



Biodiésel y cavitación hidrodinámica

para un enfoque
integral hacia la
sostenibilidad
energética



James Ronald Vera Rozo
José Manuel Riesco Ávila
Jarol Derley Ramón Valencia

**Biodiésel y cavitación
hidrodinámica para un
enfoque integral hacia la
sostenibilidad energética**

Biodiésel y cavitación hidrodinámica para un enfoque integral hacia la sostenibilidad energética / James Ronald Vera Rozo, José Manuel Riesco Ávila, Jarol Derley Ramón Valencia — Pamplona: Universidad de Pamplona. 2026.

156 p. 17 cm x 24 cm

ISBN (Digital): 978-628-7937-09-3

© Universidad de Pamplona
© Sello Editorial Unipamplona
Sede Principal Pamplona, Km 1 Vía Bucaramanga-
Ciudad Universitaria. Norte de Santander, Colombia.
www.unipamplona.edu.co
Teléfono: 6075685303

***Biodiésel y cavitación hidrodinámica para un
enfoque integral hacia la sostenibilidad energética***

James Ronald Vera Rozo
José Manuel Riesco Ávila
Jarol Derley Ramón Valencia

ISBN (Digital): 978-628-7937-09-3
DOI: <https://doi.org/10.24054/t8gswg08>
Primera edición mayo de 2026
Colección Ciencia e Innovación
© Sello Editorial Unipamplona

Rector: Ivaldo Torres Chávez Ph.D
Vicerrector de Investigaciones: Aldo Pardo García Ph.D

Jefe Sello Editorial Unipamplona: Catherine Mojica Acevedo
Corrección de estilo: Andrea del Pilar Durán Jaimes
Diseño y diagramación: Laura Angelica Buitrago Quintero

Hecho el depósito que establece la ley. Todos los derechos reservados.
Prohibida su reproducción total o parcial por cualquier medio, sin permiso del editor.



Biodiésel y cavitación hidrodinámica para un enfoque integral hacia la sostenibilidad energética

James Ronald Vera Rozo

 0000-0003-0516-3936

José Manuel Riesco Ávila

 0000-0001-7810-2566

Jarol Derley Ramón Valencia

 0000-0002-4929-8544

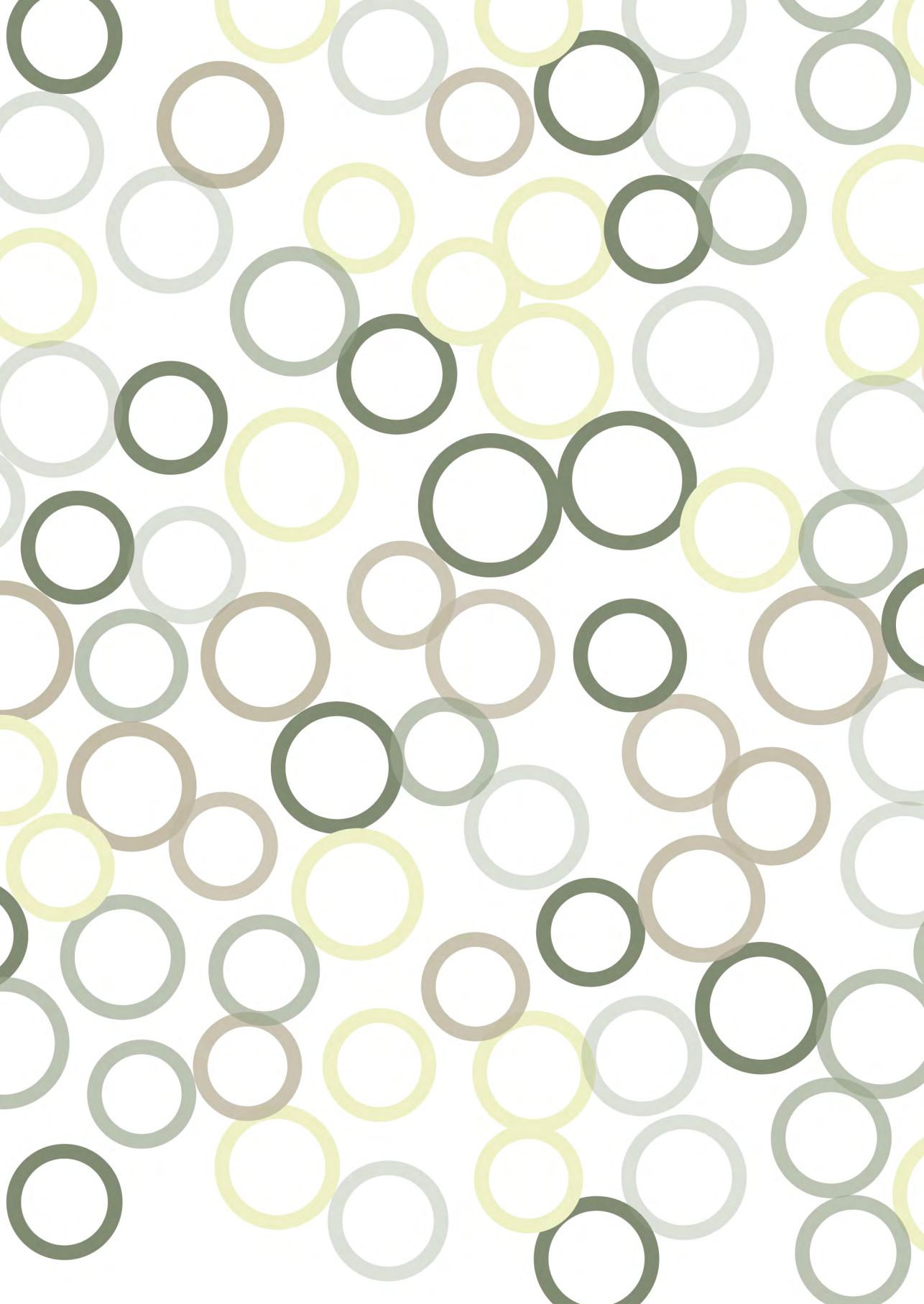


Vicerrectoría de
INVESTIGACIONES
UNIPAMPLONA

“ Formando nuevas generaciones con
sello de excelencia comprometidos
con la transformación social de las
regiones y un país en paz ”

Dedicatoria

*En memoria del Ph.D. Jacipt Alexander Ramón
Valencia por sus valiosos aportes personales y
profesionales a cada uno de los autores de este libro.*



ÍNDICE

RESUMEN	11
ABSTRACT	13

15 CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

Consecuencias del abuso energético	15
La humanidad y su abuso de la energía	15
El cambio climático	19
Combustibles alternativos	23
Biocombustibles	26
El biodiésel	28
Línea histórica del biodiésel	29
¿Seguirá siendo el biodiésel una alternativa energética?	32
Ventajas	34
Desventajas	36
Biodiésel en México	38
Biodiésel en Colombia	39
Tecnologías de producción de biodiésel	41
Hipótesis	43

45 CAPÍTULO 2 BIODIÉSEL

Transesterificación	45
Investigación en biodiésel	47
Materia prima (Aceites)	48
Aceites de primera generación	49
Aceite de girasol	51
Aceite de maíz	53
Aceite de soya	54
Aceite de palma	55
Aceites de segunda generación	56
Aceite de cocina usado	57
Grasas animales	59
Aceites de tercera generación	59

Alcoholes.....	60
Metanol.....	61
Etanol.....	62
Intensificadores	64
Químicos.....	64
Físicos	66
Microcanales	66
Destilación reactiva.....	68
Microondas.....	69
Flujo oscilatorio.....	69
Cavitación hidrodinámica	70
Reactores	71
Reactores rotativos y de flujo de pistón.....	75
Reactores de reacción y separación simultáneos	80
Reactores de microondas	85
Reactores de cavitación.....	87
Tiempo de residencia	88
Control de calidad del biodiésel.....	90
Normas ASTM D6751	91
Normas UNE EN 14214.....	93

99 **CAPÍTULO 3** **CAVITACIÓN**

El fenómeno de cavitación	99
Presión de vapor.....	101
Cavitación en flujos de líquidos reales	102
Principales efectos de la cavitación en la hidráulica.....	103
Características específicas de flujo cavitante	105
Interfases líquido-vapor	108
Parámetros no dimensionales	110
Algunos aspectos históricos.....	111
Cavitación para obtención de biodiésel	112
Cavitación hidrodinámica	114

119 **CAPÍTULO 4** **REFLEXIÓN**

GLOSARIO	123
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	127
AUTORES	153

ÍNDICE

TABLAS Y FIGURAS

TABLAS

Tabla 1. Combustibles tradicionales y alternativos.	24
Tabla 2. Desglose general del costo del biodiésel en México.	39
Tabla 3. Clasificación global de la investigación en biodiésel.	48
Tabla 4. Ácidos grasos comunes.	50
Tabla 5. Rendimiento de aceite de los cultivos oleaginosos de primera generación	51
Tabla 6. Ranking de producción de aceite de girasol a nivel mundial.	52
Tabla 7. Ranking de producción de aceite de maíz a nivel mundial	53
Tabla 8. Ranking de producción de aceite de soya a nivel mundial	55
Tabla 9. Ranking de producción de aceite de palma a nivel mundial	56
Tabla 10. Revisión de microcanales usados como intensificadores.	67
Tabla 11. Revisión de destilación reactiva como intensificadores.	69
Tabla 12. Revisión de flujo oscilatorio como intensificador.	70
Tabla 13. Comparación entre reactores batch, semibatch y continuos	74
Tabla 14. Comparación entre reactores batch, semibatch y continuo.	80
Tabla 15. Especificaciones ASTM D 6751.	92
Tabla 16. Especificaciones UNE EN 14214.	95
Tabla 17. Revisión del proceso de cavitación hidrodinámica en la obtención de biodiésel.	117

FIGURAS

Figura 1. Reportes de temperatura meteorológica del año 1900 al 2020	20
Figura 2. Ciclo cerrado de los biocombustibles	27
Figura 3. Clasificación general de los biocombustibles	29
Figura 4. Línea del tiempo del biodiésel	30
Figura 5. Reducción de emisiones por el uso del Biodiesel	41
Figura 6. Reacción de transesterificación de un triglicérido con un alcohol	46
Figura 7. Fruto, semilla y aceite de girasol	51
Figura 8. Planta, fruto, semilla y aceite de maíz	53
Figura 9. Fruto, semilla molida y aceite de soya	54
Figura 10. Fruto, almendra y aceite de palma	55
Figura 11. Biorrefinería y el aceite usado de cocina	58
Figura 12. Producción global de metanol y demanda energética	61

Figura 13. Producción global de etanol	63
Figura 14. Clasificación general de catalizadores químicos.....	65
Figura 15. Pasos generales de producción de biodiésel.....	71
Figura 16. Diagrama de reactores usados en la producción de biodiesel	75
Figura 17. Tipos de reactores rotativos	79
Figura 18. Tipos de cavitación	100
Figura 19. Diagrama de fases para del agua	101
Figura 20. Interfaz líquido vapor flujo cavitante	109

RESUMEN

Este libro parte de una visión crítica del modelo energético actual, describiendo en el primer capítulo las consecuencias del abuso de los combustibles fósiles y el reto del cambio climático. Se analiza cómo el incremento desmedido del consumo de petróleo y carbón ha acelerado la degradación ambiental, poniendo énfasis en la necesidad de diversificar las fuentes de energía. A continuación, se presenta el concepto de biocombustibles, con un enfoque particular en el biodiésel como alternativa renovable y se plantea la hipótesis de que la cavitación hidrodinámica puede mejorar la eficiencia y sostenibilidad de su producción.

El segundo capítulo ofrece una revisión exhaustiva del biodiésel: Define la reacción de transesterificación, repasa las generaciones de materias primas (desde aceites comestibles hasta algas genéticamente modificadas) y destaca los alcoholes más comunes (metanol y etanol). Se examinan intensificadores químicos y físicos, y se comparan distintos tipos de reactores (batch, continuo, de flujo de pistón, microcanales, microondas y de cavitación) así como los criterios de control de calidad basados en normas ASTM y EN.

En el tercer capítulo se profundiza en el fenómeno de la cavitación, sus parámetros físicos y no dimensionales, y su aplicación en la obtención de biodiésel. Se describe la cavitación hidrodinámica; generada por cambios súbitos de presión en dispositivos como placas de orificio y rotores-estátor y se contrastan sus ventajas en términos de tiempo de reacción y consumo energético frente a los procesos convencionales. Finalmente, el libro reflexiona sobre el papel del biodiésel y la cavitación hidrodinámica como

herramientas clave para avanzar hacia un modelo energético más sostenible.

Palabras Claves: Biocombustibles, Biodiesel, Cavitación Hidrodinámica, Reactor de Ondas de Choque, Sostenibilidad Energética.

ABSTRACT

This book begins with a critical assessment of today's energy model, detailing the environmental impacts of excessive fossil fuel use and the pressing challenge of climate change. It examines how unchecked consumption of oil and coal has accelerated ecological degradation and underscores the urgent need for diversified energy sources. The concept of biofuels is then introduced, focusing on biodiesel as a renewable alternative, and positing that hydrodynamic cavitation can enhance the efficiency and sustainability of its production.

The second chapter provides a comprehensive overview of biodiesel: it defines the transesterification reaction, reviews feedstock generations (from edible oils to genetically modified algae), and highlights common alcohols (methanol and ethanol). Chemical and physical intensifiers are discussed, and various reactor types (batch, continuous, piston-flow, microchannel, microwave, and cavitation reactors) are compared, alongside quality control criteria based on ASTM and EN standards.

The third chapter delves into the cavitation phenomenon, its physical and dimensionless parameters, and its application to biodiesel synthesis. It explains hydrodynamic cavitation generated by sudden pressure changes in devices like orifice plates and rotor-stator assemblies and contrasts its advantages in reaction time and energy consumption against conventional methods. Finally, the book reflects on biodiesel and hydrodynamic cavitation as pivotal tools for transitioning toward a more sustainable energy paradigm.

Keywords: Biodiesel, Biofuels, Energy sustainability, Hydrodynamic cavitation, Shock wave reactor



“Creo que mientras los combustibles fósiles sean baratos, la gente los usará y pospondrán el uso de nuevas tecnologías...”

Paul Krugman



INTRODUCCIÓN

La búsqueda permanente de alternativas energéticas que permitan al hombre suplir sus necesidades, ha sido uno de los grandes retos del siglo XXI; alternativas como el uso de combustibles renovables y energía nuclear al típico petróleo, para la generación de energía eléctrica y transporte, ha tomado fuerza en los últimos años. Pero a pesar de presentarse un gran avance en múltiples formas de reducir la contaminación ambiental, aún no se concientiza a la población mundial, en especial a los países en desarrollo de las consecuencias del uso desaforado de materias primas, petróleo y/o carbón.

CONSECUENCIAS DEL ABUSO ENERGÉTICO

La humanidad y su abuso de la energía

A lo largo del tiempo el hombre ha buscado facilitar sus trabajos. Inicialmente no existía más que la energía proveniente de su musculatura y/o piezas que le ayudaran a realizar actividades; no fue sino hasta el periodo paleolítico superior cuando el hombre conoció el fuego, el cual permitió desarrollar y realizar ciertas actividades hasta el momento desconocidas. Se piensa que el origen del fuego fue inicialmente proveniente de incendios provocados por rayos o erupciones volcánicas, este le permitió posteriormente al hombre protegerse del frío, alumbrarse de noche y alejar a animales depredadores. Con el paso del tiempo, ya no sólo podía controlarlo, sino generarlo usándolo a su conveniencia y desde este momento, comenzó a cocinar y explorar invenciones como el horno, donde se desprendieron múltiples descubrimientos como: Las piezas de alfarería, el trabajo del hierro y el cobre. Desde ese momento, inició

el consumo de fuentes energéticas como lo fue el carbón obtenido de leña seca o árboles muertos, siendo inicialmente de fuentes renovables y posteriormente el carbón mineral de fuentes fósiles [1], [2].

La evolución energética históricamente se debió a la agricultura, la cual permitió a la humanidad comprender la transferencia de energía solar a algunos vegetales y posteriormente, utilizar estos como alimentos; además, cuando el hombre cambió de ser un nómada y se asentó en lugares específicos, habitando chozas y cabañas, el consumo de la energía aumentó exponencialmente permitiendo a las sociedades crecer. Al avanzar en el dominio de la agricultura y construcciones en zonas de asentamientos, se completa el concepto de trabajo y energía como la capacidad de transformar y hacer producir la tierra [3]. Posterior a tener un lugar donde vivir y algunos cultivos, el hombre puede domesticar animales y profundiza en el conocimiento de lagos, ríos y mares, logrando manejar estas energías naturales como el viento para impulsar molinos en tierra y velas en el mar [4].

Todas estas energías encontradas en aquel tiempo para el hombre son de carácter renovable, pues indistinta de las situaciones pueden ser generadas rápidamente por la humanidad sin consumir más recursos que el trabajo humano y aprovechar las energías disponibles. Más adelante, en la Revolución Industrial se generalizó el uso de carbón mineral debido a la facilidad de aplicación en múltiples trabajos, pero a su vez se inició el consumo de un recurso limitado, el cual no puede ser generado sino con el paso de millones de años de evolución [5]. La máquina de vapor fue de los primeros dispositivos que usaron combustible no renovable como lo es el carbón mineral, a su vez, se introdujo el concepto de industria donde diversas áreas como la siderúrgicas, textil y transporte cambiaron notablemente, pasando a generar un impacto nocivo en la atmósfera terrestre, al generarse

dióxido de carbono (CO_2) en cantidades superiores a las absorbidas por la flora [6].

La generación masiva de electricidad no se dio sino para finales del siglo XIX, luego de crecientes desarrollos y aumento de la industria, pues requerían de fuentes motrices que consumían energía no renovable como el carbón, la cual era notoriamente ineficiente respecto a la eléctrica [7]. A partir de este momento numerosas aplicaciones como la iluminación, transporte, telecomunicaciones e informática comenzaron a desarrollarse masivamente, y como consecuencia inició un consumo desaforado de fuentes no renovables de origen fósil [5], [7].

Las industrias de transporte de pasajeros e insumos fue las más demandada por la sociedad de consumo, por lo que se produjo un esfuerzo mancomunado en alternativas de energía, dando fruto en el descubrimiento y desarrollo de la industria del petróleo [8]. En este momento no solo se extraía energía del carbón y petróleo, sino comenzaban a estudiarse los gases que se encontraban en los yacimientos, energía nuclear, hidráulica, el viento, el mar, el sol y la biomasa, dejando a un lado las menos eficientes, las cuales para ese momento eran las fuentes energéticas de origen renovable [9].

Hasta ese momento, se profundizaba en las bondades que el petróleo tenía sobre el carbón mineral, pues presentaba una mayor densidad energética, siendo de gran interés su exploración y explotación [5]. Dada esta situación, se inició una carrera desenfrenada en la obtención de energía, en especial la eléctrica, a partir de esta fuente no renovable, pero a pesar de que hoy día se use en una menor proporción el petróleo para la producción de energía eléctrica, aún se aplica en cerca del 24% [10]. Es por esta razón, que la humanidad se ha realizado la pregunta de ¿qué se hará cuando se agote el petróleo?, este cuestionamiento ha tomado más fuerza

entrando al siglo XX donde múltiples autores y la sociedad en general han planteado su preocupación por el estado de contaminación del planeta [11], [12].

Los pronósticos más alentadores indicaban que el planeta tierra tenía suficiente tamaño para encontrar nuevos yacimientos, lo suficientemente vastos y que nunca se acabarían, pero, por otro lado, inició la preocupación por que no todos los países tenían acceso al petróleo, mostrándose que en un futuro no muy lejano, el país que tenga crudo en su territorio será quien controlará las economías mundiales [13]. Es por esta razón, que el consumo del petróleo comenzó su carrera creciente, la cual fue impulsada por la Segunda Guerra Mundial, denominando esta época como “la era del petróleo” [2]. A partir de ese entonces, el consumo de combustibles para generación de energía tuvo un aumento muy significativo, en especial el de los motores de combustión interna, que para este momento ya se producían en masa y estaban presentes a lo largo y ancho del planeta con motores que consumían gasolina y diésel de origen 100% fósil [2], [6], [10].

Hoy día a pesar de lo indispensable que resulta el movilizarnos de un lugar a otro, y de las alternativas en las formas de transporte, se continúan extrayendo y usando productos derivados del petróleo en grandes proporciones. Algunos de los problemas ya estudiados y evidenciados a lo largo de la historia del uso desenfrenado de hidrocarburos son [2], [14], [15]:

- Deterioro medioambiental generalizado en las zonas donde se emiten gases de efecto invernadero y contaminantes, deforestación, extinción de especies, pérdida de la biodiversidad, disminución de la capa de ozono, incremento de residuos tóxicos y radioactivos en la atmósfera.

- Excesiva ocupación de lugares de instalación y extracción.
- Sobreexplotación de acuíferos, contaminación de agua con metales pesados y azufre.
- Guerras, invasiones a países pobres con reservas de petróleo.
- Una globalización más dividida en pobres y ricos.
- Problemas de salud generalizada en poblaciones de alta explotación de yacimientos.

Actualmente, el desabastecimiento del petróleo constituye uno de los grandes problemas de la humanidad donde, a pesar de conocer y desarrollar otras industrias como el transporte por medio de motores eléctricos, generación de energía a partir de fuentes renovables; no se cuenta con un cambio total a dichas tecnologías. Por otro lado, existen aplicaciones muy puntuales que imposibilitan la aplicación de estas tecnologías alternas, debido a la alta capacidad de potencia que se requieren para un proceso en específico y evidente gran tamaño. Es indiscutible que tecnologías renovables como la energía solar, eólica, hidroeléctricas y el uso de combustibles de origen biológico y por consiguiente renovable, pueden suplir parcialmente la necesidad que deja de inmediato el agotamiento del petróleo [16]. Además, el uso excesivo en múltiples aplicaciones del petróleo es irremplazable, lo que causa gran contaminación y en consecuencia cambio climático [16].

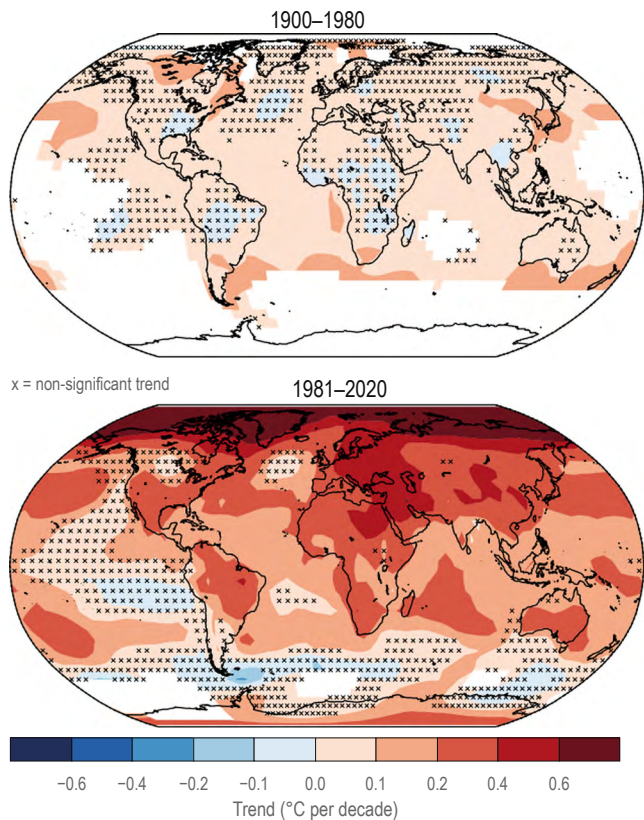
El cambio climático

El cambio climático es el reto más grande que enfrenta la humanidad en el siglo XXI. El calentamiento de la Tierra ya no es una posible amenaza, es una realidad que preocupa día con día. Este puede ser atribuido a evolución natural del planeta, mientras que algunos datos más conservadores plantean que dicho cambio se debe a la actividad descontrolada de la humanidad. En el actual modelo energético del

planeta basado en un sistema abierto, el hombre genera contaminación sin realizar ningún procedimiento para la correcta disposición de todos los residuos, impidiendo el cierre de este sistema adecuadamente, y por otro lado generando sin control emisiones contaminantes.

La mayor parte de las legislaciones a nivel global son poco restrictivas o nulas respecto a la correcta disposición de residuos y gases generados durante procesos como la combustión, lo que impide mitigar en gran medida el control y genera un aumento exponencial de los niveles contaminantes y en las emisiones.

Figura 1
Reportes de temperatura meteorológica del año 1900 al 2020



Fuente: Adaptado de Oviedo-Salazar, Badii, Guillen y Lugo Serrato (2015)

Algunas cifras preocupantes son presentadas en el boletín anual de la Organización Meteorológica Mundial (2021), la cual estima que gran parte del planeta se está calentando, ocasionando disminución del hielo disponible en el polo norte (Ver Figura 1); donde claramente en los últimos 30 años ha aumentado la temperatura en 0.6 °C [17]. A su vez, la disminución de menos del 3% de las emisiones de efecto invernadero consecuencia de la parálisis global causada por la pandemia del COVID-19, permiten estimar que el ser humano produce más CO₂ del que logra consumir las plantas, aún sin el sector del transporte funcionando [18]. Además, la mayor parte del CO₂ generado a la atmósfera en particular para América Latina se debe a la deforestación y quema de bosques para el cambio de uso de suelo en cerca del 46%, seguido de la agricultura con 20%. A nivel global, surge una mayor preocupación pues las emisiones de CO₂ debidas a la generación de energía son del 28%, seguidas del cambio de suelo con un 12% y manufactura con otro 12% según lo reportado por al IEA (Agencia Internacional de la Energía) [19].

Esta preocupación ha aumentado generalizadamente a nivel global donde se han tomado determinaciones drásticas para la mitigación de las emisiones contaminantes; países como Alemania, Francia y Bélgica han decidido optar por dejar a un lado la producción de electricidad de manera masiva con fuentes fósiles y han encaminado todas las miradas a proyectos de cero emisiones para el 2050 restringiendo, por ejemplo, el uso de motores de combustión interna en el transporte de vehículos pequeños, y dando incentivos gubernamentales o tributarios a las personas que usen vehículos eléctricos o de hidrógeno [19].

Como principal consecuencia de las emisiones contaminantes emitidas a la atmósfera, y de la radiación térmica inadecuada debido a la disminución de la capa de ozono, es inminente el incremento en el calentamiento en todo el planeta. Este

fenómeno es conocido como “el efecto invernadero”. Según lo estimado por la IEA de no tomarse medidas inmediatas la temperatura en el planeta podría llegar a aumentar hasta en 4 °C [19]. Consecuencia de este calentamiento se producirán impactos climáticos como:

- Ascenso del nivel del mar.
- Incremento de los fenómenos meteorológicos extremos tales como: Lluvias torrenciales, sequías, deshielos, tormentas tropicales (huracanes y tsunamis), olas de calor y de frío.
- Extinción de especies y destrucción de ecosistemas.
- Acidificación de los océanos.
- Crisis sociales y económicas.

Algunas corporaciones e instituciones internacionales han buscado plantear soluciones y dejar pautas específicas que permitan a la sociedad no autodestruirse. Una de estas iniciativas es la cumbre o Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático de 2009 desarrollada en Copenhague, donde múltiples naciones se comprometieron a contribuir en la disminución de las huellas de carbono, lo cual doce años después se ha evaluado como un rotundo fracaso, pues todas estas naciones no cumplieron su objetivo y empresas a las que se les solicitó la mejora de sus procesos simplemente cambiaron a naciones donde las legislaciones son flexibles y no se lleva a cabo un correcto control. Recientemente, en el COP26 donde se reúnen las grandes potencias del mundo se afianzaron acuerdos principalmente de las dos potencias mundiales, cuyos objetivos son primordialmente la priorización de procesos limpios y responsables con el medio ambiente.

Todas las diversas alternativas que se presentan a lo largo de estas conferencias gubernamentales, o avances tecnológicos presentan un panorama poco alentador para nuestro planeta. Alo que como profesionales, estudiantes y población

en general debemos contribuir generando alternativas sostenibles que permitan de manera mancomunada la disminución de los gases de efecto invernadero. A su vez, existen alternativas capaces de reducir de manera significativa los contaminantes generados por procesos como la combustión.

Aunque el petróleo aún tiene una disponibilidad considerable, su naturaleza fósil y limitada impulsa la búsqueda de energías alternativas. En aplicaciones de baja potencia suele evitarse, pero en usos de gran escala como generación eléctrica, transporte marítimo, terrestre pesado o aéreo seguirá siendo necesario hasta que surjan opciones más viables en costos y emisiones. Una transición progresiva consiste en incorporar biocombustibles, que pueden sustituir parcial o totalmente a la gasolina mediante bioetanol o al diésel mediante biodiésel. Una solución paulatina y además necesaria es la aplicación de biocombustibles para suplir de manera parcial o total la demanda general de elementos como la gasolina por el bioetanol o diésel por el biodiesel. O revalorización como la obtención de combustibles alternativos procedentes de procesos residuales como lodos de petróleo, reciclado termoquímico o pirólisis; los cuales permiten tener disponibles combustibles similares a los fósiles a menor costo con una revalorización, pero en algunas ocasiones mayores emisiones contaminantes.

COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS

En búsqueda de suplir la demanda energética, disminuir la contaminación y aportar herramientas que permitan la revalorización de residuos, el hombre ha buscado y encontrado accidentalmente fenómenos y compuestos que permiten la generación de combustibles alternativos a los convencionales fósiles como gasolina, turbosina y Diesel. Algunos de estos son de origen renovable y otros de origen fósil; se muestra una subclasificación según el tipo de

combustible y algunos de los poderes caloríficos presentados en la literatura [20]–[31].

Tabla 1
Combustibles tradicionales y alternativos.

	Tradicional		Alternativo	
	Fósil		Fósil	Renovable
Sólido	-Carbón mineral (35.00 MJ/kg) [20]		-Negro de humo (29.00 MJ/kg) [26]	-Raquis de Palma (26.50 MJ/kg) [27]
				-Madera (31.78 MJ/kg) [27]
Líquido				-Lodos residuales (14.00 MJ/kg) [28]
	-Gasolina (43.21 MJ/kg) [22]		-Aceite pirolítico liviano (44.07 MJ/kg) [24]	-Bioetanol (29.00 MJ/kg) [29]
	-Turbosina (43.15 MJ/kg) [23]		-Aceite pirolítico medio (47.35 MJ/kg) [25]	-Biodiésel (39.93 MJ/kg) [24]
	-Diésel (45.95 MJ/kg) [24]		-Aceite pirolítico pesado (44.17 MJ/kg) [24]	-Aceites vegetales (35.00 MJ/kg) [32]
	-Combustóleo (44.17 MJ/kg) [24]			
Gaseoso	-Gas licuado de petróleo (3.75 MJ/m3) [30]		-Gas pirolítico (2.5 MJ/m3) [30]	-Gas de síntesis (2.84 MJ/m3) [31]
	-Metano (3.17 MJ/m3) [31]		-Productos de gasificación (0.85 MJ/m3) [30]	-Biogás (2.15 MJ/m3) [31]

Fuente: Elaboración propia (2025)

Entre los combustibles sólidos, el carbón mineral fósil es uno de los más utilizados, especialmente para la generación de energía. Su combustión en calderas permite evaporar agua, cuyo vapor acciona una turbina conectada a un eje que, finalmente, produce el flujo eléctrico. Según los reportes de la IEA cerca del 36.7% de energía eléctrica mundial es generada por este medio, ocasionando una gran cantidad de emisiones de efecto invernadero [19]. Alternativas fósiles y renovables que buscan remplazar total o parcialmente este tipo de combustibles nocivos para el planeta y el hombre (Ver Tabla 1); algunas de estas son el negro de humo, biomasa como el raquis de palma y lodos residuales.

Cualquiera de las alternativas no presenta un poder calorífico similar, lo que conllevaría un mayor consumo para alcanzar la misma cantidad de energía suministrada a un ciclo de generación de energía, por otro lado, la disponibilidad es

limitada; podríamos verlas o considerarlas como parte de la solución, pues permitirían disminuir en un porcentaje muy pequeño estas emisiones, pero así se revalorizarían residuos, se disminuiría el costo y se beneficiaría la disponibilidad energética global [21], [26], [27], [30].

Los combustibles líquidos podrían ser clasificados de diversas formas; una de las más comunes por el tipo de motor donde se aplican. Es decir, en combustibles para motores de encendido por chispa o a gasolina, se tendrían algunos combustibles de carácter renovable como el bioetanol, y alternativo como los aceites pirolíticos livianos [24]. Para el caso de buscar remplazar el combustible por aceites pirolíticos livianos no se presentaría ningún problema, pues su poder calorífico, densidad y viscosidad son muy similares, con pequeñas alteraciones como el índice de octano que para el caso de los productos del pirólisis son algo más bajos.

Por otro lado, el sustituir la gasolina por bioetanol tendría que darse de manera parcial, o con pequeñas modificaciones en el tiempo de encendido de chispa, pero a pesar de ello, se aumentaría un poco su consumo por tener un poder calorífico 33% menor [29]. Cualquiera de estas dos formas beneficia al medio ambiente, pues para el caso de los residuos pirolíticos son focos de contaminación y para el caso del bioetanol, es de carácter renovable y las emisiones de CO_2 cierran el ciclo pues, tradicionalmente, se obtiene de la fermentación de azúcares generados por plantas como la caña [25].

Particularmente para los motores de encendido por compresión, al ser más robustos podríamos tener diversas alternativas para el tradicional diésel. En la categoría de combustibles alternativos encontramos los aceites pirolíticos medianos y pesados, que pueden ser usados de manera directa sin ninguna dilución, o pretratamiento al presentar características muy similares a las del diésel comercial [25].

Por otra parte, la aplicación de combustibles renovables como el biodiésel o de ser el caso, el mismo aceite oleaginoso, podría quemarse sin la presencia de ningún hidrocarburo con la ventaja de no generar emisiones que, finalmente, terminan siendo recicladas o de reúso, al obtenerse de plantas que consumen grandes cantidades de CO_2 [24], [32].

De igual importancia, encontramos a los combustibles gaseosos, donde existe gran variedad dependiendo del tipo de crudo que se refine, pozos de extracción o fuente renovable que se obtenga. Para el caso de los extraídos en la refinación del crudo, se encuentra el gas licuado del petróleo LP, que presenta un poder calorífico de 3.75 MJ/m^3 [30]; para remplazar este tipo de gases podemos encontrar alternativamente compuestos como los gases no condensables de los productos de la pirólisis o de gasificación que pueden tener poderes caloríficos entre 0.85 y 2.50 MJ/m^3 o gases de carácter renovable como el biogás o de síntesis que presentan poderes caloríficos de 2.15 y 2.84 MJ/m^3 respectivamente [30], [31].

En general, existen diversas alternativas para un remplazo total o parcial de cualquier combustible fósil con limitantes como la demanda o equipamiento. Pero si se usan en tan solo pequeñas proporciones, permitirían mitigar en bajos porcentajes la generación de emisiones de gases de efecto invernadero o la revalorización de recursos disponibles que no están siendo tratados adecuadamente. A nivel general, se prefieren la generación e investigación en biocombustibles, pues al ser de carácter renovable y que permiten el ciclo cerrado del oxígeno presentan preferencias por su carácter amigable con el medioambiente.

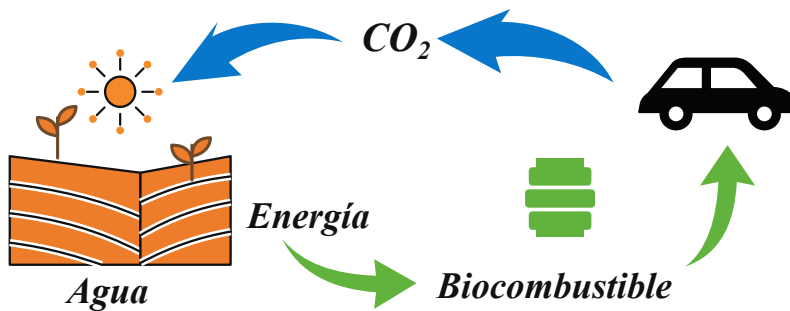
Biocombustibles

Se denominan biocombustibles a los combustibles generados a partir de una fuente de materia prima renovable y

biodegradable, que puede ser reciclada o sin uso, como las plantas oleaginosas lípidos o gramíneas, residuos orgánicos de ciudades o biomasa en general. Existen principalmente dos características que permiten definir un combustible como bio, una de ellas que todo el combustible que se queme y emite CO_2 posteriormente será absorbido por las plantas con las que es obtenido (ver Figura 2); otra que las materias primas con las que se obtienen se encuentran disponibles por cultivos o residuos que pueden ser generados en un corto tiempo respecto a los miles de años que conlleva la generación de combustibles fósiles [23], [27], [33].

Figura 2

Ciclo cerrado de los biocombustibles



Fuente: Elaboración propia (2025)

Los biocombustibles pueden clasificarse de diversas formas, una de ellas por el tipo de origen de la materia prima, principalmente la biomasa terrestre, acuática y microbiana; cualquiera de estas tres biomásas puede ser usada tradicionalmente como combustible después de pequeños procesos como secado, pero no se puede aprovechar al máximo el potencial de generación de energía, por lo que se hace necesario realizar transformaciones físicas y químicas que permitan mejorar propiedades como su poder calorífico y disminuir la presencia de agua en estas [34].

Por esta razón, se han realizado otras clasificaciones donde tenemos subclasificado por generación a los biocombustibles, en la primera, encontramos elementos como la leña, el carbón vegetal y pellets de madera que son elementos sólidos, seguidos de los líquidos como bioetanol, biodiésel, biobutanol y bioaceites; estos se obtienen luego de algún proceso sencillo como corte y secado o posterior a procesos químicos como lo es el caso de la fermentación en el bioetanol y la transesterificación en el biodiesel [35].

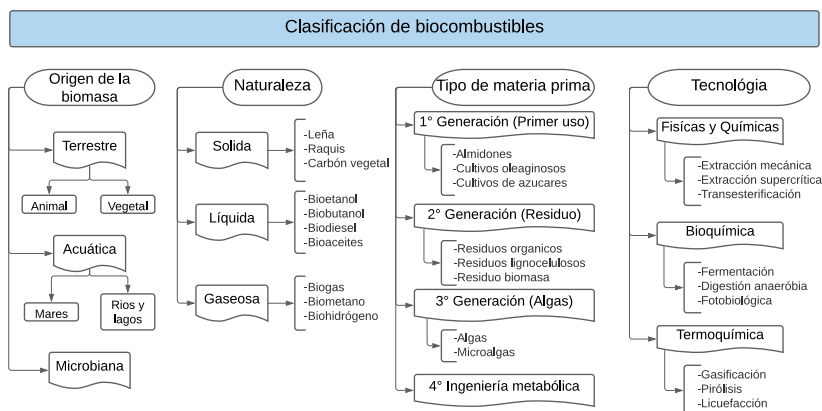
La segunda va orientada solamente al tipo de origen de la materia prima como cultivos, residuos de algún proceso lignocelulósico, algas, metanolisis, etc. Finalmente, pueden clasificarse de acuerdo su forma de combustión, como lo es el caso particular del biodiésel y el bioetanol, que requieren de un proceso adicional de alta ingeniería para permitir mediante la implementación de reactores, catalizadores y procesos industriales de alto costo transformar una materia prima en combustible de mayor valor comercial [35]. Todo lo descrito anteriormente se resume en la Figura 3.

El biodiésel

El biodiésel es definido por la ASTM (*American Society for Testing and Materials*) como ésteres monoalquílicos de ácidos de cadena larga derivados de lípidos renovables, tales como aceites vegetales o grasas de animales, que se utilizan en motores de combustión interna (MCI) de encendido por compresión de manera parcial o total, reemplazando al diésel fósil [36]. El uso de este combustible ha sido aprobado y usado por diversos países en el mundo; específicamente, en Estados Unidos la EPA (*Environmental Protection Agency*) lo ha catalogado como un combustible limpio, siempre y cuando cumpla los estándares estipulados en la ASTM D 6751 que especifica las características mínimas que debe tener un combustible de este tipo para poder ser aplicado a un MCI sin ninguna modificación. A su vez, la UNE EN que regula

los estándares en Europa ha especificado la EN 14214 como la responsable de evaluar y disponer de características y limitantes que deberá cumplir este combustible para poder ser usado de manera total o parcial en un MCI de encendido por compresión.

Figura 3
Clasificación general de los biocombustibles



Fuente: Adaptado de Jiménez Escobedo y Castillo Calderón (2021)

Línea histórica del biodiésel

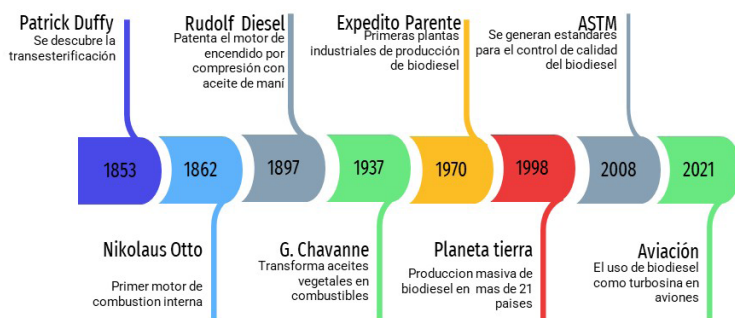
El biodiésel a pesar de ser una tecnología relativamente nueva y de gran auge en la mayoría de países en las dos últimas décadas, no es nada nuevo, pues sus estudios abarcan cerca de 175 años de desarrollo, (Ver Figura 4) una línea del tiempo de los grandes pasos históricos de este combustible [38].

Para el año de 1853 fue desarrollada la reacción que permite la generación de ésteres conocida como transesterificación, por Patrick Duffy quien la estudió y descubrió [39]; no siendo sino hasta 1862 que se patentó el primer motor de combustión interna que usaba gas como combustible creado por Nikolaus Otto [40]. Para el año de 1893 al 1897 fue creado, construido y probado con aceite de maní por Rudolf Christian Karl Diesel

el motor de encendido por compresión, que actualmente funciona con diésel [41]. Posteriormente, el 31 de agosto de 1937 G. Chavanne con ayuda de la Universidad de Bruselas, en Bélgica, se le otorga la patente por “Transformar aceites vegetales para su uso como combustibles” [42, p. 1022]. La patente describe la transesterificación del aceite usando etanol o metanol, indicando los productos de la reacción en glicerina y ésteres de cadena corta; considerándose hoy día como la primera producción de biodiésel.

Años más tarde, en 1940 el pleno auge de la Segunda Guerra Mundial que trajo con ella la escasez del petróleo, se generó gran tendencia al estudio de esta reacción y a la generación de investigaciones que permitieron la compresión general del proceso, los reactivos y en especial los aceites vegetales usados para la obtención de biocombustible. Pero desafortunadamente terminada la guerra, para el año de 1945, se cancelaron todas las investigaciones por desviación de recursos al restablecimiento de múltiples países en Europa [43].

Figura 4
Línea del tiempo del biodiésel



Fuente: Elaboración propia (2025)

Más adelante, en el año de 1970, al presentarse una de las grandes crisis históricas del petróleo, se retomaron las investigaciones abandonadas en la posguerra, las cuales

hasta hoy día han avanzado de manera exponencial. Consecuencia de esto, para el año de 1977; Expedito Parente, científico brasileño junto con su empresa Tecbio inventó y patentó el primer proceso industrial de producción de biodiésel. Esta empresa actualmente junto con Boeing y la NASA trabajan para certificar el bioqueroseno como un combustible comercial en motores a reacción [44]. Pero no fue sino hasta el año de 1983 donde se buscó producir y parametrizar un biodiésel de calidad, donde Gaskoks público e internacionalizó una industria austriaca, obtuvo esta tecnología y estableció la primera planta piloto productora de biodiésel en 1987 y una industrial en 1989 [42]. A continuación, para 1990, se parametrizaron todos los procesos con el objetivo de que muchos países europeos, entre ellos la República Checa, Alemania y Suecia iniciaran la producción industrial de este combustible [43].

Algunos países como Francia incentivaron el uso local de biodiésel (conocido localmente como diéster) obtenido de la transesterificación del aceite de colza y mezclándolo en un 5% en el combustible diésel convencional, y en un 30 % en el caso de algunas flotas de transporte público [45]. Casas matrices como Renault, Peugeot y otros productores, certificaron sus motores para la utilización parcial con biodiésel, mientras se estudiaban mezclas hasta del 50%. Lo que ocasiona que ocho años después -en 1998- más de 21 países hayan producido y generado políticas a favor del biodiesel.

Y no fue sino hasta el 2005 que Estados Unidos a través del estado de Minnesota obligó a que las estaciones de servicio distribuyeran mezclas de al menos 2% de biodiesel con el combustible comercial diésel fósil, lo que causó que luego de tres años (2008), la ASTM publicase los estándares y especificaciones de mezclas de biodiésel con diésel comercial convencional [46].

Al 2025 una gran cantidad de países producen y prestan aprobaciones para el uso obligatorio o alternativo de este combustible, incluso generan modificaciones y postratamientos para buscar que el biodiesel pueda ser usado en aviones de manera masiva y comercial, abriendo aún más el campo de acción de este combustible [43].

¿Seguirá siendo el biodiésel una alternativa energética?

Desde ya hace poco más de 30 años se han implementado sistemas industriales de producción de biodiésel, con capacidades hoy día de hasta 12 ton/día, permitiendo a comunidades determinadas de países desarrollados como Alemania, España e Inglaterra generalizar el uso de este combustible de manera comercial [47], [48]. Pero, desafortunadamente la gran mayoría de este combustible es obtenido con aceites vegetales vírgenes, que pueden ser usados como alimentos; por lo que se presenta el siguiente interrogante ¿se usa alimento para generar combustibles?, es por esta razón, que el Banco Mundial de Alimentos ha sugerido una delimitante en la producción de combustibles con aceites comestibles, generando así la búsqueda de alternativas que permitan una disponibilidad de materia prima sin comprometer alimentos en su proceso [49], [50].

Esto se ha logrado, pues gran parte de los países en vías de desarrollo han aumentado sus cultivos extensivos como la palma de aceite, permitiendo que exista una sobreoferta en los aceites de consumo humano y con ello se permita la obtención de combustible sin la preocupación de que se esté gastando el aceite que podría disminuir el hambre en países en vías de desarrollo [50].

Además, la producción de biodiésel conlleva una preocupación en el correcto manejo de desechos subproductos del proceso de obtención. Como lo es la generación de glicerol en cerca del 10 - 15% de la masa inicial de aceite suministrada al

proceso, la cual, a pesar de tener diversas aplicaciones en campos como la estética, farmacéutica e industrial aumenta el costo comercial del biodiésel. Pues se destinan recursos de su precio general, para realizar un correcto tratamiento. Alternativas como la aplicación de pirólisis a este residuo, han permitido la revalorización de las grandes cantidades de glicerina disponible plantas de producción de biodiésel, generando un bio-oil que puede ser mezclado como aditivo con el biodiésel o diésel fósil [51], [52].

A nivel general, las dos preocupaciones anteriormente planteadas ya han sido estudiadas y resueltas en las últimas décadas, pues debido a las legislaciones de países que implementan estos combustibles; se ha permitido que se resuelvan de manera paulatina cada una de ellas. El otro interrogante que se presenta en la población es ¿para qué se siguen estudiando combustibles alternativos si se dejará de producir los MCI para el 2040? Este gran interrogante ha supeditado inmensas preocupaciones en industrias y empresas destinadas a coches pequeños y de baja capacidad, en especial en la Unión Europea (EU), pues ha sido la principal precursora del lema “cero emisiones al 2050” y quien pretende implementar la legislación de no producir más MCI en vehículos destinados al transporte de pasajeros terrestres de uso particular o público [53].

Si bien este cuestionamiento sería válido si se pretendiera la aplicación del biodiésel en vehículos pequeños, hoy la gran mayoría de investigaciones van orientadas a la obtención de biodiésel y enriquecimiento para poder ser usado como bioturbosina en aviones, o es aplicado en grandes vehículos de carga como tractocamiones o barcos de gran tamaño. En especial, como se ha mencionado anteriormente (Ver Figura 2) un ciclo cerrado de generación de CO_2 que posteriormente es consumido por plantas oleaginosas que seguidamente de ellas se obtiene el biodiésel.

Se concluye entonces que el biodiésel es y seguirá siendo una alternativa energética para la generación de biocombustibles, que si bien no es aplicada a vehículos de baja cilindrada permitirá la mitigación de las emisiones, y se tendrá disponible como una alternativa al tradicional diésel fósil [10], [54].

Ventajas

El uso del biodiésel como combustible alternativo genera múltiples interrogantes por parte del usuario final, pues detrás de normativas o aplicaciones probadas y demostradas por entes de normalización como ASTM, EN e ISO, siempre se generan dudas del comportamiento del motor con combustibles alternativos al tradicional. Por lo que en los últimos 30 años de su producción masiva se ha permitido demostrar cada una de las siguientes ventajas:

- **Disminución de emisiones contaminantes.** El uso del biodiésel genera un ciclo cerrado de CO₂ que permite la disminución de este gas de efecto invernadero. Además, el uso de un combustible cuyas materias primas son orgánicas y sin contenido de azufre, no permitirá que en los productos de la combustión se encuentren presentes cualquier contenido de SO₂ o SO₃, en contribución con el hidrógeno disponible en la atmosfera a la formación de ácido sulfúrico para generar así lluvia ácida; como típicamente sucede con el tradicional diésel. A su vez, se logra la reducción o eliminación total dependiendo el grado de mezcla con el diésel tradicional de los hidrocarburos (HC) y de los aromáticos policíclicos que son obtenidos en grandes proporciones al quemar diésel obtenido del petróleo. Por otra parte, dependiendo de la tecnología del motor puede aumentar o disminuir los óxidos de nitrógeno NO_x [55], [56].

- **Seguridad.** Representa limitaciones en algunos combustibles lo que genera que sea limitada su aplicación y/o comercialización, evaluándose dos propiedades fundamentales como el punto de ignición y capacidad explosiva, como lo es el caso del hidrógeno que por su estado gaseoso genera una preocupación por las virtudes de presentarse fácilmente detonaciones.
- Para el biodiesel es un factor que lo beneficia pues su almacenamiento puede ser efectuado en los mismos recipientes donde se almacena el diesel de petróleo sin hacer ningún cambio en la infraestructura de los tanques o de los motores. Además, su manipulación es bastante confiable pues presenta un punto de ignición de aproximadamente 150 °C en comparativa con el diésel que es de alrededor de 60 °C [47]. A su vez, la capacidad explosiva evaluada desde el punto de vista del poder calorífico, analizados en la Tabla 1 presenta valores muy similares con el diésel en 45.95 MJ/kg y el biodiésel en 39.93 MJ/kg [24].
- **Carácter renovable.** La aplicación de diversos combustibles de origen renovable ha intensificado la generación de investigaciones de esta área (Ver Figura 3). El biodiésel es obtenido de un aceite y de un alcohol donde ambos pueden ser obtenidos por cultivos, de manera masiva y renovarse en un corto plazo lo que respecto al diésel tradicional genera una gran ventaja pues podrían generarse biorrefinerías que permitan la generación de diversos combustibles renovables, como la bioturbosina y el biodiésel [32], [43].
- **Lubricidad.** El biodiésel, al obtenerse de diversos ácidos grasos de cadena larga generan una mayor lubricidad a las piezas móviles del motor de encendido por compresión (MEC) donde es quemado; esto puede demostrarse con los valores típicos de viscosidad a 40°C del biodiesel de en promedio 2.5679 mm²/s respecto a 4.3953 mm²/s del diésel fósil. Por otra parte,

el desgaste de los MEC se ve disminuido levemente en términos generales de los anillos, el cilindro y los pistones al usar biodiésel como combustible [57].

- **Correcta disposición de residuos.** Algunas de las materias primas con las que se obtiene el biodiésel permite realizar una correcta disposición de residuos como el aceite usado de cocina, las cuales suelen ser focos de contaminación en las grandes ciudades [32]. A su vez, algunas investigaciones muestran que residuos urbanos orgánicos permiten la obtención de biodiésel e indican el potencial para el uso de estos residuos en procesos de generación masiva de combustible en biorrefinerías [58], [59].

Desventajas

Los MEC son diseñados, probados y optimizados con un combustible diésel de origen fósil, con ciertas características fisicoquímicas como densidad y viscosidad; luego, al hacer funcionar estos motores con combustibles alternativos y particularmente con el biodiésel se presentan algunas alteraciones en su funcionamiento como: Leve aumento del consumo de combustible y las emisiones de NO_x , disminución en el desempeño mecánico y la eficiencia de inyección, como diversas afecciones al mejor funcionamiento reportado en particular para cada MEC por las que se recomienda realizar mezclas con el diésel fósil para disminuir las afectaciones. Las principales desventajas encontradas y reportadas por algunos autores en el uso de biodiésel como combustible alternativo son:

- **Desempeño mecánico.** El funcionamiento de un MEC generalmente es evaluado de acuerdo al rendimiento mecánico, que se estima producto de la relación del torque efectivo respecto a la energía suministrada en el ciclo por la cantidad de combustible que se inyecta; en consecuencia, el poder calorífico juega

un papel fundamental en la evaluación de cualquier combustible; para que un motor funcione a un determinado régimen de giro y carga, se requerirá de mayor masa de combustible alternativo, si su poder calorífico es menor como lo es el caso del biodiésel (ver Tabla 1). También, otros factores como la viscosidad influyen en el rendimiento del motor por la manera en que se suministra el combustible a la cámara de combustión [60], [61].

- **Viscosidad mayor.** El biodiésel presenta mayor viscosidad respecto al diésel fósil, pues a pesar de beneficiar la lubricidad del motor afecta otros factores como el proceso de inyección; el spray se efectúa de diferente manera y lo que ocasiona una autoignición que genera frentes de flama los cuales en ocasiones afectan la eficiencia del motor al no lograr quemar todo el combustible. Otros factores como la tensión superficial, el punto de nube o el punto de filtro frío también afectan la eficiencia del proceso de combustión, pero la propiedad determinante es la viscosidad [57].
- **Congelamiento.** El biodiésel es obtenido de diversos ácidos grasos los cuales presentan radicales saturados e insaturados de 12 a 20 carbonos que a temperaturas de alrededor de 0 a 10 °C, inician su proceso de solidificación, respecto al diésel fósil de -12 °C muestra ser una desventaja, ya que actualmente se deben agregar aditivos, que permiten evitar obstrucciones de sistemas de flujos y bombas de combustibles en climas extremos a los que muchos vehículos de gran tamaño se ven expuestos [62].
- **Emisiones NOx.** A lo largo del proceso de combustión del biodiésel pueden verse incrementadas levemente las emisiones de NOx, la mayor afección se ocasiona cuando el grado de instauración de las materias primas (aceites) es elevado, como lo es el caso particular del aceite de soya o colza [49], [61].

- **Estabilidad a la oxidación.** Al ser obtenido el biodiésel de una fuente orgánica se presenta un fenómeno común en fuentes degradables, que se conoce como el nivel de oxidación que pueden tener o la rancidez. Esto se debe principalmente a la degradación producto de la exposición al oxígeno, la cual causa disminución en el periodo de disponibilidad del combustible o caducidad apresurada, generándose pérdidas de combustible por mal almacenamiento o tiempo prolongado sin quemarse [39], [60].

Biodiésel en México

La aplicación general de biodiésel en México aún no es masiva, ni se encuentra legislada o estipulada como obligatoria para su distribución en el territorio nacional; pero a pesar de esto, si existen plantas que obtienen biodiésel con capacidad instalada total de 4 182 m³/año según lo reportado por la Red Mexicana de Bioenergía en el año de 2015 y actualizado en un estudio denominado “Mercado de Biodiésel en México”, publicado en el 2020 [63], [64]. Además, la SENER (Secretaría de Energía de México) informó en el 2021 que solamente el Instituto de Energías Renovables del Estado de Chiapas cuenta con licencia para producción de biodiésel de manera comercial, y que cerca de 14 empresas e instituciones pueden comercializar bioenergéticos dentro de los que se encuentra el biodiésel. Actualmente, en las reformas energéticas presentadas y que son evaluadas, se estudia la implementación de mezclas que cerca de 20% de biodiésel con diésel comercial, lo que representaría un aumento en la demanda de este combustible acarreando creación y generación industrias destinadas a tal fin. Por otro lado, la materia prima que es planteada para la obtención de biodiésel es principalmente grasa animal y aceite usado de cocina, como el aceite de hígado de pescado que no es apto para el consumo humano [49], [65].

Otro factor primordial al momento de limitar el uso del biodiésel en México es su costo, pues compite directamente con una de las industrias más grandes y desarrolladas como la del petróleo o “oil and gas”. Los costos para México son estimados en cerca de 13.8 MXN/L para biodiesel producido con aceite de residuos comerciales, respecto a 11.4 MXN/L de un sistema que funcionará con aceite de cocina usado; presentado una problemática de la capacidad de suministro de este último reactivo que limitaría la producción de requerirse grandes demandas. El costo de producción promedio de biodiésel desglosado particularmente en dos casos estudio en México (Ver Tabla 2) [64], [66].

Tabla 2
Desglose general del costo del biodiésel en México.

Costo de producción	Residual (MXN/L)[USD/L]	Aceite de cocina (MXN/L)[USD/L]
Aceite	8.50 (0.41 ^a)	6.10 (0.3 ^a)
Reactivos	1.50 (0.07 ^a)	
Energía	0.60 (0.03 ^a)	
Operación	2.30 (0.11 ^a)	
Mantenimiento	0.90 (0.04 ^a)	
Total*	\$ 13.8 (0.67^a)	\$ 11.4 (0.55^a)

Fuente: Caudillo (2020).

Nota: *Este costo solo representa la producción, para poderlo comparar con el diésel que hoy día es de \$21.96 se tendría que suponer un valor del transporte, almacenamiento y distribución el cual puede variar para la población a donde vaya dirigida [63]. ^a Precio en dólares a una tasa de cambio de 20.69 MXN por USD [63].

Biodiésel en Colombia

Colombia junto con Brasil representan la mayor producción y desarrollos en cuanto a biocombustibles se refiere en América Latina; desde la década de los 70 se han realizado determinaciones políticas y sociales para el desarrollo de estas iniciativas en búsqueda de disminuir la dependencia total del petróleo.

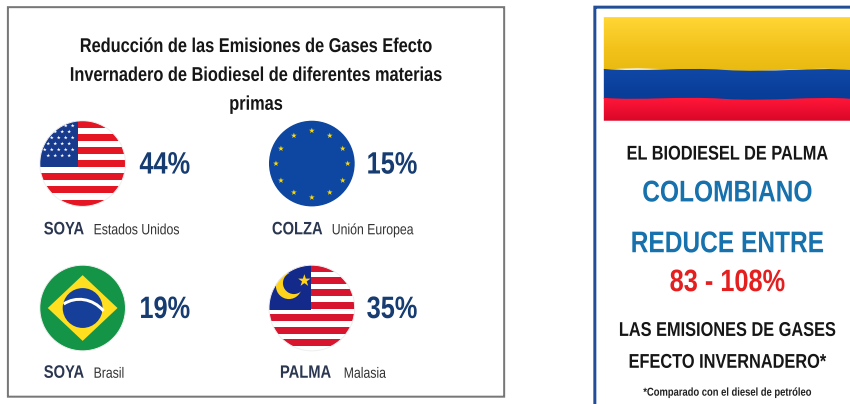
Por otro lado, Colombia al ser uno de los mayores productores mundiales de aceite de palma obtiene biodiésel a partir de esta materia prima. Este combustible es distribuido de forma masiva bajo ciertas mezclas estipuladas por ley en las estaciones de servicio desde un 12% hasta un 30% en las principales ciudades; actualmente es obligatorio una mezcla de al menos un 12% en todo el país. Algunos sistemas de transporte público usan este combustible hasta en un 50%, caso puntual el de la capital de Colombia (Bogotá), donde el TransMilenio transporta cerca de 300 mil personas diariamente [67].

La capacidad instalada de producción de biodiésel según la federación de palmeros de Colombia es de cerca de 844 mil toneladas al año, que equivalen a 261 millones de galones al año para el 2020. En Colombia al 2019 se producían cerca de 1.5 millones de toneladas al año de palma, donde cerca del 27.6% de la producción de palma es destinada a la obtención de biodiesel. Por esta demanda tan alta se han realizado avances similares a los de países asiáticos como Malasia, donde junto con Colombia son los más destacados en la obtención, distribución e investigación de este combustible alternativo [67], [68].

En cuanto a las emisiones de gases de efecto invernadero del biodiésel, Colombia obtiene una reducción significativa entre el 83 al 108%, consecuencia del correcto manejo del ciclo de vida de las plantas, cultivos y sistemas de producción de biodiésel. Seguido de Estados Unidos con un 44% de los cultivos de soya, Malasia con un 35% igualmente con palma, Brasil con un 19% con Soya y finalmente la Unión Europea con un 15% en la colza(Ver Figura 5) [67], [69].

Figura 5

Reducción de emisiones por el uso del Biodiesel [67]



Fuente: Adaptado de Mesa Dishington (2020)

TECNOLOGÍAS DE PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL

El biodiésel puede ser obtenido tan solo al hacer mezclar un triglicérido con un alcohol de cadena corta, esta acción física puede ser llevada a cabo de diversas maneras, donde la más común a nivel industrial es por tanques que agitan y calientan, y se denominan como batch. En la gran mayoría de los casos los procesos de obtención son por lotes, (Ver Tabla 2) un costo de aproximadamente 0.6 MXN/L para la energía que se debe aportar y 2.30 MXN/L para operación; lo que representa cerca de 21% de los costos de producción y en sistemas más convencionales y hechizos, se llegan hasta valores de 45% en costos de producción y equipamiento [63]. Es por esta razón, que diversas investigaciones han encontrado múltiples herramientas que permiten a la industria bioenergética la disminución de los costos, siendo con esto más competitivos con combustibles como el diésel fósil o la turbosina [70].

Las tecnologías probadas como alternativas al proceso de agitación y calentamiento pueden clasificarse como intensificadores físicos o químicos. Los intensificadores

químicos o catalizadores son estudiados por la ingeniería química como un gran campo de investigación que se conoce como catálisis; dentro de esta clasificación se encuentran múltiples alternativas de catalizadores básicos o ácidos, homogéneos o heterogéneos, enzimáticos, lipasas, etc., [71]–[73]; en el capítulo 2 se profundizará más al respecto.

Por otra parte, los intensificadores físicos son aquellos que de una manera indirecta permiten que las moléculas en reacción tengan más contacto y con ello se mejore la eficiencia del proceso ya sea en cuestiones energéticas o de tiempo; dentro de estos intensificadores tenemos el uso de equipos que generan microondas, ultrasonido o hidrodinámica para con ayuda del fenómeno de cavitación se pueda transferir mayor cantidad de energía por unidad de masa; plasma y radiación infrarroja para ionización de radicales de los ácidos grasos que está formado el aceite y beneficiando la formación de ésteres, procesos supercríticos que aprovechan el cambio de fase, etc [59], [74].

Particularmente, el libro va direccionado al estudio de la cavitación hidrodinámica como intensificador de la reacción de biodiésel. Este fenómeno se ha usado para la intensificación de reacciones químicas y separación de compuestos, desarrolladas en múltiples aplicaciones de ingeniería y medicina estética, buscando aprovechar la cantidad de energía que se desprende al tener un fluido en vapor y condensarlo en periodos de tiempo corto. La cavitación puede ocasionarse por la presencia de fenómenos hidrodinámicos, de microondas o ultrasónicos en un líquido en reposo o movimiento.

La cavitación hidrodinámica es ocasionada por un cambio súbito de la presión, consecuencia de estrechamientos o elementos móviles a alta velocidad, que provocan presiones locales cercanas a la presión de vapor, ocasionando intersticios de vapor en un medio líquido que está siendo

transportado. La cavitación ultrasónica y de microondas es generada debido a exponer un fluido a ondas acústicas o electromagnéticas, que permiten someter al fluido a frecuencias que generan interacciones a nivel molecular, permitiendo la generación de vapor, formación de burbuja y posterior liberación de energía producto de la implosión de esta a través del flujo estático [75]–[78]. Esta tecnología será descrita con mayor profundidad a lo largo del capítulo 3.

HIPÓTESIS

Como se ha mencionado anteriormente, los costos energéticos ocasionados en un proceso de obtención de biodiésel abarcan del 21% a 45% de su valor de producción, esto se debe a la forma en que se transfiere energía a los dos fluidos no miscibles (aceite y alcohol) los cuales se deben calentar y agitar por tiempos prolongados, siendo alternativamente mejorados con la aplicación de intensificadores físicos como la cavitación hidrodinámica. La cavitación hidrodinámica presenta mejoras en el tiempo de obtención respecto al proceso de agitación y calentamiento en relación al proceso de transesterificación, ocasionando en consecuencia un ahorro energético.

De esta forma, este documento evalúa cada uno de los dispositivos usados en la obtención de biodiésel a través de la cavitación hidrodinámica, permitiendo generar conocimiento sobre el efecto de los intensificadores hidrodinámicos (placa de orificio y rotor estator) y la bomba de engranajes, en la reacción de transesterificación. Así como estimar la velocidad de transformación de triglicéridos a ésteres de ácidos grasos.



***“El uso de aceites vegetales como combustible
y fuente energética podrá ser insignificante
hoy (1900), pero con el curso del tiempo será tan
importante como el petróleo y el carbón...”***

Rudolph Diesel



BIODIÉSEL

En este capítulo se presenta la reacción de transesterificación, por la cual al mezclar un triglicérido (aceite) y alcohol de cadena corta se obtiene biodiésel. Además, una revisión extensa de las cuatro líneas fundamentales en la producción de biodiésel y su grado de publicación en los últimos años. Las principales líneas en las que se clasifican las investigaciones son las materias primas, los intensificadores químicos y físicos y los reactores que son usados para la obtención de biodiésel.

TRANSESTERIFICACIÓN

La transesterificación es una de las reacciones orgánicas clásicas más aplicadas tanto en laboratorio y aplicaciones industriales. En la química orgánica se hace uso de esta reacción para preparar ésteres con diversos reactivos, los más comunes triglicéridos. En algunas ocasiones, la transesterificación es más ventajosa que la síntesis de ésteres a partir de ácidos carboxílicos y alcoholes [79], [80].

Algunos ésteres, especialmente los metílicos y etílicos, están fácilmente disponibles comercialmente, por lo tanto, sirven convenientemente como materiales de partida en algunos productos como el biodiésel o lubricantes [81], [82]. La transesterificación es aplicable no solo para la obtención de biodiésel, sino también en procesos como la polimerización, provocando la apertura del anillo de las lactonas en la síntesis de reactivos químicos [83].

Además de la utilización de laboratorio, la transesterificación también tiene una larga historia en la industria, como por ejemplo en la obtención de pinturas, como el curado de resinas alquídicas [84], [85]. A mediados del siglo XX,

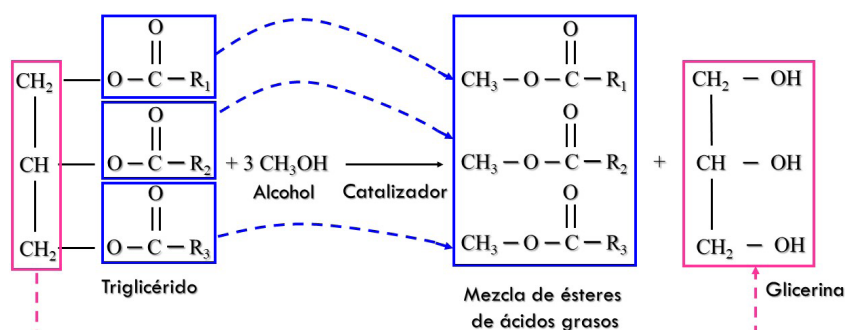
la reacción de transesterificación entre el tereftalato de dimetilo y el etilenglicol se convirtió en un paso crucial para la producción de poliéster, aunque este proceso casi ha sido reemplazado hoy día fue el precursor de muchos procesos industriales [84].

Otros procesos industriales utilizan esta reacción para producir diferentes tipos de compuestos, como, por ejemplo, en la producción de PET (tereftalato de polietileno), donde una de las etapas de producción es la transesterificación del tereftalato de dimetilo con etilenglicol usando acetato de zinc como catalizador [86], [87]. Además, un gran número de derivados del ácido acrílico se produce por transesterificación del acrilato de metilo con diferentes alcoholes, en presencia de catalizadores ácidos [87].

Químicamente la transesterificación es el término general utilizado para que un éster se transforma en otro a través del intercambio de la fracción alcoxi. Cuando el éster original se hace reaccionar con un alcohol, el proceso de transesterificación se llama alcoholisis, como el caso particular del biodiésel (Ver Figura 6) [82], [88].

Figura 6

Reacción de transesterificación de un triglicérido con un alcohol



La transesterificación es una reacción de equilibrio y la transformación ocurre solamente producto del mezclado de los reactivos. Sin embargo, la presencia de un catalizador acelera notoriamente el equilibrio de la reacción [89]. Para lograr un alto rendimiento del éster, el alcohol debe usarse en exceso, es decir aumentar el número de moles estequiométricas, que es de tres para el caso de la producción de biodiésel, algunos excesos usados suelen ser del doble o el triple molarmente. En la producción de biodiésel los ésteres son obtenidos de los triglicéridos de los aceites o grasas usados como insumo, el alcohol es procedente de procesos industriales petroquímicos o fermentaciones de lipasas [90].

INVESTIGACIÓN EN BIODIÉSEL

La obtención de biodiésel solamente se produce al mezclar dos reactivos, un éster y un alcohol de cadena corta, pero cuestionamientos como ¿cuál éster usar?, ¿qué catalizadores usar?, ¿dónde se deben mezclar? o ¿qué tipo de tecnología se aplica? Son cuestionadas a lo largo de los últimos 120 años, se presentan los cinco ejes generales en la investigación de biodiésel (Ver Tabla 3), los cuales resuelven los interrogantes anteriormente mencionados. Iniciando con la materia prima o aceite el cual puede provenir de diversas fuentes y cada uno presentará comportamientos diferentes, por otro lado, una clasificación de catalizadores, seguido de algunos intensificadores físicos o modos de reacción y finalizando con los reactores estudiados en el desarrollo del biodiésel.

Tabla 3
Clasificación global de la investigación en biodiésel.

Clase de materia prima (Aceite)	Intensificadores químicos	Intensificadores físicos	Modos de operación	Reactores
-Primera generación (Aceites vegetales comestibles)	- Catálisis homogénea: Alcalina Ácida	Microcanales Destilación reactiva	Discontinuo	De agitación y calentamiento
-Segunda generación (Aceites de desecho y no comestibles)	- Catálisis heterogénea: Alcalina Ácida	Membrana Microondas Ultrasonido Tubo helicoidal	Continuo	Tanques continuos semibatch
-Tercera generación (Micro algas)	Bifuncional	Flujo oscilatorio Descarga de plasma		De flujo de pistón
-Cuarta generación (Algas modificadas genéticamente y aceites modificados)	-Procesos supercríticos: Alcoholes Ésteres modificados Biooxidación	Radiación infrarroja Hidrodinámica		Microondas
				De cavitación

Fuente: Elaboración propia (2025)

MATERIA PRIMA (ACEITES)

La materia prima o aceite es el principal reactivo para la obtención de biodiésel, pues representa cerca del 70% de los reactivos que intervienen en el proceso de transesterificación [91]. Están conformados principalmente por triglicéridos de ácidos grasos con cadenas carbonadas desde los seis hasta los veinticuatro carbonos, algunos saturados y otros insaturados (Ver Tabla 2) [92].

Esta trazabilidad de compuestos permite la caracterización e identificación de las cualidades que un aceite puede tener; comúnmente son obtenidos de fuentes vegetales o animales, pero también pueden ser obtenidos de procesos de síntesis molecular o de formación de cultivos de algas. Algunos autores, se conforman con la clasificación de los aceites tan solo como comestibles o no aptos para el consumo humano; por otro lado, la clasificación que se enfoca en el desarrollo del biodiésel presenta una clasificación particular que permite

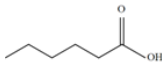
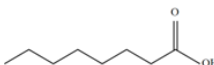
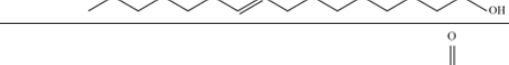
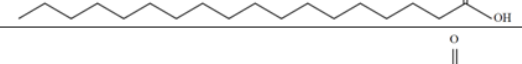
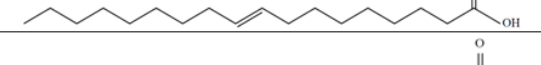
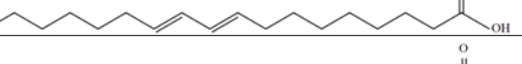
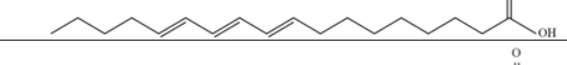
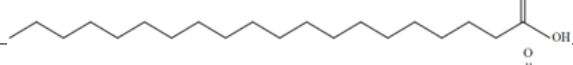
identificar la evolución y avance de los diversos sistemas en el cultivo, extracción y producción de aceites [93].

Por esto se subclasifican en cuatro generaciones, donde la primera generación agrupa los aceites usados para la industria de alimentos y que actualmente parte de estos es destinado a la producción de biodiésel, continuando con la segunda generación; en la cual se encuentran aceites que no son aptos para el consumo humano o son residuos de otros procesos industriales como lo es el caso del aceite usado de cocina. Seguido de la tercera generación. la cual permite de una fuente viva como las algas, obtener un aceite con propiedades similares a los triglicéridos que permiten la obtención del biodiesel. Finalmente, la cuarta generación abarca modificaciones genéticas y de cultivos que permiten una sobre explotación y aprovechamiento de los cultivos de algas o modificaciones transgénicas [94], [95].

Aceites de primera generación

Se denominan aceites de primera generación aquellos obtenidos de semillas oleaginosas mundialmente conocidas como la palma, girasol, soya, olivo, entre otros. Estos aceites son obtenidos de diversos cultivos donde se cosecha la semilla la cual dependiendo del fruto se extrae por maceración, evaporación o tratamientos químicos; su destino final típicamente es para la obtención de aceite comestible, aunque actualmente una parte es destinada a la obtención de combustible comercial [96]. Los cultivos oleaginosos son diversos y dependen exclusivamente de la región donde se generen, por lo que algunos son más eficientes por hectárea que otros, por ejemplo, los cultivos de palma recientemente han aumentado drásticamente al tratarse de ser los cultivos que mayor cantidad de aceite se obtiene por hectárea; seguidos de otros cultivos como la soya y el girasol como lo presenta la Tabla IV [97].

Tabla 4
Ácidos grasos comunes.

Nombre	Número de carbonos	Fórmula	Estructura molecular
Caproico	6:0	$C_6H_{12}O_2$	
Caprílico	8:0	$C_8H_{16}O_2$	
Cáprico	10:0	$C_{10}H_{20}O_2$	
Láurico	12:0	$C_{12}H_{24}O_2$	
Mirístico	14:0	$C_{14}H_{28}O_2$	
Palmítico	16:0	$C_{16}H_{32}O_2$	
Palmitoleico	16:1	$C_{16}H_{30}O_2$	
Estearico	18:0	$C_{18}H_{36}O_2$	
Oléico	18:1	$C_{18}H_{34}O_2$	
Linoleico	18:2	$C_{18}H_{32}O_2$	
Linolénico	18:3	$C_{18}H_{30}O_2$	
Araquídico	20:0	$C_{20}H_{40}O_2$	
Eicosenoico	20:1	$C_{20}H_{38}O_2$	

Fuente: Elaboración propia (2025)

Tabla 5
Rendimiento de aceite de los cultivos oleaginosos de primera generación

Cultivo	Rendimiento de aceite [kg/hectárea]	Rendimiento de aceite [Litro/hectárea]	Referencia
Girasol	800	972	[90]
Maíz	145	172	
Soya	375	446	
Palma	5000	5950	

Fuente: Elaboración propia (2025)

Aceite de girasol

El aceite de girasol es obtenido de las semillas generadas por la flor de girasol (*Helianthus annuus*), su cultivo puede desarrollarse desde la línea del Ecuador hasta una latitud de 55°, en especial en trópicos con fuentes hídricas cercanas que le permiten una mayor hidratación. Es una planta intolerante a la sombra, pero resiste altos periodos de sequías y bajas humedades por lo que se hace idónea para el crecimiento en terrenos alejados.

Figura 7
Fruto, semilla y aceite de girasol



Fuente: Tomado de Tua Saúde, “Aceite de girasol: para qué sirve y cómo usar”, imagen atribuida a Karla Leal, actualizado en enero de 2026. Disponible en <https://www.tuasaude.com/es/aceite-de-girasol/>

Las semillas provienen del sistema radial de la flor (Ver Figura 7). El aceite se obtiene por procesos de extracción mecánica o química, donde se somete a un proceso inicial de extracción de semilla, descascarado, macerado y extracción por prensado y solventes químicos. Posterior a este proceso, si

va destinado el aceite a la industria de alimentos se deberá refinar extrayendo impurezas, seguido de un blanqueado que mejora su apariencia y permite tener un aceite brillante y claro, para finalmente desodorizarse donde se elimina cualquier vestigio de sabores que pueda tener este tipo de aceite [98].

Por otra parte, si el aceite va destinado a la industria de los combustibles este solamente es refinado para eliminar los ácidos grasos libres y poder continuar el proceso de transesterificación [99]. Los rendimientos reportados de 800 kg de aceite por hectárea cultivada (Ver Tabla 5) los cuales respecto a cultivos como el maíz o la soya son superiores, pero inferiores a la palma. A nivel global la producción de girasol es liderada por Ucrania, seguida de Rusia con cerca de 10 000 toneladas de girasol producida en conjunto que abarcan el 56.12% de la producción. Otros países como Argentina, Turquía, Hungría, Francia, España, Rumania, Bulgaria y Kazajstán representan el otro 27.95% y otros países el 19.93% de la producción global (Ver Tabla 6).

Tabla 6
Ranking de producción de aceite de girasol a nivel mundial [100].

Puesto	País	Toneladas	Porcentaje [%]
1	Ucrania	5 836 206	29.10
2	Rusia	5 418 427	27.02
3	Argentina	1 414 500	7.053
4	Turquía	1 099 900	5.485
5	Hungría	687 000	3.426
6	Rumania	533 300	2.659
7	Francia	532 800	2.657
8	Bulgaria	524 500	2.615
9	España	493 300	2.460
10	Kazajstán	320 135	1.596
-	Otros	3 194 612	19.93

Fuente: Elaboración propia (2025)
 Nota: * Los cultivos reportados por la FAO en el 2019 destinados a aceite a nivel mundial son de 20 054 680.

Figura 8
Planta, fruto, semilla y aceite de maíz



Fuente: Tomado de Infobae, “Aceite de maíz: propiedades, beneficios y contraindicaciones”, por C. Amanda Osuna, 30 de enero de 2025. Imagen: AdobeStock. Disponible en: <https://www.infobae.com/espana/2025/01/30/aceite-de-maiz-propiedades-beneficios-y-contraindicaciones/>

Aceite de maíz

El aceite de maíz es obtenido de los granos de maíz comúnmente, aunque actualmente se desarrollan investigaciones para la extracción de este aceite en conjunto con el fruto (planta y bagazo). Los procesos de extracción son típicamente químicos, como el uso de solventes tipo hexano o

etanol anhidro, lo que ocasiona un costo comercial mayor debido a los procesos de refinado que requieren [98]. Los rendimientos reportados son de 145 kg de aceite por hectárea cultivada como se presenta en la Tabla IV los cuales son los más bajos comparados con la soya, el girasol y la palma.

A nivel global la producción de aceite de maíz es liderada por Estados Unidos, seguida de China con cerca de 2 298 103 toneladas de maíz producida en conjunto que abarcan el 64.89% de la producción. Otros países como Brasil, Sudáfrica, Japón, Italia, Francia, Bélgica, Canadá. Turquía representan el otro 18.65%, y otros países el 16.46% de la producción global (Ver Tabla 7).

Tabla 7
Ranking de producción de aceite de maíz a nivel mundial [100].

Puesto	País	Toneladas	Porcentaje [%]
1	Estados Unidos	1 774 200	50.10
2	China	523 903	14.79
3	Brasil	168 177	4.750
4	Sudáfrica	84 800	2.390
5	Japón	80 731	2.280
6	Italia	71 700	2.020

7	Francia	69 500	1.960
8	Bélgica	65 600	1.850
9	Canadá	63 100	1.780
10	Turquía	56 800	1.600
-	Otros	583 119	16.46

Fuente: Elaboración propia (2025). Nota: * Los cultivos reportados por la FAO en el 2019 destinados a aceite a nivel mundial son de 3 541 630.

Aceite de soya

El aceite de soya es obtenido de prensar mecánicamente el fruto de la soya (Flycine max) Es un aceite con abundantes ácidos polinsaturados, el aceite crudo de soya es usado ampliamente cuando se fríen alimentos a nivel industrial o de cocinas domésticas; además, presenta múltiples beneficios nutricionales. Es recomendado el aceite crudo de soya por su perfil lípido como beneficioso en tratamientos de mejoramiento lipídico y de la presión arterial, por otro lado,

Figura 9

Fruto, semilla molida y aceite de soya



Fuente: Tomado de Wikimedia Commons, Soybean Oil, Meal and Beans, por United Soybean Board, 2013. Licencia Creative Commons Attribution 2.0 Generic — CC BY 2.0. Disponible en: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Soybean_Oil_Meal_and_Beans_\(10059732523\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Soybean_Oil_Meal_and_Beans_(10059732523).jpg)

si este es calentado aumenta riesgo de hipertensión, dislipidemia y promueve la arterioesclerosis.

El procedo de extracción del aceite inicia con la molienda del fruto de la soya, posteriormente, es extruido en sistemas rotativos mecánicos algunos con ayuda de vapor, los cuales permiten que se obtenga la

mayor cantidad de aceite vegetal, en algunos casos hasta un 75% del fruto es extraído dejando tan solo un 25% en bagazo el cual es usado para la generación de vapor consumido a lo largo de este proceso (Ver Figura 9). Los rendimientos reportados son de 375 kg de aceite por hectárea cultivada (Ver Tabla 4) los cuales son superiores a los reportados para el maíz, pero son inferiores al girasol y la palma [101], [102].

Tabla 8
Ranking de producción de aceite de soya a nivel mundial [100].

Puesto	País	Toneladas*	Porcentaje [%]
1	China	15 998 400	26.71
2	Estados Unidos	11 290 000	18.84
3	Brasil	11 263 345	18.80
4	Argentina	8 081 200	13.49
5	India	1 438 200	2.400
6	México	874 503	1.460
7	Rusia	741 173	1.240
8	Paraguay	704 200	1.180
9	Países bajos	635 200	1.060
10	Alemania	624 100	1.040
-	Otros	8 253 971	13.77

Fuente: Elaboración propia (2025). Nota: *Los cultivos reportados por la FAO en el 2019 destinados a aceite a nivel mundial son de 59 904 292.

A nivel global la producción de aceite de soya es liderada por China, seguida de Estados Unidos con cerca de 27 288 400 toneladas de soya producida en conjunto que abarcan el 45.55% de la producción. Otros países como Brasil, Argentina, India, México, Rusia, Paraguay, Países bajos representan el otro 40.67%, y otros países el 13.77% de la producción global (Ver Tabla 8) [100].

Figura 10
Fruto, almendra y aceite de palma



Fuente: Tomado de Treid, “Exportaciones de aceite de palma en Colombia en 2019”, por Investigadores Treid, 5 de febrero de 2020. Disponible en: <https://www.treid.co/post/exportaciones-de-aceite-de-palma-en-colombia-en-2019>

Aceite de palma

El aceite de palma es la planta oleaginosa de mayor producción por hectárea (Ver Tabla 4 y Figura 10), con 5.000 kilogramos por hectárea. Este rendimiento ha ocasionado que muchos países inicien procesos de siembras masivas que provocan deforestaciones y destrucciones de selvas

madres como en Tailandia y Colombia. Esta planta también es conocida como palma africana (*Elaeis guineensis*). La Tabla 8 presenta la producción de los diversos países donde Colombia se encuentra ubicada en la cuarta posición. Además, un fruto (Ver Figura 10 y Tabla 8).

Tabla 9

Ranking de producción de aceite de palma a nivel mundial [100].

Puesto	País	Toneladas*	Porcentaje [%]
1	Indonesia	42 869 429	57.47
2	Malasia	19 858 367	26.63
3	Tailandia	3 040 000	4.076
4	Colombia	1 527 549	2.048
5	Nigeria	1 220 000	1.635
6	Guatemala	880 000	1.180
7	Honduras	707 000	0.9480
8	Ecuador	420 000	0.5631
9	Brasil	400 560	0.5370
10	Camerún	300 000	0.4022
-	Otros	3 360 320	4.505

Fuente: Elaboración propia (2025)

Nota: * Los cultivos reportados por la FAO en el 2019 destinados a aceite a nivel mundial son de 74 583 225.

Aceites de segunda generación

Los aceites de segunda generación pueden ser clasificados en dos familias; la primera aquellos que se generan producto de algún proceso como el freír alimentos de manera doméstica o industrial, estos se conocen como aceites usados de cocina o WCO (*Waste Cooking Oils*) [103], así como las grasas animales provenientes de bovinos, pollos, cerdos, borregos, etc [104], [105]. Por otra parte, aquellos aceites que son obtenidos de plantas no aptas para el consumo humano como el ricino (*Ricinus communis*) o la jatropha (*Jatropha curcas*), que son plantas tóxicas con un alto contenido oleaginoso por lo que de ellas se pueden obtener aceite de alta calidad cosmética y/o industrial [106], [107].

Otros aceites evaluados para la producción de biodiesel de segunda generación son Aceite de mahua (*Madhuca indica*), aceite de polanga (*Calophyllum inophyllum*), Carmelina sativa (*Gold of pleasure oil*), Moringa oleífera y *Nicotiana tabacum*; cualquiera de estos son plantas oleaginosas algunas nativas de zonas europeas y con bajas eficiencias en su extracción, otras en cambio a pesar de tener altos contenidos oleaginosos los costos son extremadamente altos por su poca disponibilidad y aplicaciones cosméticas [108]–[111].

Aceite de cocina usado

El residuo generado posterior a freír un alimento es una mezcla de aceites vegetales o grasas animales desnaturalizadas, residuos de alimentos y algunos sólidos suspendidos; al ser dispuestos en los desagües de las casas o restaurantes ocasionan que tan solo un litro pueda llegar a contaminar cerca de 40 000 litros de agua, lo que equivale al consumo de agua anual de una persona promedio pues contiene cerca de 5 000 veces más carga contaminante que el agua residual que circula por sistemas de drenado o redes de alcantarillado [112], [113].

Por esta razón, se debe almacenar y disponer de manera correcta dicho residuo el cual en muchos países es considerado de gran peligrosidad y se deben llevar controles estrictos. Particularmente para México, existen empresas dedicadas a la recolección, tratamiento y revalorización de este residuo donde desde productos de alimento para bovinos, cosméticos y combustible se producen a partir del aceite usado de cocina.

Shindam-Pardo en 2013 realizó un estudio del potencial de México en la generación de biodiésel a partir de este residuo demostrando mediante un caso estudio que, si se produjera combustible a partir de los residuos de aceite de la ciudad de México, se lograría subsanar del 1.5 al 3.3% del combustible

demandado por la misma ciudad con un costo de energía de 0.8727 MJ algo menor respecto a la producción de diésel de petróleo de 1.2007 MJ [114].

A nivel global la producción de aceites comestibles ha aumentado de 75 a 200 millones de toneladas de 1995 al 2019, de las cuales se estima que tan solo un 10% es tratado y dispuesto correctamente. Por lo que podría ser una gran cantidad de residuo que se revalorizaría obteniendo combustibles de competitividad directa con el diésel y a un costo menor respecto a los otros biodiésels obtenidos con fuentes oleaginosas de primera generación [115].

Se presenta un concepto alternativo que ha tomado fuerza en los últimos años (Ver Figura 11), la denominada biorrefinería; un sistema macro industrial que abarca múltiples procesos de revalorización de residuos y correcto tratamiento de desechos, para la generación de energía eléctrica, combustibles líquidos, gaseosos y sólidos. Dentro de los cuales se usa como materia prima los aceites usados de cocina, donde no solamente se generan combustibles con ellos sino compuestos para la obtención de cosméticos y medicamentos farmacéuticos [116].

Figura 11

Biorrefinería y el aceite usado de cocina



Fuente: Elaboración propia (2025)

Grasas animales

El consumo mundial de carne por parte del ser humano ha aumentado drásticamente en los últimos años, tan solo para el 2018 se registró un aumento del 58% respecto a 20 años atrás demandando un total de 360 millones de toneladas. Países como Estados Unidos y Australia lideran la demanda mundial de este producto, donde se registra que un ser humano anualmente puede llegar a consumir en promedio hasta 99 kg de carne [117]. La producción deja múltiples desechos que son tradicionalmente tratados y algunos de estos terminan siendo usados como compostaje, pero durante la fase de sacrificio muchos de los residuos orgánicos generados no son aptos para el consumo humano o con poca demanda terminan usándose en la obtención de concentrado para pollos o animales domésticos.

Parte de este producto no puede ser usado como alimento por lo que puede extraerse los contenidos grasos que presenta generando una cantidad significativa que puede ser usada como materia prima en la obtención de biodiésel [92]. Los aceites de procedencia animal reportados por algunos autores en la producción de biodiésel son manteca de cerdo, sebo de vaca, sebo de cordero y grasa de ave aportando una pequeña cifra de no más del 5% a la producción total en el mundo; pero realizando una correcta disposición de este desecho [118].

Aceites de tercera generación

El surgimiento de esta materia prima alternativa se debió a la búsqueda de nuevas formas que no dependan estrictamente de zonas agrícolas para la obtención de aceite, como todas las alternativas de primera y segunda generación que requieren de terrenos -en su gran mayoría- destinados para producción de alimentos. Para algunos autores son conocidos como aceites de segunda generación, pues son aquellos que

no dependen de un cultivo oleaginoso sino, por otro lado, de mecanismos de fotosíntesis donde se proliferan generando consumo de oxígeno y CO_2 siendo beneficioso, pues al igual que los cultivos vegetales oleaginosos, absorben grandes cantidades de gases contaminantes durante su proceso de producción.

Los cultivos de algas solamente requieren estanques y alta exposición solar, lo que puede efectuarse en zonas desérticas y que no dependan de terrenos agrícolas. Actualmente estos cultivos son posicionados en zonas aledañas a termoeléctricas pues permiten absorber una gran cantidad de gases contaminantes y generar biomasa de donde finalmente puede obtenerse biodiesel con propiedades fisicoquímicas similares al producido con aceites de primera y segunda generación. La principal dificultad que presenta esta materia prima son los escalamientos pues al ser organismos biológicos sus generaciones están supeditados a ciertos tamaños y, en ocasiones, una pequeña variación de pH o temperatura puede acabar con la vida de todas las microalgas de un estanque generando una pérdida económica elevada [48], [119].

ALCOHOLES

El uso de un alcohol a lo largo de la reacción de transesterificación para la producción de ésteres de ácidos grasos es indispensable, (Ver Figura 5) este interviene en la reacción, aportando tres moles por cada mol de triglicérido. Este reactivo debe tener características generales de ser de cadena corta para lograr una mayor afinidad a pequeñas aportaciones de energía durante el proceso de reacción y en consecuencia ser más eficiente al tratarse de mezclas no miscibles (alcohol aceite).

Para la obtención de biodiesel pueden usarse diversos alcoholes, dentro de los cuales generalmente son más usados

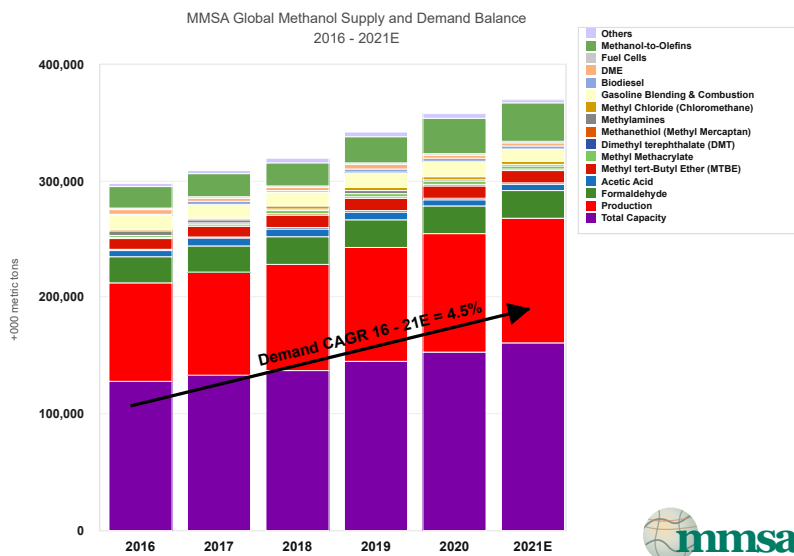
el metanol y etanol por su alta disponibilidad y producción industrial, pero pueden tenerse reacciones con alcoholes como butanol, iso propanol, entre otros, que a pesar de estudiarse en ámbitos de la investigación no podrían usarse en producciones a gran escala por su alto costo y baja disponibilidad [92], [120].

Metanol

El metanol también es conocido como alcohol metílico o alcohol de madera, es un alcohol de cadena corta y considerado el más sencillo dentro de la familia de los alcoholes por su molécula CH_3-OH . A temperatura ambiente muestra ser un líquido ligero de baja densidad, inflamable, incoloro y tóxico para el ser humano [121]. La temperatura de ebullición es de 64.7 °C y es miscible en agua en cualquier proporción.

Figura 12

Producción global de metanol y demanda energética [122]



Fuente: Tomado de Methanol Institute, "The Methanol Industry", consultado el 5 de abril de 2022. Disponible en: <https://methanol.org/the-methanol-industry/>

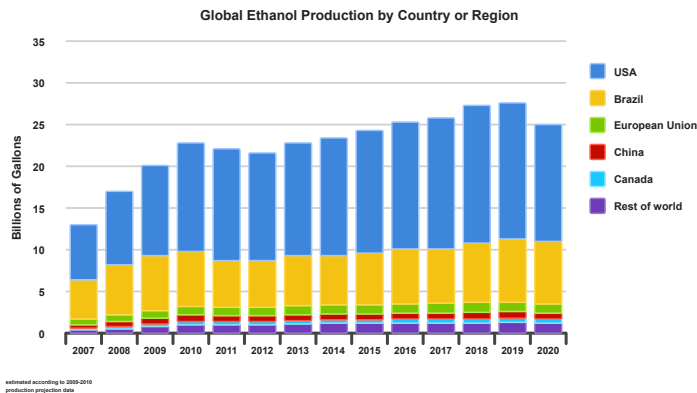
Es usado principalmente como anticongelante, disolvente y combustible. A nivel global se producen alrededor de 110 millones de toneladas donde el 80% se obtiene por procesos de fermentación a partir de aceite y gas natural, y el 20% restante en procesos petroquímicos en una refinería al año 2022 (Ver Figura 12) [122].

En búsqueda de mejorar la huella ambiental generada por procesos donde se utilizan combustibles fósiles como gas y petróleo, se han impulsado iniciativas que vinculan directamente la obtención de metanol de manera biológica con procesos sostenibles que no afectan y que incluso llegan a absorber en su proceso CO_2 ; este metanol es conocido como bio metanol por su materia prima -en la gran mayoría de los casos- son compuestos orgánicos que generan biogás donde posterior a un procesos de bio refinación se fermenta y no requiere de ningún combustible fósil [118]. En cuanto al proceso de obtención de biodiésel es el más usado por la alta disponibilidad y gran mercado, representado cerca del 30% del costo comercial del biodiésel [123].

Etanol

El etanol también conocido como alcohol etílico, es un alcohol de cadena corta perteneciente a la familia de compuestos orgánicos alifáticos con fórmula empírica $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$ y fórmula química semidesarrollada $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-OH}$. A condiciones estándar es un líquido incoloro, con olor etéreo muy penetrable y altamente inflamable. La temperatura de ebullición es de 78.4 °C y es miscible en agua en cualquier proporción. La producción global para el 2020 fue de cerca de 25 billones de galones la cual se vio levemente disminuida respecto al 2019 donde se produjo 29 billones de galones; esto consecuencia de la pandemia por el COVID-19 [120]. Los países que lideran la producción de etanol en el mundo son Estados Unidos seguido de Brasil donde en conjunto abarcan el 84% de la producción global (Ver Figura 13).

Figura 13
Producción global de etanol [120]



Fuente: Tomado de Alternative Fuels Data Center, “Global Ethanol Production by Country or Region”, consultado el 5 de abril de 2022. Disponible en: <https://afdc.energy.gov/data/10331>

Este alcohol puede ser usado en mezcla con la gasolina tradicional como carburante, sin necesidad de realizar modificaciones directas a un motor por lo que se ha vuelto una gran alternativa para muchos países en vías de desarrollo y desarrollados, donde se han implementado legislaciones que permiten la distribución y comercialización como combustible.

Por otro lado, puede ser usado para la obtención de biodiésel durante el proceso de transesterificación, con la dificultad de requerirse mayor energía respecto al uso del metanol, esto debido a la poca afinidad de este con los triglicéridos. Su producción en relación con el metanol es más sencilla pues tan solo se requiere un proceso de fermentación directa y una torre de purificación, respecto a bastos procesos requeridos por el metanol. También es altamente rentable, pero se cuestionan algunos aspectos como la disposición de cultivos de uso alimentario para el uso de combustibles [124], [125].

INTENSIFICADORES

Desde el punto de vista energético la reacción de transesterificación requiere que los fluidos en reacción estén en constante contacto a condiciones de temperatura elevada, y en algunos casos presión. Este tipo de aportación se hace físicamente a través de agitadores, calentadores, y sistemas que suministran presión.

Por otro lado, cualquier reacción puede requerir el uso de un catalizador que, a pesar de no hacer parte de la reacción, generan gran impacto en la misma, porque permiten disminuir tiempo y hacer posible la reacción. Por lo que se describirá una revisión general de los intensificadores químicos conocidos como catalizadores y físicos desde el punto de vista de sistemas mecánicos que permiten aportar energía enfocada solamente al proceso de obtención de biodiesel.

Químicos

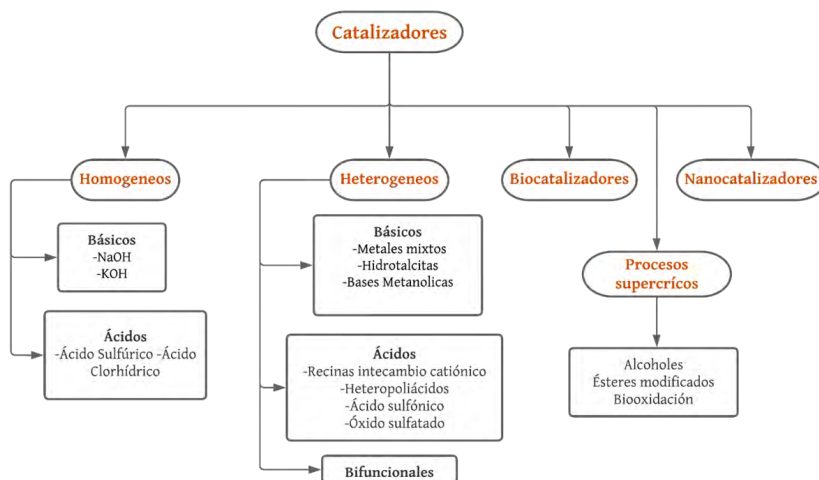
La presencia de intensificadores químicos o catalizadores se hace necesario para cualquier reacción química en búsqueda de disminuir los tiempos de obtención, y en consecuencia aumentar el rendimiento y generar ahorro energético. En el caso puntual del proceso de la alcoholisis se debe realizar la adición de un catalizador básico o ácido, por lo que recibe el nombre de catálisis ácida o básica según corresponda. Dependiendo de la materia prima (aceite), se requiere realizar inicialmente un proceso de catálisis ácida o también conocida como esterificación, esta trata los ácidos grasos libres del aceite, para que no afecten un posterior proceso de transesterificación o catálisis básica.

El criterio de selección de este proceso varía dependiendo de los autores; algunos indican que para valores de porcentajes superiores al 1% en ácidos grasos libres de un aceite, este deberá ser tratado; por otro lado, esto genera altos costos,

por lo que otros autores sugieren que este porcentaje sea del 3%, teniendo una mayor ventana de aplicación [71], [82]. Esta clasificación general de catalizadores es la más común, pues representa los más usados a nivel industrial y de investigación.

De igual importancia se generan múltiples clasificaciones de estos catalizadores, la más general, los homogéneos, catalizadores heterogéneos, biocatalizadores, procesos supercríticos y nanocatalizadores (Ver Figura 14) donde estos se pueden clasificar en subgrupos [126], [127].

Figura 14
Clasificación general de catalizadores químicos



Fuente: Elaboración propia (2025)

Cuando se usan los catalizadores de forma homogénea, las reacciones suelen ser más rápidas y requieren una menor cantidad respecto a los catalizadores heterogéneos. Un inconveniente importante de los catalizadores homogéneos es que la separación de estos catalizadores del medio, pues requieren lavados con agua la cual debe tratarse posteriormente; otro aspecto es que los heterogéneos pueden ser reutilizados.

Por otro lado, los catalizadores heterogéneos están en una fase diferente a la del sistema en reacción, lo que permite la eliminación del catalizador posterior al proceso con mayor facilidad respecto a los homogéneos, pues una vez terminada la catálisis pueden reutilizarse sin necesidad de lavados intensivos. Además, se puede obtener glicerina de alta pureza en comparación con la catálisis homogénea, debido a una cantidad considerablemente menor de iones disueltos, lo que permite su uso posterior en procesos industriales con un menor costo [126], [128], [129].

Físicos

Los intensificadores físicos permiten mediante fenómenos de transferencia de energía en forma de calor, movimiento, cambio de presión o fenómenos como la cavitación, acelerar una reacción. Particularmente, para el proceso de transesterificación a estudiar a lo largo del desarrollo de este texto, se abordó la revisión de diversos intensificadores físicos clasificándolos en: Fenómenos de microcanales, destilación reactiva, membranas, microondas, ultrasonido, tubo helicoidal, flujo oscilatorio, radiación infrarroja y cavitación hidrodinámica. A continuación, se describe más a profundidad cada uno de los intensificadores.

Microcanales

La intensificación física de la producción de biodiésel mediante reactores de microcanales es una opción que mejora la conversión, acorta el tiempo de reacción y aumenta el rendimiento del biodiésel. Las mayores tasas de transferencia de masa y la alta relación superficie/volumen son las características más llamativas de este tipo de intensificaciones. Algunos de los reactores de ese tipo de tecnología son sencillos mezcladores con configuraciones de canales (ver Tabla 10).

Tabla 10
Revisión de microcanales usados como intensificadores.

Tipo	Material	ID [mm]	Materia prima	Catalizador	PCa % p/p	RMb	Temperatura [°C]	Tiempo [min]	Rendimiento % p/p	Ref
Mezclador T y bobinado	Acero inoxidable	0.99/0.5	Soya	KOH	1.2	9:1	60°C	3	99.95	[130]
Tubo en T con ultrasonido	Acero inoxidable	2.16	Aceite reciclado	NaOH	0.6	6:1	60	75	87.00	[131]
T en forma de flecha	Teflón	1.5	Ricino	NaOH	1	6:1	60	3	98.00	[132]
Mezclador en T y J	Teflón	0.508	Palma	KOH	1	6:1	60	Continuo	97.14	[133]
Válvula Testa y Omega con mezclador	Polimetil silicona	0.5	Ricino	NaOH	1	9:1	50	15	96.7/95.3	[134]
Tubo de cuatro canales	Acero inoxidable	1.58	Soya	KOH	1	3:1	57.2	6	98.8	[135]
Mezclador KM	Acero inoxidable	0.22	Aceite usado de cocina	NaOH	1	12:1	70	Continuo	97	[136]
Mezclador en T	Acero inoxidable	0.24	Soya	NaOH	1.2	17:1	56	0.5	95.5	[137]

Fuente: Elaboración propia (2025)
 Nota: ^a Porcentaje de catalizador, ^b Relación molar metanol:aceite

Las diversas aplicaciones de micro mezcladores, en su gran mayoría en T (Ver Tabla 9), muestra aplicación de diversos materiales, donde principalmente se encuentra presente el acero inoxidable, por su alta resistencia a sustancias básicas y ácidas. Por otra parte, a pesar de presentarse excelentes rendimientos, la limitante de estos intensificadores es la baja cantidad que producen; consecuencia de ser equipos de nivel de laboratorio. Si se deseara instalar grandes plantas de producción por estos métodos, sería necesario grandes acoples entre múltiples micro reactores; lo que ocasionaría un alto costo y con ello disminuiría la posibilidad de implementación masivamente de esta tecnología.

Destilación reactiva

La destilación reactiva es un proceso que reacciona y separa dos o más reacciones durante un proceso de destilación a través de columnas empacadas o enchaquetadas. Este proceso presenta múltiples beneficios debido a la disminución de los equipos necesarios, el tiempo y en consecuencia la energía. A la vez, debido al ser continuo se debe realizar estabilizaciones y modelos de control complejos que en ocasiones terminan con bajos rendimientos de conversión.

Particularmente, en el proceso de obtención de biodiésel por destilación reactiva es algo compleja, pues al ser el proceso de transterificación una secuencia de múltiples procesos en equilibrio, estos deben regularse, permitiendo la obtención total de ésteres y glicerol a partir del alcohol y triglicéridos. Algunos procesos estudiados en la literatura han obtenido conversiones de hasta un 70% en condiciones críticas de temperatura para los alcoholes como los 120 °C esto con catalizadores heterogéneos [138].

De igual forma, con aceite de soya se ha probado la destilación reactiva obteniendo con relaciones molares metanol: aceite bajas de 4.5:1 y 3:1 bajos consumos energéticos del orden de $1.6 \cdot 10^7$ kJ/h esto a 100 °C de temperatura de operación y un rendimiento cercano al 100% [139]. Algunos otros resultados (Ver Tabla 10 y 11), donde principalmente se puede concluir que estos procesos pueden ser aplicados industrialmente con buenos rendimientos, pero temperaturas y altos costos energéticos respecto a otros procesos industriales con igual o similar aplicación al proceso de transesterificación [138]–[141].

Tabla 11
Revisión de destilación reactiva como intensificadores.

Tipo	Flujo	Materia prima	Catalizador	PC ^a % p/p	RM ^b	Temperatura [°C]	Tiempo [min]	Rendimiento (FAME) % p/p	Ref
Columna, evaporador y separador	1.2 mL/min	Aceite vegetal	Heterogéneo	5	5:1	150	60	90	[138]
Columna y condensador	300 kmol/h	Soya	NaOH	0.3	4.5:1	100	Continuo	98	[139]
Dos columnas y retroalimentación	84.1 kg/h	Soya	NaOH	0.1	3.67:1	150	40	99	[141]
Tanque agitador, columna, boiler	2.31 L/min	Agal	NR	NR	4:1	110	Continuo	68	[140]

Fuente: Elaboración propia (2025).

Nota: ^a Porcentaje de catalizador ^b Relación molar metanol:aceite NR: No registra.

Microondas

La intensificación de la reacción de transesterificación consecuencia del aporte de energía por la irradiación de las moléculas, es uno de los métodos físicos con mayor tasa de liberación de energía. Esta tecnología será desarrollada con mayor profundidad en la sección de reactores (ver subsección 2.7.4). Particularmente, algunos autores han como Sáez-Bastante han demostrado que estas formas de intensificación disminuyen notoriamente los tiempos de reacción a tan solo minutos para masas pequeñas en reacción, pero con la dificultad de su escalamiento [142]. Lo que imposibilita notoriamente la aplicación a nivel industrial supeditando en gran medida estos equipos a uso de laboratorio.

Flujo oscilatorio

Los sistemas de intensificación de flujo oscilatorio pueden ser considerados diversos sistemas, donde típicamente se usan geometrías que restringen el flujo y aumentan el grado de pérdida mecánica del fluido. Esto genera múltiples alteraciones a la reacción en el proceso de obtención de biodiésel. Algunos factores que juegan un

papel importante al momento de seleccionar o comparar este método de intensificación es el número de Reynolds, el cual relaciona las fuerzas inerciales del sistema respecto a las fuerzas viscosas. Algunos autores como Zheng et al. han aplicado intercambiadores de calor con geometrías variables (condensador de rosario) de uso de laboratorio para obtener biodiésel de forma continua con rendimiento superiores a 99% pasados los 37 minutos [143]. Otros trabajos comparativos son presentados (Ver Tabla 12).

Tabla 12
Revisión de flujo oscilatorio como intensificador.

Tipo	Reynolds	Materia prima	Catalizador	PCa % p/p	RMb	Temperatura [°C]	Tiempo [min]	Rendimiento (FAME) % p/p	Ref
Reactor batch de flujo oscilatorio 12 Hz	134	Aceite vegetal	NaOH	0.5	6:1	60	37	99	[143]
Reactor oscilatorio a 0.33 Hz	2100	WCO	NaOH	1	6:1	60	60	78.8	[144]
Reactor Helicoidal a 6 Hz	240	Aceite animal	KOH	1	12:1	60	30	90.0	[145]
Reactor de flujo oscilatorio (OFR)	N.R.	Colza	NaOH	1.4	4:1	60	15	99.3	[146]

Fuente: Elaboración propia (2025)
 Nota: ^a Porcentaje de catalizador, ^b Relación molar metanol:aceite, NR: No registra

Cavitación hidrodinámica

La cavitación hidrodinámica es considerada como un intensificador físico debido a la liberación de energía productodeestefenómeno. Estefenómenopuedesercausado por múltiples dispositivos, dentro de los más comunes, las placas de orificio y las hélices de turbinas o bombas centrífugas. En esta sección no se evaluará ni describirán a profundidad relevancias de este fenómeno, pues el capítulo 3 del presente libro está orientado al estudio en específico

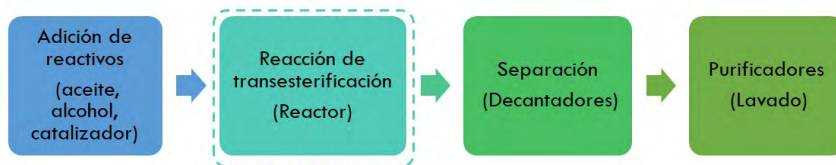
de este fenómeno. Por el contrario, en la siguiente sección (Reactores) se cuenta con una descripción de resultados de diversos reactores donde se ha usado la cavitación como intensificador de la reacción de transesterificación.

REACTORES

Los reactores en el ámbito ingenieril han sido desarrollados desde finales del siglo XIX, consecuencia de los nuevos procesos petroquímicos y alimenticios. Estos aún hoy día siguen en constante cambio tanto de forma, proceso y tecnología; lo que permite una optimización de procesos y mejoramiento de productos. Particularmente, en el campo de la obtención de biodiésel, existen dos grandes familias subclasificadas en continuos y discontinuos, enlazados en ocasiones con los semibatch que son una combinación de ambos [147].

Figura 15

Pasos generales de producción de biodiésel



Fuente: Elaboración propia (2025)

También es fundamental identificar que otros equipos adicionales donde se realiza el proceso de transesterificación son involucrados en un proceso de obtención, estos van orientados a los pasos fundamentales de producción de biodiésel a través de una alcoholísis o catálisis.

El primer paso, es la adición de los reactivos al reactor donde se lleva a cabo la obtención del biodiésel. El segundo paso, la realización de la reacción según corresponda en el equipo de reacción. El tercero, la separación de estos compuestos

en un decantador, el cual también puede llevarse a cabo en unidades centrífugas que permiten separar la glicerina de los ésteres; también algunas investigaciones han mostrado que esta separación se puede realizar mediante filtración.

El cuarto paso es la extracción de reactivos no reaccionados, en especial el exceso de alcohol suministrado en la reacción. Este implica una purificación o refinación de los ésteres, el más común, el método de lavado húmedo que consiste en realizar una adición de aguas ácidas o neutras, que permiten el arrastre de partículas básicas de catalizador y emulsificación de componentes aun presentes en la reacción. Este proceso no es totalmente amigable con el medio ambiente, pues deben ser posteriormente tratadas estas aguas con alto pH. Por ello se han planteado un método de lavado en seco que industrialmente es usado mediante columnas capilares, pero que aún está en fase de desarrollo y con ello aumenta el costo comercial de un equipo de este tipo [148]–[150].

Este proceso descrito anteriormente (Ver Figura 15). Pasos generales de producción de biodiésel.

Algunos sistemas requieren un proceso adicional de purificación del aceite, proceso conocido como esterificación, esto se debe realizar si el porcentaje de ácidos grasos libres es mayor a 1% o 3% dependiendo de los autores [137], [147], [150]. Cualquiera de estos, ya sean los procesos primarios, terciarios (Ver Figura 15) no son objetivo de este texto, pues representan múltiples alternativas que no se estudiarán.

El método más popular y comúnmente utilizado para la producción de biodiésel tanto a nivel de laboratorio como industrial es el batch, o también conocido de agitación y calentamiento [151]. En un proceso por lotes típico, no hay corrientes que entran y salgan del reactor durante el proceso y, por lo tanto, se hace reaccionar una cantidad

finita de reactivos en un periodo de tiempo especificado. En este proceso solo se introducen los reactivos, se suministra calor y agitación por tiempos estipulados, manteniendo un control total sobre las demás variables. Lo que permite tener una reacción controlada, aunque lenta y de alto consumo energético. Por esta razón, se han generado algunas otras alternativas como el semibatch o procesos continuos.

El semibatch es una variación del proceso batch el cual presenta una mayor selectividad de los productos, pero un control inferior en la temperatura de reacción, en el cual, a medida que avance la reacción, reactivos o productos pueden agregarse o retirarse del reactor de manera intermitente o continua. Lo que aumenta las variables con que parametrizar un proceso, pero beneficia el volumen que puede ser producido durante la operación.

Particularmente, para la obtención de biodiésel, pueden ser introducidas grandes cantidades de metanol o aceite, las cuales pueden ser vertidas o retiradas de forma gradual o intermitente, es decir, aceite para mejorar la velocidad de reacción y el rendimiento del proceso; y alcohol junto con catalizador, para generar una reacción más rápida. La reacción de transesterificación puede entrar en estado de equilibrio, pero en la gran mayoría de ocasiones estas son alteradas por la adición o retiro de material. Similar al proceso por lotes, la disponibilidad de producto es limitada mientras que su costo operativo es relativamente más alto. Sin embargo, al igual que los procesos en continuo se requieren de diseños y aplicaciones mucho más complejas que el reactor típico de agitación y calentamiento.

Por otra parte, los procesos en continuo presentan una entrada y salida de fluidos constantemente. Donde se introducen los reactivos a tasas parametrizadas y se retiran los productos a la misma tasa. Esto con el fin de evitar procesos de estancamiento. Dichas tecnologías han ido

en constante desarrollo en búsqueda de mejorar todas las falencias que el proceso batch presenta [147], [152].

Pero a pesar de esta tendencia, los procesos batch aún son los más usados y de mayor auge de instalación en todo el mundo, siendo el proceso de elección en las plantas de obtención de biodiésel de pequeña mediana y de gran escala. Es de importancia mencionar que, los procesos continuos ofrecen menores costos operativos mientras que entregan productos más uniformes y de mayor calidad. Algunas otras ventajas y desventajas de cada uno de los procesos anteriormente descritos se presentan a continuación (Ver Tabla 13).

Tabla 13
Comparación entre reactores batch, semibatch y continuos [147], [148], [153], [154].

Parámetro	Reactor		
	Batch	Semibatch	Continuo
Espacio de instalación requerido	↑ Alta	↕ Media	↓ Baja
Capital de inversión	↑Alta	↕ Media	↓ Baja
Costos de operación	↑Alta	↕ Media	↓ Baja
Calidad de producto	↔ Uniforme	↔ Uniforme	↔ Uniforme
Tiempo de reacción	Depende de la estequiometria	Depende de la estequiometria	Depende de la estequiometria y las puestas en marcha
Velocidad de conversión	↓ Baja	↑Alta	↑ Muy Alta
Selectividad de las materias primas	↓ Baja	↑Alta	↑Alta
Versatilidad	↑Alta	↓ Baja	↓ Baja
Flexibilidad	↑Alta	↑Alta	↑Alta
Escalabilidad	Fácilmente	Compleja	Compleja
Transferencia de calor	↓ Baja	↑Alta	↑Alta

Fuente: Elaboración propia (2025)

Cualquier reactor puede ser subclasificado además de la forma de operación en algunas de sus características fenomenológicas, es decir, no solamente de cómo son sus procesos; si continuo o batch. Si no, por otras formas, como la manera en que se suministra calor, cómo es la transferencia de masa y/o la eficiencia del proceso. Los reactores a su vez pueden ser clasificados según el número de fases que existen en su sistema de mezcla y modos de proceso. Se presenta un breve resumen de algunas condiciones operativas bajo las cuales se identifican múltiples reactores (Ver Figura 16).

Figura 16

Diagrama de reactores usados en la producción de biodiesel (Fondo cortesía de Ecodiesel Colombia S.A.S.)



Fuente: Elaboración propia (2025)

Reactores rotativos y de flujo de pistón

Los reactores rotativos son los equipos de mayor uso en el ámbito industrial por su sencillez instalación y bajo costo de instalación. Sin embargo, estos presentan eficiencias menores y dificultades en su control respecto a otros tipos de reactores. Específicamente los reactores de tanque agitado pueden ser subclasificados por lotes, continuos y a chorro.

Los reactores tubulares o de flujo (PFR) por sus siglas en inglés *Plug Flow Reactor* son los más sencillos dentro de los reactores rotativos. Son considerados rotativos, pero puede o no suministrarse agitación mediante una hélice. Estos solamente son tuberías con o sin restricciones internas que permiten la generación de una reacción química, como en este caso particular, la transesterificación. Los factores más influyentes en estos equipos son el número de Bodenstein que relaciona la cantidad de sustancia suministrada por convección (velocidad y longitud) respecto a la de difusión, el número de Reynolds, la temperatura y presión de operación, la longitud y el diámetro; así como la densidad y viscosidad de la mezcla de los reactivos.

La dificultad principal de estos equipos es el suministro de calor mediante camisas calefactoras o irradiación, pues la reacción de transesterificación tradicionalmente requiere temperaturas cercanas a la evaporación del alcohol. Además, es importante mantener un suministro de presión constante y minimizar sus pérdidas, ya que una mayor caída de presión reduce la transferencia de calor y de masa. Las condiciones de operación recomendadas para aumentar su eficiencia son el manejo de altas presiones, modo continuo, buscando estados estacionarios y la aplicación de catalizadores inmovilizados y enzimáticos. Dentro de esta familia de reactores se tienen los de flujo oscilatorio, lecho fluidizado, lecho fijo, tubulares y por goteo [155]–[157].

Los reactores de tanque agitado (STR) por sus siglas en inglés *Stirred Tank Reactor* son recipientes cilíndricos que cuentan con un eje central donde se sujetan uno o más agitadores (hélices). La falta de mezcla de estos equipos es algunas veces presentada en reactores de gran tamaño, la cual afecta la transferencia de masa y aumenta con ello los tiempos de reacción. En algunos casos se instalan serpentines que benefician la transferencia de masa, y con ello disminuyen el tiempo de reacción de transesterificación. Una de las

dificultades de la implementación de estos equipos es la alta frecuencia de mantenimiento, consecuencia del ensuciamiento y las dificultades de mezcla ocasionada por las bajas transferencias de masa respecto a otros reactores [158], [159].

Los reactores por lotes de tanque agitado (BSTR) por siglas en inglés de *Batch Stirred Tank Reactor* (ver Figura 17a) presentan tiempos de residencia del orden de 60 a 120 minutos, con una transferencia de masa media respecto a otros sistemas y una alta dificultad para poder controlar la temperatura del proceso de producción de biodiésel. Este tipo de reactores desde el auge de la industria química del siglo XVII son usados, presentan múltiples variaciones y optimizaciones, debido a su facilidad de escalamiento y comportamiento lineal de este [160].

El factor más crítico es la determinación de temperaturas límite de la reacción y el tiempo de máxima eficiencia. Actualmente estos se encuentran siendo usados en el ámbito industrial, de planta piloto y laboratorio, presentando un desarrollo total de su tecnología. Por esto, son los equipos comercialmente más usados, pero con las dificultades anteriormente mencionadas [82], [147], [161]. Algunos de los resultados reportados por la literatura para este reactor son presentados en la Tabla 14.

Los reactores de tanque agitado continuo (CSTR) por sus siglas en inglés *Continuos Stirred Tank Reactor* (ver Figura 17b) es la aplicación de los STR, pero en métodos continuos donde se busca la estabilidad de la reacción y que los reactivos al ser introducidos no generen variación en la dinámica de la reacción. Este tipo de reactores frecuentemente son usados para la obtención de biodiésel, donde se reportan rendimiento superiores al 90%. La literatura reporta diversos resultados para este reactor (ver Tabla 14).

Los reactores de chorro (JSR) por sus siglas en inglés *Jet Stirred Reactor* (ver Figura 17c) presentan características de funcionamiento continuo, y no son usados frecuentemente en la producción de biodiesel. Algunos resultados reportan que no se cuenta con rendimientos cercanos a los mostrados por otros reactores como el BSTR o CSTR.

Los reactores de tubo no han sido la excepción para ser aplicados en la producción de biodiesel, aunque en un menor grado. Por ejemplo, los reactores rotativos de tubo giratorio (RPBR) por sus siglas en inglés *Rotating plug bed Reactor* (ver Figura 17d), es una tecnología conocida como HiGee [162]. Esta tecnología aplica una fuerza centrífuga para facilitar la interfaz alcohol-aceite, la micromezcla (mezcla a escala molecular de dos líquidos) mejora la transferencia de masa, mientras se reducen los tiempos significativamente de reacción [163]. Una de las cualidades de estos reactores es la alta fuerza gravitacional causada por la alta velocidad angular de 500 a 2500 rpm, la cual mejora notoriamente la velocidad de reacción, esto consecuencia de tratarse de un lecho empacado. En contraste, la viscosidad tiene una relación de incidencia menor respecto a otros reactores. Consecuencia de algunas materias primas con alta viscosidad requieren mayor tiempo de reacción en un BSTR o menor flujo en un CSTR; este tipo de reactores no se evalúa esta influencia, al realizarse micro mezcla de cada uno de los reactivos con baja influencia de la viscosidad [164].

La aplicación de RPBR para la transesterificación de aceites aún no está completamente estudiada. Se ha analizado que los RPBR pueden mejorar la reacción de transesterificación mediante la mezcla intensiva de los reactivos en poco tiempo. Se ha reportado con éxito para la producción continua de biodiésel a partir de metanólisis catalizada de aceite de soya. Se produjo biodiésel con KOH como catalizador, aceite de soya y metanol (KOH al 3 % p/p, RM 6:1, 60 °C), con caudales de metanol (69 ml/h) y aceite (271 ml/h) a 900

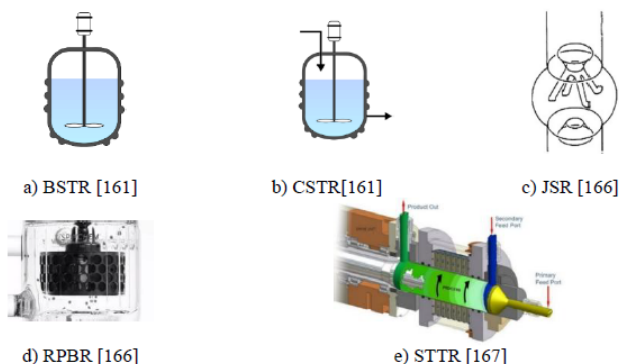
rpm de centrifugación, donde se alcanzaron rendimientos del 97,3 % y 0,83 mol/min con un tiempo de residencia de 43,2 s [165].

Otro reactor usado en la producción de biodiésel es el de tubo en tubo giratorio (STT) por sus siglas en inglés *Spinning Tube-in-Tube Reactor* (Ver Figura 17e). Este equipo es diseñado y comercializado en su gran mayoría por la empresa COSELLO. Este reactor consta de un tubo dentro de otro tubo con separaciones minúsculas de hasta los 0.25 mm en búsqueda de generar una capa tan fina y mediante la exposición a altas velocidades centrífugas (3 000-12 000 rpm) hacer reaccionar, en este caso particular, el aceite con el alcohol para permitir el proceso de transesterificación y con ello la obtención de biodiésel.

Según esta empresa, la aplicación del reactor STT puede aumentar el rendimiento del proceso de transesterificación hasta en un 3 %, independiente de la materia prima, y con una mejora significativa del tiempo de obtención. El proceso requiere alrededor de un 33% menos de capital inicial, no se requiere un paso de lavado con agua y, por lo tanto, ahorra agua generando una recuperación más rápida de la inversión. Así como su implementación, la cual ocupa poco espacio respecto a otros dispositivos de igual funcionamiento.

Figura 17

Tipos de reactores rotativos



Fuente: Elaboración propia (2025)

Tabla 14*Comparación entre reactores batch, semibatch y continuo.*

Reactor	Materia prima	Alcohol (RM) ^a	Catalizador (% p/p)	Condiciones de reacción	Tiempo [min]	Rendimiento (FAME %p/p)	Ref.
BSTR	Trioléina	Etanol (6:1)	KOH (1.0)	25 °C, 1800 rpm	5	70.00	[168]
BSTR	Higuerilla	Etanol (16:1)	NaOH (1.0)	30 °C, 400 rpm	30	99.00	[169]
BSTR	Jatropha	Etanol (6:1)	NaOH (2.0)	25 °C, 300 rpm	120	~100.0	[170]
BSTR	Soya/Girasol	Metanol (6:1)	NaOH (0.6)	60 °C, 550 rpm	60	93.41	[171]
BSTR	Canola	Metanol (6:1)	NaOH (3.0)	50 °C, 740 rpm	180	97.20	[172]
BSTR	Palma	Metanol (6:1)	KOH (1.0)	60 °C, 600 rpm	60	98.20	[173]
CSTR	Canola	Metanol (9:1)	KOH (0.5)	60 °C	60	95.13	[172]
CSTR	Colza	Metanol (7.8:1)	KOH	60 °C, tobera de 5mm a 15cm diámetro interno	3-8 mL/min	96.80	[174]
JSR	Aceite usado de cocina	Metanol (15:1)	KOH (4)	65 °C, dos inyectoras con toberas de 2 mm en tubo de 1 cm con flujo de 4 L/min	180	76.00	[175]

Fuente: Elaboración propia (2025). Nota: ^a Relación molar alcohol aceite

Los catalizadores más usados en el ámbito general de la producción de biodiésel (como se especificó en la sección 2.5.1) son el NaOH y el KOH, con una alta predominancia del metanol como alcohol (ver Tabla 14). Por su parte, la relación molar alcohol:aceite más frecuente es de 6:1. Asimismo, se observan tiempos de reacción prolongados para alcanzar rendimientos cercanos al 100%, los cuales se logran solo con el uso de equipo de laboratorio y bajo consideraciones específicas de reacción o adición de energía [176].

Reactores de reacción y separación simultáneos

Los reactores que permiten introducir reactivos (aceite y alcohol), producir una reacción (transesterificación) e ir separando los productos (ésteres y glicerina) son conocidos

como reactores simultáneos. Además, estos reactores proporcionan una excelente mezcla y, por lo tanto, se logra una mejor calidad y un mayor rendimiento de conversión. En esta sección se analizan dos clases de reactores: Los reactores de membrana y centrífugos anulares y una tecnología, la destilación reactiva que utiliza el principio de reacción y separación simultáneas para la producción de biodiésel.

Los reactores de membrana ofrecen una gran ventaja, pues en pequeños equipos, pueden efectuar procesos de mezcla y separación de una reacción de equilibrio como la transesterificación. Estos podrían usarse en la separación de líquidos, vapores y gases requeridos en una reacción de transesterificación con una alta transferencia de masa y en un solo proceso. Por esta razón, la intensificación de producción de biocombustibles es cada vez más atractiva para los investigadores de esta área, pero también, poco desarrollada.

Actualmente, son ampliamente usados o aplicados como paso complementario posterior a la obtención de biodiésel por procesos tradicionales (BSTR), para alcanzar normativas como la ASTM D 6761 y la DIN EN 14214, permitiendo con ello poder tener ésteres de hasta una pureza del 100%. Además, estas membranas pueden ser utilizadas como equipo que permite el tratamiento de aguas residuales generadas durante el proceso de separación y purificación del proceso tradicional de biodiésel.

La principal desventaja de la aplicación de estas membranas en procesos complementarios de la producción de biodiésel es el taponamiento de cualquiera de los dos tipos más comunes, fibra hueca o placa y marco. Así, como otra clasificación por la cantidad de materiales de los cuales estén compuestas, simples o compuestas; y de lo que estén estas fabricadas, orgánicas e inorgánicas. Siendo las membranas inorgánicas las más usadas en estos tipos de procesos [177]–[179].

Una de sus aplicaciones es la disminución del contenido de glicerina del biodiésel. Como el caso estudiado por Saleh et al. [180] quienes realizan un proceso de purificación del biodiesel logrando la disminución de la presencia de glicerol de 0.04% p/p a 0.013% p/p lo que traduce cerca del 59-79% de reducción en promedios generales. También se registran ahorros en la disposición de aguas para la purificación a cifras de 1 kg de agua para 500 L de biodiésel tratado, aplicando una membrana inorgánica; respecto a 70 kg de agua para los mismos 500 L de biodiésel tratado.

Torres et al. [181] prepararon una membrana compuesta por fibras poliméricas, de nanofiltración, la cual denominaron PVDF-12SI, cubrieron la superficie de la membrana asimétrica con dicloruro de vinilideno al 12% p/p de hexano. Esta membrana de nano filtrado logro reducir con ciclos de trabajo de 20 veces en un 70% el glicerol y 69 de los glicéridos presentes en la muestra a una tasa de rechazo de 7.4 L/m² por hora de trabajo. Moyo et al. [182] no solamente realizó filtrados para la purificación del biodiésel, sino produjo biodiésel con aceite usado de cocina, usando altos porcentajes de catalizador de KOH 1.3 % p/p TiO₂/Al₂O₃ obteniendo un rendimiento del 94.03% a una temperatura de 58.5 °C con un flujo de 18.78 mL/min.

Los rectores anulares centrífugos de contacto (ACC) por sus siglas en inglés *Annular centrifugal contactors*, son equipos que han sido desarrollados en su gran medida en las últimas cuatro décadas. Este tipo de sistemas permiten realizar las separaciones de fluidos no miscibles por diferencia de densidades y adición de energía por las fuerzas centrífugas. El efecto de separación producido por los ACC es trecientas veces mayor que los efectos causados por una separación por gravedad.

Debido a las velocidades centrífugas con que este funciona y el tiempo de permanencia en un reactor de una etapa, no

es apto para producir una reacción de transesterificación por tan solo ser de 10 segundos el tiempo de permanencia promedio. Por esta razón, se han efectuado modificaciones que permiten que estos sistemas puedan generar biodiésel manteniendo un poco más los reactivos. Por ejemplo, *Un-Energie* en cooperación el *Oak Ridge Nacional Laboratory* generaron un novedoso sistema de ACC que incrementa el tiempo de residencia considerablemente obteniendo con 0.6% de catalizador básico y una relación molar metanol aceite 5.1:1 y tres pasos las restricciones de triglicéridos estipuladas por la norma; esto lo logra hacer en dos minutos, una presión de 260 kPa, 80 °C [183]. Además, para obtener un rendimiento del 95% se requiere de diez minutos, sometiendo a la mezcla reaccionante a cinco pasos por el ACC. También, que las mejores condiciones de reacción encontradas minimizando el tiempo es un tiempo en promedio de un minuto bajo una temperatura de 60 °C y 4 200 rpm [183].

CINC Industries realizó estudios que permiten aumentar la capacidad de obtención de 1.9 a 767 L/min, lo cual es una demanda gigantesca respecto a otros procesos convencionales. Esto lo logra adicionando cuatro placas internas que aumentan el contacto entre las sustancias no miscibles en reacción. Estos sistemas fueron probados por diferentes investigadores. Particularmente, Abduh et al. [184] obtiene un rendimiento del 98% al hacer reaccionar etanol con una relación molar de 6:1 con 1% p/p de catalizador (C_2H_5ONa) y *Jatropha Curcas*. A su vez, Kraaj et al. [185] obtiene biodiésel a flujos máscos de 12.6 a 3.1 mL/min, metanol con una relación molar aceite de girasoles de 6:1, 60 °C y 2 100 rpm. Sin embargo, se encontró que el proceso es adecuado para unidades de biodiésel movilizado a pequeña escala con una excelente respuesta en su rendimiento, pero no se registran resultados en unidades de tamaño considerable.

La destilación es un proceso innovador desarrollado para la aplicación del biodiésel en los últimos años, en este se busca obtener mediante la adiciones excesivas de alcohol el cual se recupera de manera simultánea altos rendimientos de conversión. En este proceso una de las alternativas es realizar reacciones estequiométricas, pero presentan dificultades de rendimiento. Mientras por otro lado el exceso de alcohol garantiza que la reacción se cargue más al lado de ésteres y glicerol. La principal dificultad de estos sistemas es su alto costo de capital inicial y procesos operativos más complejos respecto a sistemas tradicionales.

La transesterificación puede realizarse veinte veces más rápida que en los procesos convencionales de destilación, lo que causa una disminución significativa de los costos de producción de biodiésel. Por otro lado, se logra 43% menos calor que los procesos convencionales, teniendo catalizadores en su gran mayoría heterogéneos que permiten realizar la transesterificación de forma continua, sin necesidad de recuperar el catalizador homogéneo inmerso en la solución. En la gran mayoría de procesos se prefiere presurizar las líneas hasta 3 atm para mejorar notoriamente los rendimientos [147].

Noshadi et al. [186] obtuvo biodiésel de forma continua de aceite usado de cocina con metanol y catalizadores heterogéneos a un flujo de 116.2 mol/h en un sistema de destilación reactiva. Donde obtuvo un rendimiento de biodiésel del 94%, este porcentaje, aunque elevado, no es normativo. Posiblemente, se debió a dificultades en los procesos de calefacción y las potencias nominales de la caldera las cuales no suministraban el suficiente calor para elevar de una forma más rápida la temperatura, a valores superiores a 30 °C según lo reportado por este autor.

Por otro lado, He et al. [187] diseñaron un equipo a escala de destilación reactiva formado por 20 platos de tamiz

para la producción continua de 75 mL/min, obteniendo rendimientos del 90.7% con aceite de canola, metanol a una relación molar de 4:1 y catalizador heterogéneo KOCH_3 con concentraciones de 30% p/p. Los dos estudios reportados anteriormente muestran ser muy prometedores, pero aun esta tecnología no alcanza su total desarrollo y la competencia respecto a reactores del tipo convencional se encuentra limitado por tasas de retorno muy altas. Además, que en su gran mayoría estas columnas son usadas para purificaciones de biodiésel y no para la producción directa de este.

Reactores de microondas

Los reactores de microondas son aquellos dispositivos que usan elementos para confinar un fluido bajo la tecnología de microondas; que son una irradiación de base electromagnética con longitudes de onda que van de 0,01 a 1 [m] con frecuencias correspondientes de 0,03 a 300 GHz [188], [189]. Las ventajas de la generación de irradiación de microondas sobre reactivos como el aceite y el alcohol es el fácil control, aumento de eficiencia térmica y menores tiempos de reacción; además, productos más limpios y menos procesamiento. A pesar de las excelentes características, existen problemas asociados a la dificultad de un control preciso de potencia y temperatura, llevando consigo baja reproducibilidad de un proceso. En su gran mayoría estos equipos están disponibles en materiales como el polietercetano, cuarzo o carburos de silicio.

Algunos estudios han sido realizados en modificaciones de hornos comerciales de microondas, lo que permite una facilidad de aplicación y maximización de recursos, pero con las limitantes de presión inferiores a los 8 MPa y temperaturas de 300 °C [190]. También, en algunas aplicaciones se hace necesario la implementación de agitadores para mejorar las mezclas y poder generar un biodiésel más uniforme debido a los reactivos no miscibles.

La producción de biodiésel puede ser asistida con energía de microondas a través de dos maneras principalmente, una de estas, la extracción de aceite de algunas materias primas y la reacción de transesterificación del aceite en biodiésel. La segunda manera, la radiación de microondas como una alternativa para el sistema de calefacción. El mejor alcohol como aceptor de acilo para la producción de biodiésel asistida por microondas es el metanol debido a la presencia del grupo hidroxilo (-OH), el cual proporciona características polares y un comportamiento con mayor conversión [191]–[193].

Algunos resultados presentados en la literatura muestran excelentes rendimientos y fácil escalamiento, pero desafortunadamente aún no se realiza un escalamiento o estudio para producciones masivas o tipo planta piloto. Algunos ejemplos de estudios son como lo desarrollado por Milap et al. [194] quienes optimizaron la producción de biodiesel asistida por microondas del aceite de papaya obteniendo con una potencia nominal de 700 W biodiésel con excelentes rendimientos de cerca del 99.9% bajo una relación molar metanol aceite de 9.5:1 y una concentración de 0.95% p/p de NaOH como catalizador. El equipo utilizado fue la modificación de un horno de microondas comercial. Otros autores como Sharma et al. [195] han obtenido biodiésel por microondas con potencias de 180 a 450 W. Para los desarrollos experimentales mostrados muestran que se obtienen rendimientos de cerca de del 96% p/p usando KOH catalizador y del 90 %p/p con CaO. Se han desarrollado revisiones extensas donde se presentan múltiples resultados a través de esta técnica con potencias desde los 80 W hasta 1 200 W y rendimientos de producción hasta del 99.9 % p/p con diversos catalizadores homogéneos, heterogéneos, ácidos y básicos [196].

Reactores de cavitación

La energía disipada puede ser clasificada en acústica, de flujo, óptica y de partículas. En las dos primeras es posible tener presentes fenómenos de cavitación (acústicas y de flujo). La intensificación por cavitación se debe a las grandes densidades de energía producto del crecimiento y posterior colapso generado por el cambio de fase de una sustancia. Esta energía puede ser aprovechada por reacciones en proceso, como el caso particular de transesterificación [197].

La aplicación de la cavitación mejora las características físicas y químicas dentro del reactor, debido a que se permite altas presiones de alrededor de cien megapascals y temperaturas de miles de grados celsius. La cavitación también facilita el proceso de transporte y la intensidad de la mezcla consecuencia de remolinos formados por las ondas de choque y transición acústica que permiten altas tasas de transferencia de energía en forma de calor y presión. Además, los radicales libres responsables de las transformaciones químicas son influenciados por la cavitación, lo que permiten en este caso particular la formación de ésteres rápidamente en una reacción de transesterificación a partir de triglicéridos [198].

Las características más importantes en la generación de cavitación es el tamaño máximo y la duración de la cavidad. Durante la transesterificación de los aceites en este tipo de reactores se generan emulsiones muy finas debido a la alteración del flujo y la mezcla causadas por el colapso cavitacional cerca o en la interfaz de los dos líquidos en reacción. En consecuencia, aumenta el área de superficie en la que el alcohol, el catalizador y el aceite interactúan entre sí, seguido de un aumento en la velocidad de reacción. Las ventajas de la cavitación como técnica emulsionante es la generación de emulsiones más pequeñas y estables que

las técnicas convencionales en presencia de poco o ningún tensoactivo, lo cual es perfecto para sistemas bifásicos [147].

La segunda sección del capítulo tres presentará a profundidad una revisión de esta técnica como intensificador en la reacción de transesterificación.

TIEMPO DE RESIDENCIA

Los reactores son los equipos donde se lleva a cabo la reacción de transesterificación, en esta se realiza la mezcla de fluidos no miscibles como lo son los alcoholes de cadena corta y los triglicéridos. En estos equipos influyen parámetros como el tiempo de residencia, si se realizan en forma continua, semi continua o batch. Independiente del tipo de reactor se debe tener una relación clara entre la velocidad de conversión y el fenómeno que está ocurriendo, es decir, sea por agitación y calentamiento, fenómenos de aportación energética abrupta como las microondas, la cavitación o los procesos supercríticos.

Por otro lado, los reactores discontinuos deben ser evaluados teniendo en cuenta la cantidad de muestra que ingresa y las propiedades que tiene; y compararla con la muestra que salga, de esta manera realizando una parametrización de la velocidad de reacción y el aumento en la misma al pasar por el reactor. El parámetro para los reactores discontinuos y discontinuos que más es caracterizado, corresponde a la distribución del tiempo de residencia (velocidad de conversión) RTD y la temperatura. Así como para algunos reactores continuos el flujo del sistema [199]. A continuación, se describe un breve comportamiento del tiempo de reacción de diversos tipos de reactores.

Los reactores de flujo continuo (CSTR) y los reactores de flujo pistón (PFR), presentan altos valores de RTD debido a la mezcla de vórtices y turbulencias a través de sus tuberías, también la presencia de zonas muertas e incluso la falla

del sistema de mezcla, es decir, presencia de mayores concentraciones de reacciones anteriores [200]. Este tipo de reactores deben ser controlados respecto al proceso de transesterificación, pues tiempos prolongados pueden generar degradación de los compuestos en reacción, así como exposición a altas temperaturas afectando al rendimiento de la reacción; la falta de tiempo de reacción puede impedir un rendimiento alto.

Algunas consideraciones de los reactores semicontinuos es la determinación del tiempo de reacción el cual se estima como el volumen del reactor dividido por el caudal; esta consideración es tomada en cuenta también para sistemas de reactores continuos si no hay una reposición de reactivos.

Algunos autores como Darnoko et al. encontraron la curva de tiempo de residencia en comparación con el rendimiento (esteres metílicos producidos) para aceite de palma en un CSTR, esta presenta un comportamiento logarítmico al aumentar el tiempo de residencia; encontrando que, para un reactor de flujo continuo, a los 60 minutos no existe una variación notoria en el rendimiento máximo, considerándose así como el tiempo óptimo de reacción [201]. Mientras que otros investigadores como Fonseca et al. [202] y Daniyan et al. [154] encontraron que para tiempos mayores de reacción podría ocasionar una evaporación o degradación del biodiésel, lo que generaría una disminución en el rendimiento y en la conversión general del proceso.

Algunos autores como Amalu et al. [203] estudian el comportamiento del tiempo de reacción variando en intervalos de 15 minutos en un rango de 30 a 120 minutos. Realizando una catálisis alcalina con KOH al 1% p/p y etanol a 60 °C con 20% p/p de aceite, encontrando que posteriormente a los 90 minutos no hay una variación notoria en el proceso de transesterificación planteado. Falahati et al. [153] determinaron qué tan importante es

el flujo y el tiempo de reacción de la síntesis de biodiésel a partir de diversos aceites, en un reactor de membrana; encontrando que el tiempo de reacción es el principal factor, seguido de la presión del reactor.

Otro estudio desarrollado por Azam et al. [204], investiga el efecto del catalizador y el tiempo de reacción a partir de aceite de palma en un reactor de microtubos. Los resultados mostraron que el rendimiento fue directamente proporcional al porcentaje de catalizador y al tiempo de reacción. Este comportamiento es justificado, pues un proceso completo de transesterificación en periodos de tiempo prolongado tiene dificultades mencionadas anteriormente, como exposición a altas temperaturas y degradación de compuestos.

Otras investigaciones como las de Rahimi et al. [149] encontraron que para transesterificación de aceite de palma y soya en un reactor de milicanales y microcanales se presenta esta misma tendencia de comportamiento respecto al tiempo de residencia, rendimiento y catalizador.

CONTROL DE CALIDAD DEL BIODIÉSEL

El desarrollo de estándares de biodiésel comenzó en la década de 1990, para respaldar el uso creciente de biodiesel a base de ésteres alquílicos y sus mezclas como combustibles para automóviles. La ASTM International (anteriormente Sociedad Americana para Pruebas y Materiales) adoptó una especificación provisional llamada PS121 en 1999 para biodiésel. La primera norma ASTM (ASTM D6751) se adoptó en 2002 [36]. Por otra parte, en Europa la norma de biodiesel EN 14214 (basada en la antigua DIN 51606) se finalizó en octubre de 2003. Las normas de EE. UU. y la UE tienen importancia internacional. Por lo general, son el punto de partida de las especificaciones de biodiésel desarrolladas en otros países.

Los enfoques de estas dos normas difieren, pues en los EE. UU la ASTM D6751 establece especificaciones para una serie de mezclas de biodiesel para combustibles destilados. Si bien la especificación se escribió para B100, no está diseñada para el biodiesel puro que se usa como combustible en vehículos. Más bien, es para las especificaciones que deben tener cada una de las mezclas del biodiesel con el diésel incluyendo desde un 5% (B5) hasta un 100% (B100).

El biodiésel es un combustible renovable proveniente de aceites vegetales o grasas de origen animal, que puede ser usado total o parcialmente para reemplazar el combustible diésel de los motores de autoignición sin requerir una modificación significativa [205][206]. El uso del biodiesel como combustible y aditivo ha sido aprobado en Estados Unidos por la Agencia de Protección del Medio Ambiente (EPA)[207]. Ha sido catalogado como un combustible limpio, siempre y cuando sus características fisicoquímicas se encuentren dentro de las especificaciones de las normas europeas.

Normas ASTM D6751

La especificación de EE. UU., ASTM D6751 [36], define el biodiesel como ésteres monoalquílicos de ácidos grasos de cadena larga derivados de aceites vegetales y grasas animales. El tipo de alcohol utilizado no está especificado. Por lo tanto, los ésteres monoalquílicos podrían producirse con cualquier alcohol (metanol, etanol, etc.) siempre que cumpla con los requisitos detallados descritos en la especificación del combustible (Ver Tabla 15). Al exigir que el combustible sea ésteres monoalquílicos de ácidos grasos de cadena larga, se excluirán intrínsecamente otros componentes, con la excepción de los aditivos.

Tabla 15
Especificaciones ASTM D 6751.

Propiedad	Método de prueba ASTM	Límites	Unidades
Punto de inflamación	D 93	130 mín	°C
Agua y sedimentos	D 2709	0.050 máx	% volumen
Viscosidad cinemática	D 445	1.9-6.0 ^c	mm ² /s
Cenizas sulfatadas	D 874	0.020 máx	% masa
Contenido de azufre	D 5453	0.05 máx	% masa
Corrosividad	D 130	No. 3 máx	
Numero de cetano	D 613	47 mín	
Punto de nube	D 2500	Reportado	°C
Carbono residual	D 4530	0.050 máx	% masa
Numero ácido	D 664	0.8 máx	mg KOH/g
Glicerina libre	D 6584	0.020	% masa
Glicerina total	D 6584	0.240	% masa
Contenido de fósforo	D 4951	0.001 máx	% masa
Temperatura de destilación al 90% recuperado	D 1160	360 máx	°C

Fuente: Elaboración propia (2025)

Esta especificación cubre el stock de mezcla de combustible biodiésel, B100, en los grados S15 y S500 para su uso como un componente de mezcla con combustibles destilados (diésel). Esta especificación prescribe las propiedades requeridas de los combustibles diésel en el momento y lugar de entrega. El biodiésel especificado debe ser ésteres mono alquílicos de ácidos grasos de cadena larga derivados de aceites vegetales o grasas animales. El producto se someterá a un análisis químico para el punto de inflamación, metanol, agua y sedimento, viscosidad cinemática, ceniza sulfatada, estabilidad a la oxidación, azufre, corrosión de la tira de

cobre, número de cetano, punto de niebla, índice de acidez, residuo de carbono, glicerina total y libre, fósforo, reducción de la presión de la temperatura de destilación, porcentaje de calcio, magnesio y sodio.

Desde 2012, el estándar ASTM D6751 [36] define dos grados de biodiésel: Grado S500 (idéntico al biodiesel definido por versiones anteriores del estándar) y grado S15 con controles más estrictos de monoglicéridos y capacidad de filtración en frío. La ASTM ha publicado dos estándares para combustibles tipo diésel como a su vez para mezclas de combustible diésel/biodiésel:

La ASTM D975 que muestra la especificación estándar del diésel/biodiésel, la cual se modificó en 2008, para permitir que se mezcle hasta el 5% de biodiésel en el combustible [208].

La ASTM D7467 es una especificación para mezclas de biodiésel de B6 a B20, es decir desde 6% a 20% de biodiésel en una mezcla [209].

Normas UNE EN 14214

En Europa, las especificaciones estándar se han desarrollado para el combustible diésel FAME sin mezclar, así como para ciertas mezclas de biodiesel de alto porcentaje (superior al 7 %), mientras que las mezclas de bajo porcentaje están cubiertas por la EN 590 [210]; la especificación del combustible diésel y biodiésel europeo tiene algunas características como:

- La EN 14214 establece especificaciones para los ésteres metílicos de ácidos grasos para motores diésel. A diferencia de la norma ASTM D6751, B100 el cumplimiento de esta norma determina que se puede usar sin mezclar en un motor diésel (si el motor ha sido adaptado para funcionar con B100) o mezclarse

con combustible diésel para producir una mezcla de acuerdo con la norma EN 590 u otras normas aplicables [211].

- EN14214: 2012 introdujo una serie de cambios que incluyen una expansión del alcance para cubrir aplicaciones de combustible aplicados a sistemas de calefacción y actualizaciones para cubrir mezclas hasta B10. También se estableció un conjunto adicional de clases climáticas basadas en el contenido de monoglicéridos [211].
- Las mezclas de biodiésel / diésel hasta B7 están cubiertas por EN 590. EN 590: 2004 permitieron mezclas de hasta 5% de metil éster de ácido graso (FAME) en combustible diésel, mientras que EN 590: 2009 aumentó el contenido permitido de FAME a 7% [210].
- La norma EN 16709, introducida en 2015, cubre las mezclas B20 y B30 para el uso en motores y aplicaciones marítimas. El componente FAME en EN 16709 debe cumplir con EN 14214 y el componente diésel con EN 590 [212].

La especificación europea de biodiesel, EN 14214, es más restrictiva y se aplica solo a los ésteres monoalquílicos elaborados con metanol, ésteres metílicos de ácidos grasos (FAME) (Ver Tabla 16). El contenido mínimo de éster se especifica en 96.5% [211]. No se permite la adición de componentes que no sean ésteres metílicos de ácidos grasos, aparte de los aditivos.

Los fabricantes de automóviles y motores de América del Norte y del Sur, Europa y Asia también han adoptado las directrices para B100 que se utilizan para hacer mezclas de combustible biodiésel/diésel. Estas pautas tienen cierta semejanza con la norma EN 14214, pero existen algunas diferencias notables que incluyen:

- Limitar las mezclas a B5 máximo.
- Aumentar la estabilidad a la oxidación de B100 a 10 h.
- Introducir un requisito de estabilidad a la oxidación para mezclas que limite el aumento de TAN a menos de 0.12 mg KOH/g.
- Reducción del límite de ceniza sulfatada a 0.005% desde 0.02% e introduciendo un límite de ceniza de 0.001%.
- Introducción de un límite de corrosión ferrosa.
- Adición de agua libre y límite de sedimento.
- Disminución de límites para viscosidad cinemática.

Tabla 16

Especificaciones UNE EN 14214.

Propiedad	Unidades	Mínimo	Máximo	Método de prueba
Contenido de esteres	%(m/m)	96.5		EN 14103
Densidad @15°C	kg/m ³	860	900	EN ISO 3675 EN ISO 12185
Viscosidad @40°C	mm ²	3.5	5	EN ISO 310
Punto de inflamación	°C	ABOVE 101		ISO/CD 3679
Carbón residual	%(m/m)		0.3	EN ISO 10370
Número de cetano		51		EN ISO 5165
Contenido de ceniza	%(m/m)		0.02	ISO 3987
Contenido de agua	mg/kg		500	EN ISO 12937
Contaminantes totales	mg/kg		24	EN 12662
Corrosión (3 hrs 50°C)	Rating	Clase 1	Clase 1	EN ISO 2160
Estabilidad oxidativa (110°C)	Horas	6		PR EN 14112
Número ácido	mg KOH/g		0.5	PR EN 14104
Número de yodo			120	PR EN 14111
Metilesteres de ácido linolénico	%(m/m)		12	PRE EN 140103
Esteres metílicos polinsaturados () de dobles enlaces	%(m/m)		1	
Contenido de metanol	%(m/m)		0.2	PR EN 14110

Contenido de monoglicéridos	%(m/m)	0.8	PR EN 14105
Contenido de diglicéridos	%(m/m)	0.2	PR EN 14105
Contenido de triglicéridos	%(m/m)	0.2	PR EN 14105
Glicerina libre	%(m/m)	0.2	PR EN 14105 PR EN 14106
Glicerina total	%(m/m)	0.25	PR EN 14105
Metales Alcalinos (K - Na)	mg/kg	5	PR EN 14108 PR EN 14109

Fuente: Elaboración propia (2025)





***Cuando las leyes de la matemática se refieren a
la realidad, no son ciertas; cuando son ciertas,
no se refieren a la realidad...***

Albert Einstein



CAVITACIÓN

A través del tiempo se han logrado estudiar y demostrar comportamientos de los fluidos bajo diversas alteraciones observadas por el hombre. Específicamente, la corrosión en piezas metálicas luego de un tiempo de funcionamiento, enfatizada en regiones específicas de las hélices de un barco o en zonas de depresión de una válvula. Luego de algún tiempo se encontró que el fenómeno responsable de esta alteración era la cavitación. Más adelante y con el paso del tiempo se ha estudiado este fenómeno para aprovechar el cambio de fase y la energía de este en la aceleración de reacciones químicas, limpieza de agua residuales, entre otros. Este fenómeno se estudiará y describirá fenotípicamente a lo largo de este capítulo mostrando las ventajas y desventajas que presenta; así como una breve revisión bibliográfica sobre la aplicación en la obtención de biodiésel.

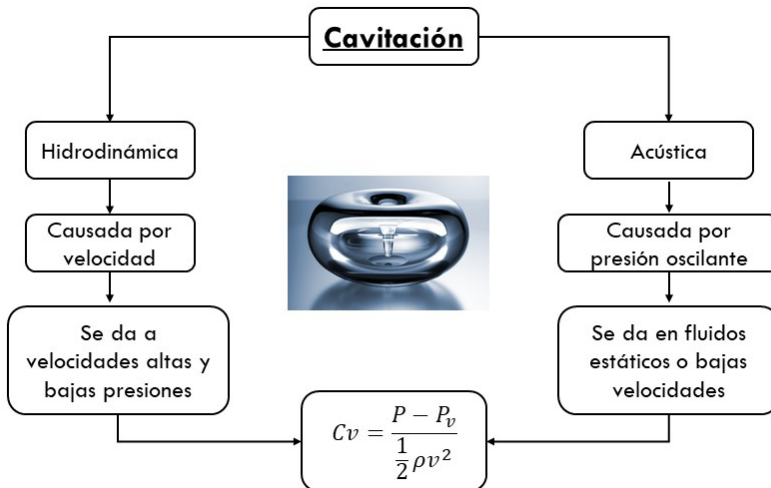
EL FENÓMENO DE CAVITACIÓN

La palabra cavitación proviene del latín *cavus*, que significa cavidad e indica la formación de burbujas compuestas de la fase gaseosa y/o vapor de un fluido. Más puntualmente puede definirse como la ruptura del líquido, antepuesta de la formación de burbujas de gas (cavidades) las cuales han crecido, desarrollado e implosionado a velocidades mayores que la del sonido, emitiendo ondas de choque (ondas de presión abrupta). La presencia de la cavitación se puede generar por diversos fenómenos, y su generación se da a presiones muy bajas [213].

La cavitación es relevante para el campo de la mecánica continua y se aplica a casos en los que el líquido está estático o en movimiento. La cavitación hidrodinámica, es decir, la

cavitación en líquidos que fluyen. Esto incluye flujos a través de boquillas Venturi, en pasajes estrechos (por ejemplo, válvulas hidráulicas) o alrededor de alas o palas de hélice. Sin embargo, la cavitación también puede ocurrir en un líquido estático o casi estático. Cuando se aplica un campo de presión oscilante sobre la superficie libre de un líquido contenido en un depósito, pueden aparecer burbujas de cavitación dentro del volumen del líquido si la amplitud de la oscilación es lo suficientemente grande. Este tipo de cavitación se conoce como cavitación acústica (Ver Figura 18). Otro ejemplo de cavitación en un líquido casi en reposo es la aceleración repentina y rápida de un cuerpo sólido con bordes afilados (una pala) en agua tranquila. Las burbujas pueden aparecer cerca de estos bordes casi instantáneamente, mientras que la velocidad del líquido sigue siendo insignificante. La definición anterior de cavitación introduce el concepto de un umbral de presión, por debajo del cual ya no se garantiza la cohesión del líquido. Idealmente, el umbral se determina a partir de consideraciones físicas a escala microscópica [214].

Figura 18
Tipos de cavitación



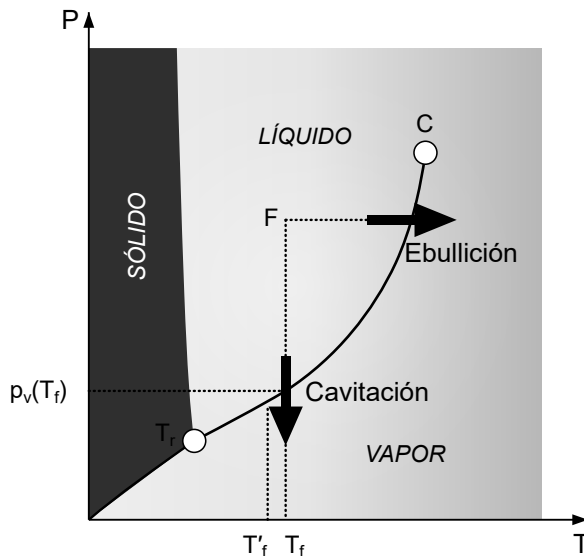
Fuente: Elaboración propia (2025)

Presión de vapor

Desde el punto de vista de la termodinámica clásica, se pueden considerar dos dominios (líquido y vapor). La ebullición es debido a un mecanismo impulsor de temperatura, mientras que la cavitación el mecanismo que lo produce es la presión a condiciones de temperatura casi constante. En el diagrama de fase presentado (Ver Figura 19), T_r representa la línea triple hasta el punto crítico C que separa los dominios líquido y vapor.

Figura 19

Diagrama de fases para del agua [214]



Fuente: Tomado de Franc y Michel (2006)

Cruzar esa curva de manera horizontal representa una transformación reversible en condiciones de equilibrio, es decir, la evaporación o condensación del fluido a una presión igual a su presión de vapor, la cual depende únicamente de la temperatura. Bajo este principio, la cavitación puede producirse al reducir la presión del líquido manteniendo una temperatura casi constante, como ocurre localmente en

flujos reales. Por ello, la cavitación es análoga a la ebullición, excepto que el mecanismo impulsor no es un cambio de temperatura, sino una disminución de presión controlada por la dinámica del flujo [215].

Particularmente, para el fenómeno de cavitación presenta una variación de la temperatura en su generación, la cual es denominada retraso térmico de cavitación ($T_f - T_f'$). La magnitud de este fenómeno incrementa conforme la temperatura ambiente se acerca a la temperatura crítica del fluido. El fenómeno es importante cuando líquidos criogénicos son transportados.

Cavitación en flujos de líquidos reales

Para fines prácticos, resulta útil distinguir dos etapas en el desarrollo de la cavitación; el inicio, que corresponde al límite entre el flujo sin cavitación y con cavitación; y la cavitación desarrollada, caracterizada por su permanencia, mayor extensión o una caída significativa en el rendimiento de las máquinas. La distinción es importante en el contexto de la aceptación o no de la cavitación en situaciones industriales. En el caso de cavitación no desarrollada, los umbrales de inicio o desarrollo son de interés por la comunidad científica, pues representa grandes zonas de estudio poco exploradas. Para la cavitación desarrollada, los fabricantes de dispositivos hidráulicos deben centrarse en las consecuencias de la cavitación en el funcionamiento de sistemas clásicos.

Algunas superficies como la pared de un sistema hidráulico pueden dar lugar a aumentos bruscos de velocidad local y caídas de presión resultantes dentro de un flujo globalmente estable. Esto sucede en el caso de una restricción en el área de la sección transversal de los ductos de líquido (boquillas Venturi), o debido a la curvatura impuesta a las líneas de flujo por la geometría local (curvas en el flujo de la tubería, lados superiores de las palas en hélices y bombas).

La cavitación también puede ocurrir en flujos de corte debido a grandes fluctuaciones de presión turbulenta (chorros, estelas, etc.). La naturaleza inestable básica de algunos flujos (por ejemplo, golpe de ariete en circuitos de control hidráulico o conductos de plantas de energía hidráulica o en las líneas de alimentación de combustible de motores diésel), puede resultar en una fuerte aceleración del fluido y, en consecuencia, en la producción instantánea de bajas presiones en algunos puntos en el flujo que conducen a la cavitación.

La rugosidad local de las paredes (por ejemplo, las paredes de hormigón de los aliviaderos de presas) produce estelas locales en las que pueden desarrollarse pequeñas cavidades adheridas. Como consecuencia del movimiento vibratorio de las paredes (por ejemplo, refrigeración líquida de motores diésel, dispositivo de erosión estándar A.S.T.M.E.) se crean campos de presión oscilantes que se superponen a un campo de presión uniforme. Si la amplitud de la oscilación es lo suficientemente grande, puede aparecer cavitación cuando se produce la oscilación negativa. Finalmente, el caso de cuerpos sólidos que son repentinamente acelerados por un choque en un líquido inactivo, particularmente si tienen bordes afilados. La aceleración del líquido necesaria para rodear estos bordes produce bajas presiones incluso si las velocidades son relativamente pequeñas inmediatamente después del choque.

Principales efectos de la cavitación en la hidráulica

Si un sistema hidráulico está diseñado para operar con un líquido homogéneo, las estructuras de vapor adicionales debidas a la cavitación pueden interpretarse, por analogía, con el caso de los sistemas mecánicos tomando el líquido como un sistema no deformable. Las estructuras de vapor son a menudo inestables, y cuando alcanzan una región de mayor presión, a menudo colapsan violentamente ya que

la presión interna apenas varía y permanece cercana a la presión de vapor. El colapso puede considerarse análogo a los choques en los sistemas mecánicos por los cuales desaparecen las holguras entre piezas vecinas. A raíz de esto, cabe esperar una serie de consecuencias, como:

- Alteración de las prestaciones del sistema (reducción de la sustentación y aumento de la resistencia aerodinámica de una lámina, caída del rendimiento de las turbomáquinas, reducción de la capacidad de evacuación de agua en vertederos, disipación de energía, etc.).
- Aparición de fuerzas adicionales sobre las estructuras sólidas.
- Producción de ruido y vibraciones.
- Erosión de la pared, en el caso de cavitación desarrollada si la diferencia de velocidad entre el líquido y la pared sólida es lo suficientemente alta.

Así, a primera vista, la cavitación se presenta como un fenómeno nocivo que debe evitarse. En muchos casos, la condición de cavitación libre constituye el escenario más severo al que se enfrenta el diseñador o el investigador. Para evitar los elevados costos asociados con esta situación, se puede permitir un grado limitado de cavitación, siempre que sus efectos se mantengan bajo control. Si bien suelen enfatizarse sus impactos negativos, la cavitación también se emplea en diversos procesos industriales para concentrar energía en regiones muy pequeñas y generar picos de alta presión, lo que resulta beneficioso en múltiples operaciones químicas. Algunos ejemplos de cavitación aplicada con fines favorables, ya sea de tipo hidrodinámico o ultrasónico, incluyen:

- Limpieza de superficies por ultrasonidos o con chorros de cavitación.
- Dispersión de partículas en un medio líquido.

- Producción de emulsiones.
- Deposición electrolítica (las capas de iones que cubren los electrodos se descomponen por cavitación, acelerando el proceso de deposición).
- Masajes terapéuticos y la destrucción de bacterias en el campo de la ingeniería médica.
- Limitación de caudales en flujos confinados debido al desarrollo de supercavidades.

Características específicas de flujo cavitante

En flujos sin cavitación, el nivel de presión de referencia no tiene efecto sobre la dinámica del flujo y solo se presta atención al gradiente de presión. Por otro lado, los flujos de cavitación dependen principalmente de este nivel, ya que, simplemente bajando la presión de referencia, la cavitación puede aparecer y desarrollarse. Por lo tanto, es esencial considerar el valor absoluto de la presión y no simplemente su gradiente.

Para predecir el inicio de la cavitación mediante un análisis teórico o numérico, se debe comparar el valor calculado de la presión en una región crítica del flujo con un valor umbral, típicamente la presión de vapor. El método de cálculo depende de la configuración del flujo. En el caso de caudales unidimensionales y estacionarios en tuberías, la utilización de la ecuación de Bernoulli, teniendo en cuenta las pérdidas de carga, es suficiente para identificar la región de mínima presión junto con el valor de este mínimo. Los flujos estacionarios sin cizallamiento significativo como los flujos alrededor de las alas y las palas de las hélices pueden considerarse flujos potenciales.

Los métodos clásicos requieren que el problema cinemático se resuelva primero, con la presión nuevamente calculada usando la ecuación de Bernoulli. En estos casos, la presión mínima generalmente se ubica en el límite del flujo,

una conclusión generalmente respaldada por evidencia experimental. El caso del flujo de corte turbulento es uno de los más complicados. En consecuencia, hasta hace poco tiempo ha sido tratado experimentalmente y/o empíricamente.

El progreso en la dinámica de fluidos computacional ha hecho posible predecir el inicio de la cavitación, al menos para las configuraciones más simples. Recientemente se han obtenido algunos resultados alentadores en este campo. En el caso de los vórtices de punta, es posible utilizar modelos de vórtices simples, como los de Rankine o Burgers. Efectivamente, el problema se reduce a la estimación de dos parámetros: La circulación alrededor del vórtice y el tamaño de su núcleo viscoso.

La presión también juega un papel importante en el caso de cavitación desarrollada y es la fuente de complejidad adicional en el modelado de flujos de cavitación. Por ejemplo, el modelado de cavidades adheridas a láminas o álabes requiere una condición de presión constante a lo largo del límite de la cavidad. Esto modifica la naturaleza del problema matemático a resolver.

Desde el punto de vista físico, el cambio en la distribución de presiones provoca un cambio en el gradiente de presión, por lo tanto, un cambio en el comportamiento de la capa límite. Cuando una gran cantidad de burbujas explota en el lado de baja presión de una lámina, la distribución de presión inicial, sin cavitación, puede modificarse significativamente y la interacción entre el flujo básico, sin cavitación y el flujo burbujeante debe tenerse en cuenta. De igual forma, la evolución de los vórtices cavitantes turbulentos en una estela no se puede predecir a través de las ecuaciones habituales de la mecánica de fluidos que rigen la conservación de la masa y la circulación de los filamentos del vórtice. Cuando el núcleo de un filamento de vórtice cavita y se carga de

vapor, entonces depende del campo de presión local. En otras palabras, la cavitación rompe el vínculo entre la tasa de elongación de un filamento giratorio y su vorticidad, expresada por la relación clásica .

En el lado experimental, aparecen dos dificultades principales con respecto a la medición de la presión. En primer lugar, los transductores de presión que deben montarse al ras de las paredes para evitar perturbaciones en el flujo mismo no necesariamente brindan información valiosa sobre la presión dentro de un flujo turbulento de corte. La segunda dificultad es bastante técnica. Quedará claro, a partir de la discusión posterior, que los fenómenos relacionados con el colapso de la burbuja tienen un tamaño característico pequeño (menos de aproximadamente 0,1 mm) y una duración corta (del orden de un microsegundo). Esto significa que los transductores deben tener una resolución espacial muy pequeña y un tiempo de subida muy corto.

Estas condiciones no se cumplen fácilmente técnicamente. Además, en el caso de estudios de erosión, se deben medir presiones del orden de cientos de megapascuales, o incluso gigapascuales. Obviamente, la resistencia mecánica de los transductores de presión se convierte en un problema central para el experimentador.

En general, los estudios experimentales sobre el inicio de la cavitación y la física de la cavitación desarrollada emplean equipos especialmente configurados que se han potenciado progresivamente a lo largo de los años. La configuración más común es el túnel de cavitación; un circuito cerrado vertical con la sección de prueba en la parte superior y una bomba de circulación en la parte inferior. Esto evita problemas de cavitación dentro de la bomba, debido a la fuerza gravitacional. La presión absoluta en la sección de prueba se ajusta por debajo de la presión atmosférica, utilizando una

bomba de vacío. En algunos casos, es necesario un compresor para aumentar la presión por encima del nivel atmosférico.

Interfases líquido-vapor

Los flujos cavitantes, al igual que otros flujos líquido-gas bifásicos, se caracterizan por la presencia de numerosas interfases. Sin embargo, su respuesta a perturbaciones externas, por ejemplo, un aumento de presión puede ser muy diferente del caso de los flujos de líquido-gas. Los flujos de dos fases que contienen burbujas de gas no suelen estar sujetos a cambios rápidos en la densidad media (excepto en el caso de las ondas de choque). Esto se debe a que la naturaleza no condensable del gas confiere una especie de estabilidad global al flujo. Sin embargo, en los flujos de cavitación, las interfaces están sujetas por un lado a una presión constante, prácticamente igual a la presión de vapor. Por lo tanto, no pueden soportar un aumento o disminución de la presión externa sin evolucionar rápidamente tanto en forma como en tamaño, lo que genera que sean extremadamente inestables.

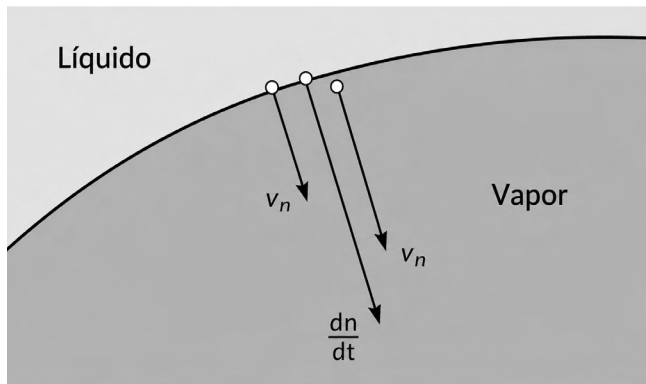
Es muy complejo utilizar sondas intrusivas para tomar medidas dentro de un flujo cavitante debido principalmente a la cavitación que genera la propia sonda. Sin embargo, si el líquido es transparente, es posible visualizar las interfaces, ya que reflejan la luz de manera muy efectiva. Las interfaces se pueden considerar generalmente como superficies materiales y su observación a partir de fotografías de una sola toma (duraciones de flash cortas del orden de un microsegundo) o de fotografías o videos de alta velocidad (a una velocidad típica de diez mil cuadros por segundo) da una idea de la dinámica del flujo. En lo referente al intercambio de líquido y vapor a través de una interfase, el caudal másico (por unidad de superficie) es proporcional a las velocidades normales del líquido o del vapor con respecto a dicha interfase. La conservación de masa en la interfase se expresa, según la Ec. (3.1):

$$\dot{m} = \rho_l \left[v_{ln} - \frac{dn}{dt} \right] = \rho_v \left[v_{vn} - \frac{dn}{dt} \right] \quad \text{Ec. (3.1)}$$

En esta ecuación, los índices l y v se refieren a las fases líquida y vapor respectivamente, y el índice n a la componente normal de las velocidades. El símbolo $\frac{dn}{dt}$ es la normal a la velocidad de la interfaz.

Figura 20

Interfaz líquido vapor flujo cavitante



Fuente: Elaboración propia (2025)

Hay dos efectos principales sobre los fenómenos de cavitación debido a una variación de temperatura esperable. Primero, a presión ambiental constante, un aumento en la temperatura del fluido resulta en una mayor capacidad para cavitarse. Son necesarias variaciones de presión menores para alcanzar la curva de cambio de fase, debido al aumento de la presión de vapor (ver Figura 20).

En segundo lugar, como la vaporización requiere la transferencia de calor desde el líquido poco a poco hasta la interfase líquido/vapor, el retardo térmico $T - T'$ (ver Figura 19) tiende a aumentar con la temperatura. Para resolver este problema donde se desconoce la temperatura dentro de la cavidad T' , se debe establecer una expresión de equilibrio térmico. Se plantea transferencia de calor por conducción

en el caso de burbujas. La convección es generalmente predominante en el caso de cavidades adjuntas.

Parámetros no dimensionales

En un sistema hidráulico susceptible de cavitarse como una turbina, bomba, compuerta o una lámina en un túnel hidrodinámico, se define como la presión en un punto de referencia convencional, donde es fácilmente medible. Por lo general, se elige en una región cercana a aquella donde se espera el inicio de la cavitación. Si es la temperatura de operación del líquido y una diferencia de presión que caracteriza el sistema, el número de cavitación (también llamado parámetro de cavitación o número de cavitación Thoma) está definido por [215]:

$$\sigma_v = \frac{P_r - P_v(T)}{\Delta P} \quad \text{Ec. (3.2)}$$

Donde, por ejemplo, para cada uno de los casos tendrá una forma diferente

- Para el caso de una compuerta

$$\sigma_v = \frac{P_{\text{Aguas abajo}} - P_v(T)}{P_{\text{Aguas arriba}} - P_{\text{Aguas abajo}}} \quad \text{Ec. (3.3)}$$

- Para una lámina colocada a una profundidad de inmersión h en un canal de superficie libre horizontal donde la presión en la superficie es P_0 y la velocidad de flujo:

$$\sigma_v = \frac{P_0 + \rho gh - P_v(T)}{\frac{1}{2} \rho U^2} \quad \text{Ec. (3.4)}$$

- Para una bomba donde V_p es la velocidad en la periferia del rotor.

$$\sigma_v = \frac{P_{\text{entrada}} - P_v(T)}{\frac{1}{2} \rho V_p^2} \quad \text{Ec. (3.5)}$$

Cabe señalar que el número de cavitación se define utilizando parámetros dinámicos y no geométricos. En un flujo sin cavitación, este parámetro adimensional no puede considerarse como un parámetro de escala. La diferencia no tiene importancia física para un flujo monofásico ya que no puede obtenerse mediante la integración del gradiente de presión a lo largo de un camino real de flujo. El parámetro de cavitación se convierte en un parámetro de similitud solo al inicio de la cavitación.

Algunos aspectos históricos

La palabra “cavitación” apareció en la literatura científica inglesa a finales del siglo XIX. Parece que el problema de la cavitación en maquinaria rotatoria que manipula líquidos fue identificado por Torricelli, y posteriormente por Euler y Newton. A mediados del siglo XIX, Donny y Berthelot midieron la cohesión de los líquidos. El efecto negativo de la cavitación en el rendimiento de la hélice de un barco fue observado por primera vez por Parsons (1893), quien construyó el primer túnel de cavitación. El número de cavitación fue introducido por Thoma y Leroux alrededor de los años 1923-1925.

Posteriormente, se llevaron a cabo muchos experimentos para estudiar los aspectos físicos del fenómeno y examinar sus efectos en los sistemas industriales. Los enfoques teóricos y numéricos fueron ampliamente utilizados. Había dos campos principales de investigación:

El primero se centró en la dinámica de las burbujas. La simplicidad de la forma esférica hizo que sus estudios (tanto teóricos como experimentales) fueran relativamente fáciles. Se ha publicado una gran cantidad de trabajos sobre la dinámica de las burbujas.

El segundo campo estaba relacionado con las cavidades o supercavidades desarrolladas y se basaba en la antigua teoría

de la estela. Esta teoría considera las estelas como regiones de presión uniforme, limitadas por superficies en las que la velocidad tangencial no es continua. Es más adecuado para estelas de cavitación que para estelas monofásicas. Posteriormente, Tulin y Wu [216], [217] hicieron uso de procedimientos de linealización para adaptar la teoría al caso de cuerpos esbeltos como alas y palas.

La cavitación de vórtices solo fue considerada más recientemente, en particular por Chahine y Ligneul [218], [219], quienes estudiaron los vórtices de toro y punta de cavitación, respectivamente.

Actualmente, la cavitación se puede evitar en múltiples instalaciones por diversos sistemas de control y es aprovechada en las reacciones químicas o reacciones de limpieza de aguas residuales, así como en tratamientos médicos debido a su alta tasa de liberación de energía [220], [221].

CAVITACIÓN PARA OBTENCIÓN DE BIODIÉSEL

La tecnología basada en la cavitación ha llamado mucho la atención como un método de extracción más ecológico, debido a su extracción rápida y eficaz de numerosos productos naturales en comparación con las técnicas convencionales. Las ventajas de la extracción basada en cavitación son eliminar la aplicación de solventes tóxicos, reducir el tiempo de extracción y lograr un mejor rendimiento de extracción, así como pureza. Los fenómenos de cavitación mejoran la eficiencia de extracción a través de una mayor tasa de transferencia de masa, debido a la intensa implosión de burbujas [222]. Este texto trata específicamente la intensificación de la reacción de transesterificación por el método de cavitación.

El principal desafío durante la producción de biodiésel es mejorar la cinética de la reacción química para aumentar

el rendimiento en condiciones favorables, lo que conduce a una síntesis más eficiente. Por esta razón, el problema a solucionar es acelerar la reacción entre dos sustancias de muy distinta naturaleza química, a saber, alcohol de cadena corta y triglicéridos. Debido a la inmiscibilidad entre fases, la transferencia de masa puede ser especialmente lenta. Como resultado, el biodiésel requiere relativamente alta cantidad de reactivos, tiempo de reacción y temperaturas, que van desde 45 a 65 °C, bajo condiciones de agitación y suministro de energía constante, este aspecto es crucial para mejorar la transesterificación [32].

Por lo general, este problema se resuelve calentando y agitando la mezcla de reacción. En síntesis, orgánica, los reactivos se calientan y agitan utilizando calentadores tradicionales en termostáticos, baños de agua y barras de agitación magnética. Este es un método lento e ineficiente para suministrar energía a mezcla de reacción porque la transferencia de calor depende de las corrientes de convección y conductividad térmica de la mezcla de reacción. Además, genera gradientes térmicos que podrían conducir a los reactivos o productos a descomponerse. Por eso, en los últimos años, diferentes estrategias que implican la reducción del tiempo de reacción, la temperatura y la cantidad de reactivos han sido desarrolladas.

El costo comercial del biodiesel es de 10-50% más que el diésel del petróleo, la materia prima (aceite, alcohol y catalizador) representa del 70-85% de su costo, mientras que el costo energético y de equipamiento representa entre 15-30% [223]. Los costos de las materias primas como el alcohol y el catalizador no son flexibles debido a que su disponibilidad es limitada. Por otra parte, para los aceites de primera generación (soya, palma, colza) su costo es comercial y algunos cotizan en bolsa, por lo que su precio no es fácil de disminuir; los aceites de segunda generación (aceite usado de cocina, jatropha, ricino) y tercera generación (algas) sí

disminuyen notoriamente el costo, pero no se encuentran disponibles en grandes cantidades en comparación con los de primera generación.

Por lo tanto, la única posibilidad de disminuir los costos de producción del biodiesel es el ahorro energético, lo cual se puede lograr reduciendo el tiempo de la reacción de transesterificación. Esto es posible mejorando el contacto entre las dos fases inmiscibles, sin embargo, el alcohol mezclado con el catalizador presenta características tipo polar y el aceite no polar, por lo que existe una gran resistencia al contacto entre sus moléculas [224].

La reacción de transesterificación está condicionada por la transferencia de masa entre dos fluidos inmiscibles, por lo que, para reducir los tiempos de esta reacción y el consumo de energía, se han propuesto varias tecnologías de intensificación, entre las que se encuentran los procesos supercríticos [89], [119], microondas [195], [225], cavitación ultrasónica [226], [227], cavitación hidrodinámica mediante placa de orificio [228], [229] y cavitación hidrodinámica usando un reactor tipo rotor-estator [230], [231].

Por ejemplo, Han et al. [16] usan *methanothermal catalytic* para obtener biodiesel con microalgas *Chlorella vulgaris* en 60 minutos con un FAME yield de 45%. Lin et al. [225] usan un horno de microondas de 750 W para obtener biodiesel a partir de aceite de palma en 3 min, con un 86.57% de FAME| yield. Sáez-Bastante et al. [232] disminuyen el tiempo de reacción en la producción de biodiésel a partir de castor oil, con un 86.57% de FAME, a 3.28 min, usando una sonda ultrasónica de 20 Hz con ciclo de trabajo de 40%.

Cavitación hidrodinámica

Es un proceso de cambio de fase de líquido a vapor que ocurre siempre que la presión local es menor que la presión de vapor. Las burbujas de vapor que se forman se mueven

con el líquido hasta llegar a una región de alta presión, donde colapsan en forma súbita. La sobrepresión, consecuencia de este fenómeno, se propaga en el seno del fluido provocando la condensación de la burbuja siguiente y el fenómeno se repite sucesivamente. Este proceso es muy eficaz para eliminar la resistencia de transferencia de masa durante la reacción de transesterificación.

La cavitación hidrodinámica puede ser producida haciendo pasar el fluido a través de una constricción, por ejemplo, una válvula de estrangulamiento, una placa de orificio o un Venturi, o mediante un reactor tipo rotor-estator. De éstos, el que presenta menor tiempo de reacción y bajo consumo energético es el tipo rotor-estator. Por ejemplo, Ghayal et al. [229] optimizan la geometría de una placa-orificio de 3 mm con 20 agujeros para obtener biodiesel de used frying oil logrando un FAME yield de 95% en 35 minutos. Crudo et al. [230] usan un reactor tipo rotor-estator logrando producir en 15 min biodiésel de palma con un FAME yield de 98%.

De las tecnologías de intensificación analizadas anteriormente, la cavitación hidrodinámica presenta las ventajas de permitir hacer el proceso de producción de biodiesel continuo y de ser fácilmente escalable a nivel industrial, con un consumo energético aceptable [231].

Los reactores tipo rotor-estator usados para la intensificación de la reacción de transesterificación en la producción de biodiésel, normalmente son probados sin tener en cuenta las influencias geométricas o las variaciones de parámetros operativos como el flujo, velocidad de rotación y la interacción de las variables químicas con las geométricas. En el trabajo presentado por Abbaszadeh-Mayvan et al. [233], por ejemplo, utilizan un reactor tipo rotor-estator para la producción continua de biodiesel introduciendo en el reactor la mezcla de aceite, alcohol y catalizador, por lo que no es posible evaluar sólo el efecto de la cavitación

en la intensificación de la reacción, ya que esta mezcla proviene de un tanque homogeneizador y es introducida al reactor a través de una bomba, por lo que es de esperarse que la reacción de transesterificación haya empezado antes de entrar al reactor. Así como este libro muchos evalúan la influencia indirecta de la cavitación en el proceso de transesterificación. Algunos otros resultados destacados son presentados en la Tabla 17.

La cavitación hidrodinámica (HD, por sus siglas en inglés) emerge como una tecnología prometedora para intensificar la transesterificación, un proceso clave en la producción de biodiésel. La eficacia de este método en comparación con técnicas como la cavitación ultrasónica (US) y la Agitación Mecánica (AM) (Ver Figura 17). A través de un análisis de los parámetros y resultados, se puede observar cómo la cavitación hidrodinámica contribuye significativamente a mejorar la eficiencia del proceso, especialmente en términos de rendimiento (FAME) y tiempos de reacción.

Una ventaja notable de la cavitación hidrodinámica es su capacidad para generar altos rendimientos de biodiésel en tiempos relativamente cortos. Por ejemplo, utilizando aceite vegetal y metanol con KOH como catalizador, se alcanzó un rendimiento del 98% en tan solo 10 minutos a 45°C y una relación molar de 6:1. Estas condiciones no solo son eficientes, sino también energéticamente más sostenibles en comparación con otros métodos que requieren tiempos más prolongados o condiciones más exigentes, como mayores temperaturas o velocidades de agitación.

Además, la cavitación hidrodinámica destaca por su escalabilidad y su capacidad para manejar volúmenes mayores en reactores industriales. A diferencia de la cavitación ultrasónica, que tiende a ser limitada en términos de capacidad (por ejemplo, reactores de 0.25 a 0.5 L según los datos), la cavitación hidrodinámica permite trabajar

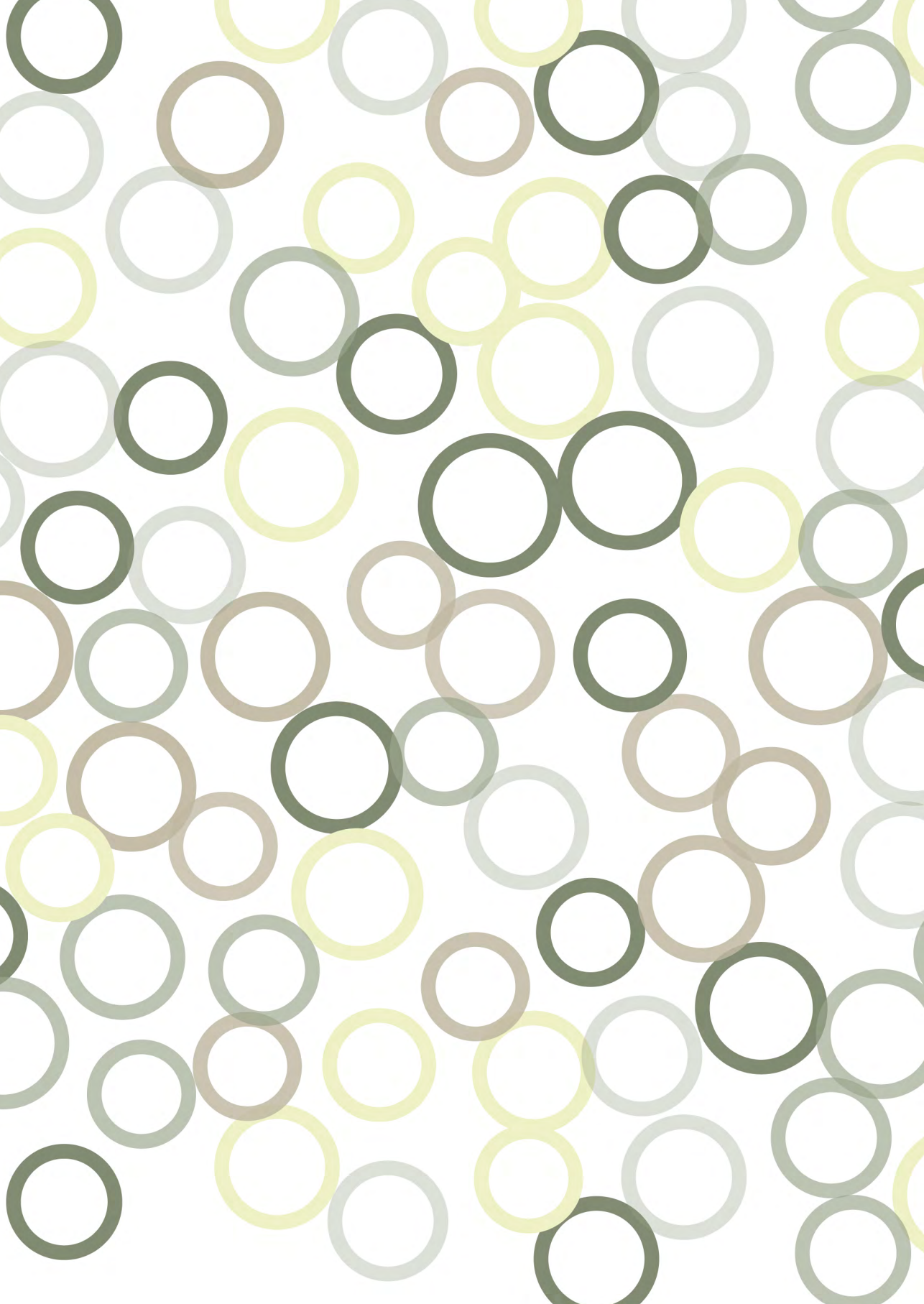
con reactores de mayor capacidad (hasta 50 L en un caso específico). Esto la hace ideal para aplicaciones industriales donde la producción en masa es esencial.

Otro aspecto importante es el ahorro energético. Mientras que la cavitación ultrasónica requiere dispositivos de alta frecuencia y potencia (como 20 kHz, 500 W), la cavitación hidrodinámica puede operar de manera más eficiente con sistemas de menor complejidad tecnológica y energética. Este ahorro energético no solo reduce costos operativos, sino que también disminuye el impacto ambiental del proceso.

Tabla 17
Revisión del proceso de cavitación hidrodinámica en la obtención de biodiésel.

Materia prima (Aceite)	Método	Alcohol	Catalizador	Parámetros				Resultados		Otros detalles	Capacidad del reactor [L]	Referencias
				Relación molar alcohol aceite	Temperatura [°C]	Catalizador wt %	Tiempo [min]	Rendimiento (FAME)	Eficiencia 10-4 g/J			
Vegetal	HD ^a	Metanol	KOH	6:1	45.0	1.0	10.0	98.0	15.18	7 bar	-	[234]
	US ^b						30.0	98.0	0.11	75% (150 W)	0.25	
	AM ^c						45.0	90.0	0.06	900 rpm	-	
Usado de cocina	HD ^a	Metanol	KOH	6:1	60.0	1.0	15.0	98.0	12.5	4kW, 2 bar	50	[235]
	AM ^c						90.0	97.0	1.5	-	-	
Animal	US ^b	Metanol	KOH	5.5:1	40.0	1.5	15.0	97.4	-	20 kHz, 500 W	0.05	[226]
Ricina	US ^b	Metanol	KOH	4.9:1	45.0	1.4	3.8	86.57	-	20 kHz, 500 W	0.25	[232]
Palma/ Sésamo	US ^b	Metanol	KOH	4.5:1	40.0	1.0	30.0	94.1	-	20 kHz, 500 W	0.5	[173]
	AM ^c				60.0		120.0	91.5	-	1500 rpm	-	
Usado de cocina	HD ^a	Metanol	NaOH	6:1	55	0.5	45.0	99.0	-	Flujo de 390 L/h	7.5	[230]
Palma									-			
Usado de cocina	HD ^a	Metanol	NaOH	6.8:1	35.0	1.0	20.0	99.0	0.33	7 bar	2.5	[236]
Oliva	US ^b	Metanol	KOH	9:1	25.0	1.2	9.0	98.9	0.75	500 W	0.5	[237]
	AM ^c				60.0		120	87.2	0.227	600 rpm	0.25	

Fuente: Elaboración propia (2025)
Nota: ^aHD: Hidrodinámico, ^bUS: Ultrasónico, ^cAM: Agitación mecánica



REFLEXIÓN

La producción de biodiésel ha evolucionado significativamente en las últimas décadas, convirtiéndose en una alternativa viable y sostenible frente a los combustibles fósiles. Como se detalla a lo largo de este libro, uno de los retos más importantes en este campo ha sido la mejora de los procesos de transesterificación para lograr mayores rendimientos y eficiencias energéticas. En este contexto, la cavitación hidrodinámica se perfila como una tecnología clave para la intensificación de este proceso, ofreciendo soluciones innovadoras que responden a las demandas de sostenibilidad, escalabilidad y eficiencia.

El análisis de la tabla final presentada en este libro resume las principales características y ventajas comparativas de la cavitación hidrodinámica frente a otros métodos como la cavitación ultrasónica y la agitación mecánica. Entre los resultados más destacados se encuentran los altos rendimientos de ésteres metílicos de ácidos grasos (FAME) alcanzados en tiempos significativamente menores. Por ejemplo, la cavitación hidrodinámica permite obtener rendimientos del 98% en tan solo 10 a 15 minutos, dependiendo de la materia prima utilizada. Este nivel de eficiencia es crítico para reducir los costos de producción y aumentar la competitividad del biodiésel frente a los combustibles tradicionales.

La cavitación hidrodinámica no solo optimiza la reacción de transesterificación al mejorar la mezcla y la transferencia de masa, sino que también presenta una ventaja sustancial en términos de escalabilidad. Mientras que métodos como la cavitación ultrasónica se limitan a reactores de pequeña escala; esta tecnología permite trabajar en reactores de

mayor capacidad, lo que la hace ideal para operaciones industriales. Además, su menor consumo energético comparado con otras técnicas reduce tanto los costos operativos como el impacto ambiental asociado a la producción.

La importancia de la cavitación hidrodinámica también radica en su flexibilidad para procesar diferentes tipos de materias primas, incluyendo aceites vegetales, aceites de cocina usados y grasas animales. Esto amplía las posibilidades de aprovechamiento de recursos locales y fomenta la economía circular al reutilizar desechos como materia prima. En un mundo que enfrenta retos ambientales cada vez mayores, estas características refuerzan el papel del biodiésel como un combustible sostenible que contribuye a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y promueve el uso eficiente de los recursos disponibles.

En conclusión, la cavitación hidrodinámica representa un paso adelante en la tecnología de producción de biodiésel, al combinar eficiencia, sostenibilidad y adaptabilidad. Como se ha demostrado en este libro, el desarrollo y la implementación de esta tecnología pueden transformar el panorama de los combustibles renovables, convirtiéndolos en una opción más accesible y competitiva para satisfacer las necesidades energéticas globales. La integración de estas innovaciones en las industrias actuales no solo contribuirá al avance de la transición energética, sino también al cumplimiento de los objetivos de sostenibilidad a nivel mundial.

Finalmente, cabe resaltar que el éxito de estas tecnologías depende también de un esfuerzo conjunto entre la investigación, la industria y las políticas públicas. La inversión en investigación y desarrollo, junto con el establecimiento de marcos regulatorios que favorezcan la producción y el uso de biocombustibles, será esencial para

consolidar el biodiésel como una alternativa sostenible y viable a los combustibles tradicionales. En este sentido, la cavitación hidrodinámica no solo simboliza una innovación tecnológica, sino también un compromiso con un futuro energético más limpio y responsable.



Glosario

Biodiésel: Combustible renovable formado por ésteres metílicos o etílicos de ácidos grasos, obtenido de aceites vegetales o grasas animales como sustituto del diésel fósil.

Biocombustibles: Combustibles producidos a partir de biomasa (residuos orgánicos, cultivos, algas), que buscan reducir la dependencia de fuentes fósiles.

Cavitación acústica: Cavitación inducida por ultrasonidos: las ondas generan burbujas que implosionan y producen zonas de alta temperatura y presión.

Cavitación hidrodinámica: Formación y colapso de burbujas de vapor por variaciones súbitas de presión en flujo a través de placas u orificios, liberando energía localizada.

Etanol: Alcohol biológico obtenido de fermentación, alternativa al metanol en la síntesis de biodiésel.

Intensificación de procesos: Conjunto de métodos y tecnologías que buscan aumentar la eficiencia, reducir tiempos de reacción y consumo energético en procesos químicos.

Materia prima: Aceites vegetales, grasas animales o biomasa de algas que sirven de insumo para la producción de biodiésel.

Metanol: Alcohol de bajo peso molecular, de origen químico, usado mayoritariamente como reactante en la transesterificación.

Número de cavitación (σ): Parámetro adimensional que cuantifica la tendencia de un fluido a cavitarse bajo condiciones de presión y velocidad dadas.

Número de Reynolds (Re): Parámetro adimensional que relaciona fuerzas inerciales con viscosas en un fluido, usado para caracterizar el régimen de flujo.

Placa de orificio: Dispositivo simple que crea un salto de presión en el flujo para inducir cavitación hidrodinámica.

Reactor batch: Equipo discontinuo donde se cargan todos los reactivos al inicio, se deja reaccionar y luego se descarga el producto.

Reactor de cavitación: Equipo que aprovecha cavitación (hidrodinámica o acústica) para generar mezcla vigorosa y acelerar la reacción de transesterificación.

Reactor continuo: Sistema en régimen estacionario donde reactivos entran y productos salen constantemente, optimizando tiempos de producción.

Reactor de flujo pistón: Tipo de reactor continuo que mantiene un perfil de concentración casi uniforme a lo largo del lecho reaccionante.

Reactor de microcanales: Reactor intensificado que utiliza canales de sección milimétrica para mejorar la transferencia de masa y calor.

Reactor de microondas: Dispositivo donde se emplea energía electromagnética de microondas para calentar la mezcla reactiva de forma rápida y uniforme.

Rotor-estator: Conjunto de un rotor giratorio y un estator fijo que juntos generan cizalla intensa y cavitación en el fluido.

Sostenibilidad energética: Modelo de generación y uso de energía que busca equilibrar seguridad de suministro, eficiencia y mínimo impacto ambiental.

Transesterificación: Reacción química en la que un triglicérido reacciona con un alcohol (metanol o etanol) para formar biodiésel (ésteres) y glicerol.



Referencias bibliográficas

- [1] M. a X. Scheler and M. Schiler, “El puesto del hombre en el cosmos,” pp. 1-6, 2013.
- [2] J. Gaviria Rios, J. Mora, and J. Agudelo, “Historia motores de combustión,” *Revista Facultad de Ingeniería*, no. 26. pp. 68-78, 2002.
- [3] H. Moradpour, R. C. Nunes, E. M. C. Abreu, and J. A. Neto, “A note on the relations between thermodynamics, energy definitions and Friedmann equations,” *Mod Phys Lett A*, vol. 32, no. 13, pp. 1-20, 2017, doi: 10.1142/S021773231750078X.
- [4] J. Moragues and A. Rapallini, “Energía Eólica,” *Instituto Argentino de la energía*, p. 22, 2003, [Online]. Accessed: 15 July 2024 Available: www.iae.org.ar/renovables/ren_eolica.pdf
- [5] D. Energías, J. Pablo, and P. Alfonso, “Petróleo: historia y perspectivas geopolíticas,” *Aldea Mundo*, no. 34, pp. 65-70, 2012.
- [6] J. Lovland, “A History of Steam Power,” p. 15, 2007.
- [7] M. Badii, A. Guillen, and O. Lugo Serrato, “History and Use of Renewable Energies,” *International Journal of Good Conscience*, vol. 10, no. 1, pp. 1-18, 2015.
- [8] J. de Vries, “The Industrial Revolution and the Industrious Revolution,” *J Econ Hist*, vol. 54, no. 2, pp. 249-270, 1994, doi: 10.1017/S0022050700014467.
- [9] I. Affairs, “Review Reviewed Work: Oil politics: a modern history of petroleum by Francisco Parra: Crude world: the violent twilight of oil by Peter Maass Review by: John Mitchell Source: International Affairs (Royal Institute of International Affairs 1944,” no. May, 2010.
- [10] G. Kalghatgi, “Is it really the end of internal combustion engines and petroleum in transport?,” *Appl Energy*, vol. 225, no. February, pp. 965-974, 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.05.076.

- [11] A. Vilches, "Educación para un futuro sostenible más allá de la problemática energética," no. August 2016, 2006.
- [12] F. Ballenilla, "El final del petróleo barato," *El Ecologista*, pp. 20-23, 2004.
- [13] R. Bemejo, "Un futuro sin petróleo, colapsos y transformaciones socioeconómicas," 2008, p. 349.
- [14] L. Aizemberg, H. H. Kramer, A. A. Pessoa, and E. Uchoa, "Formulations for a problem of petroleum transportation," *Eur J Oper Res*, vol. 237, no. 1, pp. 82-90, 2014, doi: 10.1016/j.ejor.2014.01.036.
- [15] E. Rosenberg, R. Legmann, A. Kushmaro, R. Taube, E. Adler, and E. Z. Ron, "Petroleum bioremediation - a multiphase problem," *Biodegradation*, vol. 3, no. 2-3, pp. 337-350, 1992, doi: 10.1007/BF00129092.
- [16] S. H. A.B.M and S. Aishah, "Biodiesel Fuel Production from Algae as Renewable Energy A . B . M . Sharif Hossain , Aishah Salleh , Amru Nasrulhaq Boyce , Partha chowdhury and Mohd Naquiuddin Biotechnology Laboratory , Institute of Biological Sciences , Faculty of Science , University o," *Am J Biochem Biotechnol*, vol. 4, no. 3, pp. 250-254, 2008.
- [17] B. Lars, P. Riishojgaard, J. Zillman, and A. Simmons, "WMO Unified Data Policy," *World Meteorological Organization*, vol. 70, no. 2, 2021.
- [18] N. Duarte Souza Alvarenga Santos, V. Rückert Roso, A. C. Teixeira Malaquias, and J. G. Coelho Baêta, "Internal combustion engines and biofuels: Examining why this robust combination should not be ignored for future sustainable transportation," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 148, no. October 2020, 2021, doi: 10.1016/j.rser.2021.111292.
- [19] IEA, "World Energy Outlook 2021 - revised version October 2021," 2021, [Online]. Accessed: 15 July 2024. Available: www.iea.org/weo
- [20] S. S. Matin and S. C. Chelgani, "Estimation of coal gross calorific value based on various analyses by random forest method," *Fuel*, vol. 177, pp. 274-278, 2016, doi: 10.1016/j.fuel.2016.03.031.

- [21] Z. Wu, Y. Li, D. Xu, and H. Meng, "Co-pyrolysis of lignocellulosic biomass with low-quality coal: Optimal design and synergistic effect from gaseous products distribution," *Fuel*, vol. 236, no. September 2018, pp. 43–54, 2019, doi: 10.1016/j.fuel.2018.08.116.
- [22] O. I. Awad, O. M. Ali, A. T. Hammid, and R. Mamat, "Impact of fusel oil moisture reduction on the fuel properties and combustion characteristics of SI engine fueled with gasoline-fusel oil blends," *Renew Energy*, vol. 123, pp. 79–91, 2018, doi: 10.1016/j.renene.2018.02.019.
- [23] Y. S. M. Altarazi, A. R. Abu Talib, E. Gires, J. Yu, J. Lucas, and T. Yusaf, "Performance and exhaust emissions rate of small-scale turbojet engine running on dual biodiesel blends using Gasturb," *Energy*, vol. 232, p. 120971, 2021, doi: 10.1016/j.energy.2021.120971.
- [24] M. Gülüm and A. Bilgin, "Density, flash point and heating value variations of corn oil biodiesel-diesel fuel blends," *Fuel Processing Technology*, vol. 134, pp. 456–464, 2015, doi: 10.1016/j.fuproc.2015.02.026.
- [25] A. Fivga and I. Dimitriou, "Pyrolysis of plastic waste for production of heavy fuel substitute: A techno-economic assessment," *Energy*, vol. 149, pp. 865–874, 2018, doi: 10.1016/j.energy.2018.02.094.
- [26] R. Abdallah, A. Juaidi, M. Assad, T. Salameh, and F. Manzano-Agugliaro, "Energy recovery from waste tires using pyrolysis: Palestine as case of study," *Energies (Basel)*, vol. 13, no. 7, pp. 1–13, 2020, doi: 10.3390/en13071817.
- [27] M. Daoud, O. Benturki, S. Fontana, Y. Rogaume, and P. Girods, "Energy and matter balance of process of activated carbon production from Algerian agricultural wastes: date palm rachis and jujube stones," *Biomass Convers Biorefin*, vol. 11, no. 5, pp. 1537–1554, 2021, doi: 10.1007/s13399-019-00543-w.
- [28] Y. F. Huang, P. te Chiueh, and S. L. Lo, "Energy recovery from sewage sludge: Product characteristics, heating value prediction and reaction kinetics," *Chemosphere*, vol. 268, p. 128783, 2021, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.128783.
- [29] M. Çelik, İ. Örs, C. Bayindirli, and M. Demiralp, "Experimental investigation of impact of addition of bioethanol in different

- biodiesels, on performance, combustion and emission characteristics,” *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 31, no. 11, pp. 5581–5592, 2017, doi: 10.1007/s12206-017-1052-x.
- [30] D. Czajczyńska, R. Krzyżyńska, H. Jouhara, and N. Spencer, “Use of pyrolytic gas from waste tire as a fuel: A review,” *Energy*, vol. 134, pp. 1121–1131, 2017, doi: 10.1016/j.energy.2017.05.042.
- [31] C. Andrej, P. Marián, and M. Matej, “Use of Methane-Free Synthesis Gases as Fuel in an Spark Ignition Combustion Engine,” *Strojnický Casopis*, vol. 70, no. 2, pp. 37–48, 2020, doi: 10.2478/scjme-2020-0018.
- [32] J. R. Vera-Rozo, J. M. Riesco-Avila, F. Elizalde-Blanca, and S. Cano-Andrade, “OPTIMIZATION OF THE REAL CONVERSION EFFICIENCY OF WASTE COOKING OIL,” *Thermal Science*, pp. 1–14, 2021.
- [33] F. Dalena, A. Senatore, M. Basile, D. Marino, and A. Basile, *Chapter 1. From sugars to ethanol—from agricultural wastes to algal sources: An overview*. Elsevier Inc., 2019. doi: 10.1016/B978-0-12-815162-4.00001-X.
- [34] K. Dutta, A. Daverey, and J. Lin, “Evolution retrospective for alternative fuels: First to fourth generation,” *Renew Energy*, vol. 69, pp. 114–122, 2014, doi: 10.1016/j.renene.2014.02.044.
- [35] M. Guo, W. Song, and J. Buhain, “Bioenergy and biofuels: History , status , and perspective,” vol. 42, pp. 712–725, 2015, doi: 10.1016/j.rser.2014.10.013.
- [36] ASTM D6751, “Standard Specification for Biodiesel Fuel Blend Stock (B100) for Middle Distillate Fuels,” *ASTM International*, vol. i, pp. 1–11, 2010.
- [37] M. J. Escobedo and A. C. Calderón, “Microalgal biomass with high potential for the biofuels production,” *Scientia Agropecuaria*, vol. 12, no. 2, pp. 265–282, 2021, doi: 10.17268/SCI.AGROPECU.2021.030.
- [38] C. T. Chong *et al.*, “Biodiesel sustainability: The global impact of potential biodiesel production on the energy–water–food (EWF) nexus,” *Environ Technol Innov*, vol. 22, p. 101408, 2021, doi: 10.1016/j.eti.2021.101408.

- [39] A. E. Comyns, *Bio-Futures*, vol. 2007, no. 8. 2007. doi: 10.1016/s1351-4180(07)70416-6.
- [40] G. J. Hughes, "New power sources," *Students Quarterly Journal*, vol. 18, no. 72, p. 80, 2019, doi: 10.1049/sqj.1948.0029.
- [41] R. Diesel, "Diesel's Rational Heat Motor," *Resonance*, no. April, pp. 406–424, 1897.
- [42] L. Lin, Z. Cunshan, S. Vittayapadung, S. Xiangqian, and D. Mingdong, "Opportunities and challenges for biodiesel fuel," *Appl Energy*, vol. 88, no. 4, pp. 1020–1031, 2011, doi: 10.1016/j.apenergy.2010.09.029.
- [43] S. P. Raj, P. R. Solomon, and B. Thangaraj, "History of Biodiesel," *Biodiesel from Flowering Plants*, pp. 7–14, 2022, doi: 10.1007/978-981-16-4775-8_2.
- [44] M. C. Teixeira and D. S. G. Taouil, "Biodiesel: an alternative and green energy," *Revista Vértices*, vol. 12, no. 3, pp. 17–40, 2010, doi: 10.5935/1809-2667.20100019.
- [45] F. Staat, "Bio-diesel- french experience," *Petrole et Techniques*, 1995.
- [46] T. R. Fortenbery, "Biodiesel Feasibility Study: An Evaluation of Biodiesel Feasibility in Wisconsin," 2005, doi: 10.22004/AG.ECON.12629.
- [47] G. Knothe and J. van Gerpen, *The Biodiesel Handbook* Editors. 2005.
- [48] Tamás Mizik, "cleantechnologiesEconomicandSustainability of Biodiesel Production — A Systematic Literature Review," *Clean Thechnologies*, vol. 3, pp. 19–36, 2021.
- [49] A. J. Friedemann, R. Check, and A. Energy, *Life after Fossil Fuels*, Ed 1., vol. 81. Cham, Switzerland, 2021.
- [50] Y. Mulugetta, "Evaluating the economics of biodiesel in Africa," vol. 13, pp. 1592–1598, 2009, doi: 10.1016/j.rser.2008.09.011.
- [51] M. Hayyan, F. S. Mjalli, M. Ali, and I. M. Alnashef, "A novel technique for separating glycerine from palm oil-based biodiesel using ionic liquids," *Fuel Processing Technology*, vol. 91, no. 1, pp. 116–120, 2010, doi: 10.1016/j.fuproc.2009.09.002.

- [52] S. Cerrate, F. Yan, Z. Wang, C. Coto, P. Sacakli, and P. W. Waldroup, "Evaluation of Glycerine from Biodiesel Production as a Feed Ingredient for Broilers 1," *Int J Poult Sci*, vol. 5, no. 11, pp. 1001–1007, 2006.
- [53] L. Capuano, "International Energy Outlook 2020 (IEO2020)," *US Energy Information Administration*, vol. 2020, pp. 1–7, 2020, [Online]. Available: <https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/ieo2020.pdf>
- [54] D. Rochelle and H. Najafi, "A review of the effect of biodiesel on gas turbine emissions and performance," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 105, no. June 2018, pp. 129–137, 2019, doi: 10.1016/j.rser.2019.01.056.
- [55] M. S. Mansour *et al.*, "Selection of second-generation crop for biodiesel extraction and testing its impact with nano additives on diesel engine performance and emissions," *Energy*, vol. 237, p. 12605, 2021, doi: 10.1016/j.energy.2021.121605.
- [56] K. A. Abed, M. S. Gad, A. K. el Morsi, M. M. Sayed, and S. A. Elyazeed, "Effect of biodiesel fuels on diesel engine emissions," *Egyptian Journal of Petroleum*, vol. 28, no. 2, pp. 183–188, 2019, doi: 10.1016/j.ejpe.2019.03.001.
- [57] M. A. Mujtaba *et al.*, "Development of empirical correlations for density and viscosity estimation of ternary biodiesel blends," *Renew Energy*, vol. 179, pp. 1447–1457, 2021, doi: 10.1016/j.renene.2021.07.121.
- [58] M. Carmona-Cabello, I. L. García, J. Sáez-Bastante, S. Pinzi, A. A. Koutinas, and M. P. Dorado, "Food waste from restaurant sector- Characterization for biorefinery approach," *Bioresour Technol*, vol. 301, p. 122779, 2020.
- [59] S. Pinzi and M. P. Dorado, "Optimization of solid food waste oil biodiesel by ultrasound-assisted transesterification," *Fuel*, vol. 255, no. July, p. 115817, 2019, doi: 10.1016/j.fuel.2019.115817.
- [60] T. N. Verma *et al.*, "Experimental and empirical investigation of a CI engine fuelled with blends of diesel and roselle biodiesel," *Sci Rep*, vol. 11, no. 1, pp. 1–23, 2021, doi: 10.1038/s41598-021-98382-1.

- [61] J. Xue, T. E. Grift, and A. C. Hansen, "Effect of biodiesel on engine performances and emissions," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 2, pp. 1098–1116, 2011, doi: 10.1016/j.rser.2010.11.016.
- [62] E. G. Giakoumis and C. K. Sarakatsanis, "Estimation of biodiesel cetane number, density, kinematic viscosity and heating values from its fatty acid weight composition," *Fuel*, vol. 222, pp. 574–585, Jun. 2018, doi:10.1016/j.fuel.2018.02.187.
- [63] G. A. Caudillo, A. Fabiola, and S. S. Rodríguez, "Universidad Autónoma Metropolitana Maestría en Economía Campo de conocimiento: Empresas Finanzas e Innovación Título de Idónea Comunicación de Resultados," pp. 1–141, 2020.
- [64] E. Riegelhaupt, J. Odedenthal, and L. Janeiro, *Diagnóstico de la situación actual del biodiésel en México y escenarios para su aprovechamiento*, vol. 1. 2016.
- [65] "Biocombustible en México: la ardua lucha contra la burocracia, los impuestos y el crimen organizado." <https://es.mongabay.com/2021/08/biocombustible-mexico-burocracia-impuestos-crimen-organizado/> (accessed Jan. 04, 2022).
- [66] C. De, G. Alva, C. Asesora, and F. S. Sosa Rodríguez, "Mercado de biodiésel en México," Mar. 2020, doi: 10.16/CSS/JQUERY.DATATABLES.MIN.CSS.
- [67] J. Mesa-dishington and P. Ejecutivo, "Impactos de la producción de biodiésel en la cadena de valor de palma".
- [68] M. N. Ashraf *et al.*, "Sustainability of Palm Biodiesel in Transportation: a Review on Biofuel Standard, Policy and International Collaboration Between Malaysia and Colombia," *BioEnergy Research*, pp. 43–60, 2021, [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s12155-020-10165-0>
- [69] M. J. Valencia and C. A. Cardona, "The Colombian biofuel supply chains: The assessment of current and promising scenarios based on environmental goals," *Energy Policy*, vol. 67, pp. 232–242, 2014, doi: 10.1016/j.enpol.2013.12.021.
- [70] S. K. Hoekman, A. Broch, C. Robbins, E. Cenicerros, and M. Natarajan, "Review of biodiesel composition, properties, and specifications," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.

- 16, no. 1, pp. 143–169, 2012, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.143>.
- [71] I. M. Atadashi, M. K. Aroua, and A. A. Aziz, “Biodiesel separation and purification: A review,” *Renew Energy*, vol. 36, no. 2, pp. 437–443, 2011, doi: [10.1016/j.renene.2010.07.019](https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.07.019).
- [72] J. M. Marchetti, V. U. Miguel, and A. F. Errazu, “Techno-economic study of different alternatives for biodiesel production,” *Fuel Processing Technology*, vol. 89, no. 8, pp. 740–748, Aug. 2008, doi: [10.1016/j.fuproc.2008.01.007](https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2008.01.007).
- [73] O. Dogu *et al.*, “The chemistry of chemical recycling of solid plastic waste via pyrolysis and gasification: State-of-the-art, challenges, and future directions,” *Prog Energy Combust Sci*, vol. 84, p. 100901, May 2021, doi: [10.1016/J.PECS.2020.100901](https://doi.org/10.1016/J.PECS.2020.100901).
- [74] J. Sáez-Bastante, C. Ortega-Román, S. Pinzi, F. R. Lara-Raya, D. E. Leiva-Candia, and M. P. Dorado, “Ultrasound-assisted biodiesel production from *Camelina sativa* oil,” *Bioresour Technol*, vol. 185, pp. 116–124, Jun. 2015, doi: [10.1016/j.biortech.2015.02.090](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.02.090).
- [75] R. Yang *et al.*, “Biodiesel production from rubber seed oil using poly (sodium acrylate) supporting NaOH as a water-resistant catalyst,” *Bioresour Technol*, vol. 102, no. 3, pp. 2665–2671, Feb. 2011, doi: [10.1016/j.biortech.2010.10.131](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.10.131).
- [76] H. Soyama, “Cavitation peening: A review,” *Metals (Basel)*, vol. 10, no. 2, 2020, doi: [10.3390/met10020270](https://doi.org/10.3390/met10020270).
- [77] M. Gągol, A. Przyjazny, and G. Boczkaj, “Wastewater treatment by means of advanced oxidation processes based on cavitation – A review,” *Chemical Engineering Journal*, vol. 338, no. November 2017, pp. 599–627, 2018, doi: [10.1016/j.cej.2018.01.049](https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.01.049).
- [78] M. T. Gevari, T. Abbasiasl, S. Niazi, M. Ghorbani, and A. Koşar, “Direct and indirect thermal applications of hydrodynamic and acoustic cavitation: A review,” *Appl Therm Eng*, vol. 171, no. January, 2020, doi: [10.1016/j.applthermaleng.2020.115065](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115065).
- [79] J. Otera, “Transesterification,” *Chem Rev*, vol. 4, pp. 1449–1470, 1993.
- [80] J. K. Poppe, C. R. Matte, R. Fernandez-Lafuente, R. C. Rodrigues, and M. A. Z. Ayub, “Transesterification of

- Waste Frying Oil and Soybean Oil by Combi-lipases Under Ultrasound-Assisted Reactions,” *Appl Biochem Biotechnol*, vol. 186, no. 3, pp. 576–589, 2018, doi: 10.1007/s12010-018-2763-x.
- [81] J. A. Cecilia, D. B. Plata, R. M. A. Saboya, F. M. T. de Luna, C. L. Cavalcante, and E. Rodríguez-Castellón, “An overview of the biolubricant production process: Challenges and future perspectives,” *Processes*, vol. 8, no. 3, pp. 1–24, 2020, doi: 10.3390/pr8030257.
- [82] J. Vera-Rozo, J. Riesco-Avila, F. Elizalde-Blanca, and S. Cano-Andrade, “Optimization of the real conversion efficiency of waste cooking oil to fame,” *Thermal Science*, vol. 26, no. 1 Part B, pp. 653–665, 2022, doi: 10.2298/tsci210115200v.
- [83] C. Yu, H. Huang, X. Li, Y. Zhang, and W. Wang, “Dynamic Kinetic Resolution of Biaryl Lactones via a Chiral Bifunctional Amine Thiourea-Catalyzed Highly Atropo-enantioselective Transesterification,” *J Am Chem Soc*, vol. 138, no. 22, pp. 6956–6959, 2016, doi: 10.1021/jacs.6b03609.
- [84] J. C. West, “Rapid Preparation of Methyl Esters from Lipids, Alkyd Paint Resins, Polyester Resins, and Ester Plasticizers,” *Anal Chem*, vol. 47, no. 9, pp. 1708–1709, 1975, doi: 10.1021/ac60359a058.
- [85] G. Ilia, V. Simulescu, C. A. Mak, and E. Crasmareanu, “The use of transesterification method for obtaining phosphorus-containing polymers,” *Advances in Polymer Technology*, vol. 33, no. S1, pp. 1–9, 2014, doi: 10.1002/adv.21437.
- [86] Y. Yin and L. Meng, “Improve the compatibility and crystallization ability of polyhedral oligomeric silsesquioxanes and poly (ethylene terephthalate) by using transesterification method,” *J Appl Polym Sci*, vol. 139, no. 11, p. 51779, Mar. 2022, doi: 10.1002/APP.51779.
- [87] F. Wang *et al.*, “Inhibited transesterification of PET/PBT blends filled with silica nanoparticles during melt processing,” *Polym Degrad Stab*, vol. 93, no. 8, pp. 1397–1404, 2008, doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2008.05.026.
- [88] J. Sáez-bastante, S. Pinzi, G. Arzamendi, M. D. L. de Castro, F. Priego-capote, and M. P. Dorado, “Influence of vegetable oil fatty acid composition on ultrasound-assisted synthesis of biodiesel,” *Fuel*, vol. 125, pp. 183–191, 2014.

- [89] K. Narasimharao, A. Lee, and K. Wilson, "Catalysts in Production of Biodiesel: A Review," *J Biobased Mater Bioenergy*, vol. 1, no. 1, pp. 19–30, Jun. 2020, doi: 10.1166/jbmb.2007.1976.
- [90] S. Pinzi and M. P. Dorado, *Vegetable-based feedstocks for biofuels production*. Woodhead Publishing Limited, 2011. doi: 10.1533/9780857090492.1.61.
- [91] D. Singh, D. Sharma, S. L. Soni, S. Sharma, and D. Kumari, "Chemical compositions, properties, and standards for different generation biodiesels: A review," *Fuel*, vol. 253. Elsevier Ltd, pp. 60–71, Oct. 01, 2019. doi: 10.1016/j.fuel.2019.04.174.
- [92] A. Karmakar, S. Karmakar, and S. Mukherjee, "Properties of various plants and animals feedstocks for biodiesel production," *Bioresour Technol*, vol. 101, no. 19, pp. 7201–7210, 2010, doi: 10.1016/j.biortech.2010.04.079.
- [93] J. M. Dias, J. M. Araújo, J. F. Costa, M. C. M. Alvim-Ferraz, and M. F. Almeida, "Biodiesel production from raw castor oil," *Energy*, vol. 53, pp. 58–66, 2013, doi: 10.1016/j.energy.2013.02.018.
- [94] M. Ravanipour, A. Hamidi, and A. H. Mahvi, "Microalgae biodiesel: A systematic review in Iran," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 150, no. June 2020, p. 111426, 2021, doi: 10.1016/j.rser.2021.111426.
- [95] R. Halim, M. K. Danquah, and P. A. Webley, "Extraction of oil from microalgae for biodiesel production: A review," *Biotechnol Adv*, vol. 30, no. 3, pp. 709–732, 2012, doi: 10.1016/j.biotechadv.2012.01.001.
- [96] M. M. K. Bhuiya, M. G. Rasul, M. M. K. Khan, N. Ashwath, A. K. Azad, and M. A. Hazrat, "Second generation biodiesel: Potential alternative to-edible oil-derived biodiesel," *Energy Procedia*, vol. 61, pp. 1969–1972, 2014, doi: 10.1016/j.egypro.2014.12.054.
- [97] M. Ozcanli, C. Gungor, and K. Aydin, "Biodiesel Fuel Specifications: A Review," *Biodiesel Fuel Specifications: A Review*, vol. 35, no. 7, pp. 635–647, Apr. 2013, doi: 10.1080/15567036.2010.503229.

- [98] F. Gunstone, Ed., *Vegetable Oils in Food Technology: Composition, Properties and Uses*, Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2011.
- [99] D. I. Jordanov, Y. K. Dimitrov, P. S. T. Petkov, and S. K. Ivanov, "Biodiesel production by sunflower oil transesterification," *Oxidation Communications*, vol. 30, no. 2, pp. 300–305, 2007.
- [100] F. (Organización de las N. U. para la A. y la Alimentación), "FAOSTAT- Sunflower Oils," 2022. <https://www.fao.org/faostat/es/#data/QD> (accessed Feb. 08, 2022).
- [101] H. Yao, X. Zuo, D. Zuo, H. Lin, X. Huang, and C. Zang, "Study on soybean potential productivity and food security in China under the influence of COVID-19 outbreak," *Geography and Sustainability*, vol. 1, no. 2, pp. 163–171, 2020, doi: 10.1016/j.geosus.2020.06.002.
- [102] P. M. Fearnside, "Soybean cultivation as a threat to the environment in Brazil," *Environ Conserv*, vol. 28, no. 1, pp. 23–38, 2001, doi: 10.1017/S0376892901000030.
- [103] R. Bhati, "Algae biodiesel: Fundamentals and future prospects," in *Biotechnology Business-Concept to Delivery*, Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2020, pp. 95–108.
- [104] A. Kleinová, I. Vailing, J. Lábaj, J. Mikulec, and J. Cvengroš, "Vegetable oils and animal fats as alternative fuels for diesel engines with dual fuel operation," *Fuel Processing Technology*, vol. 92, no. 10, pp. 1980–1986, Oct. 2011, doi: 10.1016/j.fuproc.2011.05.018.
- [105] T. M. Mata, N. Cardoso, M. Ornelas, S. Neves, and N. S. Caetano, "Evaluation of two purification methods of biodiesel from beef tallow, pork lard, and chicken fat," *Energy and Fuels*, vol. 25, no. 10, pp. 4756–4762, 2011, doi: 10.1021/ef2010207.
- [106] T. T. Kywe and M. M. Oo, "Production of biodiesel from jatropha oil (*Jatropha curcas*) in pilot plant," *World Acad Sci Eng Technol*, vol. 38, no. February 2009, pp. 481–487, 2009.
- [107] S. T. Keera, S. M. el Sabagh, and A. R. Taman, "Castor oil biodiesel production and optimization," *Egyptian Journal of Petroleum*, vol. 27, no. 4, pp. 979–984, 2018.
- [108] N. Sharma Dugala, G. Singh Goindi, and A. Sharma, "Evaluation of physicochemical characteristics of Mahua

- (*Madhuca indica*) and *Jatropha* (*Jatropha curcas*) dual biodiesel blends with diesel,” *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, vol. 33, no. 6, pp. 424–436, 2021, doi: 10.1016/j.jksues.2020.05.006.
- [109] U. Rashid, F. Anwar, B. R. Moser, and G. Knothe, “*Moringa oleifera* oil: A possible source of biodiesel,” *Bioresour Technol*, vol. 99, no. 17, pp. 8175–8179, 2008, doi: 10.1016/j.biortech.2008.03.066.
- [110] J. R. Brock, A. A. Dönmez, M. A. Beilstein, and K. M. Olsen, “Phylogenetics of *Camelina* Crantz. (Brassicaceae) and insights on the origin of gold-of-pleasure (*Camelina sativa*),” *Mol Phylogenet Evol*, vol. 127, no. April, pp. 834–842, 2018, doi: 10.1016/j.ympev.2018.06.031.
- [111] A. Arumugam and V. Ponnusami, “Biodiesel production from *Calophyllum inophyllum* oil a potential non-edible feedstock: An overview,” *Renew Energy*, vol. 131, pp. 459–471, 2019, doi: 10.1016/j.renene.2018.07.059.
- [112] Q. Wang *et al.*, “Harvesting Bacterial Cellulose from Kitchen Waste to Prepare Superhydrophobic Aerogel for Recovering Waste Cooking Oil toward a Closed-Loop Biorefinery,” *ACS Sustain Chem Eng*, vol. 8, no. 35, pp. 13400–13407, 2020, doi: 10.1021/acssuschemeng.0c04212.
- [113] K. Hanisah, S. Kumar, and A. Tajul, “The Management of Waste Cooking Oil: A Preliminary Survey,” *Health and the Environment Journal*, vol. 4, no. 1, pp. 76–81, 2013, [Online]. Available: <http://hej.kk.usm.my/pdf/HEJVol.4No.1/Article08.pdf>
- [114] C. Sheinbaum-Pardo, A. Calderón-Irazoque, and M. Ramírez-Suárez, “Potential of biodiesel from waste cooking oil in Mexico,” *Biomass Bioenergy*, vol. 56, pp. 230–238, Sep. 2013, doi: 10.1016/j.biombioe.2013.05.008.
- [115] L. Fereidooni and M. Mehrpooya, “Experimental assessment of electrolysis method in production of biodiesel from waste cooking oil using zeolite/chitosan catalyst with a focus on waste biorefinery,” *Energy Convers Manag*, vol. 147, pp. 145–154, 2017, doi: 10.1016/j.enconman.2017.05.051.
- [116] D. Singh, S. S. Sandhu, and A. K. Sarma, “A comprehensive study for setting up mini-biorefinery pilot plant for biodiesel,

- hybrid fuel, and hydroprocessed fuels derived from waste cooking oil,” *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, vol. 42, no. 4, pp. 432–445, 2020, doi: 10.1080/15567036.2019.1587089.
- [117] “¿Cuáles son los países que más consumen carne en el mundo? | CONtexto ganadero.” <https://www.contextoganadero.com/internacional/cuales-son-los-paises-que-mas-consumen-carne-en-el-mundo> (accessed Apr. 03, 2022).
- [118] F. Toldra-Reig, L. Mora, and F. Toldra, “applied sciences Trends in Biodiesel Production from Animal Fat Waste,” *Applied Science*, vol. 10, no. 3644, pp. 1–17, 2020.
- [119] F. Y. Han, M. Komiyama, Y. Uemura, and N. E. Rabat, “One-path catalytic supercritical methanothermal production of fatty acid methyl ester fractions from wet microalgae *Chlorella vulgaris*,” *Biomass Bioenergy*, vol. 143, no. October, 2020, doi: 10.1016/j.biombioe.2020.105834.
- [120] “Alternative Fuels Data Center: Maps and Data - Global Ethanol Production by Country or Region.” <https://afdc.energy.gov/data/10331> (accessed Apr. 05, 2022).
- [121] F. Dalena, A. Senatore, A. Marino, A. Gordano, M. Basile, and A. Basile, *Methanol Production and Applications: An Overview*. Elsevier B.V., 2018. doi: 10.1016/B978-0-444-63903-5.00001-7.
- [122] “The Methanol Industry | Methanol Institute | www.methanol.org.” <https://www.methanol.org/the-methanol-industry/> (accessed Apr. 05, 2022).
- [123] M. Tabatabaei *et al.*, “Reactor technologies for biodiesel production and processing: A review,” *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 74. Elsevier Ltd, pp. 239–303, Sep. 01, 2019. doi: 10.1016/j.pecs.2019.06.001.
- [124] J. Jiao, J. Li, and Y. Bai, “Ethanol as a vehicle fuel in China: A review from the perspectives of raw material resource, vehicle, and infrastructure,” *J Clean Prod*, vol. 180, pp. 832–845, 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.01.141.
- [125] P. Iodice and M. Cardone, “Ethanol/gasoline blends as alternative fuel in last generation spark-ignition engines: A

- review on co and hc engine out emissions,” *Energies (Basel)*, vol. 14, no. 13, 2021, doi: 10.3390/en14134034.
- [126] V. C. Akubude, K. N. Nwaigwe, and E. Dintwa, “Production of biodiesel from microalgae via nanocatalyzed transesterification process: A review,” *Mater Sci Energy Technol*, vol. 2, no. 2, pp. 216–225, 2019, doi: 10.1016/j.mset.2018.12.006.
- [127] R. Shan, L. Lu, Y. Shi, H. Yuan, and J. Shi, “Catalysts from renewable resources for biodiesel production,” *Energy Convers Manag*, vol. 178, no. July, pp. 277–289, 2018, doi: 10.1016/j.enconman.2018.10.032.
- [128] I. M. Rizwanul Fattah *et al.*, “State of the Art of Catalysts for Biodiesel Production,” *Front Energy Res*, vol. 8, no. June, pp. 1–17, 2020, doi: 10.3389/fenrg.2020.00101.
- [129] A. L. de Lima, C. M. Ronconi, and C. J. A. Mota, “Heterogeneous basic catalysts for biodiesel production,” *Catal Sci Technol*, vol. 6, no. 9, pp. 2877–2891, 2016, doi: 10.1039/c5cy01989c.
- [130] B. Aghel, M. Rahimi, A. Sepahvand, M. Alitabar, and H. R. Ghasempour, “Using a wire coil insert for biodiesel production enhancement in a microreactor,” *Energy Convers Manag*, vol. 84, pp. 541–549, 2014, doi: 10.1016/j.enconman.2014.05.009.
- [131] F. Avellaneda and J. Salvadó, “Continuous transesterification of biodiesel in a helicoidal reactor using recycled oil,” *Fuel Processing Technology*, vol. 92, no. 1, pp. 83–91, 2011, doi: 10.1016/j.fuproc.2010.09.001.
- [132] R. Jachuck, G. Pherwani, and S. M. Gorton, “Green engineering: Continuous production of biodiesel using an alkaline catalyst in an intensified narrow channel reactor,” *Journal of Environmental Monitoring*, vol. 11, no. 3, pp. 642–647, 2009, doi: 10.1039/b807390m.
- [133] A. Kaewchada, S. Pungchaicharn, and A. Jaree, “Transesterification of palm oil in a microtube reactor,” *Canadian Journal of Chemical Engineering*, vol. 94, no. 5, pp. 859–864, 2016, doi: 10.1002/cjce.22464.
- [134] E. L. Mart, P. F. Martins, A. L. J. Munhoz, L. Gutierrez-rivera, and A. A. Einstein, “Continuous Synthesis and in Situ Monitoring of Biodiesel Production in Different Micro fl

- uidic Devices,” *Industrial & Engineering Chemistry Research - IND ENG CHEM RES*, vol. 51, pp. 10755–10767, 2012.
- [135] M. Rahimi, F. Mohammadi, M. Basiri, M. A. Parsamoghadam, and M. M. Masahi, “Transesterification of soybean oil in four-way micromixers for biodiesel production using a cosolvent,” *J Taiwan Inst Chem Eng*, vol. 0, pp. 1–8, 2016, doi: 10.1016/j.jtice.2016.04.023.
- [136] M. F. Elkady, A. Zaatout, and O. Balbaa, “Production of Biodiesel from Waste Vegetable Oil via KM Micromixer,” *J Chem*, vol. 2015, 2015, doi: 10.1155/2015/630168.
- [137] A. Tiwari, V. M. Rajesh, and S. Yadav, “Energy for Sustainable Development Biodiesel production in micro-reactors: A review,” *Energy for Sustainable Development*, vol. 43, pp. 143–161, 2018, doi: 10.1016/j.esd.2018.01.002.
- [138] A. A. Kiss, F. Omota, A. C. Dimian, and G. Rothenberg, “The heterogeneous advantage: Biodiesel by catalytic reactive distillation,” *Top Catal*, vol. 40, no. 1–4, pp. 141–150, 2006, doi: 10.1007/s11244-006-0116-4.
- [139] L. Simasatitkul, P. Siricharnsakunchai, Y. Patcharavorachot, S. Assabumrungrat, and A. Arpornwichanop, “Reactive distillation for biodiesel production from soybean oil,” *Korean Journal of Chemical Engineering*, vol. 28, no. 3, pp. 649–655, 2011, doi: 10.1007/s11814-010-0440-z.
- [140] B. Mondal and A. K. Jana, “Techno-economic Feasibility of Reactive Distillation for Biodiesel Production from Algal Oil: Comparing with a Conventional Multiunit System,” *Ind Eng Chem Res*, vol. 58, no. 27, pp. 12028–12040, 2019, doi: 10.1021/acs.iecr.9b00347.
- [141] X. Gao *et al.*, “Reactive distillation toward an ecoefficient process of continuous biodiesel manufacture from waste oil: Pilot-scale experiments and process design,” *Ind Eng Chem Res*, vol. 59, no. 33, pp. 14935–14946, 2020, doi: 10.1021/acs.iecr.0c02343.
- [142] M. Carmona-Cabello, J. Sáez-Bastante, M. Barbanera, F. Cotana, S. Pinzi, and M. P. Dorado, “Optimization of ultrasound-assisted liquefaction of solid digestate to produce bio-oil: Energy study and characterization,” *Fuel*, vol. 313, 2022, doi: 10.1016/j.fuel.2021.123020.

- [143] M. Zheng, R. L. Skelton, and M. R. Mackley, "Biodiesel reaction screening using oscillatory flow meso reactors," *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 85, no. 5 B, pp. 365–371, 2007, doi: 10.1205/psep07030.
- [144] J. F. García-Martín, C. C. Barrios, F. J. Alés-Álvarez, A. Dominguez-Sáez, and P. Alvarez-Mateos, "Biodiesel production from waste cooking oil in an oscillatory flow reactor. Performance as a fuel on a TDI diesel engine," *Renew Energy*, vol. 125, pp. 546–556, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.renene.2018.03.002.
- [145] A. N. Phan, A. P. Harvey, and M. Rawcliffe, "Continuous screening of base-catalysed biodiesel production using New designs of mesoscale oscillatory baffled reactors," *Fuel Processing Technology*, vol. 92, no. 8, pp. 1560–1567, Aug. 2011, doi: 10.1016/j.fuproc.2011.03.022.
- [146] A. P. Harvey, M. R. Mackley, and T. Seliger, "Process intensification of biodiesel production using a continuous oscillatory flow reactor," in *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, Feb. 2003, vol. 78, no. 2–3, pp. 338–341. doi: 10.1002/jctb.782.
- [147] M. Tabatabaei *et al.*, "Reactor technologies for biodiesel production and processing: A review," *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 74. Elsevier Ltd, pp. 239–303, Sep. 01, 2019. doi: 10.1016/j.pecs.2019.06.001.
- [148] U. Rashid, F. Anwar, B. R. Moser, and S. Ashraf, "Production of sunflower oil methyl esters by optimized alkali-catalyzed methanolysis," *Biomass Bioenergy*, vol. 32, no. 12, pp. 1202–1205, Dec. 2008, doi: 10.1016/j.biombioe.2008.03.001.
- [149] M. Rahimi, B. Aghel, M. Alitabar, A. Sepahvand, and H. R. Ghasempour, "Optimization of biodiesel production from soybean oil in a microreactor," *Energy Convers Manag*, vol. 79, pp. 599–605, Mar. 2014, doi: 10.1016/j.enconman.2013.12.065.
- [150] I. M. Atadashi, M. K. Aroua, A. R. Abdul Aziz, and N. M. N. Sulaiman, "Membrane biodiesel production and refining technology: A critical review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 9. pp. 5051–5062, Dec. 2011. doi: 10.1016/j.rser.2011.07.051.

- [151] T. Leevijit, W. Wisutmethangoon, G. Prateepchaikul, C. Tongurai, and M. Allen, "Design and test of a continuous reactor for palm oil transesterification."
- [152] D. Darnoko and Munir Cheryan, "2000-Continuous Production of Palm Methyl Esters," *Journal of the American Oil Chemists' Society*, vol. 77, no. 12, pp. 1269–1272, 2000.
- [153] H. Falahati and A. Y. Tremblay, "The effect of flux and residence time in the production of biodiesel from various feedstocks using a membrane reactor," *Fuel*, vol. 91, no. 1, pp. 126–133, Jan. 2012, doi: 10.1016/j.fuel.2011.06.019.
- [154] I. A. Daniyan, A. O. Adeodu, O. M. Dada, and D. F. Adewumi, "Effects of Reaction Time on Biodiesel Yield," *Journal of Bioprocessing and Chemical Engineering*, vol. 3, no. 2, pp. 1–3, 2015, doi: 10.15297/JBCE.V3I2.01.
- [155] L. F. Chuah, J. J. Klemeš, S. Yusup, A. Bokhari, M. M. Akbar, and Z. K. Chong, "Kinetic studies on waste cooking oil into biodiesel via hydrodynamic cavitation," *J Clean Prod*, vol. 146, pp. 47–56, Mar. 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.06.187.
- [156] A. D. Patil and S. S. Baral, "Process intensification of thumba methyl ester (Biodiesel) production using hydrodynamic cavitation," *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 171, pp. 277–292, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.cherd.2021.05.007.
- [157] F. Ezebor, M. Khairuddean, A. Z. Abdullah, and P. L. Boey, "Oil palm trunk and sugarcane bagasse derived solid acid catalysts for rapid esterification of fatty acids and moisture-assisted transesterification of oils under pseudo-infinite methanol," *Bioresour Technol*, vol. 157, pp. 254–262, 2014, doi: 10.1016/j.biortech.2014.01.110.
- [158] F. Visscher, J. van der Schaaf, T. A. Nijhuis, and J. C. Schouten, "Rotating reactors - A review," *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 91, no. 10, pp. 1923–1940, Oct. 2013, doi: 10.1016/j.cherd.2013.07.021.
- [159] M. N. bin Mohiddin *et al.*, "Evaluation on feedstock, technologies, catalyst and reactor for sustainable biodiesel production: A review," *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 98, Korean Society of Industrial Engineering Chemistry, pp. 60–81, Jun. 25, 2021, doi: 10.1016/j.jiec.2021.03.036.

- [160] C. G. HILL and Thatcher W. Root, *Introduction to Chemical Engineering Kinetics and Reactor Design*, 2nd ed. John Wiley & Sons, 2014.
- [161] J. A. Conesa, *Chemical reactor design: mathematical modeling and applications*, 1st ed., vol. 1. John Wiley & Sons, 2019.
- [162] G. Q. Wang, Z. C. Xu, and J. B. Ji, "Progress on Hige distillation-Introduction to a new device and its industrial applications," *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 89, no. 8, pp. 1434–1442, Aug. 2011, doi: 10.1016/j.cherd.2011.02.013.
- [163] Z. Qian, Q. Chen, and I. E. Grossmann, "Optimal synthesis of rotating packed bed reactor," *Comput Chem Eng*, vol. 105, pp. 152–160, 2017, doi: 10.1016/j.compchemeng.2017.02.026.
- [164] D. Wenzel and A. Górak, "Review and analysis of micromixing in rotating packed beds," *Chemical Engineering Journal*, vol. 345. Elsevier B.V., pp. 492–506, Aug. 01, 2018. doi: 10.1016/j.cej.2018.03.109.
- [165] Y. H. Chen, Y. H. Huang, R. H. Lin, and N. C. Shang, "A continuous-flow biodiesel production process using a rotating packed bed," *Bioresour Technol*, vol. 101, no. 2, pp. 668–673, Jan. 2010, doi: 10.1016/j.biortech.2009.08.081.
- [166] F. Battin-Leclerc, J. M. Simmie, and E. Blurock, *Green Energy and Technology Developing Detailed Chemical Kinetic Models Cleaner Combustion*, Springer., vol. 1. 2013. [Online]. Available: <http://www.springer.com/series/8059>
- [167] "COSTELLO | Flow Chemistry." https://www.rccostello.com/flow_chemistry.html (accessed Jul. 12, 2022).
- [168] H. D. Hanh, N. T. Dong, K. Okitsu, R. Nishimura, and Y. Maeda, "Biodiesel production through transesterification of triolein with various alcohols in an ultrasonic field," *Renew Energy*, vol. 34, no. 3, pp. 766–768, Mar. 2009, doi: 10.1016/j.renene.2008.04.007.
- [169] N. de Lima Da Silva, C. B. Batistella, R. M. Filho, and M. R. W. Maciel, "Biodiesel production from castor oil: Optimization of alkaline ethanolysis," *Energy and Fuels*, vol. 23, no. 11, pp. 5636–5642, Nov. 2009, doi: 10.1021/ef900403j.

- [170] M. Surya Abadi Ginting, M. Tazli Azizan, and S. Yusup, "Alkaline in situ ethanolysis of *Jatropha curcas*," *Fuel*, vol. 93, pp. 82–85, Mar. 2012, doi: 10.1016/j.fuel.2011.08.062.
- [171] M. Elkelawy *et al.*, "Maximization of biodiesel production from sunflower and soybean oils and prediction of diesel engine performance and emission characteristics through response surface methodology," *Fuel*, vol. 266, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.fuel.2020.117072.
- [172] N. F. Hasanah, "Process Parameter Optimisation for Transesterification of Canola Oil using Continuous Reactor with Homogeneous Base Catalyst," *Advanced Sustainable Engineering*, vol. 01, pp. 1–1, 2021, [Online]. Available: <https://ukischolarsnetwork.org/index.php/ase>
- [173] M. A. Mujtaba *et al.*, "Ultrasound-assisted process optimization and tribological characteristics of biodiesel from palm-sesame oil via response surface methodology and extreme learning machine - Cuckoo search," *Renew Energy*, vol. 158, pp. 202–214, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.renene.2020.05.158.
- [174] K. Komers, F. Skopal, and A. Čegan, "Continuous biodiesel production in a cascade of flow ideally stirred reactors," *Bioresour Technol*, vol. 101, no. 10, pp. 3772–3775, May 2010, doi: 10.1016/j.biortech.2009.12.099.
- [175] J. M. Encinar, S. Nogales-Delgado, and C. M. Álvarez-Medina, "High oleic safflower biolubricant through double transesterification with methanol and pentaerythritol: Production, characterization, and antioxidant addition," *Arabian Journal of Chemistry*, vol. 15, no. 5, May 2022, doi: 10.1016/j.arabjc.2022.103796.
- [176] R. K. Oruganti, M. P. Gungupalli, and D. Bhattacharyya, "Alkaline hydrolysis for yield of glucose and kraft lignin from deoiled *Jatropha curcas* waste: Multiresponse optimization using response surface methodology," *Biomass Conversion and Biorefinery*, vol. 14, no. 10, pp. 11093–11111, 2024.
- [177] D. Liuzzi *et al.*, "Advances in membranes and membrane reactors for the Fischer-Tropsch synthesis process for biofuel production," *Reviews in Chemical Engineering*, vol. 38, no. 1, pp. 55–76, Jan. 2022, doi: 10.1515/revce-2019-0067.

- [178] M. Saidi and P. Moradi, "Conversion of biodiesel synthesis waste to hydrogen in membrane reactor: Theoretical study of glycerol steam reforming," *Int J Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 15, pp. 8715–8726, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.01.064.
- [179] L. B. Moyo, S. E. Iyuke, R. F. Muvhiiwa, G. S. Simate, and N. Hlabangana, "Application of response surface methodology for optimization of biodiesel production parameters from wastecookingoilusingamembranereactor," *SAfrJChemEng*, vol. 35, pp. 1–7, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.sajce.2020.10.002.
- [180] J. Saleh, A. Y. Tremblay, and M. A. Dubé, "Glycerol removal from biodiesel using membrane separation technology," *Fuel*, vol. 89, no. 9, pp. 2260–2266, 2010, doi: 10.1016/j.fuel.2010.04.025.
- [181] J. J. Torres, J. T. Arana, N. A. Ochoa, J. Marchese, and C. Pagliero, "Biodiesel Purification Using Polymeric Nanofiltration Composite Membranes Highly Resistant to Harsh Conditions," *Chem Eng Technol*, vol. 41, no. 2, pp. 253–260, Feb. 2018, doi: 10.1002/ceat.201600257.
- [182] L. B. Moyo, S. E. Iyuke, R. F. Muvhiiwa, G. S. Simate, and N. Hlabangana, "Application of response surface methodology for optimization of biodiesel production parameters from wastecookingoilusingamembranereactor," *SAfrJChemEng*, vol. 35, pp. 1–7, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.sajce.2020.10.002.
- [183] "A COMBINED REACTION/PRODUCT RECOVERY PROCESS FOR THE CONTINUOUS PRODUCTION OF BIODIESEL Approved for Public Release." [Online]. Available: <http://www.osti.gov/contact.html>
- [184] M. Y. Abduh, W. van Ulden, V. Kalpoe, H. H. van de Bovenkamp, R. Manurung, and H. J. Heeres, "Biodiesel synthesis from *Jatropha curcas* L. oil and ethanol in a continuous centrifugal contactor separator," *European Journal of Lipid Science and Technology*, vol. 115, no. 1, pp. 123–131, Jan. 2013, doi: 10.1002/ejlt.201200173.
- [185] G. N. Kraai, F. van Zwol, B. Schuur, H. J. Heeres, and J. G. de Vries, "Two-Phase (Bio)Catalytic Reactions in a Table-Top Centrifugal Contact Separator," *Angewandte Chemie*,

vol. 120, no. 21, pp. 3969–3972, May 2008, doi: 10.1002/ange.200705426.

- [186] I. Noshadi, N. A. S. Amin, and R. S. Parnas, “Continuous production of biodiesel from waste cooking oil in a reactive distillation column catalyzed by solid heteropolyacid: Optimization using response surface methodology (RSM),” *Fuel*, vol. 94, pp. 156–164, Apr. 2012, doi: 10.1016/j.fuel.2011.10.018.
- [187] B. B. He, A. P. Singh, and J. C. Thompson, “A NOVEL CONTINUOUS-FLOW REACTOR USING REACTIVE DISTILLATION FOR BIODIESEL PRODUCTION,” *Trans ASABE*, vol. 49, no. 1, pp. 107–112, 2006, doi: <https://doi.org/10.13031/2013.20218>.
- [188] H. Yuan, B. L. Yang, and G. L. Zhu, “Synthesis of biodiesel using microwave absorption catalysts,” *Energy and Fuels*, vol. 23, no. 1, pp. 548–552, Jan. 2009, doi: 10.1021/ef800577j.
- [189] H. M. Khan, T. Iqbal, M. A. Mujtaba, M. E. M. Soudagar, I. Veza, and I. M. R. Fattah, “Microwave assisted biodiesel production using heterogeneous catalysts,” *Energies*, vol. 14, no. 23, MDPI, Dec. 01, 2021. doi: 10.3390/en14238135.
- [190] C. Leonelli and P. Veronesi, “Microwave reactors for chemical synthesis and biofuels preparation,” in *Production of biofuels and chemicals with microwave*, Springer, 2015, pp. 17–40.
- [191] R. Halim, M. K. Danquah, and P. A. Webley, “Extraction of oil from microalgae for biodiesel production: A review,” *Biotechnology Advances*, vol. 30, no. 3, pp. 709–732, May 2012. doi: 10.1016/j.biotechadv.2012.01.001.
- [192] N. Yari, M. Mostafaei, L. Naderloo, and S. M. Safieddin Ardebili, “Energy indicators for microwave-assisted biodiesel production from waste fish oil,” *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, vol. 44, no. 1, pp. 2208–2219, 2022, doi: 10.1080/15567036.2019.1649324.
- [193] S. Balasubramanian, J. D. Allen, A. Kanitkar, and D. Boldor, “Oil extraction from *Scenedesmus obliquus* using a continuous microwave system - design, optimization, and quality characterization,” *Bioresour Technol*, vol. 102, no. 3, pp. 3396–3403, Feb. 2011, doi: 10.1016/j.biortech.2010.09.119.

- [194] M. G. Nayak and A. P. Vyas, "Optimization of microwave-assisted biodiesel production from Papaya oil using response surface methodology," *Renew Energy*, vol. 138, pp. 18–28, 2019.
- [195] A. Sharma, P. Kodgire, and S. S. Kachhwaha, "Biodiesel production from waste cotton-seed cooking oil using microwave-assisted transesterification: Optimization and kinetic modeling," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 116, pp. 109–394, 2019.
- [196] B. Khedri, M. Mostafaei, and S. M. Safieddin Ardebili, "A review on microwave-assisted biodiesel production," *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, vol. 41, no. 19. Taylor and Francis Inc., pp. 2377–2395, 2019. doi: 10.1080/15567036.2018.1563246.
- [197] J. A. Okolie, J. Ivan Escobar, G. Umenweke, W. Khanday, and P. U. Okoye, "Continuous biodiesel production: A review of advances in catalysis, microfluidic and cavitation reactors," *Fuel*, vol. 307, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.fuel.2021.121821.
- [198] A. Patil, S. Baral, and P. Dhanke, "Hydrodynamic cavitation for process intensification of biodiesel synthesis- a review," *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, vol. 4, p. 100144, 2021, doi: 10.1016/j.crgsc.2021.100144.
- [199] David Reay, Colin Ramshaw, and Adam Harvey, *Process Intensification*, vol. 2 ed. 2013.
- [200] A. Kayode. Coker, *Modeling of chemical kinetics and reactor design*. Gulf Professional Pub, 2001.
- [201] D. Darnoko and Munir Cheryan, "Kinetics of palm oil transesterification in a batch reactor," *Journal of the American Oil Chemists' Society*, vol. 77, no. 12, pp. 1263–1267, 2000.
- [202] F. A. S. Fonseca, J. A. Vidal-Vieira, and S. P. Ravagnani, "Transesterification of vegetable oils: Simulating the replacement of batch reactors with continuous reactors," *Bioresour Technol*, vol. 101, no. 21, pp. 8151–8157, Nov. 2010, doi: 10.1016/j.biortech.2010.05.077.
- [203] O. Alamu, M. Waheed, S. Jekayinfa, and T. Akintola, "Optimal Transesterification Duration for Biodiesel Production

from Nigerian Palm Kernel Oil,” *Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal*, vol. 9, pp. 1–11, 2007.

- [204] N. A. M. Azam, Y. Uemura, K. Kusakabe, and M. A. Bustam, “Biodiesel Production from Palm Oil Using Micro Tube Reactors: Effects of Catalyst Concentration and Residence Time,” in *Procedia Engineering*, 2016, vol. 148, pp. 354–360. doi: 10.1016/j.proeng.2016.06.462.
- [205] A. K. Agarwal, “Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for internal combustion engines,” *Prog Energy Combust Sci*, vol. 33, no. 3, pp. 233–271, 2007, doi: 10.1016/j.pecs.2006.08.003.
- [206] A. T. P. Samad, D. N. Putri, M. S. Perdani, T. S. Utami, R. Arbianti, and H. Hermansyah, “Design of portable biodiesel plant from waste cooking oil,” *Energy Procedia*, vol. 153, pp. 263–268, 2018.
- [207] E. P. A. (EPA), “Biodiesel Production Facilities,” no. November, 2008.
- [208] ASTM D 975, “Standard Specification for Diesel Fuel Oils,” *ASTM*, vol. 03, no. Reapproved, pp. 1–5, 2002, doi: 10.1520/D3992-94R12E01.2.
- [209] ASTM D7467, “Standard Specification for Diesel Fuel Oil , Biodiesel Blend (B6 to B20) 1,” *Astm D7467-13*, no. May, pp. 1–18, 2013, doi: 10.1520/D7467-13.2.
- [210] European Committee for Standardization, “European Standard EN 590:2009 - Automotive fuels - Diesel - Requirements and test methods,” 2009.
- [211] UNE-EN 14214:2013, “Productos petrolíferos líquidos. Ésteres metílicos de ácidos grasos (FAME) para motores diésel y equipos de calefacción. Requisitos y métodos de ensayo,” 2014.
- [212] E. Standard, “European Standard Europäische Norm En 1991-1-2: 2002 / Ac,” pp. 10–12, 2013.
- [213] SUSANA ALEJANDRA TORRES HURTADO Hermosillo, “Generación de burbujas de cavitación con láser continuo para la formación de microagujeros en películas metálicas delgadas,” DEPARTAMENTO DE FISICA, UNIVERSIDAD DE SONORA , Hermosillo, Sonora, 2010.

- [214] JEAN-PIERRE FRANC and JEAN-MARIE MICHEL, *Fundamentals of Cavitation*, vol. 1. NEW YORK, BOSTON, DORDRECHT, LONDON, MOSCOW, 2006.
- [215] J. M. Y. A. Cengel, Cimbala, *Mecánica de fluidos: Fundamentos y Aplicaciones*. México: McGraw Hill, 2006.
- [216] M. P. Tulin, "Steady two-dimensional cavity flows about slender bodies," *David W. Taylor Model Basin, Washington DC, USA, Department of the Navy, Research and Development Report 834*, 1953, Accessed: Nov. 01, 2022. [Online]. Available: <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3A5969057a-a68e-4c3b-9455-cccd8f91c4a>
- [217] T. Yao-Tsu Wu, "A FREE STREAMLINE THEORY FOR TWO-DIMENSIONAL FULLY CAVITATED HYDROFOILS TWO-DIMENSIONAL FULLY CAVITATED HYDROFOILS," 1955.
- [218] P. GENOUX and G. L. CHAHINE, "Equilibre statique et dynamique d'un tore de vapeur tourbillonnaire," *Journal de mécanique théorique et appliquée*, vol. 2, no. 5, pp. 829–857, 1983.
- [219] P. LIGNEUL, "Theoretical tip vortex cavitation inception threshold," *Eur J Mech B Fluids*, vol. 8, no. 6, pp. 495–521, 1989.
- [220] Lord Rayleigh, " VIII. On the pressure developed in a liquid during the collapse of a spherical cavity ," *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, vol. 34, no. 200, pp. 94–98, Aug. 1917, doi: 10.1080/14786440808635681.
- [221] H. Lamb, " XXIII. The early stages of a submarine explosion ," *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, vol. 45, no. 266, pp. 257–265, Feb. 1923, doi: 10.1080/14786442308634111.
- [222] D. Panda and S. Manickam, "Cavitation technology-the future of greener extraction method: A review on the extraction of natural products and process intensification mechanism and perspectives," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 9, no. 4. MDPI AG, Feb. 22, 2019. doi: 10.3390/app9040766.
- [223] Y. Zhang, M. A. Dubé, D. D. McLean, and M. Kates, "Biodiesel production from waste cooking oil: 2. Economic assessment

- and sensitivity analysis," *Bioresour Technol*, vol. 90, no. 3, pp. 229–240, 2003, doi: 10.1016/S0960-8524(03)00150-0.
- [224] E. Cako, Z. Wang, R. Castro-Muñoz, M. P. Rayaroth, and G. Boczkaj, "Cavitation based cleaner technologies for biodiesel production and processing of hydrocarbon streams: A perspective on key fundamentals, missing process data and economic feasibility – A review," *Ultrasonics Sonochemistry*, vol. 88. Elsevier B.V., Aug. 01, 2022. doi: 10.1016/j.ultsonch.2022.106081.
- [225] Y. C. Lin, K. H. Hsu, and J. F. Lin, "Rapid palm-biodiesel production assisted by a microwave system and sodium methoxide catalyst," *Fuel*, vol. 115, no. July, pp. 306–311, 2014, doi: 10.1016/j.fuel.2013.07.022.
- [226] J. Sáez-Bastante, M. Carmona-Cabello, S. Pinzi, and M. P. Dorado, "Recycling of kebab restoration grease for bioenergy production through acoustic cavitation," *Renew Energy*, vol. 155, pp. 1147–1155, 2020, doi: 10.1016/j.renene.2020.04.045.
- [227] M. A. Mujtaba *et al.*, "Ultrasound-assisted process optimization and tribological characteristics of biodiesel from palm-sesame oil via response surface methodology and extreme learning machine - Cuckoo search," *Renew Energy*, vol. 158, pp. 202–214, 2020, doi: 10.1016/j.renene.2020.05.158.
- [228] S. Parthasarathy, T. Siah Ying, and S. Manickam, "Generation and optimization of palm oil-based oil-in-water (O/W) submicron-emulsions and encapsulation of curcumin using a liquid whistle hydrodynamic cavitation reactor (LWHCR)," *Ind Eng Chem Res*, vol. 52, no. 34, pp. 11829–11837, 2013, doi: 10.1021/ie4008858.
- [229] D. Ghayal, A. B. Pandit, and V. K. Rathod, "Optimization of biodiesel production in a hydrodynamic cavitation reactor using used frying oil," *Ultrason Sonochem*, vol. 20, no. 1, pp. 322–328, 2013, doi: 10.1016/j.ultsonch.2012.07.009.
- [230] D. Crudo, V. Bosco, G. Cavaglià, G. Grillo, S. Mantegna, and G. Cravotto, "Biodiesel production process intensification using a rotor-stator type generator of hydrodynamic cavitation," *Ultrason Sonochem*, vol. 33, pp. 220–225, 2016, doi: 10.1016/j.ultsonch.2016.05.001.

- [231] M. Aghbashlo *et al.*, "Machine learning technology in biodiesel research: A review," *Prog Energy Combust Sci*, vol. 85, p. 100904, Jul. 2021, doi: 10.1016/J.PECS.2021.100904.
- [232] J. Sáez-Bastante, S. Pinzi, F. J. Jiménez-Romero, M. D. Luque De Castro, F. Priego-Capote, and M. P. Dorado, "Synthesis of biodiesel from castor oil: Silent versus sonicated methylation and energy studies," *Energy Convers Manag*, vol. 96, pp. 561–567, 2015, doi: 10.1016/j.enconman.2015.03.019.
- [233] A. Abbaszadeh-Mayvan, B. Ghobadian, G. Najafi, and T. Yusaf, "Intensification of continuous biodiesel production from waste cooking oils using shockwave power reactor: Process evaluation and optimization through response surface methodology (RSM)," *Energies (Basel)*, vol. 11, no. 10, 2018, doi: 10.3390/en1102845.
- [234] J. Ji, J. Wang, Y. Li, Y. Yu, and Z. Xu, "Preparation of biodiesel with the help of ultrasonic and hydrodynamic cavitation," *Ultrasonics*, vol. 44, no. SUPPL., Dec. 2006, doi: 10.1016/j.ultras.2006.05.020.
- [235] L. F. Chuah, A. R. A. Aziz, S. Yusup, A. Bokhari, J. J. Klemeš, and M. Z. Abdullah, "Performance and emission of diesel engine fuelled by waste cooking oil methyl ester derived from palm olein using hydrodynamic cavitation," *Clean Technol Environ Policy*, vol. 17, no. 8, pp. 2229–2241, Apr. 2015, doi: 10.1007/s10098-015-0957-2.
- [236] S. Bargole, S. George, and V. Kumar Saharan, "Improved rate of transesterification reaction in biodiesel synthesis using hydrodynamic cavitating devices of high throat perimeter to flow area ratios," *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, vol. 139, pp. 1–13, May 2019, doi: 10.1016/j.cep.2019.03.012.
- [237] L. Dehghan, M. T. Golmakani, and S. M. H. Hosseini, "Optimization of microwave-assisted accelerated transesterification of inedible olive oil for biodiesel production," *Renew Energy*, vol. 138, pp. 915–922, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.renene.2019.02.017.

Autores



James Ronald Vera Rozo

Doctor en Ingeniería Mecánica, con mención *summa cum laude*, y Magíster laureado por la Universidad de Guanajuato (México), e Ingeniero Mecánico por la Universidad Industrial de Santander. Actualmente es Docente Auxiliar de tiempo completo en la Universidad de Pamplona, donde participa en los programas de Ingeniería Mecánica, Maestría en Ingeniería Ambiental y Doctorado en Ciencias Ambientales y Sostenibilidad.

Su investigación se enfoca en el diseño, construcción, simulación y modelado de sistemas térmicos para energías renovables y valorización de residuos, incluyendo biodiésel, biogás, biochar, biofertilizantes y combustibles alternativos. Posee experiencia en el diseño y construcción de plantas de pirólisis industrial en varios países, así como en consultoría de mantenimiento para los sectores palmero, petrolero y de *Oil & Gas*.

✉ james.vera@unipamplona.edu.co

id <https://orcid.org/0000-0003-0516-3936>



José Manuel Riesco Ávila

Doctor en Ingeniería por la Universidad Politécnica de Valencia, Maestro en Ingeniería Mecánica por la Universidad de Guanajuato e Ingeniero Industrial Mecánico por el Instituto Tecnológico de La Laguna. Desde 1988 es profesor de tiempo completo en la Universidad de Guanajuato, donde ha consolidado una destacada trayectoria en docencia y gestión académica, ocupando cargos como la dirección del Departamento de Ingeniería Mecánica y la coordinación de programas de licenciatura y posgrado.

Su labor investigativa se especializa en termofluidos, energías renovables, biocombustibles y la conversión termoquímica de residuos, liderando proyectos enfocados en la obtención de combustibles alternativos y la reducción de emisiones contaminantes. A la par de su prolífica producción científica en revistas internacionales y congresos especializados, cuenta con una amplia experiencia en la formación de nuevos talentos mediante la dirección de numerosas tesis de licenciatura, maestría y doctorado.

✉ riesco@ugto.mx

 <https://orcid.org/0000-0001-7810-2566>



Jarol Derley Ramón Valencia

Es Doctor y Magíster en Ingeniería Ambiental, ambos títulos obtenidos con distinción laureada por la Universidad del País Vasco (España), así como Especialista en Pedagogía Universitaria e Ingeniero de Recursos Naturales y del Ambiente por la Universidad de Pamplona. Actualmente, se desempeña como Docente Asistente de tiempo completo en esta última institución, donde desarrolla actividades de docencia, investigación y extensión académica en los programas de pregrado, maestría y doctorado enfocados en las ciencias ambientales.

Su trayectoria investigativa y profesional se especializa en la gestión del cambio climático, el desarrollo de inventarios de gases de efecto invernadero, el cálculo de la huella de carbono y el modelamiento de la contaminación atmosférica. Asimismo, destaca su participación en proyectos orientados a la economía circular, la evaluación de impactos ambientales y la formulación de políticas de sostenibilidad. A través de su labor, busca generar conocimiento y formar profesionales altamente comprometidos con el diseño de soluciones innovadoras frente a los desafíos ambientales contemporáneos.

✉ jarol.ramon@unipamplona.edu.co

 <https://orcid.org/0000-0002-4929-8544>

