de aceites vegetales.</p> <p>Se ha informado que la transesterificación asistida por microondas de glicerol crudo tiene un mejor rendimiento en comparación con la transesterificación convencional, en condiciones óptimas, ya que se obtuvo un valor de 93.4% en 5 minutos que supera el 84.3% en 2 horas del rendimiento del método convencional; igualmente, se ha señalado un aumento significativo en el rendimiento de biodiesel de 90.04% a 97.74% al usar este método en vez del convencional con aceite de freír usado como materia prima.</p>	<p>Corto tiempo de reacción.</p> <p>Relación molar más baja de aceite/metanol en comparación con el resto de tecnologías.</p> <p>Baja cantidad de subproductos.</p> <p>Alto rendimiento de conversión y alta pureza del biodiesel.</p>	<p>Proceso difícil de escalar a nivel comercial.</p> <p>Calentamiento descontrolado.</p> <p>Baja profundidad de penetración de la radiación de microondas.</p>
<p>Transesterificación asistida por membranas</p>	<p>En esta técnica, los FAME se infiltran a través de una membrana permeable, mientras que los triglicéridos y FFA que no reaccionaron permanecen en el reactor y se descargarán posteriormente; por otro lado, se considera como una transesterificación catalítica heterogénea ácida de bajo costo con mayores ventajas como</p>	<p>La membrana catalítica mejora la tasa de producción y el porcentaje de conversión a biodiesel; sin embargo, puede ser selectiva</p>	<p>La membrana es el punto débil de esta técnica por su alto costo de fabricación, vida útil limitada, baja permeabilidad a bajas temperaturas y</p>

	<p>la reutilización del catalizador, amigable con el ambiente (ya que no contiene contaminantes) y permite tanto la catalización de reacciones simultaneas como la separación en tiempo real.</p>	<p>respecto a la materia prima empleada.</p>	<p>dificultad para modelado y predicciones; por ello, se requiere más investigación en orden para mejorar esta tecnología de manera que pueda escalarse industrialmente y reducir su costo total.</p>
<p>Transesterificación asistida por ultrasonidos</p>	<p>Los ultrasonidos han sido ampliamente utilizados en distintos sistemas de reacción química tanto para proveer la energía inicial como disminuir el tiempo de la misma, su rango de frecuencia es de 20 kHz a 10MHz y su aplicación principal es la cavitación acústica; ahora, estudios recientes muestran el potencial de la irradiación ultrasónica como una alternativa eficiente y novedosa para la producción de biodiesel.</p> <p>En la transesterificación, la sonicación mejora la mezcla intensiva de aceite, alcohol y catalizador a lo largo de la cavitación acústica; la cual, hace referencia a la generación de burbujas que crecen y colapsan cerca del límite de fase de los materiales irradiados con ultrasonido, este proceso conduce a un aumento in situ de la temperatura, disminución del tiempo de reacción y aumento del rendimiento de biodiesel producido. Es posible aplicar una sonicación directa o indirecta, que a su vez puede realizarse en modo continuo o por pulsos dentro del recipiente de reacción.</p>	<p>Aumenta la velocidad de reacción.</p> <p>Alto rendimiento de conversión.</p> <p>Bajo consumo de energía.</p> <p>Baja cantidad de catalizador (en caso de emplear enzimas).</p>	<p>En caso de que el catalizador no sea una enzima, se requiere de una gran cantidad de catalizador y esto aumenta la formación de jabón, impacto ambiental y costo general del proceso.</p> <p>Los restos de catalizador incrementan el pH del biodiesel.</p>

<p>Transesterificación asistida por plasma</p>	<p>Este es el método más avanzado para la producción de biodiesel, se beneficia de la colisión entre electrones de alta energía (suministrados por una fuente de alimentación de alto voltaje) y la mezcla de reacción; este, se puede desarrollar para métodos catalíticos y no catalíticos.</p> <p>Sus ventajas sobre reacciones convencionales son la independencia del catalizador, presión no térmica y atmosférica, gran ahorro de tiempo y energía, así como la ausencia de formaciones de jabón o glicerol; igualmente, considerada una técnica amigable con el ambiente gracias a sus características asociadas de reducción de residuos y seguridad ante explosiones. El inconveniente de esta técnica es la dificultad para controlar la reacción primaria, derivada de la alta energía del electrón por naturaleza. La tecnología de plasma es el cuarto estado de la materia y está compuesto por electrones, átomos excitados, iones, radicales, fotones y partículas neutras; asimismo, tiene el potencial para generar los efectos de la transesterificación asistida por microondas y por ultrasonidos.</p> <p>La energía cinética y temperatura de los electrones en el plasma no térmico (temperaturas de 10000 – 100000 K) son significativamente mayores que en las partículas de gas neutro (temperatura ambiente); por ello, la energía de activación de un proceso puede reducirse al calentarse con plasma y esto resulta en la aceleración sustancial de las reacciones químicas.</p> <p>Durante el procesamiento, los electrones de alta energía atraviesan el electrodo de tierra y excitan las moléculas de gas a granel; posteriormente,</p>	<p>Tiempo de reacción significativamente corto.</p> <p>Independiente al catalizador.</p> <p>No hay formación de jabón ni de glicerol.</p>	<p>Difícil control del mecanismo de reacción.</p> <p>Excitación e ionización de enlaces químicos ciegos.</p> <p>Difícil de detener la reacción.</p>
---	--	---	---

	<p>esta excitación de moléculas da como resultado la ionización de los átomos y la formación de especies metaestables, que incluyen radicales altamente reactivos. El resultado de estas reacciones e interacciones es la producción de compuestos con una amplia variedad de composiciones; en otras palabras, a lo largo del procesamiento de aceites vegetales se romperán los enlaces carbono-carbono en el triglicérido. En esa misma línea, en presencia de metanol como proveedor de oxígeno en la reacción, las moléculas de oxígeno reemplazan el doble enlace carbono-carbono y generan una molécula saturada.</p>		
<p>Transesterificación asistida por electrólisis (TAE)</p>	<p>El principio de funcionamiento de la TAE se basa en la generación de calor a partir de un voltaje eléctrico, suficiente para ocasionar una reacción para producir biodiésel; por lo que, no se requiere de calor externo proveniente de otra fuente y esto hace que la conservación de energía sea una ventaja de este método.</p> <p>A diferencia de los procedimientos de transesterificación convencionales, donde la presencia de agua tiene efectos negativos, la TAE requiere de agua tanto para la producción de biodiésel como para mejorar el rendimiento del sistema mediante la producción de iones H⁺ y OH⁻ en la superficie del electrodo; asimismo, en vez de neutralizar el biodiesel (pH de 7) por medio de hasta 7 lavados con agua, esta técnica solo necesita 1 lavado. Guan et al. reportaron la primera aplicación de electrolisis para producir de biodiesel a partir de aceite de maíz, donde se aplicó un voltaje constante a la mezcla de reacción (formada por metanol, aceite y el electrolito) para inducir la reacción del metanol</p>	<p>No requiere de elevadas temperaturas.</p> <p>Tiempo de reacción corto.</p> <p>Baja generación de aguas residuales.</p> <p>Económicamente viable.</p> <p>La presencia de agua mejora el rendimiento.</p> <p>Insensible a grandes cantidades de FFA y agua.</p>	<p>Sensible a pH alto de la materia prima.</p> <p>La conductividad del electrolito debe monitorearse constantemente.</p>

	<p>con un ion hidroxilo y así dar lugar a la formación de iones metóxido; posteriormente, estos últimos atacan el grupo carbonilo del glicérido y crean los FAME.</p> <p>Bajo este proceso se asegura un rendimiento de conversión a FAME del 97%, en presencia de agua y eliminando el problema de formación de jabón; además, se informó que es importante monitorear el pH de la mezcla de reacción, debido a que al aumentar de valor puede causar una caída significativa de la conductividad del electrolito y detener la reacción. Algunas ventajas de la TAE son el bajo consumo de energía, baja producción de aguas residuales, cortos tiempos de reacción y la eliminación de pasos de purificación.</p>		
--	---	--	--

2.3.6.2. Transesterificación no catalítica

La ausencia de catalizadores simplifica el proceso industrial, inhibe la formación de subproductos y puede reducir los costos de producción; ahora bien, existen dos procesos de transesterificación no catalítica para obtener biodiesel denominados transesterificación de alcohol supercrítico y BIOX (transesterificación con cosolvente) (Babadi y cols., 2022). A continuación, en la Tabla 10, se describen las distintas técnicas de transesterificación no catalítica de aceites y grasas para poder comparar mejor las diferentes tecnologías.

Tabla 10. Descripción de los procesos de transesterificación catalítica, junto con sus ventajas y desventajas (Elaboración propia con información presentada por Babadi y cols. (2022)).

Técnicas no catalíticas	Descripción	Ventajas	Desventajas
Transesterificación de alcohol supercrítico	Técnica novedosa que utiliza alta presión y temperatura, en vez de catalizadores, para producir biodiésel; en esta, la mezcla alcohol/aceite forma una mezcla monofásica en estado supercrítico que se completa en poco tiempo y permite resolver el problema de una mezcla de dos fases.	Independiente al catalizador. Alta velocidad de reacción.	Costoso económicamente. Altas temperaturas (250-400°C) y presiones (40 Mpa) requeridas.

	<p>La transesterificación supercrítica de metanol es una variante más amigable con el ambiente, rápida, energéticamente eficiente e involucra una menor cantidad de procesos de purificación; del mismo modo, cabe señalar que necesita temperaturas de entre 250-450° C y presiones de 350-600 atm para permitir la transesterificación de 3 moles de metanol y 1 mol de triglicéridos, en orden para generar 3 moles de FAME y 1 mol de glicerol.</p> <p>El rendimiento de conversión para un tiempo de reacción de 10 minutos es de entre 60 % - 95%, con tolerancia a la presencia de agua y previene la formación de jabones especialmente cuando se separa en un método de metanol supercrítico de dos pasos.</p> <p>La desventaja principal de la TAS son sus elementos principales de alta presión y temperatura, ya que encarecen la producción; ahora, esto se puede combatir mediante el uso de aceite de bajo valor como materia prima.</p>	<p>Insensible a la presencia de agua en la materia prima y a altos contenidos de FFA.</p> <p>No requiere de un proceso de pretratamiento.</p>	<p>Alta relación molar de aceite/alcohol.</p> <p>No es factible de escalar a nivel industrial.</p>
<p>Transesterificación BIOX (cosolvente)</p>	<p>La transesterificación BIOX es un nuevo método desarrollado en la Universidad de Toronto en el que un cosolvente inerte, soluble tanto en aceite como en alcohol, genera un sistema de solución monofásico que se completa en segundos a temperatura y presión ambiente; inicialmente, el primer paso de esta técnica es la esterificación ácida de los FFA y posteriormente la transesterificación de los triglicéridos al añadir el cosolvente.</p>	<p>Sistema de solución de una fase.</p> <p>Tiempo de reacción corto.</p> <p>Condiciones de temperatura y presión ambiente.</p>	<p>Toxicidad del tetrahidrofurano.</p> <p>Difícil separación del cosolvente y metanol.</p> <p>Impacto ambiental asociado.</p>

	<p>La reacción ocurre en un rango de tiempo ente 5 – 10 minutos, permite el uso de una amplia variedad de materias primas oleosas, no cuenta con residuos de catalizador ni en la fase de éster ni en la de glicerol y los cosolventes empleados (tetrahidrofurano y metil terbutil éter) pueden recuperarse y reutilizarse continuamente, debido a que cuentan con un punto de ebullición muy cercano al metanol (30°C).</p> <p>Algunas ventajas de la transesterificación BIOX son que el biodiesel producido es económicamente competitivo con el diésel petroquímico, la separación de fases de biodiesel/glicerol es limpia y el exceso de mezcla cosolvente/alcohol puede reciclarse en un proceso simple de un solo paso; sin embargo, es importante remover por completo el tetrahidrofurano u otro cosolvente de la fase de biodiesel y glicerol, por su grado de toxicidad. La principal desventaja de este método es la difícil separación del cosolvente y el metanol, ya que sus puntos de ebullición son muy cercanos entre sí.</p>	<p>Reusabilidad del cosolvente.</p> <p>Adecuado para una amplia variedad de materia prima.</p>	
--	---	--	--

2.4. Alcoholes utilizados

Los insumos de este tipo que cuentan con una importancia significativa en la producción de biodiésel son aquellos que se definen como alcoholes alifáticos monohídricos primarios y secundarios que comprenden de 1 a 8 átomos de carbono. Se ha experimentado con una amplia gama de estos en reacciones de transesterificación; por ejemplo, el metanol y etanol son los más utilizados, pero también es posible emplear otros alcoholes de cadena corta como propanol, butanol, alcohol amílico, isopropanol, terc-butanol, alcoholes ramificados y octanol, que cuentan con costos más elevados, así como bioalcoholes. El metanol es conocido como “alcohol de madera” y es preferido particularmente debido a sus ventajas físico-químicas que son principalmente la reacción rápida con los TG, se puede disolver fácilmente en NaOH, los ésteres de metilo presentan mejores propiedades acorde a las necesidades de los motores (p.ej. menor viscosidad) y bajos

costos, ya que suele ser más fácil de encontrar (Tabla 11) en relación a otro tipo de productos similares; sin embargo, al ser un alcohol de cadena corta es sensible a la absorción de agua de la atmósfera (higroscópico) (Medina Ramírez y cols., 2012) y se debe tener cuidado en su manipulación para evitar la contaminación del mismo (Musa, 2016). Al producto final obtenido a partir de la metanólisis comúnmente se le denomina éster metílico de ácidos grasos (FAME) en vez de biodiésel (Instituto Mexicano del Petróleo [IMP], 2018).

Tabla 11. Métodos de producción de metanol y biometanol (Musa, 2016).

Metanol	Biometanol
1. Síntesis catalítica a partir de CO y H ₂ .	1. Síntesis catalítica a partir de CO y H ₂ .
2. Gas natural.	2. Destilación de líquido de pirólisis de madera.
3. Gas de petróleo.	3. Productos gaseosos de la gasificación de biomasa.
4. Destilación de líquido de pirólisis de carbón.	4. Gas sintético a partir de biomasa y carbón.

Se ha reportado que la naturaleza del alcohol utilizado en la síntesis de biodiésel no representa ninguna diferencia química, siempre y cuando el producto final cumpla con la norma ASTM D6751, pero comúnmente se evitan los alcoholes de cadena larga por su característica de ser más sensibles a la contaminación por agua y favoreciendo en mayor medida la formación de jabón en la transesterificación; por ello, los alcoholes de cadena corta proporcionan rendimientos de conversión más altos en tiempos de reacción similares. El etanol y butanol son otros insumos de gran interés en la investigación al contar con la característica de que el biodiésel producido a partir de ellos es completamente de base biológica; ya que, el metanol, propanol e isopropanol generalmente son obtenidos de materiales petroquímicos. Específicamente el etanol ha sido considerado como el sustituto más adecuado para el metanol por sus ventajas de ser neutral en CO₂, menos tóxico y ambientalmente basado; ahora bien, investigaciones han informado que su eliminación en procesos de producción, como la del isopropanol, es tanto difícil como costosa porque se forma un azeótropo con el agua y se requiere del uso de un tamiz molecular para remover el agua (Musa, 2016). EL bioalcohol con mayor potencial para la producción de biodiésel es el

bioetanol, a pesar de que la principal aplicación de este insumo es como biocombustible, cuyo principal reto es optimizar y bajar costos de las tecnologías asociadas a su producción a partir de materiales lignocelulósicos (Instituto Mexicano del Petróleo [IMP], 2018).

La recuperación del alcohol no aprovechado después de que se complete la transesterificación es esencial para minimizar el desperdicio del mismo, los impactos ambientales y costos operativos del proceso; esto, al eliminar las emisiones de alcohol al entorno (tóxico y altamente inflamable) y recuperar el exceso residual para emplearse en procesos posteriores (disminuyendo los costos de materia prima). Los métodos mencionados en distintas investigaciones para recuperar el alcohol del biodiésel obtenido son por medio de destilaciones al vacío o convencionales, evaporación (evaporador de película descendente, evaporador rotatorio al vacío), embudos de separación, intercambiadores de calor, recuperación parcial en una sola etapa flash y lavado con agua destilada. En la transesterificación catalizada por enzimas se elimina este proceso de recuperación, ya que las enzimas se inactivan a concentraciones altas de alcohol (Musa, 2016).

2.5. Glicerol

Es el subproducto obtenido al producir biodiésel y representa al menos un 10% del volumen de la mezcla resultante de un proceso de transesterificación (He y cols., 2017); en otras palabras, se produce biocombustible y glicerol en una relación volumétrica de 10:1 respectivamente. El aumento mundial en la síntesis de biodiésel supone a su vez un incremento en la generación de glicerol, entre 2008 y 2012 anualmente creció un 9.3% la producción global de este subproducto y se estima que para 2025 el crecimiento será de 3.5% anual; ahora bien, es importante encontrar opciones de usos para este insumo o de lo contrario podría convertirse en una barrera para escalar la producción del biocombustible a cantidades mayores y causar problemas ambientales que se opondrían a las ganancias de reemplazar los combustibles fósiles con recursos renovables. En 2011, 2 millones de toneladas (t) de glicerol de un total de 5.1 millones (40%) fueron utilizadas y las poco más de 3 millones de toneladas restantes quedaron como excedentes (Monteiro y cols., 2018). He y cols. (2017) reportaron que el mercado mundial de glicerol llegaría a los 2,520 millones de USD en 2020, cifra que representan más de 1,400 kt de producción de este insumo en relación al año 2013, sobresaliendo la producción de biodiésel como principal fuente de obtención.

El glicerol puro es una materia prima renovable que se usa principalmente en la industria química (nitroglicerina, fabricación de jabón, tabletas sublinguales, etc.), pero su versatilidad derivada de la amplia variedad de reacciones químicas que se pueden emplear con este insumo para convertirlo en precursores sintéticos o en materiales con mayor valor agregado le permite tener aplicaciones en otras áreas como de cuidado personal (pastas de dientes y enjuagues bucales), médica (inmunoterapias con alérgenos), cosmética, farmacéutica (jarabes para la tos), alimentaria (humectante, solvente, edulcorante y conservante de bebidas y alimentos), automotriz (anticongelantes) y botánica (extractos) (Babadi y cols., 2022); sin embargo, el glicerol producido en la síntesis de biodiésel o comúnmente denominado “glicerol crudo” (45% - 90% glicerol puro), contiene impurezas como sales disueltas sobrantes de la transesterificación, restos de catalizador, ésteres alquílicos de ácidos grasos, agua y biocombustible que hacen inviable su uso en las industrias tradicionales a pesar de los bajos precios en el mercado (He y cols., 2017). Monteiro y cols. (2018) informan que el precio de mercado del glicerol crudo con 80% de pureza es de entre \$0.09 – \$ 0.20 USD por kg y para el glicerol puro estas cifras llegan a \$0.60 - \$0.91 USD por kg; por otra parte, mencionan que los datos del mercado brasileño de glicerol correspondientes al año 2012 mostraron que el valor de una tonelada de glicerol con una pureza del 99,7% era cinco veces mayor al de una tonelada de glicerol crudo.

Leaf Resources es una empresa líder a nivel mundial que patentó un proceso centrado en el uso eficiente de glicerol crudo, como un reactivo reciclable de bajo costo, para el desarrollo de una tecnología innovadora de deconstrucción de biomasa vegetal; este, se conoce como “Glycell” y es capaz de producir un alto rendimiento de azúcares concentrados de celulosa y hemicelulosa de alta calidad que a su vez permiten la fabricación de productos químicos renovables a un costo competitivo. Los principales beneficios de este proceso son (Babadi y cols., 2022):

- Obtención de azúcares celulósicos económicos y de alta pureza.
- Bajos costos operativos y de capital.
- Celulosa altamente accesible.
- Diseño de procesos continuos.

Las plantas de biodiésel, al estar enfocadas en los aspectos tecnológicos de producción y almacenamiento de biocombustible, generalmente tratan el glicerol crudo como desecho industrial y se vende sin ningún tipo de tratamiento, debido a que el costo de refinación es muy alto, o es

aprovechado para generar energía; no obstante, la alta viscosidad del subproducto, bajo poder calorífico, alta temperatura de autoignición y contenido de sales representan características inconvenientes para su combustión debido a que dificultan el rociado de flujo, el bombeo y la estabilidad de llama. Además, la quema continua promueve altas emisiones de GEI al medioambiente y la formación de un aldehído insaturado que representa riesgos considerables para la salud humana (acroleína). De acuerdo a las bases de datos del Instituto Nacional de Propiedad Industrial de Brasil (INPI), la Oficina de Patentes y Marcas del Departamento de Comercio de EE.UU. (patentes emitidas USPTO-IP y solicitudes de patentes USPTO-PA), la Oficina Europea de Patentes (EPO), la Organización Mundial de la Propiedad Intelectual (WIPO) y el índice mundial de patentes de Derwent se tiene que el 85.7% de las patentes relacionadas con aplicaciones de glicerol en el período 2002 -2015 se pueden clasificar en 4 categorías que incluyen la elaboración de productos químicos, síntesis de compuestos poliméricos, producción de biocombustibles y biogás, y la purificación y uso de glicerol crudo (Monteiro y cols., 2018).

A continuación, en la Tabla 12, se desglosan las principales aplicaciones del glicerol crudo derivado de la síntesis de biodiésel, incluyendo las categorías mencionadas anteriormente.

Tabla 12. Aplicaciones del glicerol crudo.

Aplicación	Descripción
<p>Fabricación de productos químicos (Monteiro y cols., 2018).</p>	<p>Transformación química de glicerol crudo mediante reacciones catalíticas de oxidación, deshidratación, acetilación, esterificación, reformado, eterificación, entre otros, para obtener productos derivados con potencial energético para competir con productos elaborados a partir de petróleo (p. ej. los éteres alquílicos terciarios). Se han identificado éteres, acetales y acetis de glicerol como aditivos de alto valor capaces de sustituir a aquellos fabricados en base a materias primas de origen fósil.</p> <p>Síntesis del compuesto 1,3 propanodiol que es importante en aplicaciones de medicina, polímeros, cosméticos, alimentos, adhesivos, lubricantes,</p>

	<p>solventes, entre otros. Implica cuestiones ambientales.</p> <p>Síntesis del compuesto 1,2 propanodiol que tiene aplicaciones en resinas de poliéster insaturadas (agentes congelantes y descongelantes), productos farmacéuticos, alimentos, cosméticos, detergentes líquidos, saborizantes, productos para el cuidado personal y pinturas.</p> <p>Síntesis de productos intermedios de clorhidrina, valiosos para producir epicloridina (monómero de resina epóxido), mediante hidroclicación (Babadi y cols., 2022).</p> <p>Deshidratación de glicerol crudo a acroleína, que debido a su toxicidad se convierte de inmediato a sus derivados de alto valor agregado. La mayor parte de acroleína se emplea para la síntesis de ácido acrílico (Babadi y cols., 2022).</p>
<p>Producción de compuestos poliméricos (Monteiro y cols., 2018).</p>	<p>Elaboración de polioles y/o ácido acrílico o propenoico que posteriormente se polimerizan para la producción de polímeros como poliéster, poliuretano y acrílico. El ácido acrílico es un producto químico intermedio muy importante para la obtención de acrilatos, empleados en revestimientos a base de agua, pinturas, acabados de cuero, revestimientos de papel y en la fabricación de plásticos, telas, productos químicos intermedios, entre otros productos.</p> <p>Uso de glicerol crudo para la producción de plásticos biodegradables. Por ejemplo, propeno (propileno) que es uno de los monómeros olefínicos más importantes para la industria de fabricación de polímeros, generalmente obtenido de recursos fósiles, y se usa para la fabricación de derivados acrílicos para pinturas, adhesivos, fibras y polímeros superabsorbentes; además, es la materia prima del</p>

	<p>polipropileno (empleado en el envasado de alimentos, productos de higiene y limpieza, juguetes, material hospitalario, piezas de automóviles, alfombras, tejidos, muebles, etc.).</p>
<p>Producción de alcoholes (He y cols., 2017).</p>	<p>El glicerol crudo puede servir como fuente de carbono para un cultivo de microorganismos (bacterias y/o levaduras) capaz de fermentarlo para producir alcoholes.</p> <p>Producción de etanol mediante el uso de <i>Pachysolen tannophilus</i> CBS4044, <i>Klebsiella pneumoniae</i> GEM167, <i>Kluyvera cryocrescens</i>, <i>Enterobacter aerogenes</i> y <i>Escherichia coli</i>.</p> <p>Producción de butanol (así como 1,3 propanodiol) mediante el uso de <i>Clostridium pasteurianum</i>.</p> <p>Los cultivos de microorganismos son generalmente muy específicos y costosos.</p>
<p>Producción de hidrógeno (He y cols., 2017).</p>	<p>Producción de hidrógeno limpio, con densidad energética alta y cuyo único subproducto es agua a partir de fermentación de glicerol crudo (así como para producción de alcoholes).</p> <p>La conversión de glicerol crudo a hidrógeno por medio de fermentación oscura usa microbios como <i>Klebsiella</i> sp., <i>Clostridium pasteurianum</i>, <i>Clostridium butyricum</i>, <i>Thermotoga neapolitana</i> o una colección de varios microorganismos.</p> <p>La enzima más usada para la conversión de glicerol crudo a hidrógeno por medio de fotofermentación (requiere de una fuente de luz) es <i>Rhodospseudomonas palustris</i> en una solución nutritiva.</p> <p>Chookaew y cols., 2015 han investigado la posibilidad de implementar tanto la fermentación</p>

	<p>oscura como la fotofermentación, en un proceso de dos etapas, para la producción de hidrógeno.</p> <p>Estudios han reportado la producción de hidrógeno a partir de reformado con vapor (SR), reformado por oxidación parcial (POR), reformado en fase acuosa (APR), reformado autotérmico (ATR), reformado con agua supercrítica (SWR) y reformado en fase líquida (LPR) de glicerol crudo. Los principales procesos de reformado de glicerol involucran reactores de lecho fijo, catalizadores y temperaturas en el rango de 300 – 900 °C (Monteiro y cols., 2018).</p>
<p>Producción de biogás (He y cols., 2017).</p>	<p>Producción de biogás (principalmente metano e hidrógeno) mediante co-digestión de biomasa y glicerol crudo. La descomposición de la materia prima se da por medio del uso de comunidades microbianas a temperaturas bajas.</p> <p>El glicerol crudo es muy beneficioso en procesos de co-digestión porque mejora la tasa de carga orgánica (OLR), es altamente biodegradable, reduce la concentración de amoníaco y mejora la proporción de carbono a nitrógeno. La fracción sólida digerida (residual) suele ser adecuada para posteriormente emplearse como fertilizante.</p> <p>El uso de glicerol crudo como co-sustrato en la digestión anaeróbica ha demostrado mejoras en el rendimiento de biogás; ahora, la sobrecarga de este insumo en el digestor puede causar ineficiencias y fallas.</p> <p>Se puede añadir glicerol crudo a procesos de co-digestión con estiércol de porcino, residuos de frutas y verduras, residuos sólidos orgánicos, lodos de depuradora (aguas residuales), entre otros (Monteiro y cols., 2018).</p>

	<p>La co-digestión anaeróbica de biomasa y glicerol crudo también permite producir hidrógeno (biohidrógeno) (Monteiro y cols., 2018).</p>
<p>Usos como aditivo (Monteiro y cols., 2018).</p>	<p>La eterificación catalítica del glicerol crudo es una ruta química por medio de la que se obtienen aditivos como mezclas oxigenadas para su uso con combustible diésel.</p> <p>Eterificación del glicerol crudo con olefinas ligeras, en fase líquida, para permitir un mayor volumen de mezcla de estas con combustible diésel y biodiésel, como aditivo.</p> <p>Aditivos oxigenados para combustibles, derivados del glicerol (dietilenglicol, propilenglicol y dimetiléter), han sido estudiados ya que mejoran el proceso de combustión y rendimiento del motor (disminuyendo la viscosidad y mejorando tanto la calidad, como las propiedades en frío del combustible).</p> <p>El uso de aditivos derivados de glicerol crudo con biodiésel, pueden ayudar a cumplir con estándares regulatorios y representa un método para eliminar desechos del biocombustible (He y cols., 2017).</p> <p>El glicerol crudo se ha usado como aditivo en distintos procesos termoquímicos de conversión de biomasa, debido a que aumenta el rendimiento de síntesis tanto de syngas (gasificación y pirólisis) como de bioaceite (licuefacción) (He y cols., 2017).</p>
<p>Purificación y uso de glicerol crudo (Monteiro y cols., 2018).</p>	<p>La purificación se puede realizar mediante procesos como la destilación al vacío y la adsorción de intercambio iónico. El primero evita la degradación del glicerol (permitiendo obtener un producto de alta pureza), utiliza tecnología ya establecida, se puede aplicar a pequeña y gran escala, emplea productos químicos de bajo costo y es adaptable a distintas</p>

	<p>calidades de glicerol crudo; por otro lado, el segundo proceso elimina FA, sales inorgánicas e iones libres.*</p> <p>Dhabhai y cols. (2016) reportaron la purificación de glicerol crudo mediante un tratamiento fisicoquímico secuencial, en el que se incluyen procesos de saponificación, acidificación, separación de fases y extracción, obteniendo un rendimiento máximo del 97.5% de glicerol de alta pureza.</p> <p>Las industrias de alimentos, farmacéuticas y cosméticas son los mayores mercados de consumo de glicerol de alta pureza.</p>
--	--

De la tabla anterior cabe resaltar que la búsqueda de soluciones tecnológicas, cuyo objetivo sea utilizar el glicerol crudo como materia prima para otros productos, se da principalmente por empresas o instituciones que no pertenecen a la cadena productiva del biodiésel (Monteiro y cols., 2018). La economía general del proceso de producción se mejora a través del aprovechamiento de este subproducto (Atadashi y cols., 2011); ahora bien, otra rama de investigación asociada a la superación del problema de aprovechamiento del glicerol es el desarrollo de nuevos métodos de síntesis de biodiésel que permitan reemplazar al alcohol en la reacción (p. ej. con acetato de metilo o carbonato de dimetilo) y así obtener nuevos subproductos valiosos. Se puede lograr la producción sin glicerol principalmente por medio de 3 técnicas (Babadi y cols., 2022):

- Reacción catalítica homogénea: mediante la implementación de un catalizador como la mezcla de polietilenglicolato (PEG) y metóxido de potasio (CH_3KO) en presencia de acetato de metilo. El subproducto de esta técnica es triacetina; pero, la complejidad de los pasos de purificación, la alta generación de aguas residuales y la imposibilidad de reutilizar el catalizador aumentan significativamente el costo de procesamiento.
- Reacción catalítica heterogénea: mediante el uso de acetato de metilo en presencia de metóxido de sodio (interesterificación). El subproducto obtenido es triacetina y, cabe resaltar, que este método no se ve afectado por la presencia de agua o alcohol; además, se hace más fácil la regeneración del catalizador y la separación de productos de las materias primas.

- Reacción no catalítica: al no emplear un catalizador, la purificación y separación de productos son más sencillas; más aún, esta tecnología no es sensible a la presencia de agua y exceso de FFA.

2.6. Separación y purificación del biodiésel

Terminada la reacción de transesterificación, se lleva a cabo la separación de las fases de biodiésel y glicerol convencionalmente a través de asentamiento gravitacional, decantación, centrifugación, filtración o sedimentación (Atadashi, Aroua, Raman y cols., 2011); esto, se basa en que existe una diferencia de densidad entre ambas fases que permite la aplicación de dichas técnicas simples (biodiésel 880 kg/m^3 y glicerol crudo 1050 kg/m^3). Los principales factores que influyen en la tasa del proceso de separación del biocombustible son la intensidad de mezcla, formación de emulsión, solubilidad del producto final en el subproducto y viceversa; más aún, este se puede beneficiar o afectar por características de la transesterificación como el catalizador usado en la reacción, proporción empleada de aceite a alcohol y contenido de agua y FFA de la mezcla final (Atadashi y cols., 2011). Los ésteres alquílicos de FA no pueden clasificarse como biodiésel hasta que se cumpla con las estrictas especificaciones de las normas ASTM D6751 (estándar americano) o UNE EN14214 (estándar europeo); por ello, la etapa de purificación del biocombustible crudo obtenido es de gran importancia y en caso de no tratarse se mantendrían impurezas en el mismo, como restos de glicerol libre, jabón, alcohol, FFA, catalizador, metales, agua y glicéridos (ver Tabla 13) que disminuyen su calidad, afectan el rendimiento del motor y disminuyen la vida útil de este último (Berrios & Skelton, 2008).

Tabla 13. Efectos negativos de las impurezas en biodiésel y motores (Atadashi, Aroua, Raman, y cols., 2011).

Impureza	Efecto negativo en biodiésel	Efecto negativo en motores
Alcohol (principalmente metanol)	Puntos de inflamación más bajos, causando problemas de almacenamiento, transporte y uso). Valores de viscosidad y densidad más bajos.	Corrosión de piezas de aluminio (Al) y zinc (Zn). Deterioro de sellos y juntas de caucho natural.

Agua	Promueve la formación de FFA, mediante hidrólisis. Reduce el calor de combustión.	Corrosión de componentes del sistema como tubos de combustible y bombas inyectoras. Fallas en la bomba de combustible. Crecimiento bacteriológico que causa el bloqueo de los filtros y picaduras en los pistones.
Metales (catalizador / jabón)	Formación de cristales de hielo que resultan en la gelificación del combustible residual.	Daños a los inyectores y problemas de corrosión. Bloqueo de filtros y debilitamientos del motor.
FFA	Menor estabilidad a la oxidación.	Corrosión de componentes vitales.
Glicerol libre	Decantación y problemas de almacenamiento. Problemas de sedimentación. Mayores emisiones de aldehídos y acroleína.	Formación de depósitos en el fondo del tanque de combustible. Incrustaciones en los inyectores. Graves problemas de durabilidad del motor.
Glicéridos	Cristalización y turbidez. Valores de viscosidad más altos.	Formación de depósitos en pistones, válvulas y boquillas de inyección.

El refinado de biodiésel crudo representa de un 60% a 80% del costo total del proceso de producción, los dos métodos más aceptados de purificación son los lavados húmedos y secos; los primeros, son convencionalmente los más utilizados para eliminar las impurezas mencionadas anteriormente ya que estas son altamente solubles en agua (Berríos & Skelton, 2008), pero cuentan con las desventajas de difícil separación de la fase de agua de la fase de biocombustible, generación de una gran cantidad de aguas residuales (10 L por litro de biodiésel), y aumento tanto de costo como de tiempo de producción para obtener el producto final. Por otra parte, los lavados secos se basan en la sustitución de agua por adsorbentes ácidos y básicos afines a compuestos polares como

el metanol, glicerina, glicéridos, catalizadores y jabón; sin embargo, la química de estas sustancias aún se encuentra en etapas tempranas de desarrollo para su comprensión total. Estos últimos se introdujeron con el propósito de reemplazar a los lavados húmedos porque cuentan con ventajas de llevarse a cabo sin agua, alta afinidad con compuestos polares, facilidad de integración en plantas existentes, tiempo de purificación significativamente menor, no genera aguas residuales, minimiza la cobertura del área de superficie total del tanque de lavado, los desechos sólidos tienen usos alternativos (composta, aditivo potencial para alimentos de animales y potencial combustible), ahorra espacio y mejora la calidad del combustible. Ambas técnicas de lavado se emplean en plantas comerciales para purificar biodiésel y cada una puede llevarse a cabo mediante las siguientes formas, descritas en la Tabla 14 (Atadashi, Aroua, Raman y cols., 2011):

- Lavados húmedos: lavado con agua desionizada (destilada), lavado con ácido y agua, y lavado con solvente orgánico y agua.
- Lavados secos: lavado con polvo de silicatos (magnesol o trisil), lavado con resinas de intercambio iónico y lavado con otros adsorbentes (agentes de lavado en seco).

Tabla 14. Características de los distintos tipos de lavados húmedos y secos (Atadashi, Aroua, Raman y cols., 2011).

Tipo de lavado	Descripción
Lavado con agua desionizada (destilada).	<p>Todos los métodos de lavado húmedo involucran agua calentada y ablandada, tratamiento de aguas residuales y separación de fases (agua/alcohol de biodiésel).</p> <p>La aplicación de agua destilada (120 – 140 °F) junto con un lavado suave con agua puede eliminar la precipitación de biodiésel saturado y prevenir la formación de emulsiones.</p> <p>En ocasiones es necesario eliminar el exceso de alcohol antes del paso de lavado (mediante destilación o evaporación).</p>

	<p>Se ha reportado que tras la separación de fases de biodiésel y glicerol, se agrega agua desionizada al biocombustible crudo a una razón de 5.5% por volumen de la materia prima y la mezcla se agita por 5 min. Finalmente, se deja reposar para la eliminación del glicerol.</p> <p>Investigaciones han señalado que lavar dos veces es suficiente para eliminar las impurezas de los ésteres alquílicos de ácidos grasos.</p> <p>En orden para remover totalmente los restos de catalizador del producto, primero se debe someter el biodiésel a una neutralización ácida seguida del lavado con agua (Atadashi y cols., 2011).</p>
<p>Lavado con ácido y agua.</p>	<p>Se agregan ácidos al producto transesterificado y separado del subproducto, con la finalidad de neutralizar el catalizador y descomponer los jabones formados (Atadashi y cols., 2011).</p> <p>Este proceso es seguido de un lavado con agua destilada para asegurar la eliminación de impurezas.</p> <p>Los ácidos utilizados comúnmente son ácido fosfórico, ácido sulfúrico y ácido clorhídrico.</p> <p>El biodiésel debe ser secado adecuadamente para su uso inmediato en motores y almacenamiento a largo plazo.</p> <p>Estudios muestran que el porcentaje de ácido para la neutralización está en el rango de 5% - 10% respecto al volumen total de biocombustible a purificar.</p>
<p>Lavado con solvente orgánico y agua.</p>	<p>El uso de solventes orgánicos como el éter de petróleo requiere de un posterior lavado con agua destilada caliente (~ 50 – 60 °C y en grandes cantidades) para eliminar las impurezas del biodiésel crudo, hasta que este alcance un valor de pH neutro.</p>

	<p>Investigaciones informan que, tras haber lavado el biocombustible con el solvente orgánico es necesario hacer hasta 3 lavados con agua desionizada.</p> <p>Se han realizado lavados de este tipo con mezclas de agua destilada caliente y éter de petróleo, en una proporción de 1:1. Tras este proceso es necesario lavar el biodiésel únicamente con agua destilada caliente (Atadashi y cols., 2011).</p>
<p>Lavado con magnesol.</p>	<p>Todos los métodos de lavado seco se llevan a cabo a temperaturas de alrededor de 65 °C y se completan en un rango de tiempo de 20 – 30 minutos. Requieren de un uso posterior de un filtro que permite una mayor efectividad y eficiencia del proceso de purificación.</p> <p>El volumen en peso de magnesol (silicato de magnesio sintético) requerido para este proceso debe corresponder a un 1.5% - 3% del volumen en peso de biodiesel a tratar y mezclarse completamente.</p> <p>Posteriormente, la mezcla se pasa por un filtro de tela con un tamaño de poro de 5 µm y se utiliza un filtro nominal de 1 µm para la filtración final.</p> <p>Antes de ser utilizado como combustible, el producto final se pule a través de un filtro con tamaños de poro de entre 0.45 µm y 0.55 µm.</p> <p>Este tipo de lavado, implementando filtros adecuados, ha probado ser eficiente para disminuir los niveles de glicéridos y glicerol total en el biodiésel (Atadashi y cols., 2011).</p> <p>Su uso es promovido en Reino Unido por la empresa Hydrotechnik y en EE.UU. por Dallas Corporation (Berrios & Skelton, 2008).</p>
<p>Lavado con resinas de intercambio iónico.</p>	<p>Las resinas de intercambio iónico son matrices insolubles o estructuras de soporte, normalmente en forma de perlas pequeñas con diámetros de entre 1</p>

	<p>mm – 2 mm, de color blanco o amarillento. Están hechas a partir de un sustrato de polímero orgánico y son promovidas como agentes de lavado en seco por sus fabricantes: Purolite (resina PD206) y Rohm & Haas (resina BD10 Dry).</p> <p>PD206 es un medio de pulido en seco específicamente elaborado para eliminar subproductos residuales de la producción de biodiésel.</p> <p>A pesar de que son vendidos como materiales de intercambio iónico, los proveedores no recomiendan su regeneración en su uso normal ya que actúan como adsorbentes.</p> <p>Para estudiar este tipo de lavado se han reportado experimentos en los que se alimenta una columna de resina, soportada en un tubo de vidrio, con biodiesel y utilizando una bomba dosificadora para controlar el flujo.</p> <p>Investigaciones han demostrado que las resinas de intercambio iónico ofrecen buen rendimiento en la eliminación de glicerina, agua, sales, jabón y catalizador. Por otra parte, tienen menos efecto en la remoción de metanol.</p>
<p>Lavado con otros adsorbentes (agentes de lavado en seco).</p>	<p>Otros adsorbentes sólidos usados para purificar biodiésel crudo incluyen arcilla activada, carbón activado, fibras activada y arcilla ácida (Atadashi y cols., 2011).</p> <p>Para un lavado en seco efectivo, el adsorbente debe canalizarse hacia un tanque tipo paleta y mezclarse completamente.</p>

Las dificultades asociadas tanto a los métodos de separación como a la operación de los lavados húmedos y secos han impulsado el desarrollo de la tecnología de membranas. Estos equipos son producidos para cumplir con ambos objetivos y han exhibido ciertas ventajas ante los procesos convencionales de reducir costos de capital y otros costos relacionados, así como

proporcionar una alta área específica de transferencia de masa; asimismo, suelen estar hechos de membranas cerámicas microporosas inorgánicas que cuentan con una amplia gama de aplicaciones en biotecnología. Los dispositivos más adecuados para el tratamiento de biodiésel crudo son los reactores de membrana y las membranas cerámicas de separación; por otra parte, en esta tecnología el tamaño de poro de la membrana es una característica importante a tomar en cuenta y se deben estimar los tamaños mínimos de partículas en la emulsión de la mezcla final de la transesterificación para realizar procesos eficientes de separación y refinación (Atadashi y cols., 2011).

2.7. Estado del arte de la intensificación del proceso de transesterificación asistida por ultrasonidos

Las tecnologías de intensificación del proceso de transesterificación existentes incluyen el uso de mezcladores microtubulares, microondas, destilación reactiva, reactores de flujo oscilatorio, mezcladores estáticos y cavitación sonoquímica (Sun y cols., 2023). Chatel (2018) mostró el aumento continuo en la publicación anual de artículos relacionados con química verde y procesos ecológicos basados en ultrasonido, en la revista “Ultrasonics Sonochemistry”, cuya proporción pasó de 4.8% en el año 2000 a 33.3% en 2016; esto, se relaciona con el amplio reconocimiento de la efectividad de estos métodos, la evolución de los proyectos y al aumento de la financiación institucional que permiten procesos cada vez más sostenibles, apegados a los doce principios de la química verde propuestos por Paul T. Anastas y John C. Warner en 1998; de igual forma, el estudio menciona que Jean-Louis Luche junto con Pedro Cintas establecieron la conexión entre la química verde y la sonoquímica, destacando que las ventajas de esta última son el cambio del curso de una reacción para conseguir nuevas selectividades por medio de conmutación sonoquímica, mejorar las tasas de rendimiento, ahorro de energía, reducción de desechos y la posibilidad de utilizar reactivos no clásicos o reactivos obtenidos en condiciones inusuales (incluso medios acuosos que son más seguros). A partir de datos obtenidos del sitio web “Scopus”, en enero de 2017, se obtuvo que desde el año 2000 se han incluido conceptos de química verde/amigable con el ambiente/sustentable asociados con ultrasonido/sonoquímica en alrededor de 900 artículos de investigación correspondientes a las áreas de química (25%), ingeniería química (24%), medicina y farmacología (16%), ciencia de materiales (10%), física (9%), bioquímica y biología molecular (7%), ciencias ambientales (5%), ciencias agrícolas (3%) y otras (1%); asimismo, cabe resaltar que el 10.8% de estos artículos fueron publicados en “Ultrasonics Sonochemistry” y esto refleja el reconocimiento

de esta revista dentro de la comunidad científica como referencia para la publicación de este tipo de trabajos (Chatel, 2018).

El efecto sonoquímico en la actualidad es un medio de intensificación de procesos para catálisis, extracción, síntesis y degradación que se origina del fenómeno de cavitación; el cual, es un rápido proceso de cambio de fase que involucra la nucleación, crecimiento y colapso de numerosas cavidades de vacío en un líquido (burbujas de cavitación), formadas de vapor, gases y/o aire. La gran cantidad de energía liberada por el colapso de las burbujas genera efectos mecánicos, térmicos y químicos en condiciones ambientales que eventualmente crea un entorno de reacción extremo de fuerte impacto físico (ondas de choque, microchorro y esfuerzo cortante), a alta temperatura (~ 5,000 K) y alta presión (~ 1,000 bar), produciendo radicales libres de hidroxilo e hidrógeno por la sonólisis de moléculas de agua. La cavitación puede generar otros efectos secundarios como turbulencia intensa, oscilación mecánica (fuertes corrientes de circulación), emulsificación, dispersión, trituración y calentamiento; por ello, las condiciones sonoquímicas pueden favorecer sustancialmente la mezcla e interacción de los reactivos en sistemas homogéneos y heterogéneos (Tabla 15), reducir las condiciones requeridas para las reacciones y acelerar tanto la tasa de transferencia de masa como la tasa de reacción, intensificando el rendimiento y selectividad de los productos deseados (Sun y cols.,2023). Una limitación principal de la sonoquímica es el problema de la reproducibilidad, que puede combatirse mediante la caracterización rigurosa de los parámetros asociados a ella al permitir la comprensión de la química asociada a estas tecnologías y facilitar la comparación entre los estudios existentes en la literatura; entonces, es importante informar detalladamente las condiciones experimentales de cada publicación incluyendo la frecuencia, potencias eléctricas y acústicas, intensidad ultrasónica, producción de radicales, así como la forma y geometría de los reactores utilizados. (Chatel, 2018).

Tabla 15. Efectos de la cavitación en sistemas reactivos homogéneos y heterogéneos (Zore y cols., 2021).

Sistemas de reacción	Efectos de la cavitación
Homogéneos	La implosión de las cavidades genera ondas de choque que provocan la alteración de la estructura del solvente, impurezas o moléculas de agua; lo cual, conduce a la formación de radicales libres, carabinas, entre otras. Esto es atribuido a la fragmentación

	<p>hemolítica de las especies bajo altas temperaturas y presiones.</p> <p>Estudios de investigación sugieren que las presiones de las ondas de choque y la capa del medio son un sitio activo de reacción.</p>
Heterogéneos	<p>El impacto de la cavitación es profundo en las reacciones de emulsificación líquido-líquido; además, experimentos han mostrado velocidades de reacción mejoradas debido al aumento de las áreas de contacto. En reacciones de transferencia de fase se elimina el uso de catalizadores y la ruptura de las películas líquidas permite una reducción de la resistencia a la difusión.</p>

Existen dos formas de inducir el efecto sonoquímico, la primera se denomina cavitación hidrodinámica y fue observada por Euler en el año 1756 en ruedas hidráulicas; esta, se forma en dispositivos de fluidos y tuberías cuando la presión estática local de los líquidos cae por debajo de la presión de vapor saturado, debido a que fluyen a través de una constricción o alrededor de un obstáculo (p.ej. una boquilla Venturi), formándose cavidades de vapor (Sun y cols., 2023). La segunda se denomina cavitación acústica o inducción por ultrasonidos y fue descubierta a principios del año 1927 por Richards y Loomis; a diferencia de la anterior, se produce cuando un líquido es sometido a ondas ultrasónicas intensas típicamente en un rango de frecuencia de entre 20 kHz - 10MHz (Zore y cols., 2021). El estado del arte actual de estas tecnologías son los reactores sonoquímicos, cuyo diseño es complicado debido a la física múltiple involucrada, que principalmente emplean irradiación ultrasónica para producir productos químicos más rápido e intensificar los rendimientos de distintas reacciones (Hussain & Janajreh, 2018); por otro lado, recientemente se ha experimentado ampliamente con reactores de cavitación hidrodinámica (no rotacionales, rotacionales avanzados, rotacionales avanzados tipo cizalla y rotacionales avanzados tipo interacción) para lograr los mismos objetivos (Sun y cols., 2023). La aplicación de estos dispositivos se concentra en su mayoría dentro de los campos químicos de productos farmacéuticos, síntesis de nanomateriales, cristalización, tratamiento de aguas residuales y producción de biocombustibles (Hussain & Janajreh, 2018).

La intensificación en la síntesis de biodiésel mediante reactores sonoquímicos de cavitación acústica puede conseguirse mediante distintas posibles configuraciones, dependiendo del objetivo de su implementación (caracterización o procesamiento tanto a escala piloto como comercial), que cuentan con parámetros de operación óptimos propios a cada una y se distinguen entre sí principalmente por la geometría de los transductores y las frecuencias de funcionamiento; en general, estos se pueden clasificar en reactores de inmersión directa o sistemas con fuente de ultrasonido concentrada (bocina ultrasónica) y reactores de irradiación indirecta o sistemas con fuente de ultrasonido distribuida (baño ultrasónico, celdas de flujo, etc.), cuya sonicación puede realizarse en modo continuo o por pulsos y la investigación se ha concentrado en el desarrollo de modificaciones a los diseños básicos para conseguir una actividad cavitacional uniforme (Gole & Gogate, 2012b). Es importante mencionar que anteriormente los reactores eran de tipo discontinuo y podían procesar productos químicos únicamente por lotes, lo que representa problemas de escalamiento porque para aumentar el volumen de producción se necesitan dispositivos de gran tamaño que están marcados como energéticamente ineficientes, económicamente inviables y con problemas para su fabricación; por lo que, para superar dichas deficiencias, en la actualidad se busca el desarrollo de reactores de flujo continuo donde los productos químicos fluyen a través del dispositivo mientras se les induce ultrasonido para convertir los reactivos en productos, pero esta es una técnica relativamente nueva que requiere de investigación en términos de diseño del reactor y comprensión física de la sonicación acústica (dinámica de fluidos, propagación de ondas acústicas y cinética de reacción). Uno de los principales inconvenientes a combatir es la atenuación de la onda acústica ocasionada por las nubes de burbujas de cavitación, que obstruyen el camino de las ondas; este, es un fenómeno que limita el aumento de los volúmenes de producción debido a que restringe el tamaño de los reactores sonoquímicos (Hussain & Janajreh, 2018).

Los reactores de bocina ultrasónica, también conocidos como homogeneizadores ultrasónicos de tipo sonda, consisten típicamente en un transductor encargado de generar energía acústica de altas intensidades que se dispersa totalmente a través de la punta de una sonda piezoeléctrica llamada bocina o sonotrodo hacia el contenido del recipiente que funge como reactor (Figura 8), el generador puede ser una unidad separada del transductor dependiendo de los volúmenes capaces de tratar por el sistema ultrasónico. La transmisión acústica ocurre hacia la superficie libre o el líquido dentro del reactor y experimenta reflejos en las paredes del mismo, provocando una recirculación mixta; más aún, su intensidad disminuye con el aumento de la

distancia desde la punta del sonotrodo y la literatura determina que la zona de cavitación activa está restringida en un rango de 3 a 5 cm acorde tanto a la entrada de energía como a la frecuencia de operación. Este dispositivo es óptimo para operaciones discontinuas a pequeña escala y donde es importante una agitación vigorosa; por ejemplo, se recomienda un diseño básico de este tipo de reactor para estudios de caracterización a escala de laboratorio, pero implementando determinadas mejoras como un sonotrodo que vibre longitudinalmente se vuelve factible el procesamiento continuo a gran escala (Gole & Gogate, 2012b).

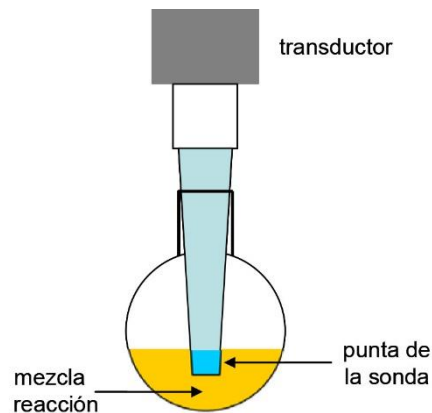


Figura 8. Esquemas del diseño básico de un reactor sonoquímico discontinuo de tipo sonda (3.6.3 Sondas Ultrasónicas | Técnicas Y Operaciones Avanzadas En el Laboratorio Químico (TALQ), s. f.).

Los reactores de baño ultrasónico se componen de un arreglo de transductores colocados en el fondo del recipiente que funge como reactor, donde el generador ultrasónico suele ser una unidad separada (Figura 9); asimismo, se ha reportado que la zona de cavitación más activa es inmediatamente encima del plano construido por los transductores y con máxima intensidad en el centro de cada uno de dichos elementos. El área de irradiación ultrasónica es considerablemente mayor en relación a los dispositivos basados en un solo transductor; lo cual, implica una mejor distribución de la energía incidente en el contenido del reactor. La configuración de los transductores puede ser en forma triangular, hexagonal o cualquier otra disposición que permita maximizar la zona de cavitación activa (Gole & Gogate, 2012b).

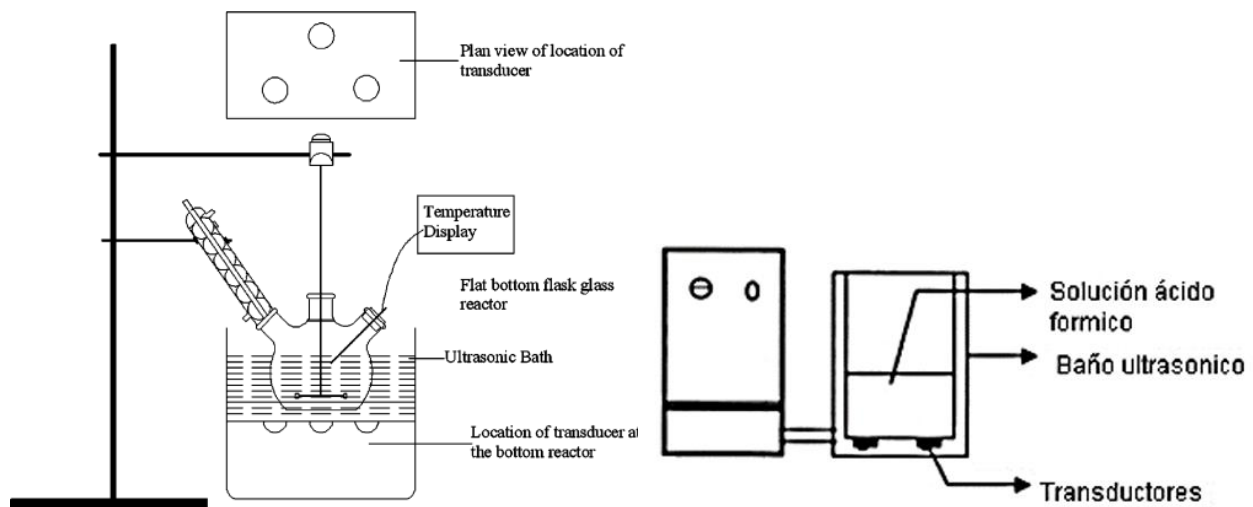
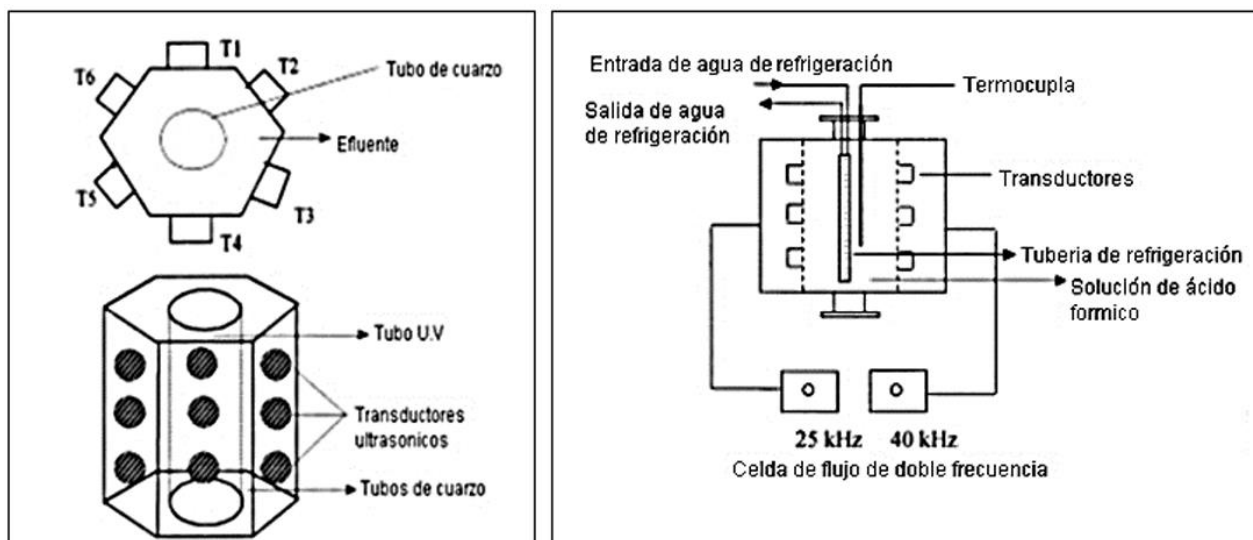


Figura 9. Representaciones del diseño básico de un reactor sonoquímico discontinuo de tipo baño ultrasónico (Gole & Gogate, 2012a) (Arias Sierra, 2022).

Los reactores de celda de flujo cuentan con la versatilidad para operar por lotes, de manera continua, procesar volúmenes pequeños (escala laboratorio) y producción industrial. En estos dispositivos el material atraviesa el espacio confinado de la cámara de la celda y se permite la operación con frecuencias múltiples, ya que este elemento está equipado con transductores en cada uno de sus múltiples lados (Figura 10), brindando una actividad cavitacional uniforme además de una mayor intensidad de la misma a niveles similares de disipación de potencia (Gole & Gogate, 2012b). La combinación de un reactor de celda de flujo con un homogeneizador de tipo sonda se utiliza para el procesamiento de grandes volúmenes de muestras; con esta configuración, el líquido de trabajo se bombea al reactor ultrasónico que corresponde a la celda de flujo (de acero inoxidable o vidrio) donde es expuesto a una sonicación ajustable con precisión. A lo largo del proceso, todo el material pasa por la zona de punto caliente de cavitación ubicada por debajo de la punta del sonotrodo y es sometido a un tratamiento uniforme; finalmente, el líquido llega a la salida de la celda. Cabe agregar que, dependiendo del proceso, el tratamiento puede ser de paso único o múltiple (Hielscher Ultrasonics GmbH, 2023).



Representación esquemática de una celda de flujo hexagonal de triple frecuencia

Representación esquemática de una celda de flujo de doble frecuencia

Figura 10. Diagramas de distintas configuraciones de reactores de celda de flujo (Arias Sierra, 2022).

Los distintos reactores mencionados anteriormente funcionan acorde al principio de generar cavitación en un medio líquido por medio de la inducción de ultrasonidos de alta potencia, las ondas se transmiten en el fluido creando ciclos alternos de alta y baja presión (compresión y rarefacción, respectivamente) con una tasa de oscilación que depende de la frecuencia de operación; por otro lado, Hussain y Janajreh (2018) indican que el equipo más adecuado para trabajar en un proceso continuo es el reactor de bocina ultrasónica. Existe otra técnica avanzada llamada ultrasonido enfocado de alta intensidad (HIFU), que cuenta con las características de no ser invasiva y continua; además, trabaja a frecuencias relativamente más bajas y usa el efecto de enfoque de transductores curvos (lentes acústicas) para lograr intensidad de sonicación necesaria en el objetivo colocado frente al punto focal del dispositivo (Zore y cols., 2021).

El objetivo de intensificar el proceso de producción de biodiesel mediante la asistencia de ultrasonidos requiere que se maximicen los efectos físicos de la transmisión acústica; los cuales, dependen del tamaño de las burbujas y el tiempo de colapso de las cavidades que, a su vez dependen de la disipación de potencia, frecuencia de funcionamiento, propiedades fisicoquímicas de los materiales y geometría del reactor sonoquímico. A continuación, en la Tabla 16, se presentan los principales parámetros operativos a considerar del equipo ultrasónico para la intensificación máxima de un proceso de este tipo, así como algunas recomendaciones para su selección óptima, de acuerdo al análisis de la literatura existente (Gole & Gogate, 2012b):

Tabla 16. Recomendaciones para la determinación de parámetros operativos del sistema ultrasónico (Gole & Gogate, 2012b).

Parámetro	Recomendación
Frecuencia de irradiación ultrasónica	<p>La operación a altas frecuencias, dentro del rango de 200 – 1000 kHz, crea una mayor cantidad de efectos químicos que pueden aprovecharse efectivamente en el tratamiento de aguas residuales y síntesis química.</p> <p>La operación a bajas frecuencias, dentro del rango de 10 – 100 kHz, permite maximizar los efectos físicos como la temperatura y presión del entorno de reacción.</p> <p>En la síntesis de biodiesel se recomienda utilizar reactores de baja frecuencia, con valores de entre 20 – 50 kHz; ya que, se requieren efectos físicos dominantes para la intensificación. Es importante resaltar que la operación con frecuencias múltiples podría resultar aún más beneficioso en relación a la operación con frecuencia única; esto, porque se crea una actividad cavitacional más intensa y uniformemente distribuida en el reactor.</p>
Disipación de potencia (potencia de entrada)	<p>Parámetro de operación del equipo que afecta al tamaño y número de cavidades, su vida útil máxima, presión e intensidad de colapso, extensión del aumento de temperatura en el fluido de trabajo y en la generación de eventos de cavitación.</p> <p>La extensión de transmisión acústica e intensidad de la mezcla también dependen directamente de la densidad de potencia.</p> <p>En la producción de biodiésel se recomienda utilizar un nivel alto de disipación de potencia debido a que es beneficioso para mejorar los efectos cavitacionales; sin embargo, dependiendo de la geometría del reactor sonoquímico se podría llegar a un nivel de disipación de potencia óptimo más allá</p>

	<p>de uno en el que se observen efectos reducidos, debido a los fenómenos de desacoplamiento acústico.</p> <p>Una potencia de entrada óptima contribuye a la obtención de un mayor rendimiento de conversión.</p>
<p>Geometría adecuada del reactor</p>	<p>Este es un factor crucial principalmente para el diseño de reactores a gran escala, que siempre busca obtener la máxima actividad cavitacional uniforme y depende del tipo de operación (continua o por lotes). La actividad cavitacional, a su vez, depende de la altura del líquido, diámetro del recipiente, material de construcción, número y tipo de transductores.</p> <p>En operaciones a gran escala, se recomienda utilizar múltiples transductores; por lo general, con reactores de celda de flujo que brindan flexibilidad en términos de operación continua y la opción de colocar los transductores en las paredes del reactor en caras opuestas, para generar patrones de onda estacionaria.</p> <p>Se ha reportado que las secciones transversales hexagonales o rectangulares de transductores producen una muy buena distribución de la actividad cavitacional y se recomiendan para operaciones a gran escala de baños ultrasónicos. Cabe señalar que tanto el número como la ubicación de los transductores afectarán el comportamiento hidrodinámico y las características de mezcla en el reactor sonoquímico, cuya importancia es especial en la síntesis de biodiésel por las limitaciones que se tienen por la transferencia de masa; por ello, ambas se deben mantener constantes a lo largo del proceso para lograr los objetivos deseados.</p>
<p>Transmisión acústica</p>	<p>La transmisión acústica depende en su mayoría de la potencia disipada en el reactor, altura y viscosidad del líquido dentro del mismo, así como del número de transductores en la configuración. Su alcance se</p>

	<p>puede mejorar con la adición de agitación en el medio líquido (especialmente a mayores escalas de operación), maximizando los efectos generales de transferencia de masa, pero hay que considerar la interferencia que puede ocasionar con el paso de energía acústica al agitarse a altas intensidades.</p> <p>Se recomienda la sonicación con agitación en comparación con la sonicación sola, debido a que la velocidad de transmisión y transferencia de masa poder llegar a ser hasta 10 veces más rápidas.</p>
<p>Propiedades fisicoquímicas de la fase líquida</p>	<p>Las principales propiedades que permiten maximizar los efectos de la cavitación incluyen una baja presión de vapor, baja viscosidad y alto valor de tensión superficial; también, la presencia de partículas sólidas, aditivos, sales y gases puede aumentar aún más la tasa de efectos.</p> <p>Específicamente hablando de la síntesis de biodiésel, se recomienda considerar con mayor importancia las propiedades del aceite que las de la fase alcohólica; ya que, en base a las primeras se puede decidir la posibilidad de obtener efectos de cavitación apreciables. En caso de que se estén formando dos fases en el sistema de reacción, valdría la pena la sonicación en la fase de alcohol en vez de en la fase oleosa.</p>

La implementación de métodos sonoquímicos implica una mejora en propiedades de la reacción como la cinética, selectividad, extracción, disolución y filtración; también, se observan incrementos términos de propiedades eléctricas y mecánicas del sistema en general. En un reactor sonoquímico, la cavitación acústica conduce a efectos físicos y químicos que incluyen un alto esfuerzo cortante cerca de la pared de las burbujas, alta temperatura y presión en el medio, producción de microchorros, entre otros; los cuales, brindan la oportunidad de aprovecharse en distintas aplicaciones y estudiar los procesos intensificados. Estos dispositivos son energéticamente más eficientes que los reactores de recipiente agitado al diseñarse y operar de manera adecuada; por otro lado, aunque no se han estudiado todos los efectos y resultados del ultrasonido, la literatura

ha validado los siguientes ejemplos como ventajas del proceso sonoquímico en comparación con los métodos convencionales (Zore y cols., 2021):

- El ultrasonido en sí actúa como catalizador y no necesita reponerse como uno convencional.
- Técnica respetuosa con el medio ambiente.
- El proceso sonoquímico permite el uso de solventes baratos y renovables.
- No se requiere de condiciones operativas extremas.
- Mejora los rendimientos de producción sin descomposición del material y la selectividad: las transformaciones tanto físicas como químicas se ven afectadas por el fenómeno de cavitación acústica, que provoca una eficiente agitación, disolución, transferencia de masa y calor, y sonólisis de reactivos. Además, se potencia la quimio-, regio- y estereoselectividad, incrementando la selectividad global.
- Mayor homogeneidad morfológica.
- Nuevas rutas de reacción que no cuentan con reacciones secundarias.
- Versatilidad: con ligeras modificaciones a las condiciones de reacción se pueden fabricar nanomateriales (metales, aleaciones, óxidos metálicos, carburos, catalizadores soportados por nanoestructuras, carbono, etc.), polímeros y biomateriales (hidrógeno). La razón de esta propiedad se atribuye a la gama de frecuencias, amplitudes e intensidades de ultrasonido que se pueden emplear (la alta frecuencia se puede utilizar para la degradación o la rotura, mientras que la baja frecuencia se puede utilizar para la síntesis).
- Ahorro de tiempo y energía: debido a la mezcla macromolecular ocasionada por la irradiación ultrasónica y la generación de puntos calientes. Como se requiere menor cantidad de tiempo para llevar a cabo el proceso de interés, también se ahorra energía.
- Altas velocidades de reacción: aumento ocasionado por la formación de radicales H, OH, HO₂ y O que conducen a reacciones redox más rápidas; más aún, la turbulencia derivada de la propagación de ondas de presión alternas aumenta las tasas de transferencia de masa.
- Altos rendimientos de extracción: se logra por la escisión específica del sitio. Por ejemplo, el ultrasonido puede ser una técnica favorable para la extraer efectivamente catequinas valiosas del té verde.

- Mejora propiedades morfológicas: el impacto creado por los microchorros y ondas de choque en el entorno de reacción influye considerablemente en la composición química y morfología física de los sólidos.
- Alta amorficidad de los productos: la alta velocidad de enfriamiento (1011 K/s) impide que el producto se cristalice, lo que resulta beneficioso ya que a veces los productos amorfos son más activos que sus contrapartes cristalinas correspondientes.
- Reduce los costos de producción de biodiesel: al contar con las características de ahorro de energía para esta etapa del proceso e incrementar las posibilidades de una producción comercial a gran escala (Babadi y cols., 2022).

Las principales desventajas reportadas en relación a los procesos sonoquímicos están asociadas al colapso repentino e incontrolable de las cavidades, que genera efectos indeseables; sin embargo, se espera que futuras investigaciones ayuden a superar dichas problemáticas (Zore y cols., 2021). Otras desventajas de estas técnicas son la lixiviación de determinados catalizadores sólidos a altas cargas del mismo y la falta de producción de radicales libres en la metanólisis con catalización básica a temperatura ambiente (Babadi y cols., 2022).

Hablando particularmente de la síntesis de biodiésel, se han informado excelentes tasas de conversión de aceite de canola a este biocombustible mediante la transesterificación asistida por ultrasonidos en presencia de óxido de calcio (99.4%) y con una relación metanol-aceite de 7.48, así como una potencia ultrasónica de 40 W; por otra parte, la operación del reactor sonoquímico a baja frecuencia no solo ahorra tiempo y energía en comparación a otros métodos mecánicos convencionales, sino que también requiere de bajas cantidades de catalizador. A diferencia de los procesos por lotes cuyas aplicaciones son a baja escala/laboratorio, los procesos continuos de transesterificación se prefieren para aplicaciones a gran escala; más aún, Babadi y cols. (2022) hacen referencia a un experimento donde se creó un reactor helicoidal asistido por irradiación ultrasónica para la transesterificación continua de aceite reciclado, con el objetivo los objetivos principales de disminuir el tiempo de reacción, eliminar el proceso de agitación mecánica y comparar el biodiesel producido con otro obtenido a partir de un proceso por lotes (con la misma materia prima como base de comparación). Los resultados de dicha investigación arrojaron que el bioenergético final es similar bajo ambos tipos de producción pero los procesos continuos cuenta con reducciones significativas tanto en el tiempo de reacción como en el espacio de trabajo necesario; agregando a lo anterior, se encontró que el aumento en la cantidad de metanol en el

biodiésel puede llegar a acelerar la reacción y no tiene ningún efecto positivo en el rendimiento de porcentaje de FAME dentro del mismo, más bien ocasiona aumentos en la cantidad de residuo tras la decantación (indicando un exceso de metanol residual) y complica la etapa de purificación que, a su vez, incrementa en costos. El reactor helicoidal tiene el potencial para impulsar la transesterificación asistida por ultrasonidos a escalas de producción industrial.

Es importante denotar que el uso de catalizadores homogéneos básicos implica la ventaja de tener una velocidad de reacción rápida en condiciones favorables, pero también necesita neutralización y separación de la mezcla de reacción; esto, puede tener un impacto negativo en el medio ambiente y ha favorecido al uso de catalizadores heterogéneos para superar dichas dificultades, ya que estos últimos no son corrosivos, se separan fácilmente y son reciclables. Se anticipa que la implementación de catalizadores sólidos reducirá la cantidad de procesos necesarios para producir biodiésel de grasas y aceites, mejorando la eficiencia del sistema y la calidad de los productos finales de FAME y glicerol; sin embargo, la adición de un mayor número de catalizadores hace más difícil el lavado y separación de estos productos por la formación de espumas, ocasionada por jabones y emulsiones (Babadi y cols., 2022). En la Tabla 17 se muestra un resumen de los estudios de investigación, cuyos trabajos se concentran en operaciones a escala de laboratorio, donde se analiza la intensificación de la síntesis de biodiésel a partir de diferentes materias primas; ahora, a pesar de que la asistencia ultrasónica es de mucha ayuda para procesos de transesterificación aún se requieren de más estudios para superar limitaciones técnicas (Gole & Gogate, 2012b).

Tabla 17. Revisión de estudios de transesterificación asistida por ultrasonidos con diferentes materias primas (Elaboración propia).

Fre- cuencia (kHz)	Reactor sonoquímico	Materia prima	Relación molar de alcohol a aceite	Catalizador	Alcohol	Temperat ura (°C)	Rendimiento / Tiempo (% / min)	Referencias
35	nm	Aceites no comestibles	7.6:1	lipasas	nm	36	94/35	(Malani y cols., 2019)

22	nm	Aceite usado / residual	9:1	CaDG	nm	52	93/30	(Gupta y cols., 2015)
22	nm	Aceite usado / residual	6:1	K ₃ PO ₄	nm	50	92/90	(Pukale y cols., 2015)
40	nm	Aceite de silibum	16:1	KHC ₄ H ₄ O ₆ /TiO ₂	nm	52	90/30	(Takase y cols., 2014)
20–30	nm	Aceite de karabi	12:1	CaO	nm	52	94/120	(Yadav y cols., 2016)
20	nm	Aceite de jatrofa	12:1	K ₃ PO ₄	nm	50	98/45	(Jogi y cols., 2016)
20,35	nm	Aceite de jatrofa	10:1	SrO–CaO	nm	55	95/30	(Ali y cols., 2017)
50	nm	Lípido de levadura	1:1	Garbage lipase	nm	30	97/30	(Selvakumar & Sivashanmugam, 2019)
35	nm	Aceites no comestibles	11.7:1	KI/ZnO	nm	59	93/30	(Malani, Shinde y cols., 2019)
20	nm	Aceite de soja	6:1	Novozym	nm	40	75/60	(De Freitas y cols., 2019)

24	nm	Microalgas	12:1	K-pumice	nm	62	85/10	(Cercado y cols., 2018)
nm	Tipo bocina, 400 W	Sebo de vaca	6:1	KOH	Metanol	60	92/1.7	(Kumar y cols., 2010)
nm	Tipo bocina, 200 W	Aceite de jatropa	9:1	Na/SiO ₂	Metanol	nm	98/15	(Deshmane y cols., 2008)
nm	Tipo bocina, 240 W	Destilado de ácidos grasos de palma	3:1	H ₂ SO ₄	Metanol	90	98/720	(Mootabadi y cols., 2010)
nm	Tipo bocina, 200 W	Aceite de palma	9:1	BaO	Etanol	65	95/60	(Zhang y cols., 2009)
nm	Baño ultrasónico, 1200 W	Trioleína	6:1	KOH	Metanol	25	95/15	(Yu y cols., 2010)
nm	Baño ultrasónico	Aceite de soja	6:1	Novozym 435	Metanol	40	96/720	(Babicz y cols., 2010)
nm	Tipo bocina, 1 KW	Canola	5:1	KOH	Metanol	nm	99/50	(Thanh y cols., 2010)
nm	Tipo bocina, 2 kW	Aceite de cocina residual	5:1	KOH	Metanol	25	99/0.93	(Hingu y cols., 2010)
nm	Tipo bocina, 250 W	Aceite de cocina residual	6:1	KOH	Metanol	45	89/40	(Chand y cols., 2010)

nm	Tipo bocina, 400 W	Aceite de cocina residual	5:1	KOH	Metanol	30	98/30	(Santos y cols., 2009)
nm	Baño ultrasónico, 1200 W	Aceite vegetal	6:1	NaOH	Metanol	nm	98/20	(Stavarach e y cols., 2005)
nm	Tipo bocina, 200 W	Aceite de palma	9:1	Bao, Sro	Metanol	65	95/50	(Kelkar y cols., 2008)
nm	Baño ultrasónico, 200 W	Cortes de ácidos grasos	10:1	H ₂ SO ₄	Metanol	28	95/90	(Huang y cols., 2010)
nm	Baño ultrasónico	Sacarosa	2:1	K ₂ CO ₃	Metanol	70	95/2	(Hanh y cols., 2009)
nm – no medido								

Los métodos enzimáticos de transesterificación asistida por ultrasonidos se han considerado como la opción verde más prometedora en términos de sostenibilidad; por ejemplo, un experimento de síntesis de biodiésel a partir de aceite de semilla de algodón usado, mientras se usa una lipasa inmovilizada, arroja como resultados que hubo una reducción en el tiempo de reacción con la menor dosis de catalizador (carga de enzima del 5% en peso) y consumo de energía (45 °C), además de que el estado de la enzima inmovilizada se mantuvo intacto durante el proceso de transesterificación y puede reutilizarse hasta cumplir cuatro ciclos (Babadi y cols., 2022). Por lo anterior, se puede decir que estas tecnologías emergentes se pueden utilizar para conseguir una mayor tasa de conversión de biodiesel, con pureza de los productos finales, eliminando elementos de fuentes de calor externa y de agitación mecánica; pero, no han podido establecerse a nivel comercial debido a que los altos costos del catalizador y la lenta velocidad de reacción enzimática son factores que se interponen en la consideración de este tipo de sistemas para distintas aplicaciones. Reportes indican que el uso de estos métodos puede ser efectivo en operaciones biológicas como la interrupción de células microbianas, desinfección microbiana y tratamientos

biológicos de aguas residuales (Gole & Gogate, 2012b). En relación a la operación de reactores sonoquímicos con procesamiento continuo, adecuados para el tratamiento de grandes volúmenes de materia prima, estudios presentados por Gole & Gogate (2012b) resaltan la importancia de definir los valores óptimos de potencia ultrasónica, frecuencia de irradiación y temperatura de reacción para asegurar un correcto funcionamiento del sistema; también, se menciona que en un reactor a pequeña escala será suficiente el efecto de emulsificación del ultrasonido para mezclar, pero es recomendable una agitación mecánica externa en caso de una operación a gran escala para conseguir una distribución uniforme del efecto del ultrasonido en el reactor. Otros factores importantes a considerar para el desarrollo de reactores sonoquímicos continuos a gran escala son la profundidad del transductor en el medio de reacción y la tasa de flujo del proceso.

3. Justificación

La confianza a nivel mundial en los combustibles fósiles como fuente de seguridad energética disminuye paulatinamente conforme al paso del tiempo y se estima que a mediano plazo ya no serán capaces de abastecer la demanda mundial; esto, en caso de que tengan que continuar cumpliendo como fuentes de generación de energía, de fabricación de una amplia gama de productos, de combustible para transporte, etc. Los biocombustibles líquidos, como el biodiésel y el bioetanol, representan una herramienta que fomenta la transición energética mediante la descarbonización del sector de transporte, cuyas materias primas fundamentales para industrializar su producción provienen de recursos renovables que incluyen cultivos comestibles y no comestibles, WCO, grasas animales, entre otros; además, el aumento reciente en su consumo global ha impulsado la formulación de políticas públicas en distintos países que autorizan y llegan a fomentar su uso, ya sea como aditivo o combustible principal (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura [IICA], 2021).

Específicamente en México, a nivel nacional, algunos beneficios asociados al desarrollo de la industria de los biocombustibles incluyen el fomento económico de regiones agrícolas por la creación de demanda de cultivos locales, el fortalecimiento de la seguridad energética asociado a la ampliación del abanico de alternativas disponibles como opciones para satisfacer la demanda de combustibles, una disminución en las importaciones de gasolinas derivadas de petróleo y una aportación adicional al cumplimiento de tratados dirigidos a la reducción en la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) (Merino & Zavala, 2008). Actualmente, la planta piloto cuyo proceso se busca hacer más eficiente es capaz de llevar a cabo la transesterificación de lotes de 120 litros de materia prima en 1.5 hrs y el biodiésel producido se utiliza como un aditivo en el tanque de combustible de la flotilla de camiones asociada a la UAQ; ahora, una intensificación sonoquímica del proceso de transesterificación llevado a cabo en la misma planta permitiría el tratamiento de los lotes de 120 litros en 24 minutos, haciendo factible el reemplazo total del diésel convencional en los tanques de combustible de la flotilla por biodiésel producido en la misma universidad.

4. Hipótesis

La intensificación del proceso de transesterificación de grasas o aceites, mediante la asistencia por ultrasonidos de alta frecuencia, permitirá reducir considerablemente el tiempo de reacción, aumentar la eficiencia de conversión del proceso y obtener un biocombustible que contará con una mayor calidad en relación a otros combustibles similares, de acuerdo a determinadas características.

5. Objetivo

Realizar 4 actividades experimentales asociadas a la producción de biodiésel tanto convencionalmente como mediante procesamientos sonoquímicos, a escalas laboratorio y planta piloto, cuyos resultados permitan comparar distintos tiempos de reacción, obtener valores de rendimientos de conversión y evaluar la calidad de los productos finales de cada experimento. Asimismo, se busca mostrar la magnitud de los beneficios que implicaría cambiar la configuración del reactor de transesterificación que actualmente se utiliza en la planta piloto de biocombustibles ubicada en la UAQ Campus Universitario (CU), para determinar la viabilidad de implementar un homogeneizador ultrasónico de tipo sonda con reactor de celda de flujo en dicha etapa del sistema.

6. Material y métodos

Este trabajo cuenta con dos ramas de análisis, una numérica y otra experimental, cuyos objetivos se concentran en resaltar la transesterificación asistida por ultrasonidos de aceites y grasas como una alternativa renovable prometedora para la producción de biocombustibles; por ello, en esta sección se profundizará detalladamente en la metodología para la elaboración de biodiésel de manera convencional y utilizando un reactor sonoquímico, a escalas laboratorio y planta piloto (4 experimentos en total), así como para la realización de diferentes pruebas de calidad de los biocombustibles obtenidos. De esta manera será posible hacer comparaciones entre los tiempos de reacción, obtener valores de eficiencias de conversión y evaluar la calidad de los productos finales de los distintos experimentos. Estas últimas son características determinantes para definir la viabilidad de estas tecnologías novedosas en materia de producción y abastecimiento de combustibles.

6.1. Método convencional a escala laboratorio

Este experimento consistió en la elaboración de biodiésel a partir de 1 kg de aceite residual de cocina (WCO).

Limpieza de la materia prima: Se comenzó con una limpieza del aceite residual, utilizando 2 filtros con distinto tamaño de poro (mínimo recomendable), para asegurar la remoción de impurezas insolubles o sólidos filtrables.

Reacción convencional de transesterificación: Antes de llevar a cabo la transesterificación, fue necesario determinar el índice de acidez de la materia prima (ver sección 6.5) y las cantidades tanto de alcohol como de catalizador requeridas para la reacción (ver sección 6.6.1). Ya con una mezcla adecuada de alcohol-catalizador-aceite, esta se depositó en un matraz Erlenmeyer de 2000 mL que a su vez se mantuvo a 56°C y con agitación constante, por 1.5 horas, mediante el uso de una placa de cocción magnética con barra de agitación (Figura 11). En caso de que por algún motivo se interrumpa el proceso, es importante destacar que se tienen alrededor de 10 minutos para reanudarlo o de lo contrario será necesario repetir la metodología; ya que, la reacción es reversible y un largo periodo de inactividad puede afectar considerablemente la síntesis de FAME.

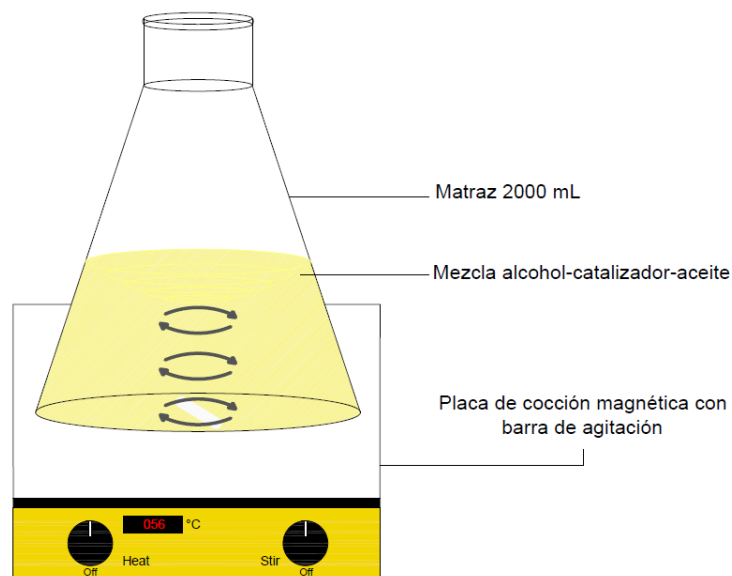


Figura 11. Esquema representativo del reactor convencional a escala laboratorio.

Habiendo terminado el tiempo de reacción, se retiró el matraz con la mezcla ahora de biodiésel y glicerol crudo para pasar a la siguiente etapa del proceso.

Separación y decantación: La mezcla de biodiésel-glicerol crudo se depositó en un embudo de decantación, sostenido por medio de un soporte universal y una pinza de laboratorio, donde se dejó reposar 1 hora para que ambas sustancias se separaran por diferencia de densidad; esto, permitió la creación de una fracción de biodiésel en la parte superior del embudo y otra de glicerol crudo en la parte inferior del mismo (Figura 12), que será removida por decantación.

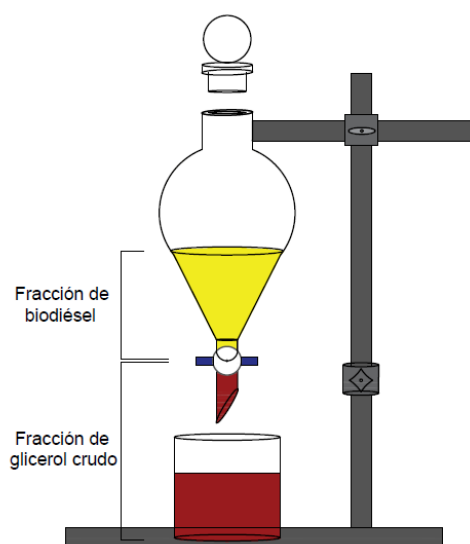


Figura 12. Diagrama de embudo de decantación listo para la separación de glicerol crudo.

Se recomienda eliminar paulatinamente el glicerol crudo en espacios de 15 minutos y al obtener únicamente la fracción de biodiésel en el embudo, se procedió a la siguiente etapa.

Lavado y recuperación de biodiésel: La fracción de biodiésel recuperada se depositó en un nuevo embudo de decantación, sostenido por medio de un soporte universal y una pinza de laboratorio, donde se lavó con la mitad del volumen de agua simple, agitando la mezcla en el embudo y separando el agua por decantación tras reposos de 1 hora (Figura 13); esto, se realizó por triplicado resultando en una duración total de lavado equivalente a 3 horas.

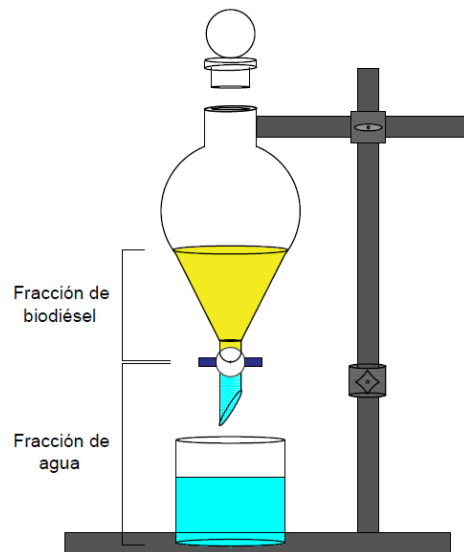


Figura 13. Diagrama de embudo de decantación tras una ronda de lavado de biodiésel con agua simple.

Una vez limpio el biodiésel, se colocó en una probeta de 1000 mL aireada en la que reposó por una semana; finalmente, se procedió con la ejecución de pruebas básicas de calidad para asegurar un proceso limpio y completo. Tomando en cuenta los tiempos planteados en cada etapa, este proceso cuenta una duración total de 5.5 horas.

6.2. Reactor sonoquímico de tipo sonda a escala laboratorio

Este experimento consistió en la elaboración de biodiésel a partir de 150 mL de aceite residual de cocina (WCO).

Limpieza de la materia prima: Se comenzó con una limpieza del aceite residual, utilizando 2 filtros con distinto tamaño de poro (mínimo recomendable), para asegurar la remoción de impurezas insolubles o sólidos filtrables.

Reacción de transesterificación utilizando el sonotrodo: Antes de llevar a cabo la transesterificación, fue necesario determinar el índice de acidez de la materia prima (ver sección 6.5) y las cantidades tanto de alcohol como de catalizador requeridas para la reacción (ver sección 6.6.2). Ya con una mezcla adecuada de alcohol-catalizador-aceite, esta se depositó en un vaso de precipitado de 250 mL y el sistema ultrasónico se colocó de manera que la punta del sonotrodo no hiciera contacto con las paredes ni con el fondo de dicho contenedor (Figura 14). El equipo utilizado es un sistema ultrasónico marca Hielscher Ultrasonics GmbH, modelo UP200-ht con una frecuencia de 26 kHz, especial para trabajos a escala de laboratorio; asimismo, las condiciones de operación del equipo bajo las cuales se llevó a cabo la reacción incluyen un tiempo de trabajo de 5 minutos a una amplitud del 50%, potencia 50% (100 W) y un pulso continuo (100%). Es importante mencionar que en este trabajo se contó con una carcasa de cerámica, especial para el ensamble del sistema ultrasónico, que permitió realizar las pruebas de manera que se redujo la cantidad de ruido ocasionado por el sonotrodo y no fue necesario el uso de ningún tipo de equipo de protección auditiva.

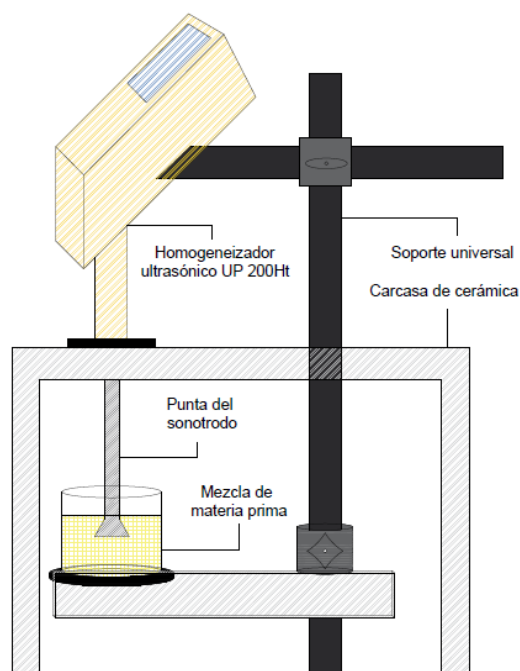


Figura 14. Esquema representativo del reactor sonoquímico de tipo sonda a escala laboratorio.

Se inició la reacción al empezar con la irradiación ultrasónica, que genera actividad cavitacional en la mezcla líquida contenida dentro del vaso de precipitado; habiendo terminado el

tiempo de operación del equipo, se retiró el vaso de precipitado con la mezcla de biodiesel y glicerol crudo para pasar a la siguiente etapa del proceso de síntesis del biocombustible.

Etapas de separación y decantación: La mezcla de biodiésel-glicerol crudo se depositó en un embudo de decantación, sostenido por medio de un soporte universal y una pinza de laboratorio, donde se dejó reposar 1 hora para que ambas sustancias se separaran por diferencia de densidad; esto, permitió la creación de una fracción de biodiésel en la parte superior del embudo y otra de glicerol crudo en la parte inferior del mismo (ver Figura 12), que será removida por decantación. Se recomienda eliminar paulatinamente el glicerol crudo en espacios de 15 minutos y al obtener únicamente la fracción de biodiésel en el embudo, se procedió a la siguiente etapa.

Etapas de lavado y recuperación de biodiésel: La fracción de biodiésel recuperada se depositó en un nuevo embudo de decantación, sostenido por medio de un soporte universal y una pinza de laboratorio, donde se lavó con la mitad del volumen de agua simple, agitando la mezcla en el embudo y separando el agua por decantación tras reposos de 1 hora (Figura 13), por triplicado (3 horas totales). Una vez limpio el biodiésel, se colocó en un vaso de precipitado de 250 mL aireado en el que reposó por una semana; finalmente, se procedió con la ejecución de pruebas básicas de calidad para asegurar un proceso limpio y completo. Tomando en cuenta los tiempos planteados en cada etapa, este proceso cuenta una duración total de 4 horas y 5 minutos.

6.3. Método convencional a escala planta piloto

La planta piloto de producción de biodiésel en la que se trabajó está ubicada en la Universidad Autónoma de Querétaro, C.U., Cerro de las Campanas s/n, Cp. 76010, Querétaro, Querétaro, México. Específicamente en el Centro de Investigación en Química para la Economía Circular (CIQEC) de la Facultad de Química, cuya capacidad de producción es de entre 170 – 200 litros de biodiésel en 10 horas. En la Figura 15 se presenta el diagrama general del sistema implementado para la producción del biocombustible; el cual, se divide principalmente en una sección cuya operación es manual y otra en la que esta es automática por medio de la programación de un equipo de control digital (PLC). Cabe resaltar que el PLC de la planta piloto está programado para determinar las cantidades adecuadas de alcohol y catalizador requeridas para la reacción de transesterificación, de acuerdo a un valor obtenido de índice de acidez de la materia prima (ver sección 6.5) que debe introducirse manualmente antes de arrancar la operación automática de la

planta. Los cálculos que realiza el PLC para determinar dichas cantidades de alcohol y catalizador siguen la metodología desglosada en la sección 6.6.3 de este trabajo.

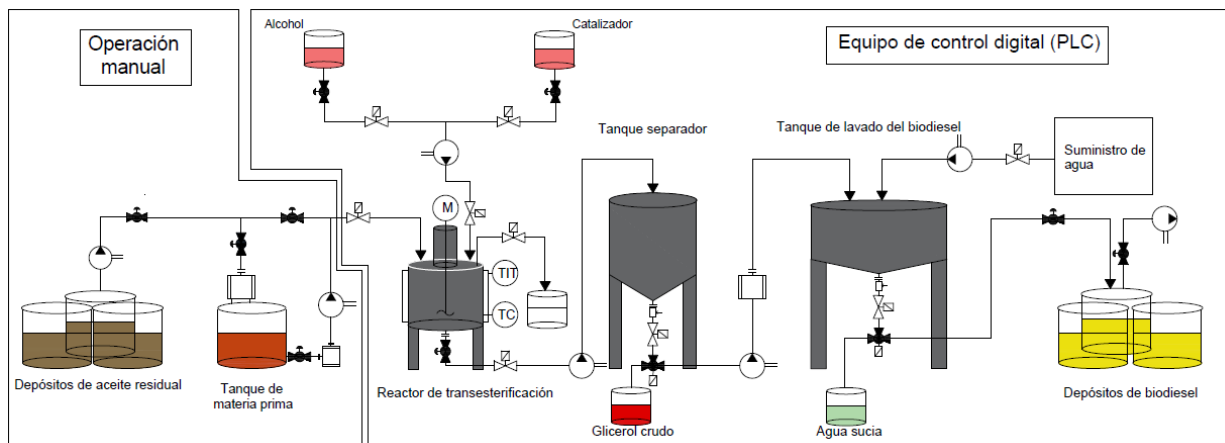


Figura 15. Diagrama del sistema completo de producción por método convencional.

El reactor de transesterificación y las tolvas, que corresponden a los tanques tanto de separación como de lavado de biodiésel, son de acero inoxidable y tienen una capacidad de 120 L; además, para todas las conexiones se utiliza tubería de 1 pulgada de diámetro y los depósitos utilizados para la materia prima, alcohol, catalizador, glicerina, agua sucia y biodiésel son de plástico. La planta piloto cuenta con bombas, válvulas manuales y electroválvulas a lo largo del sistema para tener un control del flujo de trabajo a lo largo de todo el proceso; por otra parte, en la figura anterior también se pueden apreciar otros dispositivos (motores, sensores, etc.), que serán especificados más adelante al profundizar en las etapas del proceso de obtención del biocombustible.

Tanque de materia prima: La operación de la planta piloto comenzó con la apertura de las primeras dos válvulas manuales y la activación de la bomba encargada de enviar el contenido de los depósitos de aceite residual al tanque de materia prima (Figura 16). A la entrada de este último se encuentra un arreglo de filtros de distinto tamaño de poro, encargados de la limpieza del aceite, y al haber llenado el tanque con 100 kg se procedió a cerrar la válvula manual a la salida de la bomba mencionada anteriormente.

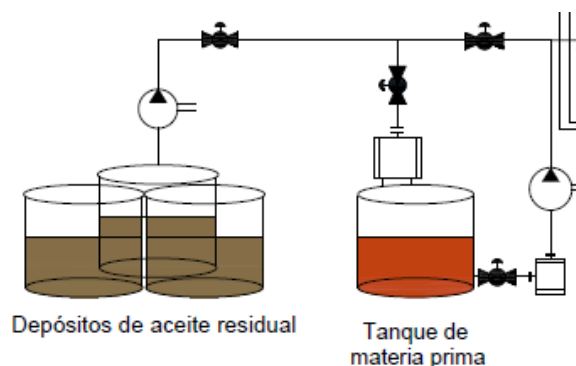


Figura 16. Sección de planta piloto correspondiente a depósitos y tanque de materia prima.

Posteriormente, se abrieron las válvulas manuales encontradas una a la salida del tanque y otra a la salida de la segunda bomba para recircular el aceite en esta sección, forzando a la materia prima a pasar por los arreglos de filtros encargados de la remoción de partículas sólidas e impurezas en la misma.

Reactor de transesterificación: Teniendo limpio el aceite de materia prima a tratar, se arrancó la operación automática de la planta por medio del PLC; de manera que, automáticamente se activaron las bombas encargadas de añadir los 100 kg de aceite y las cantidades correspondientes tanto de alcohol como de catalizador al reactor (Figura 17). Este último cuenta con un motor encargado de la agitación de la mezcla (M), calentamiento por medio de una resistencia eléctrica de acero inoxidable a prueba de explosión (TIT) y un sensor de temperatura (TC) para asegurar que el interior se mantenga alrededor de los 56 °C; por otro lado, permite la toma de muestras del contenido del mismo a través de un conducto de salida controlado por una electroválvula.

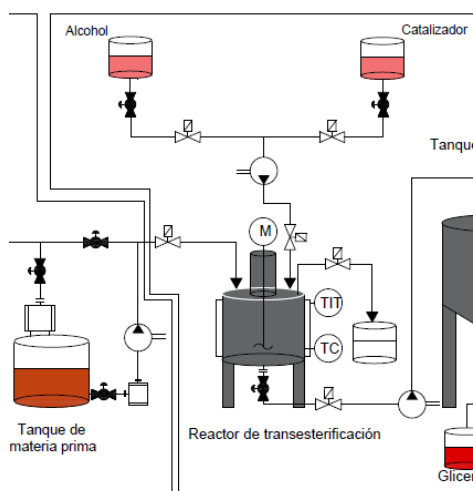


Figura 17. Sección de planta piloto correspondiente a tanque de materia prima y reactor de transesterificación.

El lote final con el que trabaja la planta es de alrededor de 120 L y el tiempo de reacción es igual al del método convencional a escala laboratorio; sin embargo, en este caso el proceso tardó 3 horas para poder pasar a la siguiente etapa porque se hace la transesterificación de 2 lotes de materia prima con el objetivo de obtener un volumen de biodiésel entre los 170 – 200 L, asegurando la producción de al menos un barril de biocombustible que corresponde a una medida estándar de estos productos (p.ej. petróleo, gasolina, etc.). Cabe mencionar que el primer lote en salir del reactor lo hace tras las 1.5 hrs que tarda la reacción y espera al segundo lote dentro del tanque de separación.

Etapa de separación y decantación: Con ambos lotes en el tanque de separación, la mezcla de biodiesel-glicerina tardó 2 horas en comenzar a separarse por decantación. Este tanque cuenta con un sensor para diferenciar líquidos por capacitancia programado para que al identificar glicerol crudo se conduzca hacia un depósito para su recolección y al identificar un líquido diferente este sea suministrado al tanque de lavado, en este caso la fracción de biodiésel (Figura 18).

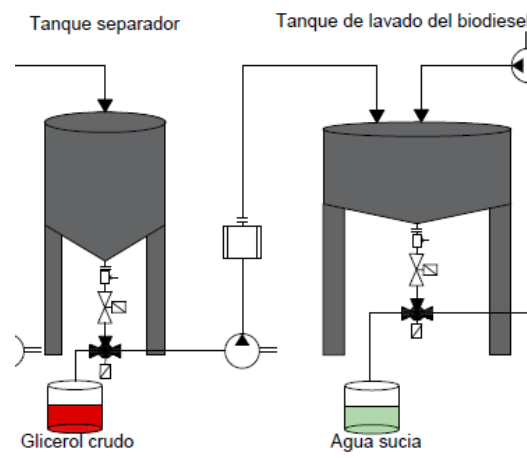


Figura 18. Sección de planta piloto correspondiente a tanques de separación y lavado.

El glicerol crudo recolectado se desechó debido a que no cuenta con otras posibles aplicaciones dentro de la planta piloto; lo cual, representa una oportunidad para la búsqueda de alternativas que le den un valor agregado a este subproducto y así mejorar la economía general del proceso de producción.

Etapa de lavado y recuperación de biodiésel: En la figura anterior se puede observar que hay un filtro a la salida de la bomba encargada de suministrar el biocombustible al tanque de lavado, que puede considerarse como el primer elemento de limpieza. Ya obtenida toda la fracción de

biodiésel, se ejecutó una micro aspersión de agua en la misma (evitando la implementación de un elemento de agitación) y la mezcla reposó 1 hora para proceder con la separación del agua por medio de decantación, esto se repitió 4 veces resultando en una duración total de lavado equivalente a 4 horas. Este tanque cuenta con un sensor para diferenciar líquidos por capacitancia programado para que al identificar agua se conduzca hacia un depósito para su recolección y al identificar un líquido diferente este sea suministrado a los depósitos de biodiésel (Figura 19), recuperando el biocombustible limpio.

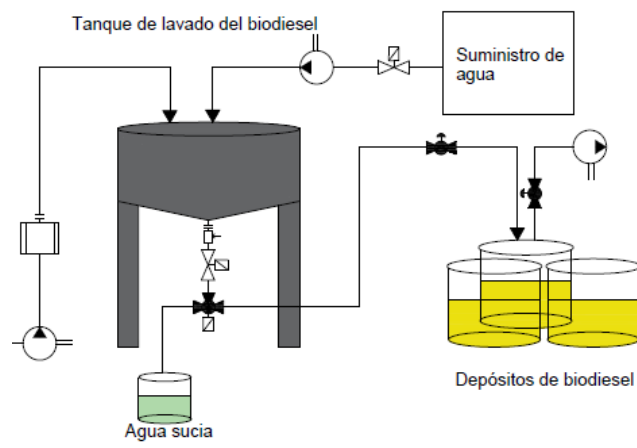


Figura 19. Sección de planta piloto correspondiente a tanque de lavado y depósitos de biodiésel.

Una vez recuperado el biodiésel limpio, este se almacenó en un contenedor cerrado dentro de un área fresca, seca, aislada, bien ventilada y lejos de fuentes de ignición o materiales incompatibles. Tomando en cuenta los tiempos planteados en cada etapa, así como actividades manuales realizadas por el operador de la planta, este proceso cuenta una duración total de 10 horas.

6.4. Reactor sonoquímico de celda de flujo a escala planta piloto

En este trabajo se propone una modificación a la configuración del reactor de transesterificación de la planta piloto descrita anteriormente, para implementar un homogeneizador ultrasónico de tipo sonda con reactor de celda de flujo en esta etapa del sistema, marca Hielscher Ultrasonics GmbH y modelo UIP 1000hdT con 20 kHz. El fabricante recomienda añadir la celda de flujo al homogeneizador para el procesamiento de lotes mayores a 5 L y presenta distintas posibles configuraciones de operación del equipo (Figura 20).

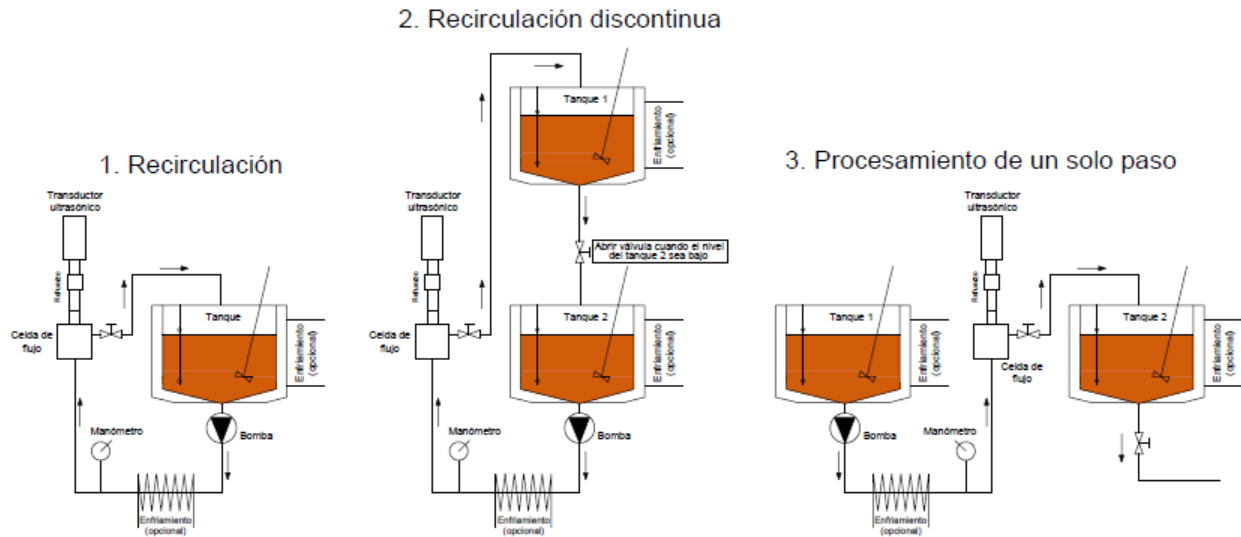


Figura 20. Posibles configuraciones de implementación del equipo sonoquímico al reactor de transesterificación.

Se escogió la configuración de procesamiento de un solo paso debido a que al utilizar el homogeneizador UIP 1000hdT para la sonicación de líquidos en este modo, por características de fábrica, este permite el procesamiento de materia prima a una tasa de 0.5 - 4 L/min; además, se considera que el flujo de salida de la bomba que alimenta al dispositivo es de 4 L/min. A continuación, en la Figura 21, se muestra un esquema de la planta piloto con las modificaciones correspondientes al tanque de transesterificación para la conversión a un procesamiento sonoquímico.

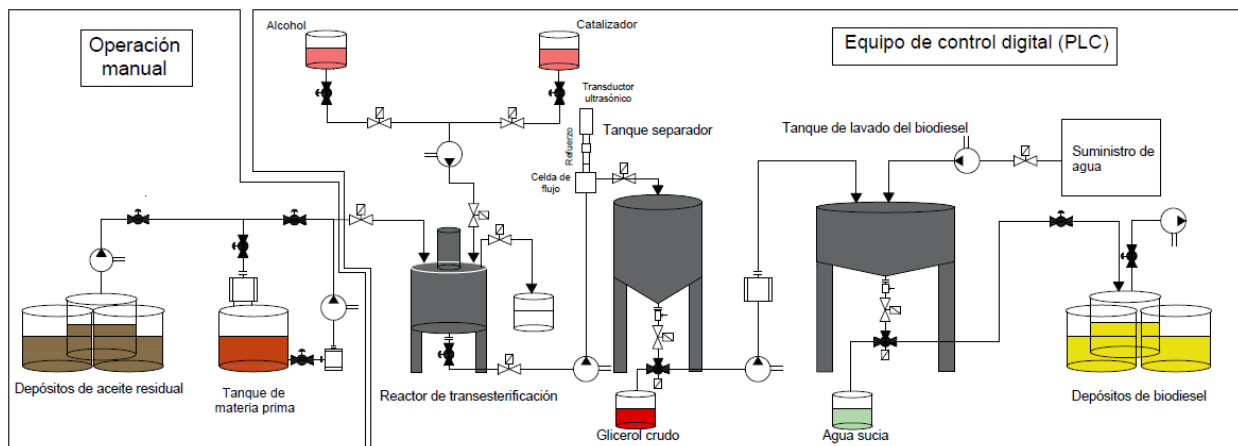


Figura 21. Diagrama del sistema completo de producción por método sonoquímico a escala planta piloto.

En caso de que el flujo de entrada al dispositivo ultrasónico no se encontrara en el rango establecido, se deberá considerar la implementación de una de las siguientes soluciones:

- Válvula reguladora de flujo a la entrada del UIP 1000hdT.
- Variador de frecuencia aplicado a la bomba de alimentación, para disminuir/aumentar las revoluciones de giro del impulsor.
- Recortar/agrandar las aspas del impulsor de la bomba de alimentación, para disminuir/aumentar el volumen de líquido que es capaz de bombear.

Tanque de materia prima: La operación de la planta piloto comienza con la apertura de las primeras dos válvulas manuales y la activación de la bomba encargada de enviar el contenido de los depósitos de aceite residual al tanque de materia prima (Figura 16). A la entrada de este último se encuentra un arreglo de filtros de distinto tamaño de poro, encargados de la limpieza del aceite, y al haber llenado el tanque con 100 kg se procedió a cerrar la válvula manual a la salida de la bomba mencionada anteriormente.

Posteriormente, se abren las válvulas manuales encontradas una a la salida del tanque y otra a la salida de la segunda bomba para recircular el aceite en esta sección, forzando a la materia prima a pasar por los arreglos de filtros encargados de la remoción de partículas sólidas e impurezas en la misma.

Reactor de transesterificación asistido por ultrasonidos: Teniendo limpio el aceite de materia prima a tratar, se arrancó la operación automática de la planta por medio del PLC; de manera que, automáticamente se activaron las bombas encargadas de añadir los 100 kg de aceite y las cantidades correspondientes tanto de alcohol como de catalizador al reactor (Figura 22). Este último ya no requiere de un motor encargado de la agitación de la mezcla, del calentamiento por medio de una resistencia eléctrica ni del sensor de temperatura, que son elementos con un alto consumo de energía; ya que, las condiciones de temperatura y agitación serán proporcionadas al medio líquido al entrar al homogeneizador ultrasónico UIP 1000hdT.

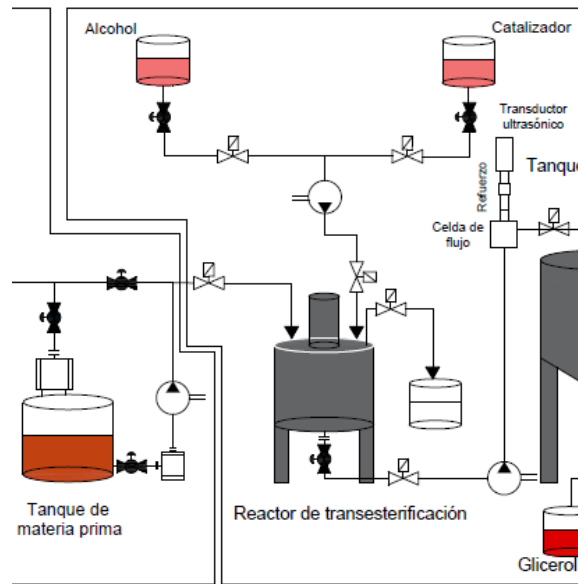


Figura 22. Sección de planta piloto, método sonoquímico, correspondiente a tanque de materia prima y reactor de transesterificación.

El lote final con el que trabaja la planta es de alrededor de 120 L y el tiempo de reacción está dado por el flujo de trabajo del reactor sonoquímico, el cual nos permite un tratamiento continuo a una tasa de 5 L/min; ahora, las condiciones de operación del equipo bajo las cuales se llevaría a cabo la reacción incluyen una amplitud del 50%, frecuencia de 20 kHz ,potencia 50% (500 W) y un pulso continuo (100%). Considerando estos factores, el proceso tardaría 48 minutos en poder pasar a la siguiente etapa porque se haría la transesterificación de 2 lotes de materia prima con el objetivo de obtener un volumen de biodiésel entre los 170 – 200 L, asegurando la producción de al menos un barril de biocombustible que corresponde a una medida estándar de estos productos (p.ej. petróleo, gasolina, etc.). Cabe mencionar que el primer lote en salir del reactor lo haría tras 24 minutos y esperaría al segundo lote dentro del tanque de separación.

Etapa de separación y decantación: Con ambos lotes en el tanque de separación, la mezcla de biodiesel-glicerina tardaría 2 horas en comenzar a separarse por decantación. Este tanque cuenta con un sensor para diferenciar líquidos por capacitancia programado para que al identificar glicerol crudo se conduzca hacia un depósito para su recolección y al identificar un líquido diferente este sea suministrado al tanque de lavado, en este caso la fracción de biodiésel (Figura 18).

El glicerol crudo recolectado se desecharía debido a que no se cuenta con otras posibles aplicaciones dentro de la planta piloto; lo cual, representa una oportunidad para la búsqueda de

alternativas que le den un valor agregado a este subproducto y así mejorar la economía general del proceso de producción.

Etapa de lavado y recuperación de biodiésel: En la Figura 18 se puede observar que hay un filtro a la salida de la bomba encargada de suministrar el biocombustible al tanque de lavado, que puede considerarse como el primer elemento de limpieza. Ya obtenida toda la fracción de biodiésel, se ejecutaría una micro aspersión de agua en la misma (evitando la implementación de un elemento de agitación) y la mezcla reposaría 1 hora para proceder con la separación del agua por medio de decantación, esto se repetiría 4 veces resultando en una duración total de lavado equivalente a 4 horas. Este tanque cuenta con un sensor para diferenciar líquidos por capacitancia programado para que al identificar agua se conduzca hacia un depósito para su recolección y al identificar un líquido diferente este sea suministrado a los depósitos de biodiésel (Figura 19), recuperando el biocombustible limpio. Una vez recuperado el biodiésel limpio, este se debe almacenar en un contenedor cerrado dentro de un área fresca, seca, aislada, bien ventilada y lejos de fuentes de ignición o materiales incompatibles. Tomando en cuenta los tiempos planteados en cada etapa, así como actividades manuales realizadas por el operador de la planta, este proceso cuenta una duración total de 7.8 horas.

6.5. Cálculo del índice de acidez

La titulación se preparó una solución con 1 mL del aceite de interés, 10 mL de isopropanol puro y 2-3 gotas de fenolftaleína, a la que se le agregó KOH al 0.1% por medio de una bureta de 25 mL hasta el punto en que la solución cambió a una coloración rosada visualmente notable por 5 segundos. Cabe resaltar que es recomendable calentar y agitar la solución antes de añadir el KOH para facilitar la reacción entre el isopropanol y el aceite, así como que es suficiente un ligero cambio visual en la coloración de la solución para terminar con la adición de KOH y no se debe llegar a notar un rosado intenso. Este procedimiento se utilizó para caracterizar la materia prima de todos los experimentos incluidos en este trabajo y su valor se indica en las respectivas secciones de cálculo de la cantidad de catalizador.

6.6. Cálculo de cantidades requeridas de alcohol y catalizador para la reacción de transesterificación

Los cuatro experimentos desglosados en este trabajo fueron realizados utilizando metanol (CH_3OH) e hidróxido de potasio (KOH); a continuación, se presenta un análisis de las ecuaciones por medio de las que se determinaron las cantidades correspondientes de dichas sustancias para cada proceso. El método de cálculo para los procesos a escala planta piloto es similar debido a que se utilizaron los mismos equipos y las diferencias entre ambas configuraciones del reactor de transesterificación no afectan la cantidad requerida tanto de alcohol como de catalizador para el tratamiento de cierto volumen de aceite.

La materia prima empleada en cada caso es aceite de cocina residual (WCO), obtenido de cafeterías y restaurantes; el cual, se filtró manualmente antes de poder agregarse a las respectivas mezclas alcohol-catalizador-aceite para evitar el ingreso de restos de comida e impurezas a las mismas. El filtrado se realizó por duplicado con filtros de distinto tamaño de poro (en caso de grasas semisólidas se debe precalentar); ahora bien, a escala laboratorio se escogieron elementos adecuados al volumen de aceite a tratar y a escala planta piloto estos se encuentran tanto a la entrada como a la salida del tanque de materia prima.

6.6.1. Método convencional a escala laboratorio

Cálculo de la cantidad de alcohol: Para determinar el volumen de CH_3OH requerido se utilizó la ecuación 1, que asocia el parámetro de relación molar alcohol-aceite (en este caso 3:2) con la cantidad de aceite a tratar en términos de masa.

$$(X \text{ g aceite}) * \left(\frac{1 \text{ mol aceite}}{282 \text{ g aceite}}\right) * \left(\frac{9 \text{ mol } \text{CH}_3\text{OH}}{6 \text{ mol aceite}}\right) * \left(\frac{32 \text{ g } \text{CH}_3\text{OH}}{1 \text{ mol } \text{CH}_3\text{OH}}\right) = X \text{ g } \text{CH}_3\text{OH} \quad (1)$$

Sustituyendo el valor de cantidad de WCO a tratar ($1 \text{ kg} = 1000 \text{ g}$) en la ecuación 1:

$$(1000 \text{ g aceite}) * \left(\frac{1 \text{ mol aceite}}{282 \text{ g aceite}}\right) * \left(\frac{9 \text{ mol } \text{CH}_3\text{OH}}{6 \text{ mol aceite}}\right) * \left(\frac{32 \text{ g } \text{CH}_3\text{OH}}{1 \text{ mol } \text{CH}_3\text{OH}}\right) = 170.2127 \text{ g } \text{CH}_3\text{OH}$$

Para facilitar la medición de la cantidad de metanol en una probeta graduada de 100 mL, se transformó el valor obtenido en términos de masa a volumen. Considerando que la densidad del metanol al 99% es de 0.792 g/mL.

$$(170.2127 \text{ g } \text{CH}_3\text{OH}) \div (0.792 \text{ g/mL}) = 214.9151 \text{ mL } \text{CH}_3\text{OH}$$

Ya obtenido el valor de alcohol necesario para 1 kg de WCO, se depositó dicha cantidad de metanol en un vaso de precipitado de 250 mL.

Cálculo de la cantidad de catalizador: Para determinar la cantidad de KOH requerido se utilizó la ecuación 2, donde el valor 0.9 g KOH corresponde al índice de acidez medido en la titulación de la materia prima y el 86% hace referencia a la pureza del KOH utilizado en este método. Esta ecuación asocia el parámetro de relación catalizador-aceite con la cantidad de WCO a tratar, en términos de masa.

$$\left(\left(\frac{595.3827 \text{ g KOH} / \text{kg aceite}}{86 \% \text{ pureza KOH}} \right) * (X \text{ kg aceite}) \right) + 0.9 \text{ g KOH} = X \text{ g KOH} \quad (2)$$

Sustituyendo el valor en kg de aceite a tratar en la ecuación 2:

$$\left(\left(\frac{595.3827 \text{ g KOH} / \text{kg aceite}}{86 \% \text{ pureza KOH}} \right) * (1 \text{ kg aceite}) \right) + 0.9 \text{ g KOH} = 7.8231 \text{ g KOH}$$

A partir del resultado anterior, se utilizó una balanza analítica de manera que se pesó el KOH hasta obtener la cantidad requerida; posteriormente, esta se depositó en el mismo vaso de precipitado de 250 mL donde se encontraba el CH₃OH.

Mezcla alcohol-catalizador-aceite: Se mezcló el KOH y CH₃OH en el vaso de precipitado correspondiente hasta distinguir una sustancia homogénea, sin partículas sólidas de KOH; por otra parte, se depositó el kg de WCO a tratar en un matraz de 2000 mL y se utilizó la placa de cocción magnética con barra de agitación para iniciar tanto un precalentamiento, hasta llegar a un valor estable de 56 °C, como la agitación del medio de reacción a 80 rpm. Habiendo alcanzado la temperatura de interés se agrega la mezcla de alcohol-catalizador al aceite, manteniendo la agitación constante a lo largo del proceso. Se recomienda mantener cierta distancia al agregar la mezcla de KOH y CH₃OH al WCO, debido a la liberación de gases que esto ocasiona.

6.6.2. Reactor sonoquímico de tipo sonda a escala laboratorio

Cálculo de la cantidad de alcohol: Para determinar el volumen de CH_3OH requerido se utilizó la ecuación 1, que asocia el parámetro de relación molar alcohol-aceite (en este caso 3:2) con la cantidad de WCO a tratar.

$$(X \text{ g aceite}) * \left(\frac{1 \text{ mol aceite}}{282 \text{ g aceite}}\right) * \left(\frac{9 \text{ mol } CH_3OH}{6 \text{ mol aceite}}\right) * \left(\frac{32 \text{ g } CH_3OH}{1 \text{ mol } CH_3OH}\right) = X \text{ g } CH_3OH$$

La ecuación anterior utiliza el valor de cantidad de aceite en términos de masa; por lo que, se transformó el valor de 150 mL a gramos, tomando en cuenta que la densidad del aceite es de 0.823 g/mL.

$$(150 \text{ mL}) * (0.823 \text{ g/mL}) = 123.45 \text{ g aceite}$$

Sustituyendo este valor en la ecuación 1:

$$(123.45 \text{ g aceite}) * \left(\frac{1 \text{ mol aceite}}{282 \text{ g aceite}}\right) * \left(\frac{9 \text{ mol } CH_3OH}{6 \text{ mol aceite}}\right) * \left(\frac{32 \text{ g } CH_3OH}{1 \text{ mol } CH_3OH}\right) = 21.0127 \text{ g } CH_3OH$$

Para facilitar la medición de la cantidad de metanol en una probeta graduada de 100 mL, se transformó el valor obtenido en términos de masa a volumen considerando que la densidad del metanol al 99% es de 0.792 g/mL.

$$(21.0127 \text{ g } CH_3OH) \div (0.792 \text{ g/mL}) = 26.53 \text{ mL } CH_3OH$$

Ya obtenido el valor de alcohol necesario para 150 mL de WCO, se depositó dicha cantidad de metanol en un vaso de precipitado de 250 mL.

Cálculo de la cantidad de catalizador: Para determinar la cantidad de KOH requerido se utilizó la ecuación 3, con la cantidad de aceite a tratar en términos de volumen. Para determinar la cantidad de KOH requerido se utilizó la ecuación 3, donde el valor 0.9 g KOH corresponde al índice de acidez medido en la titulación de la materia prima. Esta ecuación asocia el parámetro de relación catalizador-aceite con la cantidad de aceite a tratar, en términos de volumen, específicamente mililitros (mL).

$$\left(\left(\frac{5.5 \text{ g KOH}}{X \text{ mL aceite}}\right) * (1 \text{ mL aceite})\right) + 0.9 \text{ g KOH} = X \text{ g KOH} \quad (3)$$

Sustituyendo el valor en mL de aceite a tratar en la ecuación 3:

$$\left(\left(\frac{5.5 \text{ g KOH}}{150 \text{ mL aceite}} \right) * (1 \text{ mL aceite}) \right) + 0.9 \text{ g KOH} = 0.9366 \text{ g KOH}$$

El valor 0.9 g KOH de la ecuación 3 corresponde al índice de acidez, medido en la titulación del aceite utilizado como materia prima. A partir del resultado anterior, se utilizó una balanza analítica de manera que se pesó el KOH hasta obtener la cantidad requerida; posteriormente, se depositó en un vaso de precipitado de 250 mL.

Mezcla alcohol-catalizador-aceite: En el vaso de precipitado correspondiente al KOH se vertieron los 26.53 mL de CH₃OH y se mezcló hasta distinguir una sustancia homogénea, sin partículas sólidas de KOH. En la producción convencional de biodiesel es necesario un precalentamiento del aceite a tratar a 56 °C antes de agregar la mezcla alcohol-catalizador; sin embargo, en este caso este paso no es necesario y se agregó directamente a otro vaso de precipitado con los 150 mL de WCO a tratar.

6.6.3. Métodos a escala planta piloto

Cálculo de la cantidad de alcohol: Para determinar el volumen de CH₃OH requerido se utilizó la ecuación 1, que está incluida en la programación del PLC y permite el suministro automático de esta sustancia al reactor; esta, asocia el parámetro de relación molar alcohol-aceite (3:2) con la cantidad de aceite a tratar en términos de masa.

$$(X \text{ g aceite}) * \left(\frac{1 \text{ mol aceite}}{282 \text{ g aceite}} \right) * \left(\frac{9 \text{ mol CH}_3\text{OH}}{6 \text{ mol aceite}} \right) * \left(\frac{32 \text{ g CH}_3\text{OH}}{1 \text{ mol CH}_3\text{OH}} \right) = X \text{ g CH}_3\text{OH}$$

Sustituyendo el valor de cantidad de aceite a tratar (100 kg = 100,000 g) en la ecuación 1:

$$(100,000 \text{ g aceite}) * \left(\frac{1 \text{ mol aceite}}{282 \text{ g aceite}} \right) * \left(\frac{9 \text{ mol CH}_3\text{OH}}{6 \text{ mol aceite}} \right) * \left(\frac{32 \text{ g CH}_3\text{OH}}{1 \text{ mol CH}_3\text{OH}} \right) = 17,021.3 \text{ g CH}_3\text{OH}$$

Tras haber registrado el valor de alcohol necesario para la cantidad de WCO a tratar, el PLC está listo para añadirlo a la mezcla de alcohol-catalizador-aceite.

Cálculo de la cantidad de catalizador: Para determinar la cantidad de KOH requerido se utilizó la ecuación 2, que está incluida en la programación del PLC y permite el suministro automático de esta sustancia al reactor. La respectiva cantidad de aceite a tratar se maneja en términos de masa.

$$\left(\left(\frac{595.3827 \text{ g KOH} / \text{kg aceite}}{90 \% \text{ pureza KOH}} \right) * (100 \text{ kg aceite}) \right) + 1.9 \text{ g KOH} = 663.436 \text{ g KOH}$$

El valor 1.9 g KOH de la ecuación anterior corresponde al índice de acidez medido en la titulación del aceite utilizado como materia prima y el 90% hace referencia a la pureza del KOH utilizado en la planta piloto. A partir del registro del resultado anterior, el PLC está listo para añadir dicha cantidad a la mezcla de alcohol-catalizador-aceite en el reactor.

Mezcla alcohol-catalizador-aceite: En ambos casos a escala planta piloto, esta mezcla tiene lugar en el reactor de transesterificación y todas las sustancias son añadidas automáticamente por el PLC; ahora bien, un lote incluye 100 kg de WCO, 17.0213 kg de CH₃OH y 0.663436 kg de KOH.

6.7. Pruebas de calidad del biodiesel

La calidad del biodiésel obtenido tras la transesterificación se ve afectada por factores como el hecho de que esta última es una reacción escalonada, las propiedades de los ésteres alquílicos que lo componen y la influencia de otros materiales presentes en el producto final, adquiridos principalmente de acuerdo a las condiciones de almacenamiento; más aún, la medida en que dichos factores pueden afectar al biodiésel depende del perfil de FA del mismo y, a su vez, de la materia prima utilizada para su producción. Algunos problemas técnicos que enfrenta este biocombustible incluyen dificultad de flujo en frío y estabilidad de oxidación; estos, se abordan a través de la especificación de límites para ciertas propiedades en normas de calidad como la ASTM D6751-09 y la UNE EN14214, tomadas en cuenta para la realización de pruebas de calidad cuyos resultados permitan la valorización del biodiésel producido en cada experimento presentado en este trabajo. La última actualización de la norma americana ASTM es la D6751-20 y de la norma europea UNE es la EN 14214:2013 V2+A2:2019. A continuación, se presenta la metodología bajo la cual se realizaron las pruebas mencionadas anteriormente y estas corresponden a la determinación del número ácido, contenido de jabones, densidad del biocombustible y punto de inflamación. Es importante mencionar que se tomó un volumen de muestra del producto final de cada experimento equivalente a 100 mL.

6.7.1. Número ácido

Esta prueba se realizó con el objetivo de determinar la acidez total del biodiésel, a partir de una solución de KOH, en base al método de prueba ASTM D664. Se comenzó colocando 1 mL de biodiésel, con una pipeta volumétrica de 1 mL, en un vaso de precipitado; posteriormente, se disolvió en 10 mL de isopropanol tomados con una pipeta volumétrica de dicha capacidad y se agregó una gota de fenolftaleína. Es importante mencionar que esta solución debe observarse en una sola fase; de lo contrario, será necesario calentarla con un plato caliente hasta lograr la homogeneidad, considerando que el punto de ebullición del isopropanol es de 80 °C y no se deberá superar esta temperatura. El procedimiento continuó llenando una bureta de 25 mL con el titulante, que es KOH, asegurando que el menisco esté en el 0 marcado por la misma; por otra parte, se corroboró que la bureta no contuviera burbujas de aire. El KOH fue dispensado gota a gota en el vaso de precipitado con la solución de biodiésel-isopropanol-fenolftaleína, con agitación constante, hasta que se observó un cambio de tonalidad a un color rosado. Finalmente se anotó el volumen drenado por la bureta y se realizó una conversión a unidades similares a las establecidas en las normas internacionales.

6.7.2. Contenido de jabones (cuantitativa)

El objetivo de esta prueba es determinar el contenido de jabones, o saponificación no deseada, en el biodiésel. Se comenzó colocando 1 mL de biodiésel, con una pipeta volumétrica de 1 mL, en un vaso de precipitado; posteriormente, se disolvió en 10 mL de isopropanol tomados con una pipeta volumétrica de dicha capacidad y se agregó un par de gotas de bromofenol a la solución. Los posibles resultados de este procedimiento son:

- A: Color amarillo, aceptable.
- B: Color verde, aceptable.
- C: Color azul, presencia de jabón (>66 ppm).

6.7.3. Densidad

Con esta prueba se determinó la densidad del biodiésel; de manera que, se comenzó pesando un picnómetro de 25 mL, vacío, en una balanza analítica y se registró dicho valor como P_1 . Después, se llenó dicho elemento con biodiésel hasta la marca de 25 mL y se volvió a pesar, este segundo resultado se registró como P_2 . Para determinar la densidad se utilizó la ecuación 4:

$$\frac{P_2 - P_1}{V} \quad (4)$$

Tomando en cuenta que el volumen (V) es de 25 mL y los valores P₁ y P₂ obtenidos mediante el procedimiento desglosado anteriormente, se obtuvo la densidad del biodiésel producido en base a cada experimento incluido en este trabajo

6.7.4. Punto de inflamación (Flash Point)

Esta prueba de calidad se realizó con el objetivo de determinar la temperatura a la que debe calentarse el biodiésel para presentar una inflamación instantánea de sus vapores en presencia de una llama directa; esto, en base al método de prueba ASTM D93. Se comenzó llenando el recipiente del equipo para la medición de Flash Point copa cerrada Koehler con una muestra de biodiésel de aproximadamente 69 mL (hasta la marca); posteriormente, se encendió el equipo y, con la perilla de control de temperatura, se estableció un valor de 70 °C. Se utilizó un termómetro con escala de 200 °C para medir hasta los 100 °C, de manera que en este punto se bajó la temperatura a 30 °C con ayuda de la perilla mencionada anteriormente; ahora, cuando el termómetro llegó a 110 °C se bajó nuevamente la temperatura, ahora a 10 °C. Como siguiente paso, se encendió una flama con ayuda de un encendedor y la perilla de control de gas (B) que, a su vez, sirvió para ajustarla a un nivel bajo y estable; luego, se encendió otra flama con ayuda de la que fue encendida y otra perilla de control de gas (A). Cuando el termómetro indicó una temperatura de 119 °C se encendió el motor del equipo copa cerrada Koehler, que se apagó al llegar a los 120 °C y se giró la perilla de control de gas para observar una posible chispa; esto, se repitió al llegar a los 129 °C. En caso de llegar a los 155 °C se debe checar la presencia o no de la chispa a cada grado que se sube, siguiendo los pasos mencionados anteriormente.

7. Resultados

En esta sección se desglosarán los tiempos de reacción, volúmenes tanto de mezcla tratada como de producto final obtenido y resultados de las diferentes pruebas de calidad correspondientes a cada experimento incluido en este trabajo.

7.1. Tiempos de reacción y volúmenes tanto de mezcla tratada como de producto final obtenido

Experimentos a escala laboratorio: La metodología convencional requiere de 1.5 horas para completar la reacción de transesterificación, independientemente del volumen de mezcla alcohol-catalizador-aceite a tratar; por otro lado, utilizando el homogeneizador de tipo sonda UP200-ht podemos completar la reacción en 5 minutos para un determinado volumen de dicha mezcla. El volumen de mezcla de ambos experimentos a escala laboratorio se obtuvo a partir de la suma de los datos presentados en su respectiva metodología (ecuación 5), en la sección de ‘Cálculo de cantidades requeridas de alcohol y catalizador para la reacción de transesterificación’, considerando un valor de densidad del KOH igual a 1.05 g/mL y un valor de densidad del aceite residual de cocina equivalente a 0.9 g/mL.

$$\left(\frac{X \text{ g de aceite}}{0.9 \frac{\text{g}}{\text{mL}}} \right) + X \text{ mL de } \text{CH}_3\text{OH} + \left(\frac{X \text{ g de KOH}}{1.05 \frac{\text{g}}{\text{mL}}} \right) = X \text{ mL} \quad (5)$$

Sustituyendo las variables en la ecuación, con datos correspondientes al experimento convencional:

$$\left(\frac{1000 \text{ g de aceite}}{0.9 \frac{\text{g}}{\text{mL}}} \right) + 214.9151 \text{ mL de } \text{CH}_3\text{OH} + \left(\frac{7.8231 \text{ g de KOH}}{1.05 \frac{\text{g}}{\text{mL}}} \right) = 1,333.477 \text{ mL}$$

Tenemos que el volumen de mezcla total para el experimento convencional fue de 1,333.477 mL. Ahora, sustituyendo las variables en la ecuación, con datos correspondientes al experimento sonoquímico:

$$150 \text{ mL de aceite} + 26.53 \text{ mL de } \text{CH}_3\text{OH} + \left(\frac{0.9366 \text{ g de KOH}}{1.05 \frac{\text{g}}{\text{mL}}} \right) = 177.422 \text{ mL}$$

Tenemos que el volumen de mezcla total para el experimento sonoquímico fue de 177.422 mL.

Experimentos a escala planta piloto: Como se mencionó en las secciones 6.3 y 6.4, la planta piloto opera por lotes de mezcla alcohol-catalizador-aceite que cuentan con un volumen de 120 L sin importar el tipo procesamiento; ahora bien, se especifica que convencionalmente se requieren de 1.5 horas para el tratamiento de un solo lote y únicamente 24 minutos al optar por un método de intensificación por ultrasonidos.

7.2. Resultados de pruebas de calidad

En orden para realizar un análisis de los resultados obtenidos a partir de las pruebas de calidad incluidas en este trabajo; a continuación, en la Tabla 18, se presentan dichos valores junto con una descripción que indica si se cumple o no con los límites establecidos en las normas ASTM D6751-09 y UNE EN14214.

Tabla 18. Resultados obtenidos de las distintas pruebas de calidad y cumplimiento respecto a valores definidos en normas internacionales.

Experimento	Número ácido [mg KOH/g]	Contenido de jabones	Densidad		Flash point / Punto de inflamación [°C]
			[g/mL]	[kg/m ³]	
Método convencional a escala laboratorio	0.5 – Valor que cumple con normas ASTM D6751-09 y UNE EN14214	A – Aceptable	0.83	830 – Valor que no cumple con norma UNE EN14214	120 - Valor que cumple con normas ASTM D6751-09 y UNE EN14214
Reactor sonoquímico de tipo sonda a escala laboratorio	0.4 – Valor que cumple con normas ASTM D6751-09 y UNE EN14214	A – Aceptable	0.88	880 – Valor que cumple con norma UNE EN14214	162 - Valor que cumple con normas ASTM D6751-09 y UNE EN14214

Método convencional a escala planta piloto	0.4 – Valor que cumple con normas ASTM D6751-09 y UNE EN14214	B – Aceptable	0.79	790 - Valor que no cumple con norma UNE EN14214	57 – Valor que no cumple con normas ASTM D6751-09 y UNE EN14214
Reactor sonoquímico de celda de flujo a escala planta piloto	0.31 – Valor que cumple con normas ASTM D6751-09 y UNE EN14214	A – Aceptable	0.894	894 – Valor que cumple con norma UNE EN14214	178 - Valor que cumple con normas ASTM D6751-09 y UNE EN14214

En el caso del experimento correspondiente al reactor sonoquímico de celda de flujo a escala planta piloto, se ha reportado en la literatura que un tratamiento ultrasónico de entre 15 y 30 minutos (similar a los 24 minutos que tarda el dispositivo UIP 1000hdT en tratar un lote de materia prima) permite la obtención de un biodiésel con un valor promedio de número ácido equivalente a 0.31 mg KOH/g (Fuentes-Campos y cols., 2016). Por otra parte, al implementar el reactor sonoquímico de celda de flujo a escala planta piloto, el resultado a esta escala pasaría de B a A, ya que esta técnica proporciona condiciones de reacción, en términos de temperatura y agitación, que disminuyen la posibilidad de formación de jabones.

También, Hingu y cols. (2010) reportaron un valor de densidad de biodiésel equivalente a 0.894 g/cm^3 , considerando una producción mediante un homogeneizador ultrasónico de tipo sonda con una frecuencia de 20 kHz y que a su vez fue sometido a un lavado húmedo. Debido a las similitudes entre dicho experimento y el experimento correspondiente al reactor sonoquímico de celda de flujo a escala planta piloto, desglosado en este trabajo, asociadas al tipo lavado del producto final y condiciones de operación del equipo utilizado en dicho experimento, se esperaría obtener un valor de densidad similar; asimismo, Vicente Pardal (2012) informó un valor de punto de inflamación equivalente a 178 °C para un biodiésel elaborado a partir de una reacción de transesterificación asistida por un reactor ultrasónico con parámetros de trabajo que incluyen una frecuencia de 20 kHz, potencia de 40% y un tiempo de reacción igual a 15 minutos. Estas características de operación son similares a las del procesamiento con el dispositivo ultrasónico propuesto para la planta piloto ubicada en la UAQ: por ello, se esperaría obtener un valor de flash point similar para el biodiésel producido en este experimento.

8. Discusión

En esta sección se relacionan los valores de tiempos de reacción, eficiencias de conversión y calidad de los productos finales de los distintos experimentos, con la finalidad de dimensionar la magnitud de intensificación del proceso al optar por un sistema ultrasónico en vez de un sistema convencional para la producción de biodiesel a distintas escalas.

8.1. Análisis de tiempos de reacción

Experimentos a escala laboratorio: Con base en los valores presentados en la sección 7.1, correspondientes a los experimentos a escala laboratorio, se determinó la cantidad de veces que se tendría que repetir el experimento sonoquímico para tratar el volumen de mezcla del experimento convencional, a partir de la ecuación 6.

$$\frac{X \text{ mL tratados convencionalmente}}{X \text{ mL con tratamiento sonoquímico}} = X \text{ número de experimentos sonoquímicos} \quad (6)$$

Sustituyendo las variables en la ecuación, con datos correspondientes al volumen de mezcla tratada en cada experimento a escala laboratorio:

$$\frac{1,333.477 \text{ mL tratados convencionalmente}}{177.422 \text{ mL con tratamiento sonoquímico}} = 7.516 \sim 8 \text{ número de experimentos sonoquímicos}$$

Resulta que se necesitarían alrededor de 8 repeticiones del experimento sonoquímico para tratar el volumen de mezcla alcohol-catalizador-aceite correspondiente al experimento convencional. Retomando el tiempo que tarda en completarse la reacción de transesterificación al utilizar el UP200-ht y tomando en cuenta el valor obtenido de la ecuación 6 podemos decir que, al intensificar el proceso convencional a escala laboratorio mediante la implementación de este dispositivo ultrasónico, pasaríamos de tardar 1.5 horas en tratar 1,333.477 mL de mezcla a tan solo 40 minutos; lo cual, representa una reducción en tiempo del 55.556%. La ruta sonoquímica permitiría completar la reacción de transesterificación en menos de la mitad del tiempo que bajo un procesamiento convencional.

Experimentos a escala planta piloto: Con base en los valores presentados en la sección 7.1, correspondientes a los experimentos a escala planta piloto, se determinó la proporción que representa el tiempo de reacción del procesamiento sonoquímico (TRS) respecto al tiempo de reacción del procesamiento convencional (TRC), utilizando la ecuación 7:

$$\left(\frac{TRS}{TRC}\right) * 100 = \text{Proporción del TRS respecto al TRC} \quad (7)$$

Sustituyendo los valores correspondientes en la ecuación 7:

$$\left(\frac{24 \text{ minutos}}{90 \text{ minutos}}\right) * 100 = 26.66\%$$

Finalmente, resulta que el tiempo de reacción de la ruta sonoquímica representa un 26.66% del tiempo de reacción de la ruta convencional. Se permitiría disminuir el tiempo de reacción en un 73.33%; en otras palabras, intensificando el procesamiento a escala planta piloto mediante la asistencia de ultrasonidos, la etapa del reactor de transesterificación se completaría en aproximadamente una cuarta parte del tiempo requerido bajo un procesamiento convencional. Considerando esto último, en caso de que se implementara el homogeneizador UIP 1000hdT en la planta piloto ubicada en la UAQ, esta tardaría únicamente 7.8 hrs en producir los mismos 170-200 litros que produce ahora en 10 hrs.

8.2. Análisis de eficiencias de conversión

Experimentos a escala laboratorio: El volumen de la mezcla de materia prima procesada convencionalmente fue de 1,333.477 mL; ahora, tras haber dejado reposar el biodiésel recuperado se calculó su volumen al depositarlo en una probeta graduada de 2 L, que se escogió debido a que cuenta con la capacidad de contener un volumen mayor al de la mezcla. Resultó que se obtuvo un total de 581 mL de producto final y para obtener el valor de eficiencia de conversión de este experimento se utilizó la ecuación 8:

$$\frac{(X \text{ mL biodiésel} * 100\%)}{X \text{ mL mezcla}} = X\% \text{ eficiencia de conversión} \quad (8)$$

Sustituyendo los valores correspondientes en la ecuación 8, asociados al experimento convencional a escala laboratorio:

$$\frac{(581 \text{ mL biodiésel} * 100\%)}{1,333.477 \text{ mL mezcla}} = 43.57\% \text{ eficiencia de conversión}$$

Se calculó que este proceso tuvo una eficiencia de conversión o rendimiento de biodiésel de 43.57%. Por otro lado, el volumen de mezcla de materia prima correspondiente al experimento sonoquímico a esta escala fue de 177.422 mL y siguiendo el mismo procedimiento que para el biodiésel recuperado mediante la técnica convencional, en este caso utilizando una probeta

graduada de 250 mL como depósito para el biocombustible sintetizado, resultó que se obtuvo un total de 142 mL de producto final. Sustituyendo los valores correspondientes en la ecuación, asociados al experimento asistido por ultrasonidos a escala laboratorio:

$$\frac{(142 \text{ mL biodiésel} * 100\%)}{177.422 \text{ mL mezcla}} = 80.03\% \text{ eficiencia de conversión}$$

Se calculó que esta técnica tuvo una eficiencia de conversión o rendimiento de biodiésel de 80.03%. Haciendo una comparación entre los porcentajes de rendimiento de ambos experimentos, podemos observar un incremento de 36.46% al optar por un procesamiento sonoquímico en vez de uno convencional y se producirían alrededor de 1,067 mL, en vez de los 581 mL, al tratar el volumen de mezcla del experimento convencional bajo las condiciones del experimento sonoquímico.

Experimentos a escala planta piloto: A esta escala se optó por calcular la eficiencia de conversión o rendimiento de biodiésel comenzando por la medición de la cantidad de glicerol obtenida del procesamiento de dos lotes (240 L); esto, porque el volumen del subproducto es sustancialmente menor y, a su vez, más sencillo de manipular. De manera convencional, el proceso genera 43 L de glicerol crudo tras la separación de la mezcla de este material y el biocombustible de interés; entonces, tomando en cuenta el volumen de los lotes y el valor anterior, resulta que se producen 197 L de producto final. Sustituyendo los valores correspondientes en la ecuación 8, asociados al experimento convencional a escala planta piloto:

$$\frac{(197 \text{ L biodiésel} * 100\%)}{240 \text{ L mezcla}} = 82.08\% \text{ eficiencia de conversión}$$

Se calculó que esta técnica tuvo una eficiencia de conversión o rendimiento de biodiésel de 82.08%. En el caso del experimento correspondiente al reactor sonoquímico de celda de flujo a escala planta piloto, una investigación reportada por García Abreu (2021) indica que se ha demostrado en la literatura una eficiencia de conversión promedio, a través de la reacción de transesterificación asistida por ultrasonidos, de 91.69%. Haciendo una comparación entre los porcentajes de rendimiento de ambos experimentos, podemos observar un incremento de 9.61% asociado a optar por un procesamiento sonoquímico en vez de uno convencional y se producirían 220 L en vez de los 197 L actuales.

8.3. Análisis de la calidad del biodiesel obtenido

De la Tabla 20, se observa que los resultados de la prueba de número ácido indican que los productos finales de todos los experimentos incluidos en este trabajo cumplen con los límites establecidos en ambas normas internacionales; sin embargo, cabe destacar que el procedimiento convencional cuenta con un valor más alto en relación al procedimiento sonoquímico, tanto a escala laboratorio como planta piloto. Asimismo, cabe destacar que el valor que más se aleja de los límites definidos dentro de las normas de calidad es el correspondiente al reactor sonoquímico de celda de flujo a escala planta piloto.

Los valores asociados a la prueba de densidad muestran que las técnicas convencionales a ambas escalas, laboratorio y planta piloto, no permiten la obtención de un biocombustible que cumpla con los límites establecidos en la norma internacional UNE EN114214 para este parámetro; al contrario, se puede ver que las técnicas sonoquímicas a distintas escalas cuentan con valores que sí cumplen con dicha norma de calidad. Es importante mencionar que esta propiedad no se incluye en la norma ASTM D6751-09.

Por último, en relación a la prueba de flash point o punto de inflamación, se tiene que el único experimento que cuenta con un valor fuera de los límites establecidos en las normas de calidad es el método convencional a escala planta piloto; lo cual, favorece a la propuesta de cambiar la configuración del reactor de transesterificación con el que se procesa actualmente la materia prima, de manera que el biodiésel obtenido como producto final tendría la calidad requerida por los estándares internacionales. A pesar de que la prueba de contenido de jabones no cuenta con límites establecidos en la ASTM D6751-09 y UNE EN14214, se puede apreciar que se pasaría de un resultado B a uno A en caso de optar por la implementación de un reactor sonoquímico en vez de uno convencional.

9. Conclusiones

Los resultados obtenidos a partir de las 4 actividades experimentales, asociadas tanto a la producción convencional de biodiésel como mediante procesamientos sonoquímicos, corroboran la hipótesis planteada en este trabajo y permiten visualizar tanto la alta viabilidad como la magnitud de los beneficios que se obtendrían al implementar el homogeneizador ultrasónico de tipo sonda con celda de flujo en la configuración del reactor de transesterificación que se utiliza hoy en día en la planta piloto ubicada en la UAQ, campus CU; estos, demuestran que la planta piloto aumentaría su producción diaria de 408 – 480 L/día a 523 – 584 L/día de biodiésel, considerando únicamente que la planta trabajara 24 hrs y que a esta escala el proceso convencional tarda 10 horas en producir 170-200 L, mientras que el sonoquímico tarda 7.8 horas en producir lo mismo. Cabe destacar que el equipo UIP 1000hdT está diseñado para funcionar las 24 horas de los 7 días de la semana.

Al optar por un reactor sonoquímico de celda de flujo a escala planta piloto se tendría una producción similar a la actual, con una reducción en tiempo del 73.33% en la etapa de transesterificación, mejoraría la eficiencia de conversión del proceso al pasar de 82.08% a 91.69%, y se obtendría un biodiésel con valores de parámetros de calidad que permiten cumplir con normas internacionales que actualmente no se satisfacen (prueba de densidad y flash point); ahora bien, a escala laboratorio resultó que el uso de un homogeneizador de tipo sonda implica una reducción en el tiempo de reacción del 55.55%, una mejora en la eficiencia de conversión al pasar de 43.57% a 80.03% (se producirían 1,067 mL en vez de 581 mL, en un menor tiempo de reacción), y la obtención de un producto final con valores de índices calidad que cumplen con estándares internacionales que no se cumplen mediante técnicas convencionales (prueba de densidad).

Cabe resaltar que la planta piloto analizada aún no cuenta con un programa de recuperación y disposición del glicerol crudo obtenido como subproducto, que apoyaría la economía general del proceso; además, que el dispositivo sonoquímico propuesto cuenta con flujos de trabajo predefinidos por el fabricante y se deben considerar soluciones que aseguren que este sea adecuado para una operación continua, en caso de ser necesarias.

10. Referencias

3.6.3 Sondas ultrasónicas | Técnicas y operaciones avanzadas en el laboratorio químico (TALQ). (s.f.). <https://www.ub.edu/talq/es/node/256>

Ali, S. D., Javed, I. N., Rana, U. A., Nazar, M. F., Ahmed, W., Junaid, A., Pasha, M., Nazir, R., & Nazir, R. (2017). Novel SRO-CAO mixed metal oxides catalyst for Ultrasonic-Assisted transesterification of jatropha oil into biodiesel. *Australian Journal of Chemistry*, 70(3), 258. <https://doi.org/10.1071/ch16236>

Arias Sierra, S. (2022). Diseño y construcción de un reactor ultrasónico por cavitación para el tratamiento de aguas residuales provenientes del proceso de curtiembres. [Tesis de licenciatura, Universidad Libre de Colombia]. <https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/23455/Dise%c3%b1o%20y%20construcci%c3%b3n%20de%20un%20reactor%20ultras%c3%b3nico%20por%20cavitaci%c3%b3n%20para%20el%20tratamiento%20de%20aguas%20residuales%20provenientes%20del%20proceso%20de%20curtiembres..pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Atadashi, I., Aroua, M. K., & Aziz, A. R. A. (2011). Biodiesel separation and purification: A review. *Renewable Energy*, 36(2), 437-443. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.07.019>

Atadashi, I., Aroua, M. K., Raman, A. A. A., & Sulaiman, N. M. N. (2011). Refining technologies for the purification of crude biodiesel. *Applied Energy*, 88(12), 4239-4251. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.05.029>

Babadi, A. A., Rahmati, S., Fakhlaei, R., Barati, B., Wang, S., Doherty, W. J., & Ostrikov, K. (2022). Emerging technologies for biodiesel production: Processes, challenges, and opportunities. *Biomass & Bioenergy*, 163, 106521. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2022.106521>

Babicz, I., Leite, S. G. F., De Souza, R. O. M. A., & Antunes, O. A. C. (2010). Lipase-catalyzed diacylglycerol production under sonochemical irradiation. *Ultrasonics Sonochemistry*, 17(1), 4-6. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2009.07.005>

Berrios, M., & Skelton, R. (2008). Comparison of purification methods for biodiesel. *Chemical Engineering Journal*, 144(3), 459-465. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2008.07.019>

Bozbas, K. (2008). Biodiesel as an alternative motor fuel: Production and policies in the European Union. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 12(2), 542-552. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2005.06.001>

Cabrera-Munguía, D. A., Romero Galarza, A., López Montes, R. A., Rios González, L. J., & Leyva Inzunza, Z. C. (2022). Producción de Biodiésel en México: Estado Actual y perspectivas. *CienciAcierta*, 72, ISSN: 2683-1848. <http://www.cienciacierta.uadec.mx/articulos/cc72/292producciondebiodisel.pdf>

Cercado, A. P., Ballesteros, F., & Capareda, S. C. (2018). Ultrasound assisted transesterification of microalgae using synthesized novel catalyst. *Sustainable environment research*, 28(5), 234-239. <https://doi.org/10.1016/j.serj.2018.03.002>

Chand, P., Chintareddy, V. R., Verkade, J. G., & Grewell, D. (2010). Enhancing biodiesel production from soybean oil using ultrasonics. *Energy & Fuels*, 24(3), 2010-2015. <https://doi.org/10.1021/ef9011752>

- Chatel, G. (2018). How sonochemistry contributes to green chemistry? *Ultrasonics Sonochemistry*, 40, 117-122. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.03.029>
- Chookaew, T., O-Thong, S., & Prasertsan, P. (2015). Biohydrogen production from crude glycerol by two stage of dark and photo fermentation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(24), 7433-7438. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.02.133>
- De Freitas, V. O., Matte, C. R., Poppe, J. K., Rodrigues, R. C., & Ayub, M. A. Z. (2019). ULTRASOUND-ASSISTED TRANSESTERIFICATION OF SOYBEAN OIL USING COMBI-LIPASE BIOCATALYSTS. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 36(2), 995-1005. <https://doi.org/10.1590/0104-6632.20190362s20180455>
- Deshmane, V. G., Gogate, P. R., & Pandit, A. B. (2008). Process Intensification of synthesis process for medium chain glycerides using cavitation. *Chemical Engineering Journal*, 145(2), 351-354. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2008.08.012>
- Dhabhai, R., Ahmadifeijani, E., Dalai, A. K., & Reaney, M. J. T. (2016). Purification of crude glycerol using a sequential physico-chemical treatment, membrane filtration, and activated charcoal adsorption. *Separation and Purification Technology*, 168, 101-106. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2016.05.030>
- Fuentes-Campos, M. E., Aranda S., M. D., & Gómez G., S. T. (2016). Ondas ultrasónicas aplicadas en el biodiésel producido con diferentes tipos de aceites vegetales. *Revista del Instituto de Investigación, FIGMMG-UNMSM*, 19(38), 147-151.
- García Abreu, A. (2021). Obtención de biodiesel asistida por ultrasonidos a partir de aceites de *Jatropha curcas* y *Moringa oleífera*. *Revista Estudiantil Nacional de Ingeniería y Arquitectura*, 2(1), e14.
- García-Muentes, S. A., Sánchez del Campo-Lafita, A. E., Labrada-Vázquez, B., Lafargue-Pérez, F., & Díaz-Velázquez, M. (2018). Cinética de la reacción de transesterificación para la producción de biodiesel a partir del aceite de *Jatropha curcas* L., en la provincia de Manabí, Ecuador. *Tecnología Química*, 38(2). <https://www.redalyc.org/journal/4455/445558422007/html/>
- Gogate, P. R., Mujumdar, S., & Pandit, A. B. (2003). Sonochemical Reactors for waste water treatment: Comparison using formic acid degradation as a model reaction. *Advances in Environmental Research*, 7(2), 283-299. [https://doi.org/10.1016/s1093-0191\(01\)00133-2](https://doi.org/10.1016/s1093-0191(01)00133-2)
- Gole, V. L., & Gogate, P. R. (2012a). Intensification of synthesis of biodiesel from nonedible oils using sonochemical reactors. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 51(37), 11866-11874. <https://doi.org/10.1021/ie2029442>
- Gole, V. L., & Gogate, P. R. (2012b). A review on intensification of synthesis of biodiesel from sustainable feed stock using sonochemical reactors. *Chemical Engineering and Processing*, 53, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2011.12.008>
- Google. (s. f.). Google Maps. Google Maps. Recuperado 24 de agosto de 2023, de <https://www.google.com/maps/@20.5931198,-100.4138185,18z?entry=ttu>

Gupta, A. R., Yadav, S. V., & Rathod, V. K. (2015). Enhancement in biodiesel production using waste cooking oil and calcium diglyceroxide as a heterogeneous catalyst in presence of ultrasound. *Fuel*, 158, 800-806. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.05.064>

Hanh, H. D., Okitsu, K., Nishimura, R., & Maeda, Y. (2009). Biodiesel production through transesterification of triolein with various alcohols in an ultrasonic field. *Renewable Energy*, 34(3), 766-768. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.04.007>

He, Q., McNutt, J., & Yang, J. (2017). Utilization of the residual glycerol from biodiesel production for renewable energy generation. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 71, 63-76. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.110>

Hielscher Ultrasonics GmbH. (2023, 11 mayo). Flow Cells and Inline Reactors for Lab Ultrasonicators. Hielscher Ultrasonics. Recuperado 28 de julio de 2023, de <https://www.hielscher.com/es/flow-cells-and-inline-reactors-for-lab-ultrasonicators.htm>

Hingu, S. M., Gogate, P.R., & Rathod, V K. (2010) Synthesis of biodiesel from waste cooking oil using sonochemical reactors *Ultrasonics Sonochemistry*, 17(5), 827-832. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2010.02.010>

Huang, D., Jiang, X., Zhu, H., Fu, X., Zhong, K., & Gao, W. (2010). Improved synthesis of sucrose fatty acid monoesters under ultrasonic irradiation. *Ultrasonics Sonochemistry*, 17(2), 352-355. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2009.08.009>

Hussain, M., & Janajreh, I. (2018). Acousto-chemical analysis in multi-transducer sonochemical reactors for biodiesel production. *Ultrasonics Sonochemistry*, 40, 184-193. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.07.009>

Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura [IICA]. (2021, 16 septiembre). Fuerte incremento en el consumo de biocombustibles durante los últimos 20 años. Blog del IICA. Recuperado 30 de octubre de 2023, de <https://blog.iica.int/blog/fuerte-incremento-en-consumo-biocombustibles-durante-los-ultimos-20-anos#:~:text=Los%20biocombustibles%20I%C3%ADquidos%20se%20han,m%C3%A1s%20amigables%20con%20el%20medioambiente.>

Instituto Mexicano del Petróleo [IMP]. (2018). Reporte de inteligencia tecnológica. Biodiesel. (F. Pacheco Román, Ed.) [EN LINEA]. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/313548/Reporte_Inteligencia_Tecnologica_BIODIESEL_270318.pdf

Jogi, R., Murthy, Y. S., Satyanarayana, M., Rao, T. N., & Javed, S. (2016). Biodiesel production from Degummed *Jatropha Curcas* oil using constant-temperature ultrasonic water bath. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, And Environmental Effects*, 38(17), 2610-2616. <https://doi.org/10.1080/15567036.2015.1093044>

Karmakar, A., Karmakar, S., & Mukherjee, S. (2010). Properties of various plants and animals feedstocks for biodiesel production. *Bioresource Technology*, 101(19), 7201-7210. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.04.079>

- Kelkar, M. A., Gogate, P. R., & Pandit, A. B. (2008). Intensification of esterification of acids for synthesis of biodiesel using acoustic and hydrodynamic cavitation. *Ultrasonics Sonochemistry*, 15(3), 188-194. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2007.04.003>
- Knothe, G., Van Gerpen, J., & Krahl, J. (Eds.). (2005). *The Biodiesel Handbook* (1.a ed.) [EN LÍNEA]. AOCS Press. https://ia800204.us.archive.org/24/items/The_Biodiesel_Handbook_Knothe_van_Gerpen_and_Krahl/The_Biodiesel_Handbook_Knothe_van_Gerpen_and_Krahl.pdf
- Kumar, D., Kumar, G., Poonam, & Singh, C. P. (2010). Fast, easy ethanolysis of coconut oil for biodiesel production assisted by ultrasonication. *Ultrasonics Sonochemistry*, 17(3), 555-559. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2009.10.018>
- Malani, R. S., Shinde, V., Ayachit, S., & Goyal, A. (2019). Ultrasound-assisted biodiesel production using heterogeneous base catalyst and mixed non-edible oils. *Ultrasonics Sonochemistry*, 52, 232-243. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.11.021>
- Malani, R. S., Umriwad, S. B., Kumar, K., & Goyal, A. (2019). Ultrasound-assisted enzymatic biodiesel production using blended feedstock of non-edible oils: kinetic analysis. *Energy Conversion and Management*, 188, 142-150. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.03.052>
- Medina Ramírez, I. E., Chávez Vela, N. A., & Jáuregui Rincón, J. (2012). Biodiesel, un combustible renovable. *Investigación y Ciencia*, 20(55), ISSN: 1665-4412. <https://www.redalyc.org/pdf/674/67424409008.pdf>
- Meráz, D. R. (2016). Optimización del proceso de producción de biodiesel a partir de aceites de cocina residuales. Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ). Facultad de Ingeniería. Tesis para obtener el grado de maestría.
- Meher, L. C., Sagar, D. V., & Naik, S. N. (2006). Technical aspects of biodiesel production by transesterification—a review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 10(3), 248-268. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2004.09.002>
- Merino, A. G., & Zavala, Y. C. (2008). Biocombustibles, biotecnología y alimentos. Impactos sociales para México. *Argumentos. Estudios críticos de la sociedad*, 21(57), 55-83. <http://scielo.unam.mx/pdf/argu/v21n57/v21n57a4.pdf>
- Monteiro, M. R., Kugelmeier, C. L., Pinheiro, R. S., Batalha, M. O., & Da Silva César, A. (2018). Glycerol from biodiesel production: Technological paths for sustainability. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 88, 109-122. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.02.019>
- Mootabadi, H., Salamatina, B., Bhatia, S., & Abdullah, A. Z. (2010). Ultrasonic-assisted biodiesel production process from palm oil using alkaline earth metal oxides as the heterogeneous catalysts. *Fuel*, 89(8), 1818-1825. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.12.023>
- Musa, I. A. (2016). The effects of alcohol to oil molar ratios and the type of alcohol on biodiesel production using transesterification process. *Egyptian Journal of Petroleum*, 25(1), 21-31. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2015.06.007>
- Ordoñez, S. (2009). Después de Hubbert. Los combustibles fósiles. *Boletín de la Real Sociedad Geográfica*, Tomo CXLV. <https://realsociedadgeografica.com/wp-content/uploads/2018/02/BOLETIN-RSG-2009-CXLV.pdf#page=9>

- Pukale, D. D., Maddikeri, G. L., Gogate, P. R., Pandit, A. B., & Pratap, A. P. (2015). Ultrasound assisted transesterification of waste cooking oil using heterogeneous solid catalyst. *Ultrasonics Sonochemistry*, 22, 278-286. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2014.05.020>
- Ramos, M. M. D., Dias, A. C. G., Puna, J., Gomes, J., & Bordado, J. C. (2019). Biodiesel Production Processes and Sustainable Raw Materials. *Energies*, 12(23), 4408. <https://doi.org/10.3390/en12234408>
- Ruíz Rocha, J. E., & Gutiérrez Ortega, N. L. (2015). Transesterificación de Ácidos Grasos Asistida por Irradiación Ultrasónica para la Obtención de Biodiésel. *Jóvenes en la Ciencia*, 1(2), 1726-1730.
- Santos, F. F. P. D., Rodrigues, S., & Fernandes, F. A. N. (2009). Optimization of the production of biodiesel from soybean oil by ultrasound assisted methanolysis. *Fuel Processing Technology*, 90(2), 312-316. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2008.09.010>
- Selvakumar, P., & Sivashanmugam, P. (2019). Ultrasound assisted oleaginous yeast lipid extraction and garbage lipase catalyzed transesterification for enhanced biodiesel production. *Energy Conversion and Management*, 179, 141-151. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.10.051>
- Stavarache, C., Vinatoru, M., Nishimura, R., & Maeda, Y. (2005). Fatty acids methyl esters from vegetable oil by means of ultrasonic energy. *Ultrasonics Sonochemistry*, 12(5), 367-372. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2004.04.001>
- Sun, X., Liu, S., Manickam, S., Tao, Y., Yoon, J. Y., & Xuan, X. (2023). Intensification of biodiesel production by hydrodynamic cavitation: A critical review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 179, 113277. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113277>
- Takase, M., Chen, Y., Li, H., Zhao, T., Yang, L., & Wu, X. (2014). Biodiesel production from non-edible silybum marianum oil using heterogeneous solid base catalyst under ultrasonication. *Ultrasonics Sonochemistry*, 21(5), 1752-1762. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2014.04.003>
- Thanh, L. T., Okitsu, K., Sadanaga, Y., Takenaka, N., Maeda, Y., & Bandow, H. (2010). A two-step continuous ultrasound assisted production of biodiesel fuel from waste cooking oils: a practical and economical approach to produce high quality biodiesel fuel. *Bioresource Technology*, 101(14), 5394-5401. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.02.060>
- Torossi Baudino, F. D. (2006). Reacciones en contexto: la transesterificación en la producción de biodiesel a partir de aceite de fritura usado. *ANALES de la Real Sociedad Española de Química*, 102(3), 43-49.
- Vicente Pardal, A. C. D. (2012). Obtención de biodiesel por transesterificación de aceites vegetales: nuevos métodos de síntesis [Tesis Doctoral]. Universidad de Extremadura.
- Yadav, A. K., Khan, M. T., Pal, A., & Singh, B. (2016). Ultrasonic-assisted optimization of biodiesel production from karabi oil using heterogeneous catalyst. *Biofuels*, 9(1), 101-112. <https://doi.org/10.1080/17597269.2016.1259522>

Yu, D., Tian, L., Wu, H., Wang, S., Wang, Y., Ma, D., & Fang, X. (2010). Ultrasonic irradiation with vibration for biodiesel production from soybean oil by Novozym 435. *Process Biochemistry*, 45(4), 519-525. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2009.11.012>

Zhang, Y., Stanculescu, M., & Ikura, M. (2009). Rapid transesterification of soybean oil with phase transfer catalysts. *Applied Catalysis A-general*, 366(1), 176-183. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2009.07.001>

Zore, U., Yedire, S. G., Pandi, N., Manickam, S., & Sonawane, S. H. (2021). A review on recent advances in hydrogen energy, fuel cell, biofuel and fuel refining via ultrasound process intensification. *Ultrasonics Sonochemistry*, 73, 105536. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105536>

11. Lista de figuras

Figura 1. Empresas en México involucradas en la cadena de producción de biodiesel en México: productoras, recicladoras y generadoras de tecnología (Cabrera-Munguia y cols., 2022).

Figura 2. Componentes clave de la cadena de valor de los biocombustibles (Instituto Mexicano del Petróleo [IMP], 2018).

Figura 3. Ecuación general de transesterificación (Torossi Baudino, 2006).

Figura 4. Reacción de transesterificación de triglicéridos mediante metanol en medio básico (Torossi Baudino, 2006).

Figura 5. Reacciones reversibles en la transesterificación de triglicéridos (Torossi Baudino, 2006).

Figura 6. Mecanismo de transesterificación catalizada por bases (Meher y cols., 2006).

Figura 7. Mecanismo de transesterificación catalizada por ácidos (Meher y cols., 2006).

Figura 8. Esquema del diseño básico de un reactor sonoquímico discontinuo de tipo sonda (Zore y cols., 2021).

Figura 9. Representación esquemática del diseño básico de un reactor sonoquímico discontinuo de tipo baño ultrasónico (Gole & Gogate, 2012a).

Figura 10. Esquema de una celda de flujo hexagonal de triple frecuencia (Gogate y cols., 2003).

Figura 11. Esquema representativo del reactor convencional a escala laboratorio.

Figura 12. Diagrama de embudo de decantación listo para la separación de glicerol crudo.

Figura 13. Diagrama de embudo de decantación tras una ronda de lavado de biodiésel con agua simple.

Figura 14. Esquema representativo del reactor sonoquímico de tipo sonda a escala laboratorio.

Figura 15. Diagrama del sistema completo de producción por método convencional.

Figura 16. Sección de planta piloto correspondiente a depósitos y tanque de materia prima.

Figura 17. Sección de planta piloto correspondiente a tanque de materia prima y reactor de transesterificación.

Figura 18. Sección de planta piloto correspondiente a tanques de separación y lavado.

Figura 19. Sección de planta piloto correspondiente a tanque de lavado y depósitos de biodiésel.

Figura 20. Posibles configuraciones de implementación del equipo sonoquímico al reactor de transesterificación.

Figura 21. Diagrama del sistema completo de producción por método sonoquímico a escala planta piloto.

Figura 22. Sección de planta piloto, método sonoquímico, correspondiente a tanque de materia prima y reactor de transesterificación.

12. Lista de tablas

Tabla 1. Aspectos generales de empresas en México involucradas en la cadena de producción de biodiesel (Cabrera-Munguia y cols., 2022).

Tabla 2. Especificaciones de estándares internacionales de biodiesel (Atadashi, Aroua, Raman y cols., 2011).

Tabla 3. Perfiles de FA de diferentes materias primas en porcentajes en peso (wt.%) mínimos y máximos (Ramos y cols., 2019).

Tabla 4. Diferentes generaciones de biodiesel y sus materias primas.

Tabla 5. Porcentaje de aceite y rendimiento por hectárea de distintos insumos de primera y segunda generación (Karmakar y cols., 2010).

Tabla 6. Cambios físico-químicos del aceite durante el proceso de freído (Meráz, 2016).

Tabla 7. Propiedades físico-químicas de materia prima comúnmente utilizada para producir biodiésel (Karmakar y cols., 2010).

Tabla 8. Factores que afectan la reacción de transesterificación (Meher y cols., 2006).

Tabla 9. Descripción de los procesos de transesterificación catalítica, junto con sus ventajas y desventajas (Elaboración propia con información presentada por Babadi y cols. (2022)).

Tabla 10. Descripción de los procesos de transesterificación catalítica, junto con sus ventajas y desventajas (Elaboración propia con información presentada por Babadi y cols. (2022)).

Tabla 11. Métodos de producción de metanol y biometanol (Musa, 2016).

Tabla 12. Aplicaciones del glicerol crudo.

Tabla 13. Efectos negativos de las impurezas en biodiésel y motores (Atadashi, Aroua, Raman, y cols., 2011).

Tabla 14. Características de los distintos tipos de lavados húmedos y secos (Atadashi, Aroua, Raman y cols., 2011).

Tabla 15. Efectos de la cavitación en sistemas reactivos homogéneos y heterogéneos (Zore y cols., 2021).

Tabla 16. Recomendaciones para la determinación de parámetros operativos del sistema ultrasónico (Gole & Gogate, 2012b).

Tabla 17. Revisión de estudios de transesterificación asistida por ultrasonidos con diferentes materias primas (Elaboración propia).

Tabla 18. Resultados obtenidos de las distintas pruebas de calidad y cumplimiento respecto a valores definidos en normas internacionales.