

# Revisión del estado del arte en tecnologías de transesterificación para la producción de biodiésel en sistemas de flujo continuo y por lotes

Michael Andres Alzate-León<sup>1a</sup>; José Ricardo Bermúdez-Santaella<sup>1b</sup>;  
Daniel Andrey Herrera-Susa<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Grupo de Investigación en Desarrollo de Procesos Industriales (GIDPI), Universidad Francisco De Paula Santander (UFPS), Cúcuta, Colombia.

<sup>2</sup>Laboratorio de Energía, Sistemas Térmicos y Nanotecnología LEST-NANO, Universidad Federal de Uberlândia (UFU), Uberlândia, Brasil.

<sup>a</sup>michaelandresaleo@ufps.edu.co

Fecha recepción: 11 de mayo de 2024  
Fecha aceptación: 29 de agosto de 2024

## Resumen gráfico



## Resumen

En el campo energético, la búsqueda de alternativas sostenibles a los combustibles fósiles convencionales ha impulsado el desarrollo de nuevas fuentes de energía como los biocombustibles. El biodiésel, en particular, se destaca por su capacidad para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y el impacto ambiental asociado al uso y extracción del diésel. Este estudio tiene como objetivo principal revisar y analizar críticamente el estado del arte en las tecnologías de transesterificación empleadas en la producción de biodiésel, tanto en sistemas de flujo continuo como por lotes, con un enfoque en la eficiencia, la calidad del producto y las innovaciones recientes en tecnologías de calentamiento. Así mismo, en el proceso de síntesis de biodiésel se han presentado notables avances en la investigación y desarrollo de tecnologías que aumenten la producción, tal como es el caso de los sistemas de calentamiento y reactores de flujo continuo, los cuales se han convertido en un área de creciente interés debido a su potencial para mejorar la eficiencia y la calidad del biodiésel. Para ello, la revisión de estado del arte se realizó a partir de una revisión bibliográfica sistematizada, aplicando criterios específicos de búsqueda y selección de la literatura científica publicada entre 2018 y 2023. Los resultados obtenidos indican que los sistemas de flujo continuo, en combinación con tecnologías avanzadas como la irradiación por microondas, han mostrado un mayor potencial para optimizar la producción de biodiésel en comparación con los métodos tradicionales por lotes. Sin embargo, también se identificaron desafíos significativos, incluyendo los altos costos de implementación y las consideraciones ambientales relacionadas con la producción a gran escala.

**Palabras clave:** Biodiésel; Energía renovable; Flujo continuo; Impactos; Técnicas de producción; Tecnologías de reactores.

**Cita:** Alzate-León MA, Bermúdez-Santaella JR, Herrera-Susa DA. Revisión del estado del arte en tecnologías de transesterificación para la producción de biodiésel en sistemas de flujo continuo y por lotes. rev. ion. 2024;37(2):65-87. doi:[10.18273/revion.v37n2-2024005](https://doi.org/10.18273/revion.v37n2-2024005)

# Review of the state of the art in transesterification technologies for biodiesel production in continuous flow and batch systems

## Abstract

In the energy field, the search for sustainable alternatives to conventional fossil fuels has driven the development of new energy sources such as biofuels. Biodiesel in particular stands out for its ability to reduce greenhouse gas emissions and the environmental impact associated with the use and extraction of diesel. The main objective of this study is to critically review and analyze the state of the art in transesterification technologies used in biodiesel production, both in continuous flow and batch systems, with a focus on efficiency, product quality, and recent innovations in heating technologies. Likewise, in the biodiesel synthesis process, notable advances have been made in the research and development of technologies that increase production, such as heating systems and continuous flow reactors, which have become an area of growing interest due to their potential to improve the efficiency and quality of biodiesel. To this end, the state-of-the-art review was conducted based on a systematic bibliographic review, applying specific search and selection criteria for the scientific literature published between 2018 and 2023. The results obtained indicate that continuous flow systems, in combination with advanced technologies such as microwave irradiation, have shown greater potential to optimize biodiesel production compared to traditional batch methods. However, significant challenges were also identified, including high implementation costs and environmental considerations related to large-scale production.

**Keywords:** *Biodiesel; Renewable energy; Continuous flow; Impacts; Production techniques; Reactor technologies.*

# Revisão do estado da arte em tecnologias de transesterificação para produção de biodiesel em sistemas de fluxo contínuo e batelada

## Resumo

No domínio da energia, a procura de alternativas sustentáveis aos combustíveis fósseis convencionais impulsionou o desenvolvimento de novas fontes de energia, como os biocombustíveis. O biodiesel, em particular, destaca-se pela sua capacidade de reduzir as emissões de gases com efeito de estufa e o impacto ambiental associado à utilização e extração do gasóleo. O principal objetivo deste estudo é revisar e analisar criticamente o estado da arte em tecnologias de transesterificação utilizadas na produção de biodiesel, tanto em sistemas de fluxo contínuo quanto em batelada, com foco na eficiência, qualidade do produto e inovações recentes em tecnologias de aquecimento. Da mesma forma, no processo de síntese do biodiesel, avanços notáveis têm sido alcançados na pesquisa e desenvolvimento de tecnologias que aumentam a produção, como sistemas de aquecimento e reatores de fluxo contínuo, que se tornaram uma área de interesse crescente devido ao seu potencial para melhorar o eficiência e qualidade do biodiesel. Para tanto, a revisão do estado da arte foi realizada com base em uma revisão bibliográfica sistematizada, aplicando critérios específicos de busca e seleção da literatura científica publicada entre 2018 e 2023. Os resultados obtidos indicam que os sistemas de fluxo contínuo, em combinação com tecnologias avançadas, como a irradiação por micro-ondas, demonstraram maior potencial para otimizar a produção de biodiesel em comparação com os métodos tradicionais em lote. No entanto, também foram identificados desafios significativos, incluindo elevados custos de implementação e considerações ambientais relacionadas com a produção em grande escala.

**Palavras-chave:** *Biodiesel; Energia renovável; Fluxo contínuo; Impactos; Técnicas de produção; Tecnologias de reatores.*

## Introducción

En la actualidad, la creciente preocupación por el cambio climático, la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y la alta demanda en el sector energético ha impulsado la búsqueda de fuentes energéticas limpias y sostenibles, las cuales contrarresten las problemáticas medioambientales que aquejan a la población mundial [1-2]. En este escenario, los combustibles fósiles han prevalecido como la principal fuente de energía tanto para la generación de electricidad como para el sector de transporte a nivel mundial [3-4]. No obstante, esto ha significado un considerable aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero, siendo el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) el responsable del casi el 60 % de estos gases en la atmósfera [5]. Es por ello, que ante este panorama se ha intensificado la búsqueda de nuevas fuentes de energía para reducir la dependencia de los combustibles fósiles convencionales al maximizar el potencial de las energías renovables a partir del aprovechamiento consciente de los recursos naturales [6-8].

En este contexto, los biocombustibles líquidos como el etanol y el biodiésel se han convertido en alternativas altamente sostenibles en comparación con los combustibles fósiles en el ámbito energético, ya que su producción utiliza recursos renovables que contribuyen en cierta medida a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero [9-10]. Sin embargo, el biodiésel destaca como una fuente energética alternativa relevante en la actualidad, debido a la compatibilidad con la infraestructura automotriz, el menor impacto asociado en los sistemas alimentarios ya que es producido generalmente a partir de aceites vegetales no comestibles o residuos de alimentos y la disminución de las problemáticas medio ambientales asociadas a la contaminación [11].

El biodiésel ofrece ciertas ventajas debido a su alto potencial en la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, en un mundo que está cada vez más concientizado sobre la problemática asociada al cambio climático. Así mismo, la capacidad que presenta el biodiésel para aprovechar la biomasa obtenida de fuentes de aceites vegetales, grasas animales o residuos orgánicos, lo convierte en una opción atractiva desde un punto de vista ambiental y sostenible. Sin embargo, también existen La integración de procesos como la pirólisis de plásticos en

estos sistemas continuos podría representar un avance significativo, permitiendo la valorización de residuos plásticos a gran escala y ofreciendo una solución sostenible tanto para la gestión de residuos como para la producción de energía limpia. Del mismo modo, el biodiésel exhibe características biodegradables, no tóxicas y amigables con el medio ambiente, posicionándolo como un biocombustible alternativo y prometedor ante la reducción de la huella de carbono [12-13]. Al mismo tiempo, desde una perspectiva más tecnificada en los procesos de obtención de biodiésel la creciente demanda energética ha generado en los últimos años un gran interés en los sistemas continuos debido a sus índices de eficiencia, mayor productividad y operación no interrumpida, lo que podría optimizar la producción a escalas industriales, piloto o experimentales, en función de las tecnologías utilizadas para su producción [14].

Cabe resaltar que existen diversas metodologías para la producción de biodiésel, en las cuales se consideran ciertos aspectos claves para el desarrollo de un producto de calidad que cubra con la demanda energética actual y los estándares de calidad establecidas por organismos como la ASTM y EN. Estas normativas abordan aspectos clave dentro del proceso como lo son, la composición química, las propiedades físicas, las características de rendimiento y desempeño del biodiésel, lo cual ayuda a asegurar que los biocombustibles producidos cumplan con los estándares internacionales y sean compatibles con los motores y sistemas de combustión interna utilizados en el parque automotor [15-16]. El método más utilizado es la transesterificación, que implica la conversión de los lípidos presentes en la materia prima, ya sea aceite vegetal o grasa animal, en ésteres metílicos o etílicos a través de una reacción química con alcohol y en presencia de un catalizador [17]. La transesterificación es altamente influenciada por una serie de parámetros que determinan su eficiencia y rendimiento en la producción de biodiésel, entre los cuales se encuentra: El tipo de aceite, la relación molar alcohol/aceite, el tipo y cantidad de alcohol, el tiempo de reacción o residencia, el tipo y concentraciones de catalizador, el estado del aceite vegetal y el reactor de transesterificación para la producción de biodiésel [18].

Del mismo modo, la implementación de sistemas continuos en la producción de biodiésel ha ganado atención en los últimos años debido a su potencial

y beneficios significativos en la mejora de la eficiencia, la calidad del biocombustible producido y la viabilidad económica en comparación con los métodos por lotes o batch [19]. Estos sistemas continuos se caracterizan por una poca interrupción durante el proceso, lo cual genera una mayor capacidad de producción y eficiencia, menores tiempos de producción y volúmenes relativamente altos en comparación con los sistemas por lotes. Además, los procesos continuos permiten una mayor automatización y control, lo que ayuda a reducir los costos operativos y a mejorar la calidad del biodiésel obtenido.

Es por ello, que la investigación se estructura en diversas secciones o subtemas que abordan los aspectos fundamentales de los sistemas continuos de producción de biodiésel, así como también ciertos aspectos operativos y fundamentales como lo son: las técnicas y sistemas de producción, los tipos de reactores y características técnicas, los procesos o etapas involucradas en la producción y las perspectivas futuras de los sistemas continuos de producción [20]. En este contexto, la evaluación comparativa de los sistemas continuos de producción de biodiésel se vuelve esencial en la identificación de tecnologías más eficientes y adecuadas para satisfacer la creciente demanda energética mundial [21]. Por lo que, la presente revisión del estado del arte se enfoca en recopilar, analizar y resumir los enfoques más recientes utilizados en la producción de biodiésel. Por lo tanto, al examinar las diversas tecnologías empleadas en los sistemas de producción, se busca proporcionar una comprensión profunda y detallada de los avances logrados hasta la fecha, así como resaltar las áreas que requieren de una mayor investigación y desarrollo.

## Metodología

Con el fin de realizar una revisión bibliográfica sistematizada sobre los sistemas en flujo continuo y por lotes para la producción de biodiésel, se aplicaron criterios específicos de búsqueda y selección de material bibliográfico. La estrategia de búsqueda se centró en recopilar literatura científica pertinente, principalmente enfocada en artículos de investigación y libros, con respecto a las temáticas que abordan los métodos y tecnologías de producción en sistemas de flujo continuo para la síntesis de biocombustibles líquidos, tales como el biodiésel. Se realizaron búsquedas en bases de datos académicas y científicas a partir de una

ecuación de búsqueda generalizada “Continuous Biodiésel Reactors” y una ventana de 6 años (2018 – 2023), de la cual se obtuvieron resultados a través de bases de datos como Scopus (191), ScienceDirect (4 102), Web of Science (232), Google Scholar (16 700) y Taylor&Francis (242). En el proceso de búsqueda, se llevó a cabo un análisis crítico y exhaustivo de la literatura científica para asegurar la relevancia y actualidad de los estudios seleccionados. Así mismo, se aplicaron filtros de referencia para la revisión de los artículos de investigación que abordan el componente de reactores químicos continuos, sistemas de producción de biodiésel y tecnologías solvotérmicas o de calentamiento para la síntesis de biodiésel. Así mismo, dentro del proceso de revisión se excluyeron aquellos estudios que no estaban relacionados con el tema en cuestión, donde la decisión de retirarlos se basó en el criterio de metodologías teóricas, es decir, que se aplicaron principios y reglas teóricas para determinar la relevancia de los artículos, sin recurrir a la realización de experimentos prácticos. Sin embargo, para delimitar y filtrar mucho más la información se consideraron los principales aspectos en los que se basa esta revisión, teniendo en cuentas las siguientes palabras claves o términos: “*biodiésel, microwave, continuous reactors, biodiésel reactors, biodiésel quality, benchmarking, process optimization, synthesis methods, future perspective of biodiésel reactors, biodiésel characterization*”, para lo que sería un filtrado de los referentes bibliográficos encontrados.

Después del proceso de búsqueda y extracción de la literatura científica se obtuvieron como resultado para el análisis 389 artículos para revisión, de los cuales se seleccionaron 101 referencias con un aporte considerable del caso de estudio, lo cual es equivalente al 25,96 % de la literatura científica clasificada, sin embargo, tras haber rechazado 288 o aproximadamente el 74,03 %, debido a que la información de estos no cumplió con los criterios de selección indispensables para la respectiva revisión. En última instancia, la mayoría de los estudios incluidos corresponden a revisiones de la literatura científica, lo cual debido a la cantidad fue necesaria la revisión de los resúmenes de cada documentación para aplicar un filtro de primera mano y mejorar la eficiencia en la revisión del material científico, así como también se aplicó un recorrido rápido de revisión del contenido general para su respectivo análisis, con la finalidad de

seleccionar de manera adecuada los artículos que correspondan con la temática del caso de estudio. La Figura 1 (a), relaciona a través de un gráfico de barras el número de artículos de investigación enfocados en reactores continuos en la producción de biodiésel en una ventana de tiempo de 6 años (2018-2023). Por otra parte, la Figura 1 (b), resalta los porcentajes de artículos de investigación publicados en el mismo lapso de tiempo según las áreas temáticas de interés. Estos datos fueron extraídos de la base de datos de Scopus, aplicando filtros para la extracción de artículos de investigación enfocados en las áreas de interés para la revisión bibliográfica.

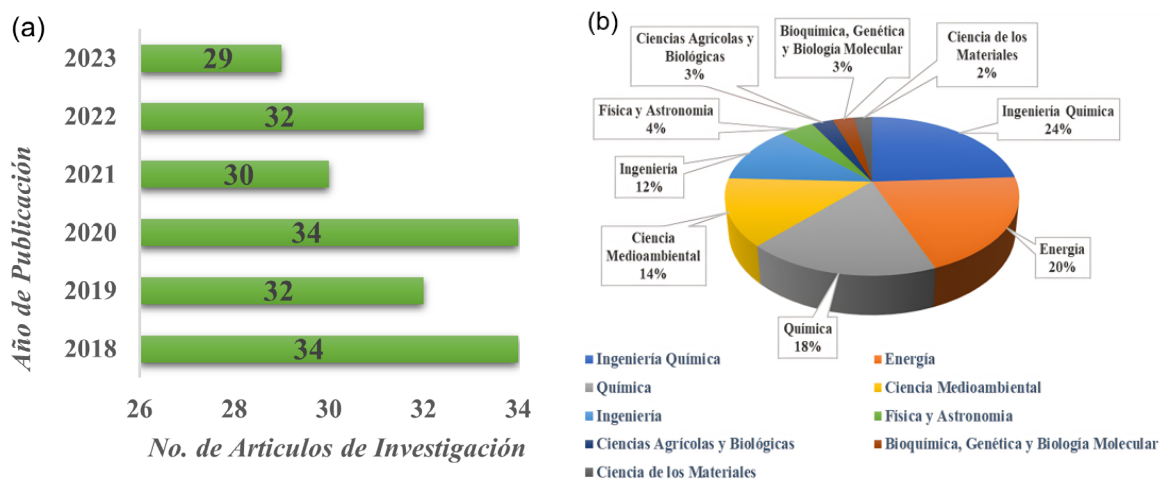
## Resultados

A continuación, se plantea la síntesis de los resultados basados en una revisión exhaustiva de diversos artículos científicos y académicos, los cuales proporcionan una base fundamental e informativa de las técnicas, sistemas de producción, avances tecnológicos, tipos de reactores, procesos o etapas del proceso de producción y las perspectivas futuras asociadas a los procesos de producción de biodiésel.

### Biodiésel y técnicas de producción

En las últimas décadas, la producción de biodiésel ha presentado un notable aumento debido a la creciente necesidad de reducir la dependencia actual de los combustibles fósiles tradicionales, así como la mitigación de los impactos ambientales

asociados a su uso [22-23]. En respuesta a estos desafíos, se han venido desarrollando diversas técnicas de producción con el objetivo de lograr una producción eficiente, sustentable y respetuosa con el medio ambiente a través del biodiésel [24]. Ante esto, las técnicas de producción están centradas en la conversión de materias primas, tales como grasas animales, aceites vegetales y aceites usados, en un producto renovable y respetuoso con el medio ambiente tal como lo es el biodiésel [25]. Es por ello, que resulta imprescindible analizar las diferentes tecnologías y técnicas empleadas en los procesos de producción de biodiésel para determinar las respectivas concentraciones, materias primas, elementos y características propias del biodiésel producido, así como sus implicaciones en los sectores económicos, sociales y ambientales [26-27]. Por otra parte, se debe tener presente el constante aumento de los bicombustibles en el sector energético y de transporte a nivel mundial, siendo el biodiésel uno de los biocarburantes que más ha llamado la atención de los países para asegurar una transición energética sostenible y viable de acuerdo a los requerimientos establecidos en los acuerdos ambientales internacionales [28-29]. De acuerdo con los investigadores Awogbemi O y Von Kallon [30], se presenta diversas estrategias para la generación de biodiésel, con la finalidad de sintetizar la materia prima teniendo en cuenta sus propiedades físico-químicas, las cuales se clasifican en técnicas físicas y químicas.



**Figura 1.** (a) Evolución del número de artículos de investigación publicados entre 2018 y 2023, (b) Distribución porcentual de los artículos de investigación publicados en un período de seis años según sus áreas temáticas. (Datos obtenidos de Scopus).

**Técnicas Físicas:** este es un método de producción de biodiésel que no implica ninguna reacción química, en cambio, se centra en modificar físicamente los componentes para lograr la síntesis del biocombustible. En este contexto, se encuentran dos técnicas relevantes como lo son las Microemulsiones y la Cavitación Hidrodinámica.

**Microemulsiones:** esta técnica de producción de biodiésel busca reducir la viscosidad del aceite y prevenir la formación de depósitos de carbón, así como disminuir las emisiones nocivas de NOx y CO. Sin embargo, aunque esta técnica permita sintetizar biodiésel con una baja viscosidad, no resulta eficiente su inyección en los motores de combustión interna debido a que genera una combustión incompleta [31-32].

**Cavitación hidrodinámica:** es empleada en la síntesis de biodiésel con el propósito de mejorar la eficiencia del proceso de transesterificación, al incrementar la velocidad de reacción y conversión de aceites vegetales o grasas animales en ésteres metílicos o etílicos (biodiésel). La metodología se basa en la generación y colapso controlado de burbujas de vapor en un líquido, tras inducir condiciones extremas de presión y temperatura en el gas. Ante esto, en la síntesis de biodiésel este fenómeno se produce al propagar ondas de presión a través de una mezcla de materia prima, alcohol y catalizador, creando zonas de alta energía y temperatura durante el colapso de las burbujas [33].

**Técnicas Químicas:** en estas la producción de biodiésel se consigue mediante la modificación química de aceites y grasas naturales, en el cual se alteran las propiedades fisicoquímicas de la materia prima para la generación de ésteres [34]. Entre estos métodos se encuentra la pirólisis, superfluido/supercrítico y transesterificación.

**Pirólisis:** el método de pirólisis para la producción de biodiésel es un proceso de degradación térmico, el cual se caracteriza por la ausencia de oxígeno y altas temperaturas (300°C a 800°C) bajo presión atmosférica sin producirse combustión, con lo que se producen gases tales como, CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub> y residuos sólidos [35-36].

**Superfluido/Supercrítico:** otra técnica empleada para mejorar la eficiencia del proceso de producción de biodiésel es a partir del uso de

fluidos supercríticos. En este contexto, al trabajar con esta técnica química de síntesis se debe considerar el uso de un disolvente supercrítico, tal como lo es el CO<sub>2</sub>, el cual se comprime en un estado intermedio entre un líquido y gas, por lo que presenta altas temperaturas y presiones [37-38]. Este método presenta ciertas ventajas, como la eliminación de los catalizadores químicos en el proceso, esto debido a que es utilizado como un solvente para la extracción del aceite de la materia prima, como en el caso de las semillas de plantas oleaginosas [39]. Por otra parte, permite una reducción en la cantidad de subproductos no deseados y en el consumo energético. Además, los fluidos supercríticos tienden a mejorar la velocidad de reacción, lo que conduce a una mayor eficiencia y pureza del producto final [40].

**Transesterificación:** en cierta medida la técnica de transesterificación es la reacción química más utilizada en el proceso de producción de biodiésel, la cual consiste en la reacción de un aceite vegetal con un alcohol de cadena corta como metanol o etanol y en presencia de un catalizador, el cual puede ser tanto ácido como básico, con el propósito de acelerar la reacción [41-42]. Por otro lado, en el proceso de transesterificación se transforma la materia prima en ésteres de alquilo (biodiésel) y glicerina como subproducto [43-44]. Además, esta reacción también contribuye a la reducción de la viscosidad de los aceites vegetales, lo que facilita su uso como biocombustible en motores diésel convencionales [45].

Ante esto, entre las diferentes técnicas mencionadas, la transesterificación es considerada como el método más utilizado en los procesos de producción de biodiésel, debido a su alta eficiencia en la conversión de los lípidos presentes en la materia prima (aceites vegetales y grasas animales) en ésteres metílicos o etílicos de ácidos grasos, lo cual permite aprovechar de manera eficiente los insumos en la síntesis del biodiésel, como lo reafirman los investigadores [46].

#### **Tipos de reactores y características técnicas de los sistemas de producción de biodiésel**

Tanto en la industria como en el ámbito de laboratorio, los procesos de transesterificación se llevan a cabo en reactores químicos, cuyas condiciones de reacción deben ser controladas de tal manera que se obtenga un producto final (biodiésel) que cumpla con los requerimientos de calidad necesarios [47,48]. Así mismo, los

sistemas de producción de biodiésel se clasifican según el tipo de reactor empleado para llevar a cabo la transformación de la materia prima (aceite vegetal) y los respectivos reactivos a través del proceso de transesterificación, teniendo en cuenta el tipo de flujo en la entrada y salida que presente el sistema, para con ello determinar las características del proceso de producción, como lo es el caso de los reactores continuos y por lotes (batch) [49].

Además, dependiendo de la naturaleza química de la materia prima y del producto final, las condiciones operativas de cada reactor varían considerablemente. Por lo tanto, al seleccionar un reactor químico para la producción de biodiésel, es crucial considerar principalmente las condiciones de operación, requerimientos de espacio, tiempos de ejecución, volúmenes de producción, calidad,

eficiencia energética y económica [50]. En cuanto a la clasificación de dichos sistemas de producción, estos se determinan en función del modo de operación del reactor de transesterificación, el cual puede ser de tres tipos: por lotes (batch), semicontinuo (semi-batch), y sistemas de producción continua [51-52]. Ante esto, la elección del tipo de sistema a implementar resulta fundamental al momento adaptarse a situaciones o requisitos específicos del sistema de producción. En la [Tabla 1](#), se presenta una comparativa entre los diferentes modos de operación de los reactores químicos, teniendo en cuenta su aplicabilidad en los procesos de producción de biodiésel al considerar factores como el tipo de suministro de los reactivos y materia prima, los costos de operación, el control de temperatura, la transferencia de calor y la tasa o volumen de producción.

**Tabla 1.** Comparación de características para los modos de operación de reactores químicos por lotes, semicontinuos y continuos.

Aspecto Evaluado	Sistema por lotes (Batch)	Sistema Semicontinuo	Sistema Continuo
Tipo de sistema	Cerrado	Cerrado/Abierto	Abierto
Suministro de reactivos	No presenta corrientes de entrada ni salida del sistema (cantidad predeterminada).	Permite la adicción de reactivos por lotes o de manera continua.	Existen corrientes de entrada y salida (suministro constante).
Requerimiento de espacios	Alto	Medio	Bajo
Costos de operación	Alto	Medio	Bajo
Control de temperatura	Bajo	Alto	Muy Alto
Transferencia de calor	Bajo	Alto	Muy Alto
Velocidad de producción	Bajo	Medio	Alto
Tasa de producción	Bajo	Alto	Muy Alto
Adaptabilidad	Alto	Medio	Bajo
Selectividad del sistema (Eficiencia)	Bajo	Alto	Muy Alto
Escalabilidad del sistema	Sencilla	Difícil	Difícil

Fuente: Adaptado de [52-53].

Ante la comparativa, los sistemas de producción continua sobrepasan en cierta medida la producción por lotes y sistemas semicontinuos, debido a su mayor eficiencia y productividad en la generación de biodiésel. La producción continua garantiza un proceso ininterrumpido, para minimizar los tiempos muertos en la adicción de reactivos de los procesos por lotes, lo cual mejora considerablemente la eficiencia operativa, así como los volúmenes de producción.

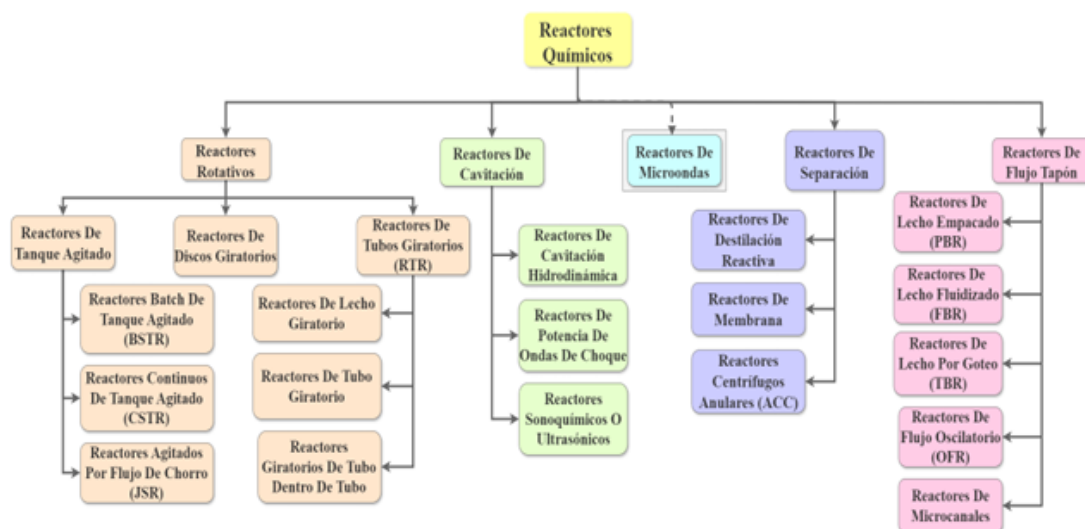
En la [Figura 2](#), se presentan los reactores comúnmente empleados en el proceso de transesterificación para la síntesis de biodiésel, en el cual se clasifican según el tipo de sistema de calentamiento o flujo.

En el caso de los procesos de producción de biodiésel, estos sistemas hacen referencia a las diferentes configuraciones utilizadas para llevar a cabo el proceso de transformación de las materias primas en biodiésel. Para ello, los sistemas de

producción continuos suelen involucrar el uso de reactores continuos, donde las reacciones químicas ocurren de manera continua y se pueden lograr mayores tasas de producción [55].

Cabe resaltar, que los sistemas mencionados anteriormente pueden ser diseñados de diferentes formas, como por ejemplo los reactores continuos de tanque agitado, por flujo de chorro, de microcanales, ultrasonido o por irradiación de microondas. Sin embargo, los criterios de selección de los sistemas de producción dependen en cierta medida de diversos factores, como el volumen de producción, las características de las materias primas, los requisitos de calidad del biodiésel, la eficiencia energética y la rentabilidad [51].

En la [Tabla 2](#), se presentan las principales características de los diferentes tipos de reactores comúnmente utilizados en el proceso de producción de biodiésel.



**Figura 2.** Clasificación de los reactores químicos empleados en la producción de biodiésel. Tomado y adaptado de [54].

**Tabla 2.** Características de distintos tipos de reactores utilizados en la producción de Biodiésel.

Tipo de reactor	Tiempo de Reacción	Transferencia de Calor y Masa	Control de Parámetros	Estado Actual
Reactor de Tanque Agitado por Lotes (BSTR)	1 – 2 h	Baja / Buena	Difícil	Industrial
Reactor de Tanque Agitado Continuo (CSTR)	≥ 60 min	Buena	Fácil	Industrial
Reactor Agitado por Chorro (JSR)	≈ 38 min	Buena	Difícil	Piloto
Reactor de Flujo Tubular/Pistón	19 min	Buena	Difícil	Piloto



Tipo de reactor	Tiempo de Reacción	Transferencia de Calor y Masa	Control de Parámetros	Estado Actual
Reactor De Flujo Oscilatorio (OBR)	30 min	Excelente	Fácil	Piloto
Reactor Giratorio de Tubo en Tubo (STT)	< 1 min	Excelente	Fácil	Industrial
Reactor de Membrana	1 – 3 h	Baja	Fácil	Piloto
Reactor de Destilación Reactiva	Var. min.	Excelente	Fácil	Piloto
Contactador Centrifugo Anular (ACC)	≈ 1 min	Excelente	Fácil	Industrial
Reactor Tubular Catalítico de Lecho Empacado (PBR)	2,8 h	Baja / Buena	Difícil	Piloto
Reactor de Lecho Fluidizado (FBR)	0,3 - 3 h	Buena	Fácil	Piloto
Reactor Ultrasónico	10 - 40 min	Buena	Fácil	Industrial
Reactor de Cavitación Hidrodinámica	≈ 30 min	Buena	Fácil	Industrial
Reactor de Energía de Ondas de Choque	10 <sup>-6</sup> seg	Excelente	Fácil	Industrial
PFR con Mezclador Estático	30 min	Buena	Fácil	Laboratorio
Reactor de Microcanales	28 seg – Var. min.	Excelente	Fácil	Laboratorio
Reactor de Microondas	≤ 10 min	Buena	Fácil	Laboratorio

Fuente: Tomado de [56].

En los reactores continuos, un aspecto crucial para lograr un rendimiento óptimo de biodiésel es asegurar una adecuada mezcla de los reactantes, especialmente cuando se enfrenta a resistencias en la transferencia de masa. La correcta homogeneización de los componentes de reacción se convierte en un requisito primordial para obtener un alto rendimiento en la producción de biodiésel en estos sistemas continuos [57].

Así mismo, es crucial destacar que en los sistemas de producción de biodiésel existen diversos factores que desempeñan un papel fundamental en el proceso de transesterificación. Estos factores incluyen elementos como la proporción entre la cantidad de alcohol y aceite o relación molar, el tipo y concentración de catalizador, el tiempo de residencia o de reacción, la transferencia de masa u homogeneidad de la mezcla y el tipo de alcohol y aceite empleado como materia prima. Es por ello, que la integración eficiente de estos factores determina en cierta medida el rendimiento y la calidad deseada en la síntesis del biodiésel

[58]. Sin embargo, una de las características más importantes dentro del proceso de producción de biodiésel es el tipo de reactor con el que se lleva a cabo la reacción química, ya que facilitan la reacción de transesterificación que convierte las materias primas (aceites vegetales) en biodiésel. Estos reactores operan bajo ciertas condiciones de reacción, las cuales son controladas con la finalidad de obtener un biocombustible que cumpla con los requisitos de calidad y rendimientos necesarios para su posterior uso en los motores de combustión [59].

Ante esto, la selección del tipo de reactor y el modo de operación del mismo son parámetros fundamentales a la hora de establecer un sistema de producción de biodiésel. La elección del reactor dependerá de ciertos factores como la capacidad de producción del sistema, la eficiencia, la calidad del biodiésel y los recursos disponibles para la implementación del sistema de producción de biodiésel [60].

## Reactores de tanque agitado

Los reactores de tanque agitado son equipos esenciales en la producción de biodiésel, caracterizados por presentar un sistema de agitación mecánica que asegura una mezcla homogénea entre los reactivos y la materia prima, así como una transferencia de calor y masa eficiente [61]. Estos reactores son utilizados comúnmente en el proceso de transesterificación debido a su versatilidad para funcionar tanto en sistemas por lotes como continuos, por lo que pueden adaptarse a diferentes volúmenes de producción, lo cual resulta fundamental a la hora de seleccionar reactores para sintetizar biodiésel [62]. Así mismo, su sencillo control de parámetros, la capacidad de utilizar una gran variedad de materias primas y un mantenimiento relativamente sencillo han sido características de su excelente implementación en el sector industrial [63]. Además, son reconocidos por su flexibilidad en la escala de producción, desde operaciones de laboratorio hasta operaciones industriales a gran escala, así como por su rentabilidad a la hora de producir biodiésel. Por otra parte, los reactores de tanque agitado se clasifican dependiendo del tipo de sistema empleado, tal como es el caso de los Reactores Batch de Tanque Agitado (BSTR), los Reactores Continuos de Tanque Agitado (CSTR) y los Reactores Agitados por Flujo de Chorro (JSR), siendo los (CSTR) los más utilizados en la industria debido a su operación continua que permite la entrada y salida constante de reactivos y productos, así como por su eficiencia y productividad a la hora de implementarlos a gran escala [64].

El estudio propuesto por Kouzu *et al.* [65], se enfoca en la producción continua de biodiésel mediante transesterificación catalizada heterogéneamente, se aborda una problemática asociada con la limitación de la transferencia de masa en la reacción de transesterificación y el hecho de implementar catalizadores heterogéneos en los reactores (CSTR). Es por ello, que para abordar dicha situación dentro de la investigación, se implementa el proceso de transesterificación de aceite de colza con un catalizador de CaO en polvo dentro de un reactor continuo de tanque agitado (CSTR), el cual se caracteriza por un flujo constante para el mezclado de los reactivos. Este enfoque del reactor CSTR dentro del proceso de transesterificación, logra alcanzar un estado estacionario, según lo corroborado por la investigación. Sin embargo, a pesar de obtener

una eficiencia en el flujo de mezclado para la transesterificación, se presenta una limitación en el rendimiento de FAME de aproximadamente el 90 %, debido a la amplia variabilidad en el tiempo de residencia, la cual se debe a la agitación y mezcla intensa dentro del reactor. Sin embargo, en esta investigación se propone una solución prometedora para mejorar el rendimiento del biodiésel producido, al implementar reactores de tanque agitado continuos en serie.

## Reactores de membrana

La investigación llevada a cabo por los investigadores Gao *et al.* [66], se centra en el modelado de la producción de biodiésel utilizando un reactor de membrana con un catalizador alcalino sólido KF/Ca-Mg-Al, aceite de soja y metanol. Los resultados obtenidos revelaron que el sistema de membrana puede dividirse en dos etapas distintas: la acumulación de biodiésel a través del proceso de transesterificación y la separación de la membrana del biodiésel, lo que proporciona una buena transferencia de masa entre las fases inmiscibles del producto, sin embargo, se necesita de un tratamiento de aguas abajo simple para obtener un biodiésel libre de triglicéridos [67]. En general, la implementación de reactores de membrana permite una separación continua los productos, mejorando la velocidad de reacción y permitiendo un incremento significativo en la temperatura para la síntesis de biodiésel. Estos hallazgos contribuyen significativamente al entendimiento de las dinámicas de producción de biodiésel en reactores de membrana y proporcionan una base valiosa para futuras investigaciones y optimizaciones de procesos.

Por otra parte, tras realizar experimentos destinados a la evaluación de reactores de membrana en los procesos de síntesis de biodiésel, con el propósito de optimizar la velocidad de producción, la concentración de glicerina en el producto final y la velocidad de reacción de la mezcla, se implementó un sistema de producción de biodiésel que incorpora un reactor de contacto de membrana de fibra hueca, diseñado y construido por el equipo de investigación de Bello Yaya *et al.* [68]. El estudio demostró que la disposición contracorriente del contacto de membrana de fibra hueca resulta eficaz al momento de extraer la glicerina de la fase final del biodiésel, eliminando así la necesidad de una etapa adicional de separación entre el biodiésel y el glicerol. Así mismo, esta investigación resalta las limitaciones de la producción convencional de

biodiésel, el cual implica la posterior separación del glicerol y la reducción de la carga de contaminantes en la purificación o lavado del biodiésel. Además, se destaca que el método tradicional no favorece un contacto entre las fases y conlleva un consumo significativo de energía. Es por ello, que la integración de reactores de membrana ofrece una alternativa prometedora ante los desafíos asociados a los métodos tradicionales, tras mejorar la eficiencia del proceso de producción de biodiésel.

En los reactores de membrana existe una característica de gran interés, la cual radica en la combinación del proceso de reacción de transesterificación y separación de los esteres por medio de membranas, las cuales permiten el paso de glicerol y metanol. Así mismo, el uso de reactores de membrana que utilizan un nano catalizador  $MnO_2$  *Trachyspermum ammi*, destaca una alta conversión de esteres en un 94% con una temperatura de 90 °C, una relación 8:1 y un tiempo de reacción de 2 horas, lo cual es descrito en los estudios realizados por Rozina *et al.* [69]. Otro aspecto de interés dentro de la investigación es la implementación de nano catalizadores heterogéneos reutilizables de  $MnO_2$  para acelerar la reacción de transesterificación dentro de la producción de biodiésel, así como el uso de aceite de semilla no comestible de carom (*Trachyspermum ammi*). Como resultado, la tecnología de reactores de membrana puede presentarse como una técnica prometedora en la producción ésteres metílicos de manera más eficiente, debido a la adecuada transferencia de masa del sistema.

### Reactores de microcanales

Los reactores de microcanales (MCR) representan un campo de innovación en la producción de biodiésel, tras caracterizarse por presentar una configuración de innumerables canales o tuberías estrechas con diámetros en el rango de los milímetros [70]. Así mismo, estos reactores destacan por su capacidad de mejorar significativamente la transferencia de masa y calor durante la conversión del biodiésel, así como la aceleración de la velocidad de reacción en el proceso de transesterificación [71]. Es por ello, que los reactores de microcanales están siendo sometidos a pruebas a escala de laboratorio con una visión futura hacia su implementación en la

producción industrializada de biocombustibles, debido a que proporcionarían una mayor eficiencia y control en la síntesis de biodiésel, lo cual permite optimizar las condiciones de reacción y garantizar una producción más rentable y sostenible.

A través de la investigación desarrollada por Gholami *et al.* [72], se destaca la implementación de reactores de microcanales como una alternativa que ha despertado la curiosidad de los investigadores en los últimos años para la síntesis de biodiésel. Estos reactores tienen la característica de aumentar significativamente la velocidad de reacción dentro del proceso de transesterificación, al optimizar la transferencia de masa y calor de la mezcla, tras aprovechar una relación intrínseca entre la superficie y el volumen del reactor, el cual se presenta en pequeñas cantidades. Es por ello, que la comunidad científica ha dedicado ciertos estudios al análisis y mejoramiento de la producción de biodiésel a través de los reactores de microcanales, lo cual resalta su importancia en la generación de biocombustibles. Así mismo, el uso de un catalizador líquido iónico de hidróxido de colina (ChOH) al 6,11% en peso mejoro considerablemente la eficiencia del proceso en un 4,9%. La materia prima empleada fue aceite no comestible de Norouzak (*Salvia lerifolia*), con el cual se obtuvieron rendimientos del 93,36%, a través de una relación molar de metanol y oleo de 9:1 y tiempos de reacción de 12,48 minutos.

La investigación realizada por Mohd Laziz *et al.* [73] plantea la producción de biodiésel en un reactor de microcanales continuo compacto a temperatura ambiente, con el objetivo de obtener una alta conversión de aceite de palma refinado con metanol como reactivo en una reacción de transesterificación. La reacción se llevó a cabo en un reactor microfluídico de canal o tubo capilar de 1 metro de longitud y 690  $\mu m$  de diámetro interno, donde se produjo la transesterificación de forma casi inmediata en un corto período de 40 segundos de tiempo debido a la mejora del comportamiento de la mezcla en la fase con metanol tras utilizar un modelo de volumen en fluido. Por otra parte, la tasa de flujo volumétrico, la relación molar y la temperatura de reacción fueron controladas de tal forma que la concentración de catalizador KOH y el tiempo de residencia fueran variables para estudiar el efecto de estos parámetros en la conversión del aceite para la producción de biodiésel.

## Reactores de microondas

En la búsqueda de tecnologías más eficientes para la producción de biodiésel, se ha explorado el uso de la tecnología de irradiación por microondas. La cual ha demostrado aumentar los parámetros del proceso de producción de biodiésel, lo que a su vez mejora la eficiencia de la reacción [74]. Este método resulta ser eficiente energéticamente en comparación con otros métodos de calentamiento utilizados para la producción de biodiésel.

Ante esto, los sistemas de calentamiento por microondas tienen la capacidad de acelerar las reacciones químicas a través de la transferencia de calor por radiación, a diferencia de los métodos convencionales de calentamiento que dependen de la conducción y convección térmica [75]. Esto se debe a que la tecnología de microondas permite un calentamiento selectivo del material, tiempos de calentamiento reducidos y un proceso sin contacto físico con el reactor o la sustancia, por lo que se caracteriza como un sistema eficiente en el tratamiento térmico de la materia prima y los reactivos en la producción de biodiésel [76].

Las características de un reactor de microondas de flujo continuo incluyen una rápida transferencia de calor, una alta eficiencia energética y una distribución homogénea de la temperatura en el interior del reactor que puede aumentar la eficiencia de la producción. Además, también se ha comprobado que esta tecnología puede ser más económica en comparación con otros procesos de producción de biodiésel [77]. Así mismo, los métodos de calentamiento convencional pueden ser complementados al combinar el calor generado por la tecnología de radiación de microondas y así aumentar la velocidad de reacción y eficiencia en la producción de biodiésel.

Con el fin de abordar los costos elevados asociados al proceso de calentamiento por microondas, cabe resaltar las investigaciones pioneras en este campo de acción, en el cual hacen parte los investigadores Lertsathapornsuk y Pairintra en [78], donde llevaron a cabo modificaciones en hornos microondas convencionales por medio de dos orificios en los costados para optimizar el flujo de los reactivos y reducir los tiempos de carga y descarga, así como para permitir una mayor eficiencia en el proceso de calentamiento, lo que contribuye a una mejora general en la eficiencia del sistema de calentamiento por microondas utilizado en la producción de biodiésel.

La investigación realizada por Khedri B y Mostafaei [79], presenta un análisis detallado sobre los sistemas de producción continua de biodiésel, tomando un enfoque en las tecnologías de calentamiento híbrido (irradiación por microondas y campos magnéticos), así como la combinación de catalizadores y alcoholes con el objetivo de mejorar la eficiencia de la síntesis del biodiésel. Es por ello, que los parámetros de transferencia de calor y reacción de la mezcla son parámetros a considerar al momento de establecer la eficiencia del proceso de transesterificación. Así mismo, se investigaron diversos factores que influyen en la integración de tecnologías de calentamiento, abarcando la intensidad de campo magnético en niveles de 0, 0,225 y 0,450 T, la potencia del microondas en un rango de entre 400 y 1200 W, así como los porcentajes de catalizadores KOH y NaOH, ambos con una concentración constante del 1 % en peso. Además, en la investigación se examinó que la relación molar de 6:1 y los porcentajes de la mezcla de alcoholes como el etanol y metanol. Ante esto, el enfoque integrador de dos tecnologías destaca la innovación del campo científico en la búsqueda de soluciones que mejoran significativamente la eficiencia y sostenibilidad para la producción de biodiésel de forma continua.

Según las investigaciones realizadas por Silitonga A y Shamsuddin [80], se adoptó un sistema de irradiación por microondas para la generación de biodiésel a partir de una mezcla de aceite de Ceiba Pentandra, empleando un algoritmo de optimización y pronóstico de las condiciones óptimas, con el objetivo de lograr un rendimiento significativo en la síntesis del biodiésel. Los resultados obtenidos indican que la radiación por microondas facilita un calentamiento eficaz al aumentar la velocidad de la reacción química debido a la transferencia de calor por parte de la radiación electromagnética del sistema de microondas hacia la mezcla de forma directa. Así mismo, el modelo planteado ofrece rendimientos del 95,42 %, con un tiempo de reacción de 6.45 minutos en el proceso de transesterificación.

Así mismo, autores como Groisman y colaboradores [81], plantean el acoplamiento de las reacciones de transesterificación mediante un horno microondas doméstico (DMO) con una bomba de circulación para crear un sistema de microondas de flujo circulante continuo, lo cual

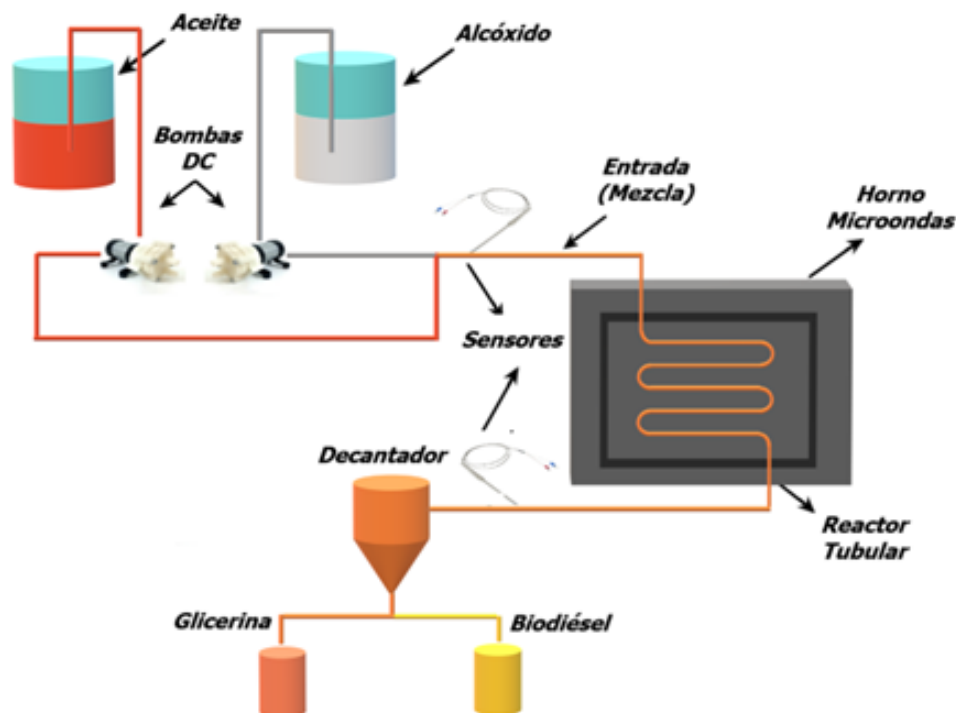
permite que los reactivos y los productos circulen dentro y fuera del reactor del microondas hasta el final de la síntesis. Por otra parte, en el sistema DMO continuo se presenta diversas ventajas sobre hornos microondas discontinuos, en el cual se tiene la capacidad de trabajar con grandes cantidades de reactivos, para la posibilidad de retirar muestras del producto sin detener el proceso y la agitación persistente de los reactivos durante la reacción.

En la [Figura 3](#), se presenta un sistema para la producción de biodiésel en flujo continuo por radiación de microondas en etapas.

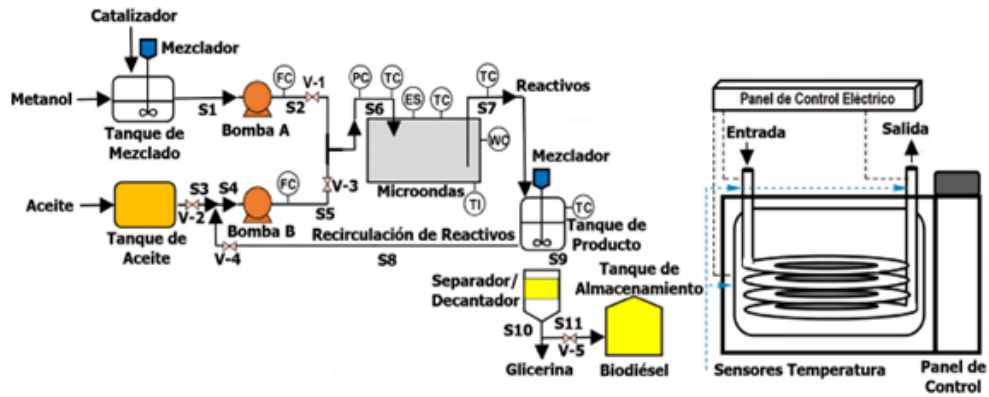
Cabe resaltar el estudio presentado por Phromphithak *et al.* [82], en el cual se destaca la generación de biodiésel mediante la transesterificación de aceite de palma en un sistema de flujo continuo, empleando la tecnología de radiación por microondas. En el cual la investigación se centra en la optimización de variables fundamentales a través del diseño experimental Box-Behnken, con el objetivo de mejorar significativamente el rendimiento del biocombustible obtenido. Los resultados indican que las condiciones más eficientes, considerando la relación molar, la potencia, la cantidad de catalizador y el flujo fueron, 13.2:1, 800 W, 6 %p, y 20 ml/min, respectivamente, logrando con ello un rendimiento del 90 %. Este enfoque destaca la importancia de ajustar a través de un

análisis experimental los parámetros de operación adecuados para maximizar la eficiencia en la producción de biodiésel mediante la tecnología de microondas en un sistema de flujo continuo y resulta ser un antecedente fundamental hasta la fecha. Por otra parte, a través del diseño y construcción de un sistema de producción de biodiésel en un reactor continuo asistido por microondas se evaluaron los efectos de un catalizador activado a base de piedra caliza (LBC), con aceite de cocina usado en un horno microondas, esto con el objetivo de caracterizar el biodiésel producido y determinar los índices de conversión y rendimiento del proceso. El banco de pruebas fue realizado a partir de la investigación de Mohd Ali M y Yunus [83]. En este estudio se logran plasmar las condiciones óptimas para la generación de biodiésel a través de un diseño factorial de dos niveles, con una metodología de superficie de respuesta para establecer dichos puntos óptimos en el proceso. Así mismo, los resultados de la investigación arrojaron rendimientos del 96,65 % en base del 5,47 % de catalizador en peso y una reducción de casi el 77 % del tiempo de reacción en comparación con los procesos convencionales.

En la [Figura 4](#), se presenta el diagrama de flujo del banco de pruebas para la producción de biodiésel en flujo continuo por radiación de microondas desarrollado por Phromphithak *et al.* [82].



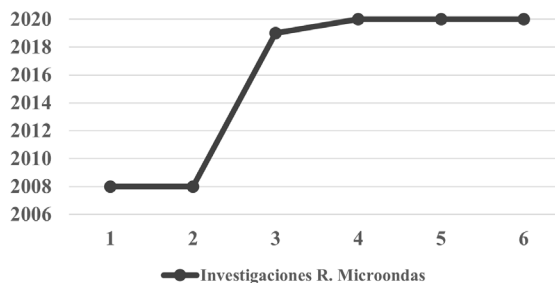
**Figura 3.** Sistema Continuo de Flujo por Microondas.



**Figura 4.** Sistema Continuo De Producción De Biodiésel utilizando la tecnología de radiación por microondas. Tomado de [84].

Así mismo, existen diversos factores que podrían afectar su producción de biodiésel realizado por el microondas, cómo por ejemplo el tipo y la concentración del catalizador, la potencia de los microondas, su temperatura de reacción, tipo de alcohol-aceite, los ácidos grados libres y el contenido de agua del aceite, así como la velocidad de agitación [85]. Debido a esto es necesario tener un conocimiento en profundidad sobre el impacto de estos factores en el proceso de producción de biodiésel. Esto daría como resultado valores óptimos de estos factores y por lo tanto mejoraría la eficacia de la reacción. Según la investigación realizada por Falowo *et al.* [86], los catalizadores básicos homogéneos y las potencias de microondas más elevadas, la igual que las temperaturas y los altos contenidos de alcohol podrían mejorar la producción de biodiésel. En la Figura 5, se presenta la distribución referencial de la producción de biodiésel a partir de la tecnología de radiación por microondas. En este contexto, el proceso de calentamiento a través de la tecnología de irradiación por microondas tiende a presentar tiempos y velocidades de reacción óptimos, lo cual demuestra su aptitud

para impulsar la reacción de transesterificación de manera más ágil y controlada, lo cual contribuye a la obtención de biocombustibles líquidos (biodiésel) de manera más eficiente. Así mismo, cabe resaltar que en los últimos años el proceso de transesterificación para la producción de biodiésel ha experimentado avances significativos, con un enfoque particular en la utilización de tecnologías innovadoras como el calentamiento por irradiación de microondas los métodos convencionales de calentamiento, con el objetivo de mejorar la eficiencia y sostenibilidad del proceso. En este sentido, la Tabla 3 recopila informes que abarcan el período entre 2019 y 2023, destacando los avances, las metodologías y los resultados obtenidos en el proceso de transesterificación para la producción de biodiésel mediante el uso de calentamiento por irradiación de microondas. Esta tabla ofrece en cierta medida una visión general de investigaciones en este campo, proporcionando una referencia útil para aquellos interesados en explorar esta tecnología en el sector de los biocombustibles.



**Figura 5.** Distribución de tiempo de las referencias relevantes de la producción de biodiésel a partir de la tecnología de radiación por microondas.

**Tabla 3.** Informes del periodo 2019 al 2023 del proceso de Transesterificación para la producción de biodiésel a través del calentamiento por irradiación de microondas.

Materia Prima	Relación Molar	Potencia (W)	Catalizador (wt%)	Temp. (°C)	Tiempo	Rendimiento (%)	Referencia
Sebo Bovino	6:1	200	KOH (0,4)	70	20 min	98,73	[87]
Aceite de harina de plumas de pollo	8:1	500	Bio Nano CaO (1)	50	5 min	95	[88]
Aceite de cocina usado	8:1	300	CaO mod. (4)	65	75 min	98,2	[89]
Aceite de cocina usado, Jatropha Curcas y Palma	9,86:1	80	Difícil KOH (0,78)	40	10.5 min	96,91	[90]
Ácido Oleico	20:1	50	UiO-66 (8)	100	60 min	98,3	[91]
Aceite de Camelina	6,91:1	400	KOH (1,26)	65	5.85 min	95,31	[92]
Aceite de cocina usado de semillas de algodón	9,6:1	180	CaO (1.33%)	50	9.7 min	90.41%	[93]

Cabe resaltar que en la [Tabla 3](#) se presentan y analizan críticamente factores como la materia prima, el tipo de alcohol, la relación molar, la potencia, el catalizador, la temperatura y tiempo de reacción, así como el rendimiento en función de estos parámetros. Así mismo, la revisión general del estado del arte abarca ciertos estudios específicos que investigan la combinación de diversas tecnologías de calentamiento y mezclado para la producción de biodiésel, como lo es la investigación de Khedri B y Mostafaei [79]. Tal es el caso de los sistemas de radiación por microondas y microcanales, reactores ultrasónicos con sistemas de cavitación hidrodinámica y reactores de flujo tubular/pistón con reactores PBR. Ante esto, la incorporación de más de una tecnología para la generación de biodiésel permite mejorar la eficiencia en la transferencia de calor y masa tras asegurar un calentamiento o mezclado rápido y uniforme de los reactivos. En otras palabras, la tecnología de irradiación por microondas, al ser aplicada en el proceso de producción de biodiésel, ha demostrado ser una solución termoquímica efectiva que aumenta la eficiencia de la reacción.

#### **Perspectivas futuras de los sistemas continuos de producción de Biodiésel**

A futuro, el desarrollo e innovación de reactores en flujo continuo basados en la incorporación de múltiples tecnologías de calentamiento, facilitara

la aceleración de los procesos de reacción y activación interna de las sustancias (materia prima, catalizador y alcohol) de tal forma que mejoren la calidad del biodiésel producido [94]. Por otra parte, la geometría de los reactores afecta directamente en la transferencia de calor y masa de los reactivos dentro del proceso de producción, por lo que la selección del reactor depende del tipo de sistema (batch/ continuo) y la tecnología solvotérmica de calentamiento [95]. Así mismo, se debe considerar el uso de catalizadores más eficientes, tal como es el caso de los biocatalizadores para el proceso de transesterificación, con el objetivo de mejorar la conversión y calidad del biodiésel, al tiempo que reduzcan los costos de producción y residuo. Además, se debe incursionar en el uso de aceites de segunda (no comestibles, aceites usados) y tercera generación (microalgas) para la producción de biodiésel [96]. Es por ello, que las microalgas, residuos agrícolas, aceites no comestibles y grasas animales recicladas se posicionan como fuentes alternativas de materia prima ante la actual demanda de aceites comestibles como la palma, soja y colza para la producción de biodiésel, lo cual permitirá diversificar las fuentes de suministro [97]. Por otra parte, la optimización de los parámetros operativos es otra perspectiva crucial para la producción de biocombustibles como el biodiésel. Esto es posible gracias a la investigación y desarrollo de mejores prácticas y metodologías

para maximizar la eficiencia del proceso de transesterificación y minimizar la formación de subproductos no deseados, como jabones, aguas residuales del lavado, geles, entre otros. Esto es posible mediante el empleo de técnicas avanzadas de simulación y procesos de validación por medio de experimentos a escala de laboratorio en la producción de biodiésel [98], permitiendo una optimización más fiable y efectiva en el proceso. Además, se presenta la posibilidad de integrar los sistemas continuos de producción de biodiésel con fuentes de energía renovable o tecnologías verdes. Aunque actualmente la producción de biodiésel se realiza a través de energías no renovables, lo cual sigue siendo la práctica más extendida. Sin embargo, teniendo en cuenta una visión a futuro de los respectivos cambios asociados a la sostenibilidad y reducción en la huella ambiental, se considera la utilización de energía solar, eólica o biomasa para alimentar los procesos de calentamiento y agitación, así como el aprovechamiento del calor residual mediante técnicas de cogeneración, los cuales ofrecen una alternativa prometedora [99].

No obstante, otro factor a considerar son las tecnologías emergentes en la producción de biodiésel, las cuales se centran en mejorar continuamente la eficiencia del proceso de transesterificación, tras optimizar los catalizadores y condiciones de reacción para aumentar rendimientos y reducir costos [100]. Además, se espera un mayor énfasis en tecnologías emergentes, como la producción de biodiésel a partir de algas y la exploración de procesos más sostenibles y económicamente viables, para impulsar la implementación de estos sistemas a gran escala [101]. Es por ello, que el desarrollo de métodos más eficientes, respetuosos con el medio ambiente y económicamente rentables seguirá siendo un objetivo clave en investigaciones futuras sobre el biodiésel.

## Conclusiones

La revisión exhaustiva realizada destaca los avances significativos en la producción de biodiésel, con un enfoque particular en los sistemas de flujo continuo y las diversas tecnologías de calentamiento no convencionales, en el cual se subraya la importancia de estos avances en el contexto de la transición energética hacia fuentes renovables como lo son los biocombustibles. Es por ello que se destaca el papel de los reactores,

tecnologías de calentamiento y sistemas de producción con el objetivo de optimizar y mejorar la eficiencia en cuanto a la producción de biodiésel desde el ámbito de investigación e industrialización, teniendo en cuenta el uso de estos biocombustibles en la mitigación de la dependencia de los combustibles fósiles y la generación de energía para su implementación en zonas sin acceso al sistema eléctrico interconectado nacional, así como para la generación de energía ante el sector de transporte, el cual representa casi en totalidad el uso de este biocarburante.

Por otra parte, la exploración de diversas técnicas de producción resalta el desarrollo continuo de métodos de producción eficientes, sostenibles y respetuosos con el medio ambiente, tal como es el caso de la transesterificación, siendo este un proceso químico fundamental para la transformación de materias primas como aceites vegetales y grasas animales en biodiésel. Es por ello que entre las técnicas revisadas para la producción de biodiésel se considera que la transesterificación sigue siendo más eficiente y económicamente viable, en comparación con otros métodos como la pirólisis y las microemulsiones.

Otra característica fundamental de los sistemas continuos es que garantizan un control más preciso sobre las condiciones del proceso tras monitorear y supervisar los parámetros en tiempo real, como es el caso de la dosificación de los reactivos, el mezclado, la transferencia de masa, la temperatura de reacción y los tiempos de producción. Sin embargo, en el caso de los sistemas de producción por lotes el control de las variables manipulables del proceso tiende a ser discontinuo, debido a que estas se ajustan durante el montaje del lote de producción, lo cual limita la implementación de ajustes y correcciones en el transcurso del proceso.

En cuanto a la clasificación del sistema de producción empleado para la producción de biodiésel se deben tener criterios tales como el tipo de reactor utilizado (batch, semicontinuo, continuo) subrayando la importancia de elegir adecuadamente la metodología en función de las necesidades y recursos disponibles. Así mismo, se destaca la tendencia hacia la investigación de sistemas de flujo continuo, los cuales cuentan con una mejora en la transferencia de calor y masa durante la conversión del biodiésel. En ello se



destaca el uso de reactores de micro canales y la combinación de tecnologías como la irradiación por microondas y los ultrasonidos para optimizar el sistema de producción. Sin embargo, se considera especialmente la incorporación de tecnologías emergentes como la irradiación por microondas, debido a que esta última se presenta como una opción eficaz para acelerar la reacción de transesterificación y mejorar la eficiencia general del proceso.

## Referencias

- [1] Ashokkumar V, Flora G, Venkatkarthick R, SenthilKannan K, Kuppam C, Mary Stephy G, *et al.* Advanced technologies on the sustainable approaches for conversion of organic waste to valuable bioproducts: Emerging circular bioeconomy perspective. *Fuel*. 2022;324(PB):124313. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124313>
- [2] Brand Correa LI. Energía y bienestar: una breve historia desde la perspectiva de los límites medioambientales. *Arbor*. 2023;199(807):11. <https://doi.org/10.3989/arbor.2023.807002>
- [3] Khatibi SR, Karimi SM, Moradi Lakeh M, Kermani M, Motevalian SA. Fossil energy price and outdoor air pollution: Predictions from a QUAIDS model. *Biofuel Research Journal*. 2020;7(3):1205–16. <https://doi.org/10.18331/BRJ2020.7.3.4>
- [4] Aldana Urrea AV, Rodríguez Patarroyo DJ. Complementarity of energy resources for the electrical generation: a review. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*. 2019;29(2):99–114. <https://doi.org/10.18359/rcin.3625>.
- [5] Njoh AJ. Renewable energy as a determinant of inter-country differentials in CO<sub>2</sub> emissions in Africa. *Renew Energy*. 2021;172:1225–32. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.03.096>
- [6] Bautista S, Espinoza A, Narvaez P, Camargo M, Morel L. A system dynamics approach for sustainability assessment of biodiésel production in Colombia. Baseline simulation. *J Clean Prod*. 2019;213:1–20. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.111>
- [7] Li B, Haneklaus N. The role of renewable energy, fossil fuel consumption, urbanization and economic growth on CO<sub>2</sub> emissions in China. *Energy Reports*. 2021;7:783–91. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.09.194>
- [8] Aiello Mazzarri C, Salazar Y, Urribarrí A, Arenas Dávila E, Sánchez Fuentes J, Ysambertt F. Producción de biodiésel a partir de las grasas extraídas de la borra de café: esterificación con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y transesterificación con KOH. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*. 2019;29(1):53–66. <https://doi.org/10.18359/rcin.2899>
- [9] Villafuerte Barreto AG, Zambrano Gavilanes F, Bravo Zamora R. Evaluación Del Potencial Uso De Piñón (*Jatropha Curcas* L.) Para La Generación De Biocombustible. *Biotempo*. 2022;19(2):281–289. <https://doi.org/10.31381/biotempo.v19i2.5106>
- [10] Andrade C, Corredor A, Buitrago L, Lache Muñoz A. Procesos bioquímicos utilizados Para la Producción de bioetanol, biodiésel y biogás y su estado en Colombia. *América Semilleros Formación Investigativa*. 2017;3(1):101–117. Disponible en: <http://hdl.handle.net/20.500.11839/6444>
- [11] Zulqarnain, Mohd Yusoff MH, Ayoub M, Ramzan N, Nazir MH, Zahid I, *et al.* Overview of Feedstocks for Sustainable Biodiésel Production and Implementation of the Biodiésel Program in Pakistan. *ACS Omega*. 2021;6(29):19099–114. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c02402>
- [12] Brahma S, Nath B, Basumatary B, Das B, Saikia P, Patir K, *et al.* Biodiésel production from mixed oils: A sustainable approach towards industrial biofuel production. *Chemical Engineering Journal Advances*. 2022;10(100284):1–31. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.100284>
- [13] Medina Ramírez IE, Chávez Vela NA, Jáuregui Rincón J. Biodiésel, un combustible renovable. *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*. 2012;55:62–70. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=67424409008>
- [14] Kouassi KE, Abolle AA, Yao KB, Boa D, Adouby K, Drogui P, *et al.* Optimization of Rubber Seed Oil Transesterification to Biodiésel Using Experimental Designs and Artificial Neural Networks. *Green and Sustainable Chemistry*. 2018;08(01):39–61. <https://doi.org/10.4236/gsc.2018.81004>.
- [15] U.S. Department of Energy's. ASTM Biodiésel Specifications. U.S. Department of Energy's. Disponible en: <https://afdc.energy.gov/fuels/biodiesel-specifications>

- [16] Inambao F. Biodiésel Standards and Quality Testing: A Review. *Journal of Harbin Engineering University* [Internet]. 2023; 44(10):273–95. Disponible en: <https://harbinengineeringjournal.com/index.php/journal/article/view/1508>
- [17] Molero H, Moyano K, Arias Toro D. Evaluación De Las Propiedades Catalíticas De Diversos Materiales En La Producción De Biodiésel. *Journal Of Science And Research*. 2022;7(2):151–78. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7262003>.
- [18] Kodgire P, Sharma A, Kachhwaha SS. Biodiésel production with enhanced fuel properties via appropriation of non-edible oil mixture using conjoint ultrasound and microwave reactor: Process optimization and kinetic studies. *Fuel Processing Technology*. 2022;230:107206. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2022.107206>
- [19] Ye J, Zhu H, Yang Y, Huang K, Vijaya Raghavan GS. Dynamic analysis of a continuous-flow microwave-assisted screw propeller system for biodiésel production. *Chem Eng Sci*. 2019;202:146–56. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2019.03.022>
- [20] Phromphithak S, Meepowpan P, Shimpalee S, Tippayawong N. Transesterification of palm oil into biodiésel using ChOH ionic liquid in a microwave heated continuous flow reactor. *Renew Energy*. 2020;154:925–36. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.03.080>
- [21] Cavero Gonzales AM, Solis Balbuena GA. Prototipo para la Producción de Biodiesel con Micro Alga *Chlorella vulgaris* en el Desarrollo de Biotecnología Energética. Revisión Sistemática 2021 (Tesis de grado). Lima, Perú: Universidad César Vallejo; 2022.
- [22] K Rajan K, Rajaram Narayanan M, Suresh Kumar S, Parthasarathi R, Mohanavel V. A detailed study on improving the properties and performance aspects of biodiésel. *International Journal of Ambient Energy*. 2022;43(1):19–53. <https://doi.org/10.1080/01430750.2020.1725634>
- [23] J Ruatpuia JVL, Changmai B, Pathak A, Alghamdi LA, Kress T, Halder G, *et al*. Green biodiésel production from *Jatropha curcas* oil using a carbon-based solid acid catalyst: A process optimization study. *Renew Energy*. 2023;206:597–608. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.02.041>
- [24] Sotolongo Pérez JÁ, Rodríguez Piloto R, García Díaz A, Suárez Hernández J. Producción de biodiésel. En: *Biodiésel: producción y uso*. Estación Experimental de Pastos y Forrajes Indio Hatuey; 2021. p. 78.
- [25] Rodrigues FMS, Masliy V, Silva MFC, Felgueiras AP, Carrilho RMB, Pereira MM. Catalytic multi-step continuous-flow processes for scalable transformation of eugenol into potential fragrances. *Catal Today*. 2023;418(February):1–12. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2023.114055>
- [26] Dey S, Reang NM, Das PK, Deb M. A comprehensive study on prospects of economy, environment, and efficiency of palm oil biodiésel as a renewable fuel. *J Clean Prod*. 2021;286:124981. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124981>
- [27] Waudby H, Zein SH. A circular economy approach for industrial scale biodiésel production from palm oil mill effluent using microwave heating: Design, simulation, techno-economic analysis and location comparison. *Process Safety and Environmental Protection*. 2021;148:1006–18. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.02.011>
- [28] Acevedo P JC, Becerra O LC, Acevedo R AZ, Posso R FR. Una revisión técnico-ambiental de la producción de biodiésel a partir de aceite de fritura residual en Colombia. *Desarrollo e Innovación en Ingeniería*. 2019;4:17. <http://doi.org/10.5281/zenodo.3387679>
- [29] Campos Martín JM, Chica A, Domine ME, García T, Pawelec B, Pinilla JL, *et al*. Biocombustibles. Grupo Español Carbón [Internet]. 2020;58:1–7. [https://digital.csic.es/bitstream/10261/226100/1/BoletinGEC\\_058-art6.pdf](https://digital.csic.es/bitstream/10261/226100/1/BoletinGEC_058-art6.pdf)
- [30] Awogbemi O, Von Kallon DV. Application of Tubular Reactor Technologies for the Acceleration of Biodiésel Production. *Bioengineering*. 2022;9(347):37. <https://doi.org/10.3390/bioengineering9080347>
- [31] Deepak B, Mohamed Ibrahim M. Microemulsion fuel formulation from used cooking oil with carbinol as the dispersion phase. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*. 2023;45(2):4107–26. <https://doi.org/10.1080/15567036.2023.2202624>

- [32] Kumar H, Sarma AK, Kumar P. A comprehensive review on preparation, characterization, and combustion characteristics of microemulsion based hybrid biofuels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2020;117:109498. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109498>
- [33] Samani BH, Behruzian M, Najafi G, Fayyazi E, Ghobadian B, Behruzian A, *et al.* The rotor-stator type hydrodynamic cavitation reactor approach for enhanced biodiesel fuel production. *Fuel*. 2021;283:118821. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118821>
- [34] Cortés Sánchez MD, Gata Montero EM, Pipió Ternero A, Rodríguez Rivas Á, Sánchez Santos JM. *Biocombustibles: tipos y estrategias de producción*. MoleQla: Revista de Ciencias de la Universidad Pablo de Olavide. 2019;(35):23.
- [35] de Sousa FP, dos Reis GP, Pasa VMD. Catalytic pyrolysis of vegetable oils over NbOPO4 for SAF and green diesel production. *J Anal Appl Pyrolysis*. 2024;177:106314. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2023.106314>
- [36] Cruz-Reina LJ, Flórez-Rojas JS, López GD, Herrera-Orozco I, Carazzone C, Sierra R. Obtention of fatty acids and phenolic compounds from Colombian cashew (*Anacardium occidentale*) nut shells using pyrolysis: towards a sustainable biodiesel production. *Heliyon*. 2023;9(8). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18632>
- [37] Manuale DL. *Obtención De Biodiesel En Condiciones Supercríticas (Tesis Doctoral)*. Ciudad de Santafé, Argentina: Universidad Nacional de Litoral; 2011.
- [38] Demirbaş A. Biodiesel from vegetable oils via transesterification in supercritical methanol. *Energy Convers Manag*. 2002;43(17):2349–56. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(01\)00170-4](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(01)00170-4)
- [39] Shalfoh E, Ahmad MI, Binhweel F, Shaah MA, Senusi W, Hossain MS, *et al.* Fish waste oil extraction using supercritical CO2 extraction for biodiesel production: Mathematical, and kinetic modeling. *Renew Energy*. 2024;220:119659. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119659>
- [40] Qadeer MU, Ayoub M, Komiyama M, Khan Daulatzai MU, Mukhtar A, Saqib S, *et al.* Review of biodiesel synthesis technologies, current trends, yield influencing factors and economical analysis of supercritical process. *J. Clean. Prod*. 2021;309:127388. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127388>
- [41] Jung S, Kim M, Lin KYA, Park YK, Kwon EE. Biodiesel synthesis from bio-heavy oil through thermally induced transesterification. *J Clean Prod*. 2021;294. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126347>
- [42] Mahesha CR, Rani GJ, Dattu VSNCH, Rao YKSS, Madhusudhanan J, Natrayan L, *et al.* Optimization of transesterification production of biodiesel from *Pithecellobium dulce* seed oil. *Energy Reports*. 2022;8:489–97. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.10.228>
- [43] Lourenço VA, Nadaleti WC, Vieira BM, Li H. Investigation of ethyl biodiesel via transesterification of rice bran oil: bioenergy from residual biomass in Pelotas, Rio Grande do Sul - Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021;144:111016. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111016>
- [44] Ulakpa WC, Ulakpa ROE, Egwunyenga MC, Egbosiuba TC. Transesterification of non-edible oil and effects of process parameters on biodiesel yield. *Cleaner Waste Systems*. 2022;3:100047. <https://doi.org/10.1016/j.clwas.2022.100047>
- [45] Calderon Benavides AC. *Evaluación del desempeño y emisiones de mezclas biodiesel, diésel, etanol y agua en motores diésel con base en la literatura (Tesis de grado)*. Bogotá, Colombia: Universidad de La Salle; 2022. Disponible en: <https://ciencia.lasalle.edu.co/server/api/core/bitstreams/def46a3e-be95-4ec3-8601-055e55764757/content>
- [46] Zhang J, Zhang X. The thermochemical conversion of biomass into biofuels. En: *Biomass, Biopolymer-Based Materials, and Bioenergy*. Elsevier; 2019. p. 327–68. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102426-3.00015-1>
- [47] Concepción Toledo DN, González Suárez E, López Bastida EJ, Ramos Miranda F. Gestión del conocimiento en la proyección científica de la industria química mediante diseños experimentales. *Universidad y Sociedad*. 2021;13(2):446–51.
- [48] Brahma S, Nath B, Basumatary B, Das B, Saikia P, Patir K, *et al.* Biodiesel production from mixed oils: A sustainable approach towards industrial biofuel production. *Chemical Engineering Journal Advances*. 2022;10:100284. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.100284>

- [49] Geng N, Zhang Y, Sun Y, Geng S. Optimization Of Biodiésel Supply Chain Produced From Waste Cooking Oil: A Case Study In China. *IOP Conf Ser Earth Environ Sci.* 2019;264(1):012006. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/264/1/012006>
- [50] Goyal H, Chen TY, Chen W, Vlachos DG. A review of microwave-assisted process intensified multiphase reactors. *Chemical Engineering Journal.* 2022;430(P4):133183. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.133183>
- [51] Xu C, Lan J, Ye J, Yang Y, Huang K, Zhu H. Design of continuous-flow microwave reactor based on a leaky waveguide. *Chemical Engineering Journal.* 2023;452(4):139690. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.139690>
- [52] Castillo Gonzales JP. Control de un Reactor CSRT para la Producción de Biodiésel (Tesis Doctoral). Ciudad de México, México: Tecnológico Nacional de México; 2021. Disponible en: <https://rinacional.tecnm.mx/jspui/handle/TecNM/2922>
- [53] Tabatabaei M, Aghbashlo M, Dehghani M, Panahi HKS, Mollahosseini A, Hosseini M, *et al.* Reactor technologies for biodiésel production and processing: A review. *Progress in Energy and Combustion Science.* 2019;74:239–303. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2019.06.001>
- [54] Raheem I, Mohiddin MN Bin, Tan YH, Kansedo J, Mubarak NM, Abdullah MO, *et al.* A review on influence of reactor technologies and kinetic studies for biodiésel application. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry.* 2020;91:54–68. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2020.08.024>
- [55] Iyyaswami R, Halladi VK, Yarramreddy SR, Malur Bharathaiyengar S. Microwave-assisted batch and continuous transesterification of karanja oil: Process variables optimization and effectiveness of irradiation: Microwave-assisted transesterification of karanja oil. *Biomass Convers Biorefin.* 2013;3(4):305–17. <https://doi.org/10.1007/s13399-013-0080-8>
- [56] Tabatabaei M, Aghbashlo M, Dehghani M, Panahi HKS, Mollahosseini A, Hosseini M, *et al.* Reactor technologies for biodiésel production and processing: A review. *Prog Energy Combust Sci.* 2019;74:239–303. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2019.06.001>
- [57] Khelafi M, Djaafri M, Kalloum S, Atelge MR, Abut S, Dahbi A, *et al.* Effect of stirring speeds on biodiésel yield using an innovative oscillatory reactor and conventional STR (A comparative study). *Fuel.* 2022;325:1248560. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124856>
- [58] Bezergianni S, Nikas V. Irradiación de microondas para la producción de biodiésel: estado del arte y desafíos futuros. *Revisiones de energía renovable y sostenible.* 2019;104:420–31.
- [59] Gonçalves T dos S, Oro CED, Wancura JHC, dos Santos MSN, Junges A, Dallago RM, *et al.* Challenges for energy guidelines in crop-based liquid biofuels development in Brazil. *Next Sustainability.* 2023;2(100002):1-15. <https://doi.org/10.1016/j.nxsust.2023.100002>
- [60] Goldraj A. Diseño y código técnico en la producción de biocombustibles a partir de plantas. Un análisis desde la teoría crítica de la tecnología de Andrew Feenberg. *Revista iberoamericana de ciencia tecnología y sociedad.* 2022;18(54):153–73. <https://doi.org/10.52712/issn.1850-0013-357>
- [61] González JPC, Gutiérrez PEÁ, Medina MA, Zapata BYL, Guerrero GVR, Valdés LGV. Effects on biodiésel production caused by feed oil changes in a continuous stirred-tank reactor. *Applied Sciences.* 2020;10(3):992. <https://doi.org/10.3390/app10030992>
- [62] Hernández Ferrer CL. Diseño conceptual de un proceso para la obtención de Biodiésel a partir de aceite usado de fritura (Tesis de pregrado). Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia; 2019. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10251/134029>
- [63] Sun W, Tao T, Lailliau M, Hansen N, Yang B, Dagaut P. Exploration of the oxidation chemistry of dimethoxymethane: Jet-stirred reactor experiments and kinetic modeling. *Combust Flame.* 2018;193:491–501. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2018.04.008>
- [64] Pérez Robert AI, Elizalde Martínez I, Monterrubio Badillo Ma del C, Mederos Nieto FS, Vázquez Medina R. Modelación matemática de un reactor de tanque agitado con catalizador disperso para la obtención de metil oleato a partir de trioleína. *CIENCIA ergo sum.* 2020;27(2):1–15. <https://doi.org/10.30878/ces.v27n2a7>
- [65] Kouzu M, Fujimori A, Fukakusa R ta, Satomi N, Yahagi S. Continuous production of biodiésel by the CaO-catalyzed transesterification operated with continuously stirred tank reactor. *Fuel Processing Technology.* 2018;181:311–7. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2018.10.008>

- [66] Gao L, Xu W, Xiao G. Modeling of biodiesel production in a membrane reactor using solid alkali catalyst. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*. 2017;122:122–7. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2017.09.019>
- [67] Bansod P, Kodape S, Dharaskar S, Shirsath SR. Review on membrane technology for separation of biodiesel. *Materials Today: Proceedings*. 2021;47(10):2415–2419. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.482>
- [68] Bello Yaya N, Habert AC, Kronemberger F de A. Evaluation of a hollow fiber membrane contactor reactor for reactive extraction in biodiesel production. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*. 2023;194:109574. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2023.109574>
- [69] Rozina, Ahmad M, Zafar M, Bokhari A, Akhtar MS, Alshgari RA, *et al.* Membrane reactor for production of biodiesel from nonedible seed oil of *Trachyspermum ammi* using heterogenous green nanocatalyst of manganese oxide. *Chemosphere*. 2023;322. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138078>
- [70] Wang SC, Wang XD, Teng XN, Dai JY, Dong YS, Yuan HL, *et al.* Fatty acid chain modification of loxenate and its kinetics in a continuous flow microchannel reactor. *Process Biochemistry*. 2023;124:259–268. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2022.12.007>
- [71] Mohd Laziz A, KuShaari KZ, Chin J, Denecke J. Quantitative analysis of hydrodynamic effect on transesterification process in T-junction microchannel reactor system. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*. 2019;140:91–99. [doi.org/10.1016/j.cep.2019.04.019](https://doi.org/10.1016/j.cep.2019.04.019)
- [72] Gholami A, Pourfayaz F, Hajinezhad A, Mohadesi M. Biodiesel production from Norouzak (*Salvia leriifolia*) oil using choline hydroxide catalyst in a microchannel reactor. *Renew Energy*. 2019;136:993–1001. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.01.057>
- [73] Mohd Laziz A, KuShaari KZ, Azeem B, Yusup S, Chin J, Denecke J. Rapid production of biodiesel in a microchannel reactor at room temperature by enhancement of mixing behaviour in methanol phase using volume of fluid model. *Chem Eng Sci*. 2020;219:115532. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2020.115532>
- [74] Yusuf NNAN, Kamarudin SK, Yaakub Z. Overview on the current trends in biodiesel production. *Energy Convers Manag*. 2011;52(7):2741–51. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.12.004>
- [75] Omolola AO, Jideani AIO, Kapila PF. Modeling microwave drying kinetics and moisture diffusivity of mabonde banana variety. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2014;7(6):107–13. <https://doi.org/10.3965/j.ijabe.20140706.013>
- [76] Milano J, Ong HC, Masjuki HH, Silitonga AS, Chen WH, Kusumo F, *et al.* Optimization of biodiesel production by microwave irradiation-assisted transesterification for waste cooking oil-*Calophyllum inophyllum* oil via response surface methodology. *Energy Convers Manag*. 2018;158:400-15. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.12.027>
- [77] Ye J, Zhang C, Zhu H. A Temperature-Control System for Continuous-Flow Microwave Heating Using a Magnetron as Microwave Source. *IEEE*. 2020;8:44391–9. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2978124>
- [78] Lertsathapornsuk V, Pairintra R, Aryusuk K, Krisnangkura K. Microwave assisted in continuous biodiesel production from waste frying palm oil and its performance in a 100 kW diesel generator. *Fuel Processing Technology*. 2008;89(12):1330–6. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2008.05.024>
- [79] Khedri B, Mostafaei M, Safieddin Ardebili SM. Flow-mode synthesis of biodiesel under simultaneous microwave–magnetic irradiation. *Chinese Journal of Chemical Engineering*. 2019;27(10):2551–2559. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2019.03.010>
- [80] Silitonga AS, Shamsuddin AH, Mahlia TMI, Milano J, Kusumo F, Siswantoro J, *et al.* Biodiesel synthesis from Ceiba pentandra oil by microwave irradiation-assisted transesterification: ELM modeling and optimization. *Renewable Energy*. 2020;146:1278–1291. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.07.065>
- [81] Groisman Y, Gedanken A. Continuous flow, circulating microwave system and its application in nanoparticle fabrication and biodiesel synthesis. *Journal of Physical Chemistry C*. 2008;112(24):8802–8. <https://doi.org/10.1021/jp801409t>

- [82] Phromphithak S, Meepowpan P, Shimpalee S, Tippayawong N. Transesterification of palm oil into biodiesel using ChOH ionic liquid in a microwave heated continuous flow reactor. *Renewable Energy*. 2020;154:925–936. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.03.080>
- [83] Mohd Ali MA, Gimbin J, Lau KL, Cheng CK, Vo DVN, Lam SS, *et al.* Biodiesel synthesized from waste cooking oil in a continuous microwave assisted reactor reduced PM and NOx emissions. *Environmental Research*. 2020;185. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109452>
- [84] Gupta J, Agarwal M, Dalai AK. An overview on the recent advancements of sustainable heterogeneous catalysts and prominent continuous reactor for biodiesel production. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2020;88:58–77. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2020.05.012>
- [85] Arpia AA, Chen WH, Lam SS, Rousset P, de Luna MDG. Sustainable biofuel and bioenergy production from biomass waste residues using microwave-assisted heating: A comprehensive review. *Chemical Engineering Journal*. 2021;40:126233. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126233>
- [86] Falowo OA, Apanisile OE, Aladelusi AO, Adeleke AE, Oke MA, Enamhanye A, *et al.* Influence of nature of catalyst on biodiesel synthesis via irradiation-aided transesterification of waste cooking oil-honne seed oil blend: Modeling and optimization by Taguchi design method. *Energy Conversion and Management: X*. 2021.12:100119. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2021.100119>
- [87] Handayani PA, Athhar I, Reksono D. Optimization of Biodiesel Production from Beef Tallow Using Microwave Assisted. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*. 2022;97(2):57–65. <https://doi.org/10.37934/arfmts.97.2.5765>
- [88] Zhang M, Ramya G, Brindhadevi K, Alsehli M, Elfasakhany A, Xia C, *et al.* Microwave assisted biodiesel production from chicken feather meal oil using Bio-Nano Calcium oxide derived from chicken egg shell. *Environmental Research*. 2022;205:112509. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112509>
- [89] Hsiao MC, Kuo JY, Hsieh SA, Hsieh PH, Hou SS. Optimized conversion of waste cooking oil to biodiesel using modified calcium oxide as catalyst via a microwave heating system. *Fuel*. 2020;266:117114. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117114>
- [90] Yusoff MNAM, Zulkifli NWM, Sukiman NL, Kalam MA, Masjuki HH, Syahir AZ, *et al.* Microwave irradiation-assisted transesterification of ternary oil mixture of waste cooking oil – *Jatropha curcas* – Palm oil: Optimization and characterization. *Alexandria Engineering Journal*. 2022;61(12):9569–82. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.03.040>
- [91] Gouda SP, Ngaosuwan K, Assabumrungrat S, Selvaraj M, Halder G, Rokhum SL. Microwave assisted biodiesel production using sulfonic acid-functionalized metal-organic frameworks UiO-66 as a heterogeneous catalyst. *Renewable Energy*. 2022;197:161–9. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.07.061>
- [92] Rokni K, Mostafaei M, Dehghani Soufi M, Kahrizi D. Microwave-assisted intensification of transesterification reaction for biodiesel production from camelina oil: Optimization by Box-Behnken Design. *Bioresource Technology Reports*. 2022;17:100928. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100928>
- [93] Sharma A, Kodgire P, Kachhwaha SS. Biodiesel production from waste cottonseed cooking oil using microwave-assisted transesterification: Optimization and kinetic modeling. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019;116:109394. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109394>
- [94] Asghari M, Hosseinzadeh Samani B, Ebrahimi R. Review on non-thermal plasma technology for biodiesel production: Mechanisms, reactors configuration, hybrid reactors. *Energy Conversion and Management*. 2022;258:115514. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115514>
- [95] Xu C, Lan J, Ye J, Yang Y, Huang K, Zhu H. Design of continuous-flow microwave reactor based on a leaky waveguide. *Chemical Engineering Journal*. 2023;452(P4):139690. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.139690>
- [96] Beccaria JA. Preparación Y Caracterización De Biodiesel A Base De Diferentes Tipos De Aceites Comestibles Y No Comestibles (Tesis de pregrado). SEDICI. Universidad Nacional De La Plata; 2012. Disponible en: <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/139226>

- [97] Benti NE, Aneseyee AB, Geffe CA, Woldegiyorgis TA, Gurmesa GS, Bibiso M, *et al.* Biodiésel production in Ethiopia: Current status and future prospects. *Sci Afr.* 2023;19:e01531. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2022.e01531>
- [98] Velásquez Figueroa YP. Análisis sistemático de una metodología para escalado de reactores fotoquímicos heterogéneos basado en métodos matemáticos. *Rev. Ing Nova.* 2023;2(1):43-52. Disponible en: <https://revistas.unicartagena.edu.co/index.php/ing-nova/article/view/4262>
- [99] Arismendi Londoño JP, Avendaño Avendaño AJ, Parra Llanos JW, Rodríguez Ordoñez DC. Aprovechamiento de aceites vegetales usados para la obtención de biodiésel de segunda generación: una revisión. *ConBRepro.* 2021;1–10. Disponible en: [https://aprepro.org.br/conbrepro/2021/anais/arquivos/09272021\\_220941\\_61526cf9343f5.pdf](https://aprepro.org.br/conbrepro/2021/anais/arquivos/09272021_220941_61526cf9343f5.pdf)
- [100] Reséndiz Luna JJ, Martínez Guido SI, Romero Izquierdo AG, Guitiérrez Antonio C. Producción de biodiésel en México: materias primas promisorias y sus rendimientos. *Naturaleza y Tecnología.* 2022;22–42.
- [101] Quiros Celis MC. Estudio Analítico De Las Rutas De Conversión Para La Producción De Biodiésel A Partir De Aceite Extraído De Palma Africana (*Elaeis Guineensis Jacq*) (Tesis de pregrado). Pamplona, Colombia: Universidad De Pamplona; 2021. Disponible en: <http://repositoriodspace.unipamplona.edu.co/jspui/handle/20.500.12744/5510>