



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

FACULTADES DE QUÍMICA E INGENIERÍA

**Implementación de un reactor para transesterificación
supercrítica y análisis energético para obtención de biodiésel a
partir de aceite de ricino**

TESIS

Presenta:

M en C. Luis Armando Galván Camacho

226256

DOCTORADO EN CIENCIAS DE LA ENERGÍA

Dirigida por:

Dr. Miguel Angel Ramos López

Co-dirigida por:

Dr. Luis Alberto Morales Hernández

Universidad Autónoma de Querétaro

La presente obra está bajo la licencia:
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>



CC BY-NC-ND 4.0 DEED

Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

Usted es libre de:

Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

Bajo los siguientes términos:



Atribución — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante.



NoComercial — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).



SinDerivadas — Si [remezcla, transforma o crea a partir](#) del material, no podrá distribuir el material modificado.

No hay restricciones adicionales — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas](#) que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.

Avisos:

No tiene que cumplir con la licencia para elementos del material en el dominio público o cuando su uso esté permitido por una [excepción o limitación](#) aplicable.

No se dan garantías. La licencia podría no darle todos los permisos que necesita para el uso que tenga previsto. Por ejemplo, otros derechos como [publicidad, privacidad, o derechos morales](#) pueden limitar la forma en que utilice el material.



Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Química
Doctorado en Ciencias de la Energía

“Implementación de un reactor para transesterificación supercrítica y análisis energético para obtención de biodiésel a partir de aceite de ricino”

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de doctor en ciencias de la energía

Presenta:

Luis Armando Galván Camacho

Dirigido por:

Dr. Miguel Angel Ramos López

Dr. Miguel Angel Ramos López
Presidente

Firma

Dr. Luis Alberto Morales Hernández
Secretario

Firma

Dr. Francisco Javier de Moure Flores
Vocal

Firma

Dr. José Santos Cruz
Suplente

Firma

Dr. Rufino Nava Mendoza
Suplente

Firma

Dr. José Santos Cruz
Director de la Facultad

Dr. Manuel Toledano Ayala
Director de investigación y posgrado

Centro Universitario Querétaro, Qro.
Fecha: Diciembre 2025

Agradecimientos

A Dios padre, por darme la oportunidad de realizar mis propios deseos en esta vida, y a la vida misma por enseñarme cada día algo nuevo.

A mis padres, Ana Bertha Camacho Rubio y Armando Galván Rangel, por todo el apoyo que me han brindado desde el primer momento y hasta ahora.

A mis profesores de licenciatura y posgrado, que gracias a que compartieron su conocimiento conmigo es que yo he formado gran parte del mío, y en especial al Dr. Miguel Angel Ramos López que, confiando en mí nuevamente, aceptó ser mi director de tesis, brindándome en todo momento su apoyo con su experiencia y conocimiento, así como gran parte de su equipo de trabajo y su tiempo.

A mis amigos, que me brindan en todo momento su amistad incondicional y su apoyo cuando les es posible.

Por último agradezco SECIHTI significa Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación por el apoyo brindado con la beca para estudios de posgrado, gracias a la cual fue posible la realización de mis estudios de posgrado

ÍNDICE

Resumen.....	9
Abstract.....	9
1. Introducción.....	11
2. Fundamentación teórica	13
2.1. Biocombustibles.....	13
2.1.1. Biocombustibles Líquidos.....	13
2.1.2. Biodiésel	14
2.1.3. Materias primas para la generación de biodiésel.....	14
2.1.4. Aceites de cultivos alimenticios.....	15
2.1.5. Microalgas	15
2.1.6. Residuales de aceites y grasas de origen animal y vegetal.....	15
2.1.7. Aceites provenientes de cultivos no comestibles; Error! Marcador no definido.	
2.2. <i>Ricinus communis</i>	16
2.3. Requerimientos Agroclimáticos de <i>Ricinus communis</i>	17
2.4. Procesos de extracción de aceite de ricino.....	17
2.4.1. Métodos tradicionales.....	17
2.4.2. Extracción por solventes	18
2.4.3. Extracción mecánica.....	18
2.4.4. Extracción asistida por microondas.....	19
2.4.5. Extracción asistida por ultrasonido (UAE).....	19
2.4.6. Extracción enzimática.....	20
2.5. Procesos para obtención de biodiésel	20
2.5.1. Dilución	20
2.5.2. Pirólisis	20
2.5.3. Micro emulsión.....	20
2.5.4. Hidrotratamiento	21
2.5.5. Transesterificación (catálisis homogénea).....	21
2.5.6. Transesterificación (catálisis heterogénea):	21
2.5.7. Transesterificación supercrítica:	21

2.6.	Medición de energía	22
2.7.	Circuito integrado MCP39F511A para análisis de energía	24
3.	Hipótesis	25
4.	Objetivo general	25
5.	Objetivos específicos.....	25
6.	Metodología	26
6.1.	Diseño de reactor de alta presión.....	26
6.1.1.	Volumen de la autoclave.....	27
6.1.2.	Dimensiones de la autoclave.....	27
6.2.	Adaptación de reactor.....	30
	31
6.3.	Seguridad	31
6.4.	Control de temperatura.....	33
6.5.	Control de presión.....	35
6.6.	Determinación de las condiciones óptimas de transesterificación supercrítica con aceite de ricino	37
6.7.	Diseño del sistema de análisis de energía.....	40
6.8.	Construcción del sistema de análisis de energía.....	41
6.8.1.	Sistema mínimo.....	41
6.8.2.	Comunicación serial.....	43
6.8.3.	Detector de cruce por cero	43
6.8.4.	Conexión a canales de alimentación	44
6.8.5.	Fuente de poder	44
6.9.	Determinación del EROEI.....	46
6.10.	Determinación de las características fisicoquímicas del biodiésel obtenido a partir de aceite de ricino	48
6.10.1.	TGA (Thermo gravimetric analysis - TGA).....	48
6.11.	Determinación de los componentes principales del biodiésel	49
6.12.	Densidad.....	49
6.13.	Viscosidad	49
6.14.	Contenido de cenizas	49
7.	Análisis estadístico	50

8. Resultados y discusión	53
8.1. Determinación de las condiciones óptimas de transesterificación supercrítica con aceite de ricino	53
8.2. Determinación de las características fisicoquímicas del biodiésel obtenido a partir de aceite de ricino	57
8.2.1. Densidad, viscosidad, contenido de cenizas y punto de inflamabilidad	57
8.2.2. Determinación de los componentes principales del biodiesel	59
8.2.3. Análisis de energía.....	60
8.2.4. Determinación del EROEI.....	62
9. Conclusiones	63
10. Referencias	64

Índice de tablas

Tabla 1: ANDEVA del experimento del ensayo preliminar	53
Tabla 2: Condiciones óptimas para el experimento	54
Tabla 3: Propiedades del biodiesel obtenido.....	57
Tabla 4: Comparación de rendimientos para diferentes procesos de transesterificación supercrítica.....	58
Tabla 5: Resultados de cromatografía de gases acoplado a masas para biodiesel a partir de transesterificación supercrítica.....	59
Tabla 6: Resultados de cromatografía de gases acoplado a masas para biodiesel a partir de transesterificación catalítica	59
Tabla 7: Datos de gasto energético para el lote con las condiciones óptimas.....	60

Índice de figuras

Figura 1: Nomenclatura del cilindro y cabezal según código ASME	26
Figura 2: Modelo 2D del reactor inicial propuesto en AUTOCAD.....	28
Figura 4: Modelo 3D del reactor	29
Figura 3: Dimensiones 2D de la tapa superior y la tapa inferior en centímetros	29
Figura 5: Dimensiones internas, de la tapa superior e inferior (de izquierda a derecha) ...	30
Figura 6: Reactor adquirido.....	30
Figura 7: Reactor con compresor de CO ₂	31
Figura 8: Disco de ruptura para seguridad.....	32
Figura 9: Sistema de control de presión implementado.....	32
Figura 10: Válvula de seguridad acoplada a servomotor.....	33
Figura 11: Visualización de presión del sistema	33
Figura 12: Curva temperatura en ° C (eje y) vs tiempo en min (eje x) para 127v.....	34
Figura 13: Curva temperatura en ° C (eje y) vs tiempo en min (eje x) para 220v.....	35
Figura 14: Código en CCS compiler para el sistema de control de presión activo	36
Figura 15: Sistema integrado de control de presión activo (sensor, válvula y servomotor) y pasivo (disco de ruptura)	37
Figura 16: Proceso de metil esterificación y transesterificación de aceite de ricino	38
Figura 17: Proceso de hidrólisis + esterificación de ácidos grasos y transesterificación de triglicéridos llevado a cabo en los experimentos.....	40
Figura 18: Diagrama simplificado de resistencia de SHUNT y carga del reactor	41
Figura 19: Circuito mínimo recomendado para la utilización del MCP39F511N.....	41
Figura 20: Sistema mínimo para el MCP39F511N	42
Figura 21: Circuito de comunicación serial para el MCP	43
Figura 22: Detector de cruce por cero	43
Figura 23: Conexiones de conectores IEC en la plataforma y a la línea de alimentación ...	44
Figura 24: Circuito de alimentación para la plataforma	44

Figura 25: Diseño de PCB en ALTIUM DESIGNER®	45
Figura 26: Vista de componentes del diseño de PCB.....	45
Figura 27: Placa circuito con componentes	46
Figura 28: Sistema de medición de energía montado con reactor.....	46
Figura 29: Captura de datos de la plataforma vía serial	47
Figura 30: Visualización en tiempo real de los datos de energía gastada	47
Figura 31: TGA Q500 TA	48
Figura 32: factores y niveles del experimento (RelAlcAce: Relación alcohol/aceite, RelAceAgua: Relación aceite/agua)	50
Figura 33: Unidades experimentales del diseño (RelAlcAce: Relación alcohol/aceite, RelAceAgua: Relación aceite/agua)	51
Figura 34: Experimento para optimización de factores (RelAlcAce: Relación alcohol/aceite, RelAceAgua: Relación aceite/agua)	52
Figura 35: gráfica de interacción alcohol/aceite, tiempo y relación de glicerol.....	54
Figura 36: gráfica de interacción aceite/agua, tiempo y relación de glicerol.....	55
Figura 37: gráfica de interacción alcohol/aceite, tiempo y relación de glicerol para nuevo experimento.....	55
Figura 38: gráfica de interacción aceite/agua, tiempo y relación de glicerol para el nuevo experimento.....	56
Figura 39: Curva TGA/DTG para la muestra de biodiesel obtenido.....	57
Figura 40: Corriente utilizada (Amperes en eje Y vs iteraciones en eje X) durante el proceso de transesterificación supercrítica.....	60
Figura 41: Potencia aparente del reactor utilizada (Volt-Amperes en eje Y vs iteraciones en eje X) durante el proceso de transesterificación supercrítica	61
Figura 42: Energía del reactor utilizada (Wh en eje Y vs iteraciones en eje X) durante el proceso de transesterificación supercrítica.....	61

Resumen

En la problemática de combustibles fósiles, alza en los precios y problemas por gases de efecto invernadero, se trabaja con combustibles alternativos. En el tema particular del biodiésel hecho a partir de aceite de la semilla de *Ricinus communis* L. Se realizan diferentes procesos que involucran transformaciones químicas tales como la transesterificación por catálisis, la cual, al hacer uso de catalizadores como el KOH o el NaOH, tienden a inducir saponificación en presencia de agua y calor, además de que se requieren procesos de lavado con agua desionizada para la remoción de dicho catalizador, lo cual crea inconvenientes como contaminación en agua y procesos extra de preprocesamiento en los aceites a utilizar. En este trabajo se diseñó y modificó un reactor tipo autoclave para la obtención de biodiésel a partir de aceite de ricino, se realizaron experimentos para determinar las condiciones óptimas de temperatura, presión y tiempo de la reacción de transesterificación supercrítica, siendo estos 270° C, 1200 PSI, 60 min de reacción. Se obtuvo también un análisis de gasto energético para determinar la tasa de retorno energético (ERoEI por sus siglas en inglés) del proceso, esto mediante un analizador de energía que permitió obtener los siguientes parámetros: voltaje RMS, corriente RMS, potencia activa, potencia reactiva, potencia aparente, frecuencia, factor de potencia y la energía acumulada, obteniendo una ERoEI de 0.41, una vez encontradas las condiciones óptimas de transesterificación se realizó la determinación de las propiedades fisicoquímicas, obteniendo valores de densidad de 0.88 g/mL, viscosidad de 20.37 mm²/s, un contenido de cenizas de 0.8%, un punto de inflamabilidad de 250° C y un 91% de metil ésteres de cadena larga y 9% de aldehídos y alcoholes de acuerdo a la cromatografía de gases.

Abstract

In the problematic of fossil fuels, rising prices and problems due to greenhouse gases, alternative fuels are being worked on. On the particular subject of biodiesel made from oil from the seed of *Ricinus communis* L. Different processes are carried out that involve chemical transformations such as transesterification by catalysis, which, when using catalysts such as KOH or NaOH, tend to induce saponification in the presence of water and heat, in addition to the fact that washing processes with deionized water are required for the removal of said catalyst, which creates inconveniences such as contamination in water and extra preprocessing processes in the oils to be used. In this work, an autoclave-type reactor was designed and modified to obtain biodiesel from castor oil, experiments were carried out to determine the optimal conditions of temperature, pressure and time of the supercritical transesterification reaction, these being 270° C, 1200 PSI, 60 min of reaction. An energy expenditure analysis was also obtained to determine the energy return rate (ERoEI) of the process, this by means of an energy analyzer that allowed to obtain the following parameters: RMS voltage, RMS current, active power, reactive power, apparent power, frequency, power factor and accumulated energy, obtaining an ERoEI of 0.41, once the optimal transesterification conditions were found, the physicochemical properties were determined, obtaining density values of 0.88 g/mL, viscosity of 20.37 mm²/s, an ash content of 0.8%, a flammability point of

250° C and 91% of methyl long-chain esters and 9% of aldehydes and alcohols according to gas chromatography.

1. Introducción

La quema de combustibles fósiles es, por mucho, la mayor fuente humana de emisiones de gases de efecto invernadero. Un desafío contemporáneo para las políticas climáticas es cómo disuadir a las economías ricas en este tipo de combustibles de dejar de arrojar emisiones. Las políticas para reducir la demanda de éstos, que se centran en el punto de combustión, aún tienen que poner las emisiones en un rumbo coherente con los objetivos de cambio climático del acuerdo de París. Con las tasas de extracción actuales, las reservas probadas de carbón y petróleo en todo el mundo podrían durar alrededor de 110 y 50 años, respectivamente (WCARtFC; 2025). El uso de biocombustibles como fuentes alternativas es una de las soluciones más prometedoras a los problemas de combustibles convencionales limitadas y los impactos ambientales negativos asociados a su uso y a la cada vez menor disposición (Choi et al., 2016). Los biocombustibles se clasifican según el origen de sus insumos. En este sentido, los de primera generación son los que se obtienen a partir de cultivos destinados habitualmente al consumo humano o animal. Los de segunda son aquellos biocombustibles generados a partir de cultivos no comestibles, lo cual engloba a restos de cultivos no destinados al consumo humano, de la elaboración de alimentos y desechos orgánicos municipales (Guo et al., 2015; Taylor, 2008). Los de tercera son aquellos producidos a partir de microalgas y otros microorganismos, las cuales tienen altos rendimientos de carbohidratos, proteínas y aceites (Singh & Heldman, 2016). Por último, los de cuarta generación son aquellos que utilizan la ciencia de ingeniería genética para el crecimiento de materias primas, (Abdulkareem-Alsultan et al., 2020).

En términos generales, se buscan cultivos oleaginosos no comestibles para biocombustibles de segunda generación cuyas características hagan de éstos opciones sustentables para su utilización (Taylor, 2008). En este sentido, *Ricinus communis* L; planta arbustiva de la familia Euphorbiaceae, es un cultivo oleaginoso importante no comestible que tiene una alta producción anual y buen rendimiento en lugares donde se cultiva comercialmente, además debido a que es adecuada para desarrollarse en suelos marginales y climas semi áridos como los presentes en varios municipios en el estado de Querétaro. Su contenido de aceite se considera como una fuente combustible renovable y limpia. El nombre científico "Ricinus" viene de la garrapata de las ovejas europeas llamada *Ixodes ricinus* y "communis" del latín "común" debido a que es la única especie conocida del género. Es comúnmente conocida como ricino, castor, higuera, etc. (Bueno et al., 2017). Este cultivo es ampliamente sembrado en áreas secas de los trópicos y subtrópicos con diferentes temperaturas y con veranos cálidos (Mondal & Das, 2019). La producción mundial de aceite de ricino es próxima a 1.8 millones de toneladas anuales. Los principales productores son India, china y Brasil (Attia et al., 2018). Contienen cantidades de aceite rico en triglicéridos de entre 40 y 60 %. Principalmente ácido ricinoléico (Mondal & Das, 2019). Dado que las semillas son venenosas por la presencia de la proteína tóxica ricina, es necesaria precaución durante la cosecha (Scholz & da Silva, 2008). En particular, el aceite de ricino es un líquido no comestible, y su aplicación en la industria de los biocombustibles, en comparación del uso de materia prima sostenible (otro tipo de cultivos) para producción de

biodiésel mediante tecnologías de transesterificación convencionales no crea crisis alimentarias ni eleva preocupaciones ambientales críticas (Canoira et al., 2010; Conceição et al., 2007; Maleki et al., 2013; Mukesh et al., 1993; Panwar et al., 2010). En adición, la producción de biodiésel con aceite de ricino es más barato comparado con otros aceites vegetales debido a que es soluble en alcohol y se somete a la reacción de transesterificación con calentamiento mínimo bajo condiciones de temperatura ambientales (Ramezani et al., 2010). Para este tipo de aceite, las condiciones de transesterificación son cruciales. Altos tiempos de reacción y temperatura propician la pérdida evaporativa de metanol (Arora, 2014), alterando la relación molar metanol aceite y evitando la formación de productos en la reacción, resultando en saponificación (Dhawane et al., 2018, 2019; Leung & Guo, 2006); Halder et al., 2015; Leung & Guo, 2006). Debido a esto se propone una técnica alternativa como la transesterificación supercrítica (altas presiones y temperaturas), reacción que evita el uso de catalizadores y disminuye los tiempos de proceso (Demirbaş, 2001; Kusdiana & Saka, 2001; Madras et al., 2004; Saka & Kusdiana, 2001; Warabi et al., 2004). En la cual se realizó el diseño y construcción de un reactor para la producción de biodiésel a partir del aceite de ricino, mientras se efectuó un análisis de gasto energético del proceso para cada lote de biocombustible adquirido.

2. Fundamentación teórica

2.1. Biocombustibles

La producción de energía a partir de biomasa es una vía renovable que se utiliza para reducir el impacto de la producción y uso de energía a lo largo el planeta (McKendry, 2002). Para este cometido, la biomasa tiene el mayor potencial y puede ser considerada como la mejor (Demirbaş, 2001) opción para atender la demanda y seguridad del suministro de combustibles de una manera sustentable (Chandra Kishore et al., 2022).

De acuerdo con (Demirbaş, 2001) En este sentido la energía se puede obtener de la biomasa de 5 maneras:

- Uso de cultivos productores de azúcar, almidón, aceite y celulosa;
- Los desechos sólidos pueden ser incinerados;
- Los biodigestores anaeróbicos creadores de biogás, aquellos que pueden ser utilizados para generar calor y electricidad;
- Producción de metano a partir de desechos sólidos en rellenos sanitarios y producción de biocombustibles líquidos que incluyen etanol, metanol, biodiésel y sus derivados (Demirbaş, 2001).

De acuerdo con (Bartocci et al., 2020) existen 3 tipos de biocombustibles:

- Los derivados de la biomasa (basados en su composición)
- Biogas: derivado de gasificación de biomasa
- Biocombustibles líquidos: En su mayor parte derivados de aceites

2.1.1. Biocombustibles líquidos

Estos constituyen una de las escasas alternativas para la sustitución a corto o mediano plazo de buena parte de los combustibles derivados del petróleo. Poseen la capacidad de brindar reducciones en las emanaciones de gases de efecto invernadero y fortalecer la libertad energética. No obstante, en la actualidad, el encarecimiento de los insumos alimentarios y los deficientes rendimientos energéticos de estos productos (específicamente en los de primera generación) han provocado que se ponga en duda su empleo de forma global; asimismo, las inquietudes futuras se orientan hacia la ocupación de terrenos agrícolas, las materias primas consisten en especies vegetales de base lipídica, tales como las semillas oleaginosas para la manufactura de biodiésel, y plantas ricas en azúcar, como la caña de azúcar para la obtención de etanol. Dichos cultivos, que cuentan con una aplicación nutricional, se denominan cultivos energéticos de “primera generación”. Por otra parte, la totalidad de la masa lignocelulósica (biomasa en la que la mayoría de las paredes celulares exhiben una elevada concentración de carbono) puede transformarse en combustibles líquidos mediante procedimientos biológicos (esterificación y fermentación) o por medio de vías termoquímicas como la pirólisis. Aquellas plantaciones que carecen de fines alimentarios se identifican como de “segunda generación”. Los biocombustibles que emplean algas como recurso básico se designan como de “tercera generación” y, finalmente, aquellos insumos modificados genéticamente para obtener un alto desempeño de biomasa y reducidos niveles de lignocelulosa y lignina se adscriben a la denominada “cuarta generación” de biocombustibles.. La complejidad de la cadena de suministro de los

cultivos de segunda generación puede impedir el desarrollo de los biocombustibles, pero puede ser también ventajoso, ya que pueden emerger muchos productos de la pequeña agricultura (Taylor, 2008). Los biocombustibles líquidos pueden ser algunos como: bioturbosina, etanol, biobutanol y biodiésel. (Ziolkowska, 2020).

2.1.2. Biodiésel

La Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM, por sus siglas en inglés) define al biodiésel como un combustible compuesto de ésteres monoalquílicos de ácidos grasos de cadena larga derivado de aceites vegetales o grasas animales (ASMT, 2015). En México, la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos lo define como “combustible que se obtiene por la transesterificación de aceites de origen animal o vegetal” (DOF, 2008).

Aunque la especificación ASTM D6551 no indica el proceso de producción en su definición de biodiésel, señala que comúnmente se produce por una reacción de aceites vegetales o grasas animales con un alcohol en presencia de un catalizador para producir ésteres monoalquílicos y glicerina (ASMT, 2015).

Se considera como “biodiésel convencional” aquel combustible renovable y limpio derivado de aceites vegetales o grasas animales, químicamente constituido por una mezcla de ésteres monoalquílicos de ácidos grasos de cadena larga (Cheng & Timilsina, 2011). El término convencional se refiere al tipo de biomasa empleado para su obtención: fuentes comestibles/alimenticias también denominadas de primera generación. (Pérez-Bravo et al., 2022)

El “biodiésel avanzado”, en contraparte, representa un combustible sustentable y libre de impurezas, integrado por una combinación de ésteres monoalquílicos de ácidos grasos de cadena larga; asimismo, presenta la posibilidad de poseer una configuración química y un potencial calórico muy parecidos al diésel tradicional, siempre que el diésel renovable se incluya dentro de dicha clasificación.. El término avanzado alude a la tecnología y/o al tipo de biomasa usada en su producción: fuentes no comestibles/no alimenticias desarrolladas sustentablemente, aceites/grasas residuales, residuos agrícolas, residuos municipales e inclusive aceites derivados de microorganismos (Vilas Bôas et al., 2022)

2.1.3. Materias primas para la generación de biodiésel

Los insumos primordiales para la obtención de biodiésel tradicional a través de la transesterificación se constituyen de aceites de grado alimenticio junto con el metanol. Mientras que los insumos del biodiésel avanzado incluyen los aceites de cultivos no alimenticios/no comestibles, aceites/grasas residuales y materiales lignocelulósicos denominados fuentes de segunda generación, así como los aceites derivados de microorganismos que se consideran insumos de tercera generación (Sandoval, 2010). El tipo de insumo empleado es relevante porque éste imparte características relacionadas con las propiedades del biodiésel producido (Zhang et al., 2017). El metanol se posiciona como el alcohol predilecto para la manufactura de biodiésel, debido a su reducido precio y a sus beneficios en términos químicos y

físicos. Cuando éste se emplea en su producción, usualmente al producto también se le denomina éster metílico de ácidos grasos en vez de biodiésel (FAME, por sus siglas en inglés). El uso de otros alcoholes como el etanol e iso-propanol es posible, pudiéndose obtener biodiésel con mejores propiedades combustibles, pero su uso está limitado cuando se buscan cumplir varios estándares existentes (Knothe, 2010).

2.1.4. Aceites de cultivos alimenticios

Los aceites comestibles como el de soya, palma, canola, girasol, cártamo, coco, maíz y cacahuete se consideran insumos de primera generación por ser los primeros cultivos empleados en la producción del biodiésel (Balat, 2011). La mayor cantidad del biodiésel se produce mediante aceites comestibles como el de soya (Estados Unidos), canola (Europa) y palma (Malasia) (Stoytcheva & Montero, 2021). Las ventajas de los aceites comestibles son su composición pura (reduce su pretratamiento), su disponibilidad a gran escala, su comercialización internacional y la posibilidad de ser importados (Balat, 2011). Las desventajas incluyen su competencia con la producción de alimentos y las preocupaciones por la posible deforestación y cambios de uso de suelo relacionados con el incremento en la producción de aceite vegetal (Naylor & Higgins, 2018).

2.1.5. Microalgas

Las microalgas son organismos fotosintéticos que convierten la luz del sol, agua y dióxido de carbono en biomasa y representan el insumo de tercera generación para producir biodiésel. Dada su eficiencia fotosintética para producir biomasa, tasas altas de crecimiento y gran contenido de aceite, se consideran el único insumo capaz de cumplir la demanda de combustibles y desarrollarse sustentablemente en el futuro (Atabani et al., 2012; Tabatabaei et al., 2015a).

Existen algunas investigaciones e intentos para obtener biodiésel mediante la transesterificación de aceites de algas (Atabani et al., 2012; Tabatabaei et al., 2015a). Sin embargo, éste posee altos costos de producción. Por ello, los esfuerzos se orientan a seleccionar las mejores cepas y establecer estrategias de cultivos robustas y estables comercialmente, administrando sustentablemente el uso de tierra, agua y nutrientes para obtener la máxima productividad de biomasa y lípidos con microalgas (US DoE, 2025.; ETIP, 2025.; Loera-Quezada & Olguín, 2010).

2.1.6. Residuos de aceites y grasas de origen animal y vegetal

Las grasas animales como el de res, aves, cerdo, grasas y aceites sobrantes de cocina se consideran insumos de segunda generación. En particular, los aceites y grasas residuales son una alternativa para producir biodiésel al ser una materia prima barata y eliminar la necesidad de disponer estos residuos (Kumar & Sharma, 2011; Tabatabaei et al., 2015a).

En particular, el aceite de cocina usado es 2.5-3.5 veces más barato que los aceites puros, su disponibilidad no se afecta por políticas de uso de suelo, se producen grandes cantidades en las cocinas de todo el mundo y su pretratamiento solo

requiere deshidratación y filtrado por lo que su conversión convencional es ideal para instalaciones pequeñas ubicadas en centros urbanos (Bart, 2011).

No obstante, el empleo de aceites de desecho puede manifestar complicaciones técnicas y de gestión logística debido a su carácter remanente, destacando factores como su acopio, monitoreo y seguimiento de origen. De igual forma, este recurso puede demandar múltiples etapas de tratamiento previo cuando exhibe concentraciones elevadas de sustancias insaponificables, humedad y ácidos grasos libres. Por lo que los costos de producción de biodiésel de aceite residual pueden ser elevados (Martínez Valencia, 2011).

2.1.7. Grasas derivadas de plantaciones no aptas para el consumo humano

Las grasas de carácter no alimentario constituyen una alternativa para atenuar el empleo de aceites de grado comestible en la manufactura de biodiésel. Se consideran insumos sostenibles siempre y cuando se cultiven en páramos no aptos para cultivos alimenticios, eliminen la competencia por alimentos, reduzcan la deforestación, sean más eficientes, ambientalmente amigables y más económicos que los aceites comestibles (Tabatabaei et al., 2015a).

Aunque existen varios cultivos de aceites no comestibles para producir biodiésel (Atabani et al., 2012), algunos destacados son la jatropha (*Jatropha curcas*), la camelina (*Camelina sativa*) y la higuera (*Ricinus communis*) (Tabatabaei et al., 2015b).

La jatropha es una planta perenne que se puede cosechar casi continuamente (30-50 años), resiste a sequías, crece rápido y se adapta a varias condiciones climáticas (SAGARPA-SENASICA, 2012) mientras que la higuera es una planta tropical que tolera suelos variables y reduce la erosión de este (Balat, 2011; INIFAP, 2011).

En general, se señala que ambos cultivos crecen con poca irrigación en suelos marginales de cualquier tipo, aunque también se ha encontrado que para producir altos rendimientos se requiere abastecer adecuadamente de agua y nutrientes (IEA, 2022).

2.2. *Ricinus communis*

El ricino se define como un arbusto ramificado de ciclo perenne y desarrollo acelerado, que en ocasiones se manifiesta como un árbol de madera poco densa con una elevación habitual de 3 metros, aunque puede superarla. Durante su ciclo inicial, es capaz de llegar a los 12 metros de longitud. Por su parte, los granos presentan dimensiones que oscilan entre los 15 y 20 mm de longitud, con un grosor que va de los 5 a los 12 mm. La semilla, en variedades híbridas contiene de 47 a 51 % de aceite. (Aboelazayem, El-Gendy, et al., 2018)

Su ciclo vital se manifiesta de forma anual, bienal o perenne; asimismo, brota entre las estaciones de otoño y primavera, exhibiendo un desarrollo acelerado. Comienza a producir a partir de los 6 meses y continúa rindiendo frutos durante todo el año durante 6 a 7 meses (Hadiyanto et al., 2020) Crece lentamente en invierno. "Al llegar la primavera, los ejemplares inician un desarrollo acelerado. El rendimiento de la cosecha decae de manera considerable tras el tercer ciclo de recolección, etapa en la cual la plantación requiere ser sustituida. Se comporta como un cultivo anual en

áreas heladas (Gad et al., 2018). Tradicionalmente, se usa para iluminación y en medicina (Cotrina Mamani, 2024). Se utiliza también como un lubricante de alta calidad y es en general una materia prima versátil en la industria química (Arbab et al., 2013).

2.3. Requerimientos Agroclimáticos de *Ricinus communis*

Esta especie requiere de temperaturas de 6 a 32° C con una media de 15 a 28° C para un buen crecimiento, temperaturas de más de 36° C provocan aborto de las flores reduciendo fuertemente el rendimiento, lo que provoca también mermas en el contenido de aceite. Las temperaturas inferiores a 2° C provocan la pérdida de viabilidad del polen (Arumugamurthi et al., 2022). Los requerimientos mínimos para su desarrollo en cuanto a precipitación son de 400 a 500 mm (Tropical and Subtropical Agroecosystems, 2018.), puede soportar periodos de sequía y producir semillas menos pesadas y con menor porcentaje de aceite. La altitud donde es factible sembrar es desde el nivel del mar hasta una altitud de 2300 m. Los tipos de suelos propicios para su buen desarrollo son los regosoles, cambisoles, feozems, vertisoles, litosoles y rendzinas con textura media a gruesa. El PH del suelo donde puede prosperar es de 4.5 a 8.3. (Falasca et al., 2012)

Tratándose de las semillas, estas se encontrarán preparadas para su recolección una vez que la totalidad de las cápsulas hayan completado su secado. Postergar la siega cuando el cultivo ha alcanzado su punto óptimo puede derivar en mermas durante el proceso, dado que los granos son proyectados fuera de las cápsulas. Habitualmente, las semillas de aceite de ricino se extraen de forma manual y los frutos maduros se retiran directamente del ejemplar. Los granos obtenidos se someten a un deshidratado para suprimir la humedad, permitiendo que su contenido oleoso se obtenga mediante diversos métodos (Subramaniam et al., 2013).

2.4. Procesos de extracción de aceite de ricino

2.4.1. Métodos comúnmente tradicionales

En términos de recuperación de aceite y rendimiento, a manera tradicional e informal de extracción usados por comunidades rurales alrededor del mundo es reconocida como ineficiente Olaniyan, (2010) ha propuesto 3 maneras principales de recuperación de aceites de materiales oleaginosos originarios de plantas, como son: extracción húmeda (agua caliente o por acción de vapor), extracción por solventes y prensado mecánico. En términos de la extracción húmeda Oluwole et al., (2015), señalaron 9 principales pasos involucrados en la extracción de aceite de ricino por el método tradicional siendo: recolección de vainas de semillas, abrir las vainas, hervir las semillas para reducir humedad, machacar las semillas para formar una pasta, mezclar la pasta con agua/hervir para extraer aceite y separar aceite, secándolo por calentamiento y además valoraron el porcentaje de eficacia de recuperación de aceite, obteniendo un 19.42%.

"Los procedimientos tradicionales gozan de gran aceptación y se ejecutan de forma masiva, destacando primordialmente la obtención mediante solventes y el prensado mecánico. Numerosos granos se procesan empleando ambas técnicas o a través de la integración de las dos (Armendáriz et al., 2015; Fatimah et al., 2022).

2.4.2. Extracción mediante solventes

La obtención mediante solventes se ejecuta habitualmente en granos que poseen una escasa concentración oleosa (inferior al 20%), tal como sucede con la soya. Este método es considerado como uno de los más eficientes en extracción de aceite vegetal, con muy poco residuo de aceite en la pasta (Buenrostro & López-Munguía, 1986; Saurabh, 2011). Los solventes más comúnmente usados son hexano, dietil éter, éter de petróleo y etanol, las consideraciones en la elección del solvente son la alta relación soluto-solvente, volatilidad del solvente con el aceite, viscosidad y polaridad del aceite, costo y disponibilidad del solvente (Muzenda et al., 2012; Takadas & Doker, 2017).

De acuerdo con Muzenda et al. (2012), en la optimización en los parámetros de proceso para aceite de ricino que realizaron, determinaron que la habilidad de extracción es mejorada aumentando el tiempo de extracción y mediante una relación solvente-soluto de 6:1.

En su trabajo en extracción caracterización y modificación de aceite de ricino, Akpan et al., (2006), hicieron uso de la extracción de aceite de pasta de semillas de ricino usando extractor Soxhlet, obtuvieron 33.2% de eficiencia de extracción y concluyeron que el modo de extracción y la variedad de la semilla son parámetros importantes que afectan la eficiencia de extracción de este.

Algunas de las ventajas de este método de extracción son la repetibilidad y reproducibilidad, sin embargo, las desventajas son largos periodos de extracción, consumo relativamente alto de solvente, altas inversiones, alto requerimiento de energía, emisiones de compuestos orgánicos volátiles a la atmósfera, altos costos de operación, baja calidad del aceite y por el número de pasos en el proceso (Buenrostro & López-Munguía, 1986; Dawidowicz et al., 2008; del Valle & Aguilera, 1999; Takadas & Doker, 2017). Aunado a lo anterior, el proceso hace uso de solventes orgánicos cuya remoción trae consigo costos adicionales y pasos extra en el proceso (Ijaz et al., 2019; Takadas & Doker, 2017).

2.4.3. Extracción mecánica asistida

La extracción mecánica involucra la aplicación de presión (usando prensa hidráulica o de tornillo) para forzar al aceite a salir de los materiales oleaginosos (Arisanu, 2013). Mediante este mecanismo la eficiencia de extracción es implementada por el incremento de presión, Mwithiga & Moriasi., (2007) hallaron que la eficiencia de extracción aumentaba con presiones dentro del rango de (40-80 kgf m⁻²), la duración de prensado de 6-12 min y mediante el incremento de temperatura del lote, alcanzando 75 °C.

En cuestión del porcentaje de extracción, la prensa de tornillo tiene una ventaja contra la prensa hidráulica por tener ligeramente mejor eficiencia, en adición a su modo de extracción continuo (Arisanu, 2013). La extracción mecánica es generalmente más sencilla, segura y contiene menos pasos que la extracción que empleando solventes (Oyinlola et al., 2004).

Los métodos de prensa mecánica son usualmente usados para extraer aceites vegetales de semillas que contengan arriba del 20% (Sinha et al., 2015). Generalmente estos métodos tienen la ventaja de bajo costo de operación y la producción de aceites es de alta calidad con poco contenido de ácidos grasos libres

(Carr, 2014; Kirk et al., 1949). Sin embargo, este método de extracción tiene menor eficiencia comparado con la extracción por solventes, dejando una porción grande del mismo en la pasta restante (Anderson et al., 2020; Buenrostro & López-Munguía, 1986). En la extracción de aceite de ricino, la prensa mecánica remueve cerca del 45% presente en las semillas, con un remanente en la pasta, extraíble mediante solventes (Ogunniyi, 2006).

Existen dos variantes de procedimientos para el prensado mecánico, denominadas extracción en frío y extracción en caliente. La técnica en frío, también identificada como método de escarificación, se desarrolla bajo condiciones térmicas reducidas (menores a 50 °C), en contraste con el prensado en caliente, el cual se ejecuta a temperaturas altas. Por lo general, el procesamiento en frío ofrece mayores niveles de seguridad que su contraparte térmica; no obstante, pueden manifestarse consecuencias negativas, tales como la reducción de la estabilidad frente a la oxidación y el deterioro de elementos esenciales del aceite. La pureza y las propiedades naturales del aceite son preservadas con la compresión fría (Azad & Rasul, 2019; Bhatol, 2013). Los métodos de prensado en caliente tienen mayores eficiencias debido a la disminución de la viscosidad del aceite a altas temperaturas, las eficiencias son cercanas al 80% del aceite disponible en semillas (Patel et al., 2016).

2.4.4. Extracción asistida mediante microondas

La extracción asistida por microondas es una técnica innovadora para extracción de aceites vegetales y aceites esenciales (Ramanadhan, 2005; Rassem et al., 2016). Dicho procedimiento resulta sencillo, no obstante, supera a diversas técnicas térmicas empleadas en la obtención de aceites de categoría superior. El pretratamiento para las semillas es realizado en un horno de microondas, que usa ondas de radio para transmitir y convertir energía en calor a frecuencias de 300 MHz a 300 GHz (Singh & Heldman, 2016). El uso de radiación de microondas resulta en la ruptura de membranas celulares, haciendo posible una mayor eficiencia en la extracción y un incremento en coeficientes de transferencia de masa (Azad & Rasul, 2019). De hecho, esta técnica ha sido utilizada para la extracción de aceite en semillas de una gran variedad, incluyendo soya, ricino, cacahuete, canola, oliva, girasol, avellanas, colza, entre otras (Muzenda et al., 2012).

2.4.5. Extracción asistida mediante ultrasonido (UAE)

UAE es una técnica innovadora que hace uso de ondas de ultrasonido para incrementar la vibración y el calor, resultando en la destrucción de las paredes celulares rígidas de la planta, incrementando el contacto entre el solvente y el material de la planta (Takadas & Doker, 2017). Se analizó la producción de aceite de semillas de papaya por UAE y solventes, reportaron que la extracción convencional por solvente se realizó en 12 h, cuando el método UAE duró solamente 30 min, observando eficiencias similares (Lim et al., 2012). Las ventajas de la extracción por UAE incluyen reducción en tiempo de extracción (Stanisavljević et al., 2007), menor consumo de energía (Hashemi et al., 2015; Tian et al., 2013) e igual o mayor eficiencia de extracción de aceite (Takadas & Doker, 2017).

2.4.6. Extracción por enzimas

La obtención enzimática constituye una metodología con gran potencial para la recuperación de grasas, empleando biocatalizadores durante la trituración del grano. El propósito fundamental de integrar estas enzimas en la extracción acuosa consiste en hidrolizar la configuración de los polisacáridos que componen la pared celular de los granos oleaginosos, así como las proteínas que conforman la membrana celular y los cuerpos lipídicos (Latif & Anwar, 2008; Taha & Hassanein, 2007). El proceso es amigable con el medio y no produce compuestos orgánicos volátiles. Sin embargo, el proceso es tardado. Existen complejos o preparados enzimáticos comerciales de grado alimenticio con actividad múltiple como celulasa, hemicelulasa y pectinasa, que se aplican a las semillas oleaginosas con la finalidad de hidrolizar los componentes de la pared celular de los tejidos (Ovando-Chacón & Waliszewski, 2005).

2.5. Procesos para obtención de biodiésel

2.5.1. Dilución

Bajo este procedimiento, las grasas se mezclan con diésel en determinadas relaciones, logrando así una disminución de la viscosidad. Los insumos predilectos para esta técnica incluyen los aceites de semilla de algodón, girasol y de semilla de palo María (*Calophyllum inophyllum*). Se ha detectado que los niveles de viscosidad cinemática en las combinaciones de aceite de ricino con diésel consiguen ajustarse a los parámetros señalados en la normativa ASTM D6751 al utilizar una proporción del 30% de aceite de ricino. Diversos atributos fisicoquímicos relevantes de estas mixturas, tales como la densidad, viscosidad cinemática, porcentaje de humedad, poder calorífico superior y punto de nube, entre otros, han sido analizados exhaustivamente. La mezcla de aceite de ricino cumplirá con las exigencias del biodiésel empleando dicho 30% (Nwafor, 2003).

2.5.2. Pirólisis

El mecanismo de **pirólisis** comprende la degradación de la materia orgánica en configuraciones más reducidas o elementales mediante la aplicación de calor en una atmósfera carente de oxígeno. Se trata de un procedimiento termoquímico que **presenta** un elevado rendimiento; no obstante, no **representa** una vía rentable para la obtención de biodiésel (Boopathi et al., 2018).

2.5.3. Micro emulsión

Las microemulsiones pueden definirse como dispersiones isotrópicas y transparentes, o bien, como una distribución termodinámicamente estable y traslúcida conformada por aceite, agua, surfactantes y diversas moléculas anfífilas. Otro procedimiento empleado para reducir la viscosidad de las grasas vegetales consiste en la formación de microemulsiones mediante el uso de alcoholes de cadena breve, tales como metanol, etanol o 1-butanol. El diámetro de las gotas en estos sistemas oscila entre los 100 y los 1000 nm. Con lo que se ha

encontrado disminución de la viscosidad y mejoras en las características de rociado de los combustibles obtenidos por este proceso, así como reducciones en números de cetano y valores térmicos debido al alcohol que se adiciona (Pinto et al., 2005).

2.5.4. Hidrotratamiento

El hidrotratamiento representa una vía opuesta a la transesterificación de lípidos animales y grasas vegetales, la cual se basa en la interacción de dichas materias primas con hidrógeno. Los resultados de este proceso constituyen hidrocarburos parafínicos que poseen una equivalencia química con el diésel (Bart, 2011; Rapiet, 2014).

2.5.5. Transesterificación (catálisis homogénea)

La transesterificación es el proceso mediante el cual el aceite vegetal o grasa animal reacciona con un alcohol en presencia de un catalizador líquido para producir una mezcla de ésteres metílicos (biodiésel) y glicerol como subproducto (Knothe, 2010; Naik et al., 2010). El mecanismo de catálisis homogénea conlleva que el agente catalítico permanezca en fase líquida, de forma análoga a los reactivos, existiendo la posibilidad de que dicho componente sea de naturaleza ácida o alcalina. Los catalizadores básicos incluyen hidróxido de sodio, metóxido de sodio, metóxido de potasio, hidróxido de potasio y carbonato de potasio (Bhan et al., 2025)

Los catalizadores ácidos incluyen ácido sulfúrico, ácido clorhídrico, ácido fosfórico, sulfato férrico y ácido sulfónico. Pese a que la cinética de reacción es más pausada en contraste con la transesterificación alcalina, se han documentado niveles de rendimiento en ésteres sumamente elevados. Asimismo, los agentes catalíticos de carácter ácido admiten materias primas con concentraciones superiores de humedad y ácidos grasos libres (Naik et al., 2010).

2.5.6. Transesterificación (catálisis heterogénea):

La catálisis heterogénea es un método alternativo de producción de biodiésel que consiste en utilizar catalizadores sólidos para la reacción de transesterificación superando así las desventajas de usar catalizadores líquidos (Da Costa Evangelista et al., 2016). Los agentes catalíticos heterogéneos presentan una elevada densidad de centros básicos en su relieve para efectuar la reacción de transesterificación. En consecuencia, se han analizado variados catalizadores integrados en materiales de sustento tales como alúminas, hidrotalcitas, zeolitas y sílices. El método de obtención de biodiésel guarda gran similitud con el procedimiento de catálisis homogénea. La diferencia principal es la producción de ésteres y glicerina sin ningún rastro de catalizador, lo que facilita la etapa de purificación de ambos productos (Rizwanul Fattah et al., 2020).

2.5.7. Transesterificación supercrítica:

Se conocen ya procesos supercríticos para solucionar el problema de la miscibilidad aceite-alcohol que dificulta la cinética de la transesterificación, así como para aprovechar la no utilización de catalizador en absoluto. Las condiciones de operación son bastante rigurosas ($T > 240\text{ }^{\circ}\text{C}$, $p > 80\text{ bar}$) y por lo tanto requieren

equipo especial (Gómez-Castro et al., 2011; He et al., 2007). Sin embargo, a altas temperaturas, las reacciones de esterificación y transesterificación ocurren juntas sin ningún problema, y la velocidad de reacción no se ve afectada por la presencia de subproducto de agua como en otros métodos de esterificación.

El biodiésel se puede obtener mediante métodos de transesterificación de alcohol supercrítico no catalítico (Demirbas, 2008). Existen ya varios procesos de producción de biodiésel mediante metanol supercrítico que permiten un proceso simple y altos rendimientos debido a la transesterificación simultánea de triglicéridos y la esterificación metílica de ácidos grasos (Demirbaş, 2001). Los parámetros que afectan la formación de ésteres metílicos son la temperatura de reacción, presión, relación molar, contenido de agua y contenido de ácidos grasos libres, se puede observar que, en un estado subcrítico de alcohol, la velocidad de reacción es muy baja y aumenta gradualmente a medida que aumenta la presión o la temperatura. Se observa también que el aumento de la temperatura de reacción, especialmente en condiciones supercríticas, tiene una influencia favorable sobre el rendimiento de conversión del éster. El rendimiento de éster de alquilo aumenta con el aumento de la relación molar de aceite a alcohol (Demirbaş, 2001; Demirbas, 2005). Se observa también que, en el método de transesterificación de alcohol supercrítico, el rendimiento de conversión aumenta a 50-95% durante los primeros 10 min de la reacción. El contenido de agua es un factor importante en la transesterificación catalítica convencional de grasas y aceites vegetales para producción de biodiésel. En la transesterificación convencional de grasas y aceites vegetales para la producción de biodiesel, los ácidos grasos libres y el agua siempre producen efectos negativos, ya que la presencia de ácidos grasos libres y agua provoca la formación de jabón, el catalizador se consume y se reduce la eficacia de catálisis. En los métodos catalizados, la presencia de agua tiene efectos negativos sobre los rendimientos de ésteres metílicos, sin embargo, la presencia de agua afecta positivamente la formación de ésteres metílicos en métodos de metanol supercrítico (Demirbas, 2008).

2.6. Medición de energía

Los sistemas de monitoreo de energía se utilizan ampliamente en plantas industriales y edificios para observar el consumo de energía. El cambio de voltaje, consumo de energía, factor de potencia, frecuencia y parámetros de corriente deben medirse para las plantas industriales con el fin de observar la cantidad de energía utilizada. Diferentes valores de consumo de energía a lo largo de un día constituyen un elemento significativo para que el establecimiento calcule los costos de producción y consumo. En la literatura, se pueden encontrar varios sistemas de monitoreo de energía de acuerdo con varias demandas como resultado de diferentes necesidades. Por ejemplo, las empresas manufactureras generalmente tienen muchos horarios de tarifas y políticas de penalización diferentes para cargas de bajo factor de potencia. Con el fin de reducir las facturas de electricidad y evitar multas, las empresas se preocupan por el uso eficiente de la electricidad. Como resultado de los desarrollos de rápido crecimiento en tecnologías electrónicas y de software, los sistemas de adquisición de datos y las aplicaciones de monitoreo de energía se utilizan ampliamente en la automatización de plantas y procesos (Bryan & Bryan, 1997; Chung et al., 2007; Nguyen et al., 2002). Los sistemas eléctricos

deben estar dotados de sistemas de medición y control para gestionar adecuadamente el consumo de energía y mejorar su eficiencia energética (Rossiter, 2005).

2.7. Circuito integrado MCP39F511A para análisis de energía

El dispositivo MCP39F511A es un circuito integrado de monitoreo de energía monofásico completo altamente integrado diseñado para la medición en tiempo real de la energía de entrada para fuentes de alimentación de CA y CC, lo que lo hace adecuado para una amplia gama de aplicaciones industriales y de consumo. Es capaz de detectar los tipos de voltaje de entrada para seleccionar el modo CC o CA automáticamente. Incluye ADC Delta-Sigma de doble canal, un motor de cálculo de 16 bits, EEPROM y una interfaz flexible de 2 cables. Se proporcionan registros de calibración de CA y CC separados para garantizar mediciones de alta precisión en ambos modos. Una referencia de voltaje de baja deriva integrada con $7 \text{ ppm} / ^\circ \text{C}$, además de 94.5 dB de rendimiento SINAD en cada canal de medición, permite diseños con una precisión superior al 0.1% en un rango dinámico de 4000:1 (Microchip Technology, 2025).

3. Hipótesis

La modificación de las condiciones de temperatura y presión durante la reacción de transesterificación supercrítica logra la conversión de esteres metílicos del aceite de ricino, consiguiendo una reducción en tiempo del 50% durante la conversión a biodiesel, así como del gasto energético durante la misma, sin el uso de catalizadores ni de procesos de purificación para la obtención del producto final.

4. Objetivo general

Desarrollar un reactor de transesterificación supercrítica con análisis de energía integrado para la elaboración de biodiesel a partir de aceite de ricino, incrementando la tasa de conversión de esteres metílicos.

5. Objetivos específicos

- Elaborar un prototipo de reactor para la transesterificación supercrítica de aceite de ricino según presión y temperatura.
- Evaluar la tasa de conversión de ésteres metílicos a partir de aceite de ricino mediante el reactor de transesterificación supercrítica.
- Determinar el gasto energético durante el proceso de la obtención del biodiesel en la reacción de transesterificación supercrítica.
- Evaluar propiedades fisicoquímicas del biodiesel producido a partir de aceite de ricino mediante transesterificación supercrítica.

6. Metodología

6.1. Diseño de reactor de alta presión

Para el diseño, se realizó en software SOLIDWORKS® 2020 en vistas isométricas y en 3D, este diseño se basó en la cantidad inicial de materia que se utilizaría por lote y de acuerdo con el Código ASME para calderas y recipientes a presión. Sección VIII – Reglas para la construcción de recipientes a presión Div 1. Inicialmente se diseñó para una cantidad de 720 mL para ser utilizado al 70% (500 mL), el material seleccionado fue el AISI 316 (Acero inoxidable 316) debido a que es bastante común de encontrar y tiene un índice s de 18700 (máxima presión admisible), lo cual nos permitía unos tamaños de pared relativamente poco anchos.

De acuerdo con el Código ASME, Para cuerpos cilíndricos de paredes delgadas bajo presión interna, el espesor requerido por la tensión tangencial (σ_t) es mayor (el doble) que el requerido por la tensión longitudinal (σ_L). (Figura 1)

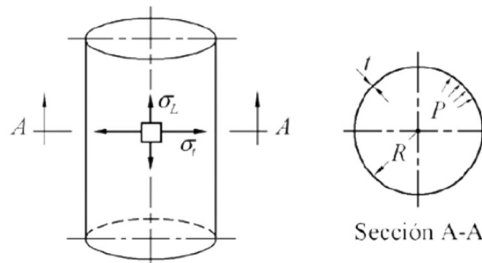


Figura 1: Nomenclatura del cilindro y cabezal según código ASME

Estrés tangencial: El espesor requerido en función de la presión interna y la presión admisible en función del espesor se pueden calcular a partir del valor del radio interno R

$$t_r = \frac{PR}{SE - 0.6P}$$

Por tanto

$$P_a = \frac{SEt}{R + 0.6t}$$

Donde:

S: Presión máxima admisible

R: Radio interno

E: Eficiencia de la junta soldada

Pa: Presión admisible

T: espesor del cuerpo cilíndrico

P: Presión interior de diseño

Por otro lado la tapa se diseñó también de acuerdo con la especificación del código ASME para una tapa circular :

$$t_r = d \sqrt{\frac{C P}{S E}}$$

Donde:

d: diámetro del cabezal
 E: Eficiencia de la junta soldada
 C: factor que considera el método de unión con el cuerpo
 P: Presión de diseño interno
 S: Máxima presión admisible

Para nuestro diseño se tomó una eficiencia de junta de 1, debido a que el sello mecánico se planeó con tornillos, así como descrito en el código ASME. Los birlos/tornillos se seleccionaron de 7/8" y se tomaron en cuenta 10 de estos.

6.1.1. Volumen de la autoclave

Las especificaciones iniciales fueron las siguientes:

Material AISI 316 -> s = 18700
 Volumen = 720 ml, @ 70% -> 500 ml
 Cilindro con R = 1.518", H = 6.071"
 Cilindro con R = 3.855", H = 15.42 cm
 Presión de diseño = 1000 Psi
 Para una superficie plana Parte superior C: 0.75

El diseño inicial se consideró para un volumen de lotes de 500 mL debido a la cantidad de aceite que se podía manejar en el experimento

6.1.2. Dimensiones de la autoclave

Volumen en pulgadas cúbicas:

$$3.1416 \times 3.855^2 \times 15.48 = 15.4$$

Volumen en centímetros cúbicos:

$$3.1416 \times 3.855^2 \times 15.48 = 722.72$$

Espesor para un reactor cilíndrico (Paredes) en pulgadas:

$$t_r = \frac{PR}{SE - 0.6P}, \quad t_r = \frac{(1000)(1.51)}{(18700)(1) - 0.6(1000)} = 0.083425 \text{ in}$$

$$0.083425 \times 2.54 = 0.21190 \text{ cm}$$

Grosor para la tapa de superficie plana en pulgadas

$$t_r = d \sqrt{\frac{C P}{S E}}, \quad t_r = 3.0354 \sqrt{\frac{(0.75)(1000)}{(18700)(1)}} = 0.60789 \text{ in}$$

$$0.60789 \times 2.54 = 1.5440 \text{ cm}$$

Con estas dimensiones se realizaron los modelos 2D y 3D para el reactor (Figuras 2 a 5)

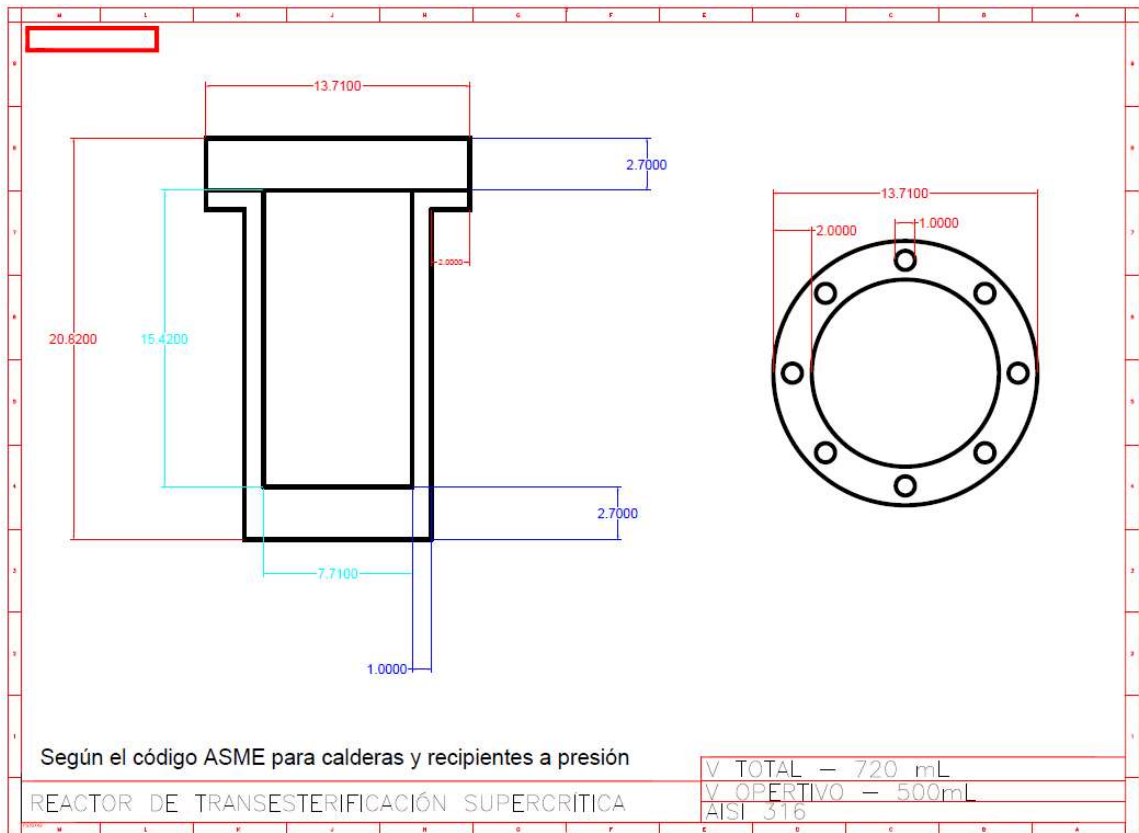


Figura 2: Modelo 2D del reactor inicial propuesto en AUTOCAD

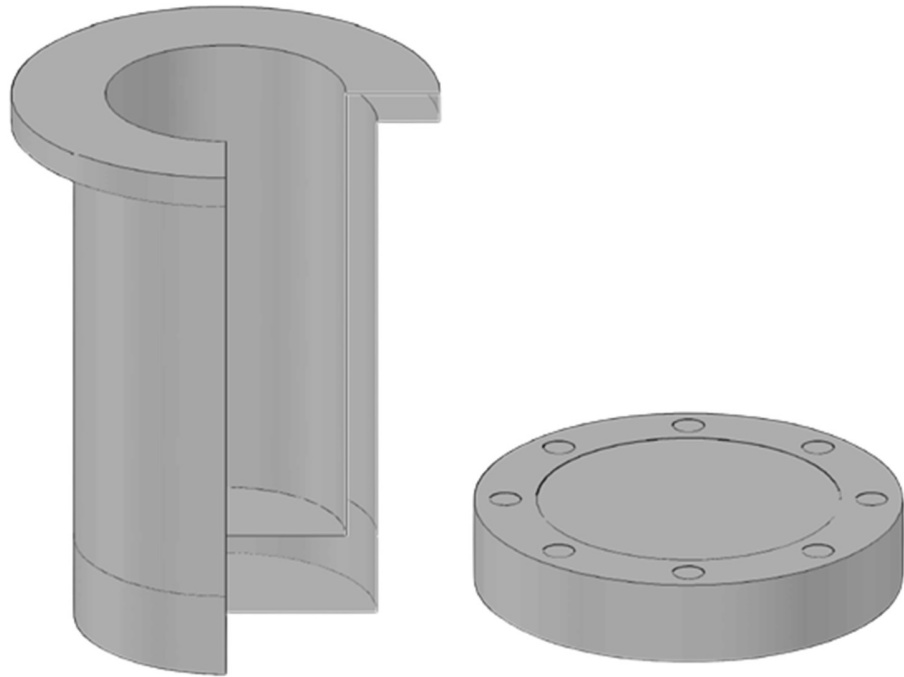


Figura 4: Modelo 3D del reactor

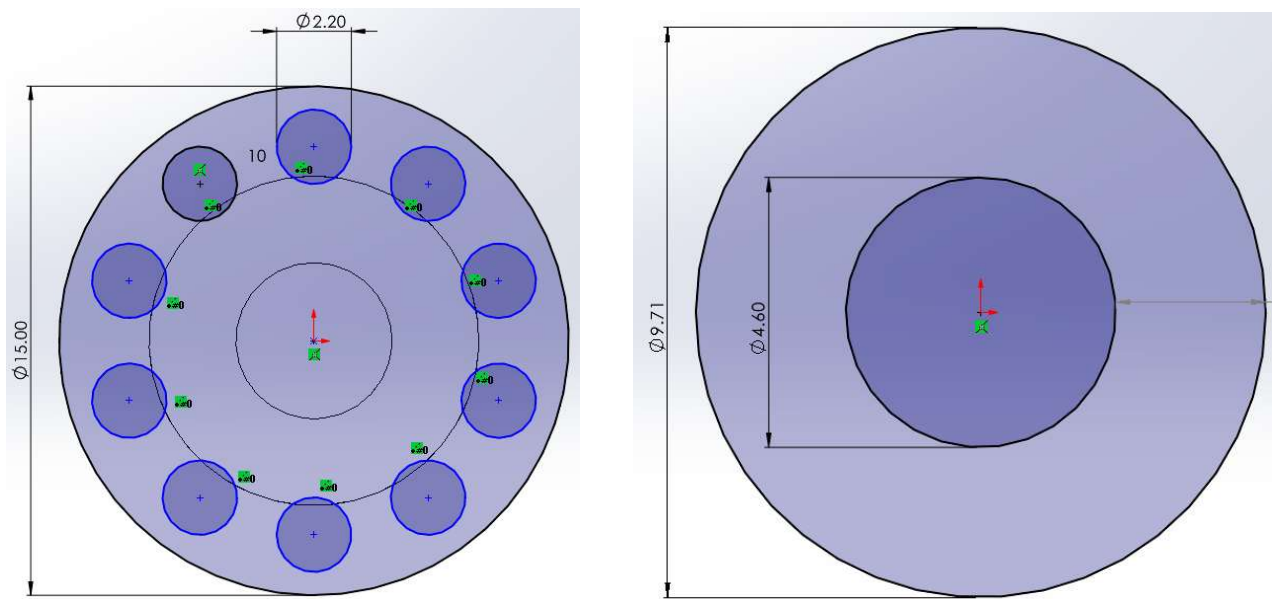


Figura 3: Dimensiones 2D de la tapa superior y la tapa inferior en centímetros

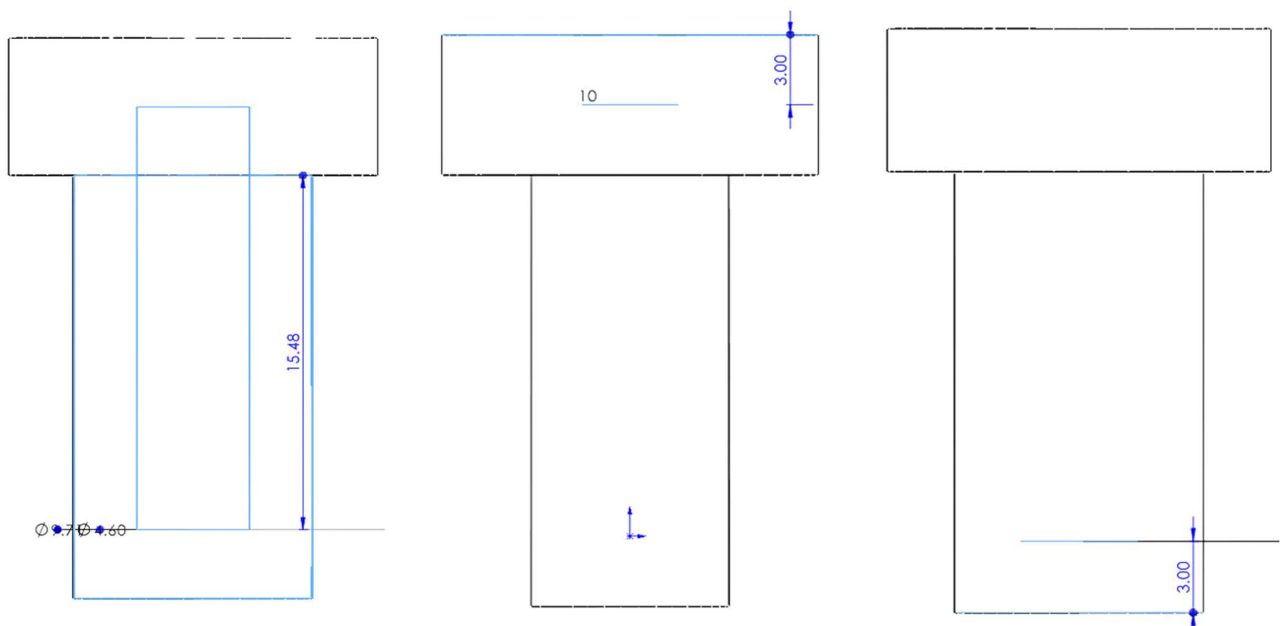


Figura 5: Dimensiones internas, de la tapa superior e inferior (de izquierda a derecha)

6.2. Adaptación de reactor

Se adquirió un reactor que ya contaba con la fase de agitación, válvulas, medidores, válvula de seguridad y fase de calentamiento, este contaba con las siguientes características iniciales (Figura 6):

Marca: LZHZXY

Modelo: CDF-0.25L

volumen de trabajo: 250 mL

Material: AISI 316L

Presión de diseño: 10 MPa

Temperatura de diseño: 350° C

Voltaje de trabajo: 110 ~ 220 VAC



Figura 6: Reactor adquirido

Control de temperatura: PID (DHACEL XMTG-3000) con resistencias de calentamiento y medición de temperatura con termopar mediante termo pozo, para el funcionamiento del reactor se trabajó inicialmente con 127 vac y finalmente con 220 vac

Para la adición de CO₂ en el reactor se acopló de manera mecánica un compresor PCP de 4500 PSI marca BEEMAN® modelo 3390 de 110v a un tanque de CO₂ de 50 kg marca INFRA® y a una válvula del reactor como se muestra en la Figura 7.



Figura 7: Reactor con compresor de CO₂

6.3. Seguridad

El proceso de transesterificación al utilizar metanol tiende a presurizar el recipiente a medida que aumenta la temperatura. Para evitar riesgo por explosión, el reactor contaba con una válvula de seguridad de disco de ruptura diseñado a 1350 PSI (Figura 8), esta medida nos sirvió como disposición de emergencia en caso de que el algún elemento de control fallara y la temperatura se desbordara, sin embargo, para evitar también este tipo de complicación, acoplamos un sistema de alivio de presión por medio de un servomotor y una válvula de salida. Esta fue controlada por un microcontrolador microchip® PIC 18f4550, un sensor de presión marca OMEGA® PX309-2KG5V y un servomotor TOWERPRO® modelo MG995 de 40 Kg de fuerza. La visualización de los datos de presión se hizo mediante una pantalla LCD de 4x20 caracteres (Figuras 9, 10 y 11).



Figura 8: Disco de ruptura para seguridad

El sistema funcionó de manera activa de la siguiente manera: El sensor de presión realizaba una medición cada segundo, en un rango entre 0 y 1180 PSI se mostraba en la pantalla un estatus de “NORMAL” (Figura 11), si la temperatura aumentaba y se encontraba en un rango de entre 1180 y 1250 PSI se mostraba un estatus de “sobrepresión” (Figura 11) y la válvula se comenzaba a abrir de manera lineal al aumento de presión desde 1° y hasta alcanzar los 4°. En una última instancia, si la temperatura seguía en aumento a pesar del alivio de presión y sobrepasaba los 1250 PSI, el sistema realizaba una apertura de emergencia de 5°. También el sistema contemplaba el fallo del sensor de presión, por lo cual, si se detectaba una presión de 0 PSI, se abría la válvula en 3° y se notificaba mediante un mensaje de “Falla en sensor” (Figura 11) y una alerta sonora, el sistema anteriormente mencionado se puede observar en la figura 9.



Figura 9: Sistema de control de presión implementado

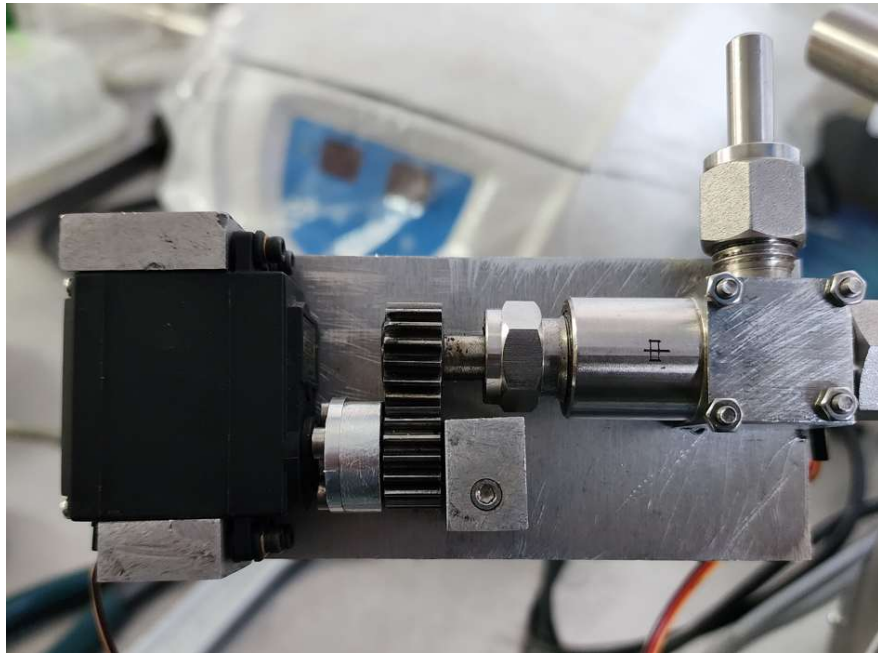


Figura 10: Válvula de seguridad acoplada a servomotor



Figura 11: Visualización de presión del sistema

6.4. Control de temperatura

El calentamiento se llevó a cabo mediante el anteriormente mencionado controlador PID con termopar tipo j que venía acoplado al reactor adquirido. En una fase inicial se trabajó con 127 vac, sin embargo, al realizar varias pruebas de calentamiento de aceite (sin metanol) mientras se buscaban las ganancias del sistema PID, se observaba que la temperatura requerida de 265° no solamente no era alcanzada, si

no que no presentaba un comportamiento lineal de calentamiento (Figura 12), así que se optó por utilizar un voltaje de 220 v.

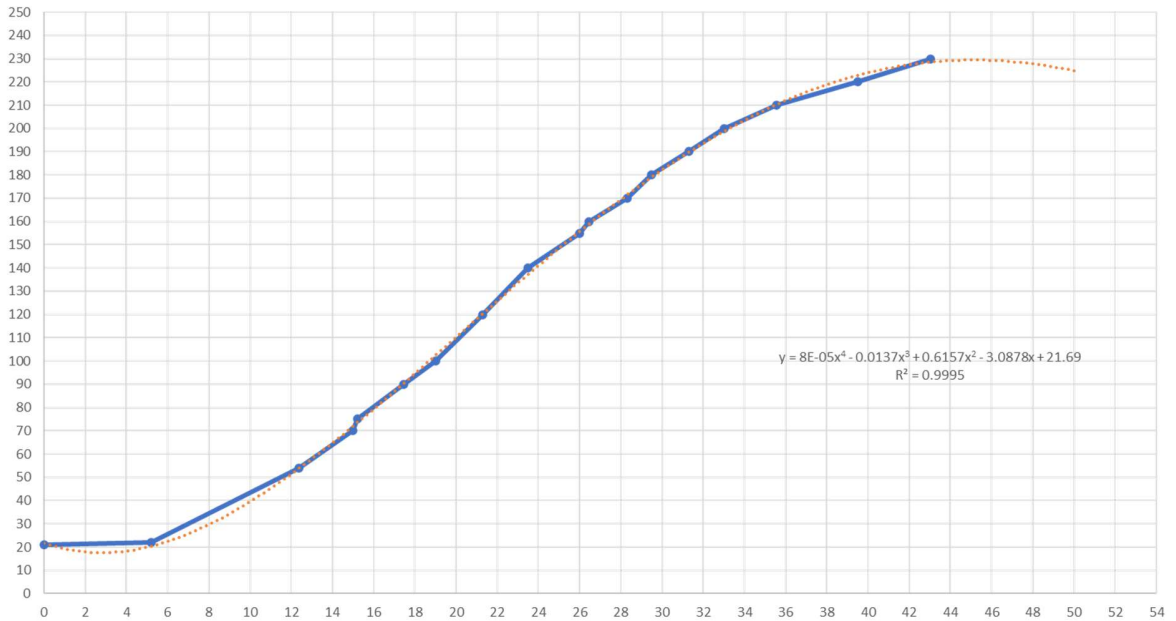


Figura 12: Curva temperatura en °C (eje y) vs tiempo en min (eje x) para 127v

Una vez que se consiguió el transformador elevador de voltaje se hicieron pruebas con el reactor, dejándolo conectado a la energía eléctrica para ver en qué tiempo se alcanzaba la temperatura deseada de 265° C, al corroborar esto se utilizó la característica integrada del controlador PID (Figura 7) para encontrar las ganancias, lo cual se realizó de la siguiente manera:

Se utilizó un volumen de 30 gr. De aceite en el reactor para simular las condiciones de la planta (sistema reactor a controlar), se selló el reactor a 20 lb/ft de presión en cada una de las 10 tuercas y se indicó la temperatura de variable de proceso (265° C), se utilizó la función de auto aprendizaje del controlador como descrito en el manual, se apagó el controlador e inmediatamente se volvió a encender, una vez encendido, se presionó el botón de “SET” por 3 segundos y se entró al menú de AUTOTUNING, una vez ahí dentro se navegó con las flechas de “arriba y abajo” hasta la opción de “YES”, se presionó el botón de “SET” una vez más hasta que la pantalla comenzara a parpadear en “AT”, el sistema comenzó a calentar el reactor de manera lineal hasta llegar a la temperatura deseada, una vez llegada a esta temperatura el sistema apagó la alimentación de calentamiento y procedió a enfriarse, se notó que el sistema sobrepasó la temperatura deseada por 18° C, una vez que la temperatura bajó de 265 el sistema comenzó a calentar nuevamente el reactor una vez más y repitió el paso anterior. Una vez terminado este paso el reactor ya contaba con las ganancias deseadas P=44, I=8 y D=252.

La curva característica de calentamiento con las ganancias obtenidas se puede observar en la Figura 13, en la cual se puede observar que el tiempo requerido para alcanzar la temperatura de proceso es de alrededor de 50 min.

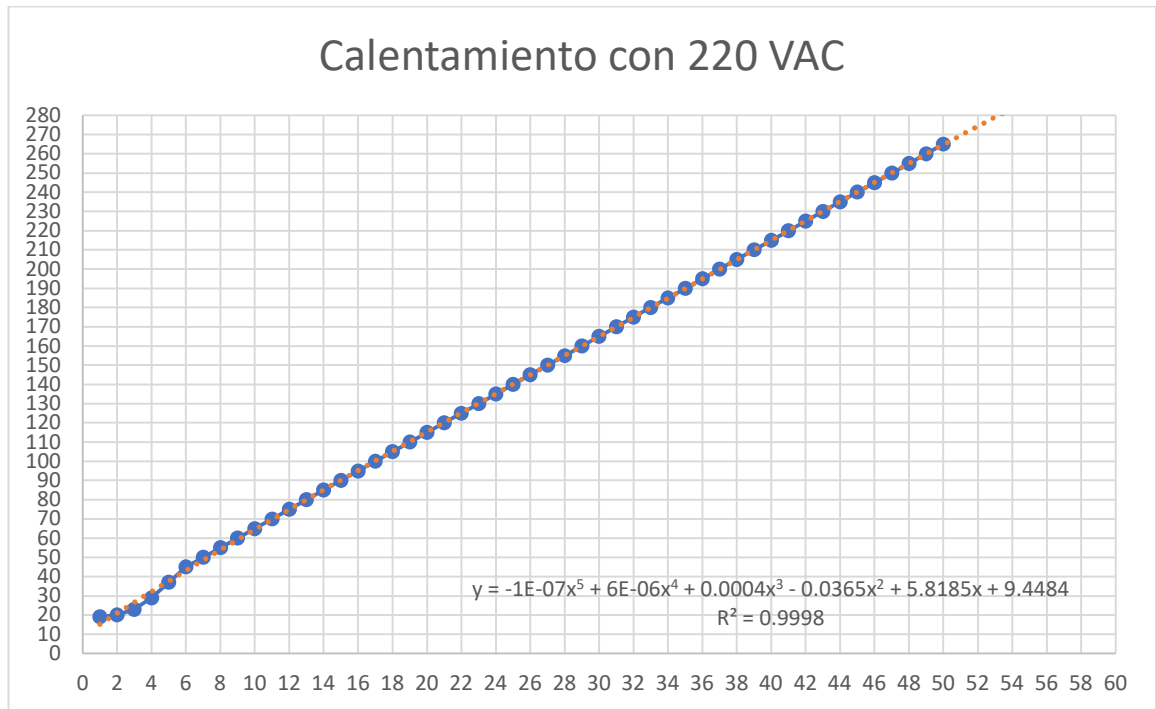


Figura 13: Curva temperatura en °C (eje y) vs tiempo en min (eje x) para 220v

6.5. Control de presión

Como anteriormente mencionado en la sección 7.3, el sistema activo de seguridad compuesto por un sensor de presión, un servomotor y una válvula controlaban la presión del sistema en caso de un exceso, esto se realizarían mediante la programación descrita en la Figura 14, la cual fue realizada en CCS compiler®, para un microcontrolador MICROCHIP® 18F2550, el montaje completo del sistema se puede observar en la Figura 15.

```

while(TRUE)
{
    lecturaADC();

    //!lectura= rad_adc();

    IF (PSIG >= 0 && PSIG < 1180)
    {
        EstadoReactor="Normal";
        Bandera=1;
        duty_cycle=348; // 0 grados de apertura
    }
    IF (PSIG > 1180 && PSIG <= 1250)
    {
        EstadoReactor="Sobrepresion";
        do
        {
            float_duty=0.1*PSIG+230;
            duty_cycle=float_duty; // 1 a 4 grados de apertura
        }while (lectura >= 1180);
    }
    IF (PSIG > 1250)
    {
        EstadoReactor="Alarma";
        duty_cycle=356; // 5 grados de apertura
    }
    IF (PSIG == 0 && Bandera==1)
    {
        EstadoReactor="Falla sensor";
        duty_cycle=352; // 3 grados de apertura
    }

    set_pwm1_duty(duty_cycle);
}

```

Figura 14: Código en CCS compiler para el sistema de control de presión activo



Figura 15: Sistema integrado de control de presión activo (sensor, válvula y servomotor) y pasivo (disco de ruptura)

6.6. Determinación de las condiciones óptimas de transesterificación supercrítica con aceite de ricino

El proceso de transesterificación se realizó inicialmente con aceite de ricino (USP marca PRODUCTOS BR DE MEXICO®) y metanol (99.99% Sigma-Aldrich®) siguiendo las variables de operación de Torrentes-Espinoza et al., (2017), las cuales fueron de 265° para temperatura y 1000 PSI para presión y una relación molar 30:1, al ver en las pruebas preliminares la ausencia de glicerol se optó por subir la presión de proceso a 1200 PSI según varias observaciones de la literatura como las mencionadas por Marulanda et al., (2010).

Adicionalmente, se agregó agua a los experimentos para realizar una reacción dual de hidrólisis de triglicéridos para su conversión a ácidos grasos y posterior metil-esterificación y transesterificación de triglicéridos como puede ser explicado en los trabajos de Kiss et al., (2014), Kusdiana & Saka., (2004) y Portilho Trentini et al., (2019). Dicho proceso de doble reacción se puede ver explicado de manera visual en la Figura 16; Para mejorar el proceso de transesterificación también se utilizó CO₂ como cosolvente ya que en su punto supercrítico es completamente miscible tanto en triglicéridos como en metanol, ayudando a crear una fase homogénea y reduciendo la tensión interfacial como mencionado en la literatura en los trabajos de investigación de Macawile & Auresenia., (2022), Marulanda et al., (2010) Y Singh et al., (2021).

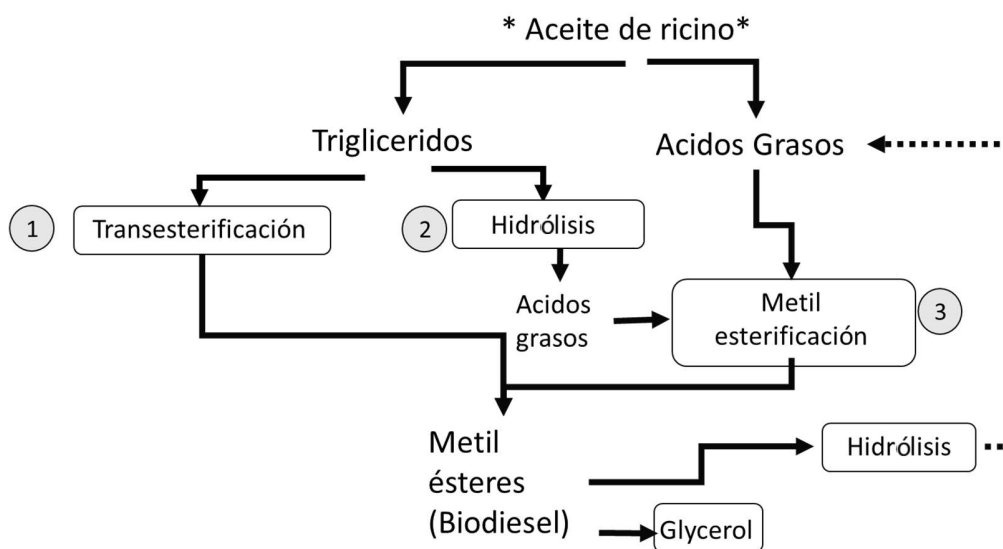


Figura 16: Proceso de metil esterificación y transesterificación de aceite de ricino

Para los experimentos el proceso de transesterificación se realizó de la siguiente manera:

Se limpiaba el reactor del experimento anterior quitando en patrón de cruz las tuercas y se vaciaban los contenidos de los restos de la reacción del día anterior para su posterior pesaje y recuperación, ya limpio se agregaban las correspondientes cantidades de aceite, alcohol y agua de acuerdo con los experimentos planteados en la sección de análisis estadístico y sus respectivas relaciones molares:

Alcohol/Aceite: 0:1 ~ 50:1

Aceite/Agua: 0:1 ~ 10:

Con temperaturas fijas de 265° C y presiones de 1200 PSI. Para mantener la presión constante se trabajó siempre con la misma cantidad de metanol, para que, al

calentar el reactor, éste llegara a su presión de trabajo justo cuando se alcanzara la temperatura de proceso. Esta cantidad se fijó mediante experimentos preliminares en 30 g de metanol, para modificar la relación molar alcohol/aceite manteniendo fija la cantidad de alcohol, se variaba la cantidad de aceite. Se observó que la cantidad de agua no afectaba de manera drástica a la presión del proceso en la temperatura más alta.

Los reactivos se agregaban en el siguiente orden , primero se pesaba la cantidad de aceite en un vaso de precipitado de 200 mL y se vaciaba dentro del reactor, una vez realizado esto quedaban remanentes de aceite en el vaso de precipitado, por lo cual en este mismo vaso se agregaba la cantidad de alcohol necesaria haciendo la respectiva tara y se mezclaba el metanol pesado con el aceite remanente mediante una espátula metálica, se vaciaba esta mezcla en el reactor y se procedía a pesar la cantidad de agua en el mismo vaso de precipitado, realizando previamente la tara. De esta manera se aseguraba que el 100% de los reactivos fueran agregados al reactor, una vez puestos los componentes se tapaba el reactor y se apretaban las 10 tuercas en patrón de cruz a aproximadamente a 45°, una vez realizado el torque de las tuercas se agregaba el CO₂ de la siguiente manera:

Se conectaba el tanque de CO₂ al compresor y el compresor a la válvula de entrada del reactor, se abría la válvula perilla del tanque y se encendía el compresor, en cuanto esto se realizaba se procedía a abrir la válvula de entrada del reactor para permitir el ingreso de CO₂ presurizado, se presurizaba hasta alcanzar los 1000 PSI y se cerraba la válvula de entrada del reactor, una vez hecho esto se apagaba el compresor y se cerraba la perilla del contenedor de CO₂, se mantenía 10 min en reposo para permitir que el CO₂ bajara por densidad dentro del reactor y subieran los demás gases atmosféricos a la parte superior de la tapa del reactor, una vez pasados los 10 min se abría la válvula de control de presión activa 1° y se despresurizaba el CO₂, una vez llegada la presión a 0 PSI se cerraba dicha válvula y se encendía el sistema de calentamiento y el sistema de agitación, el proceso de calentamiento tardaba aproximadamente 1 hora, en cuanto la variable de proceso llegaba a la temperatura deseada se comenzaba a cronometrar el tiempo según lo requerido por el diseño del experimento, terminado el tiempo del experimento se apagaba el reactor y la agitación y se dejaba enfriar el reactor por 2 horas para poder despresurizarlo sin abrir las válvulas de regulación de presión, esto sucedía debido a que al bajar la temperatura del reactor también la presión bajaba, una vez despresurizado el reactor se guardaba para realizar otro experimento al día siguiente, ya recuperados los restos del experimento se separaba la fracción de alcohol mediante evaporador rotatorio a presión reducida a una temperatura de 50° C por 30 min. Al pasar este tiempo se subía la temperatura a 80° C y se recuperaba la parte correspondiente al agua al pasar 15 min, terminado este tiempo el restante se vertía en un embudo de separación de 60 mL para recuperar las fases de glicerol y biodiesel, en este proceso de separación se dejaba descansar por 24 horas el embudo, después de la separación de las fases de biodiesel y glicerol se procedía

a pesar con báscula analítica la cantidad de glicerol resultante del experimento y del biodiesel.

El resumen de este proceso se puede ver en la siguiente Figura (Figura 17)

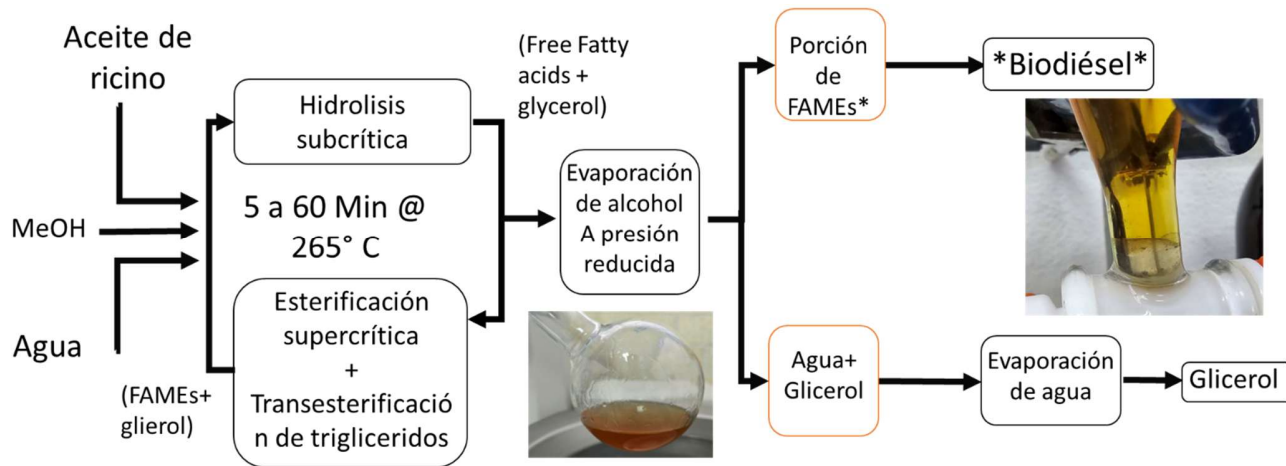


Figura 17: Proceso de hidrólisis + esterificación de ácidos grasos y transesterificación de triglicéridos llevado a cabo en los experimentos

6.7. Diseño del sistema de análisis de energía

El análisis de energía se realizó mediante una plataforma de evaluación manejada por el circuito MCP39F511N (MICROCHIP®), el cual mediante el uso de una resistencia shunt es capaz de medir el voltaje, la corriente y las potencias activa, reactiva y aparente. Esta plataforma fue diseñada en el software ALTIUM DESIGNER® con los archivos de diseño propios del circuito y proporcionados por la compañía MICROCHIP (Figura 19). Una vez diseñada la plataforma se realizó la impresión del modelo en tarjeta PCB (Printed circuit board) mediante un proveedor asiático (PCBWAY®) Los componentes fueron soldados a la PCB mediante caudín, pasta para soldar y flux.

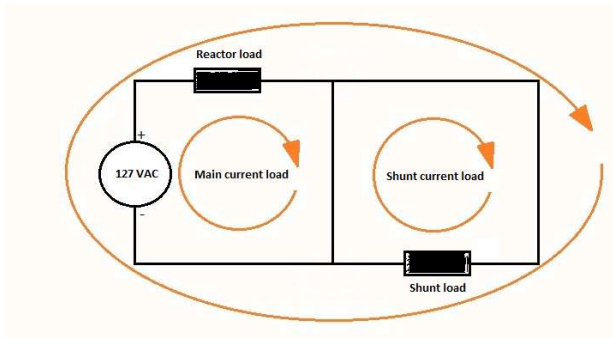


Figura 18: Diagrama simplificado de resistencia de SHUNT y carga del reactor

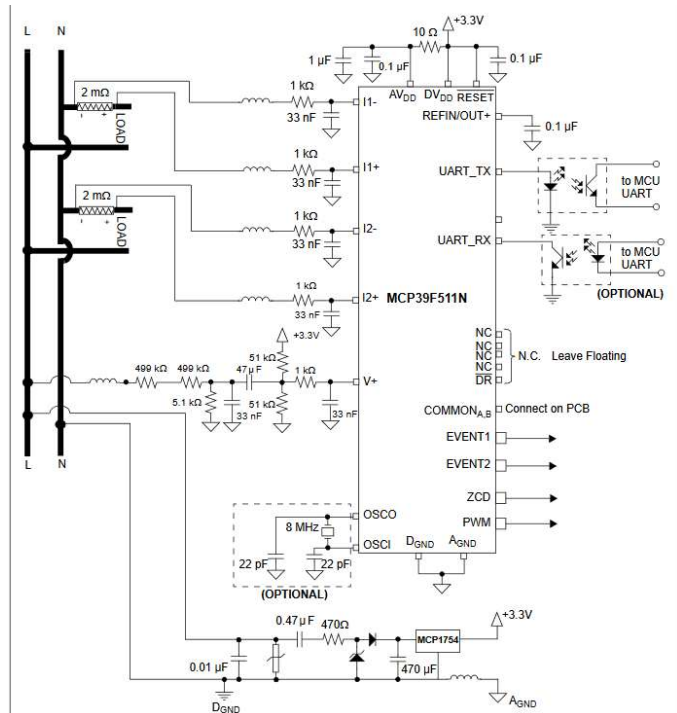


Figura 19: Circuito mínimo recomendado para la utilización del MCP39F511N

6.8. Construcción del sistema de análisis de energía

La placa del circuito fue diseñada en las siguientes etapas:

- Sistema mínimo (Figura 20)
- Comunicación serial (Figura 21)
- Detector de cruce por cero (Figura 22)
- Conexión a canales de alimentación (Figura 23)
- Fuente de poder (Figura 24)

6.8.1. Sistema mínimo

Esta parte corresponde a los componentes necesarios para la operación del circuito, siendo los principales capacitores, cristales de cuarzo, resistencias y conexiones a canales de alimentación

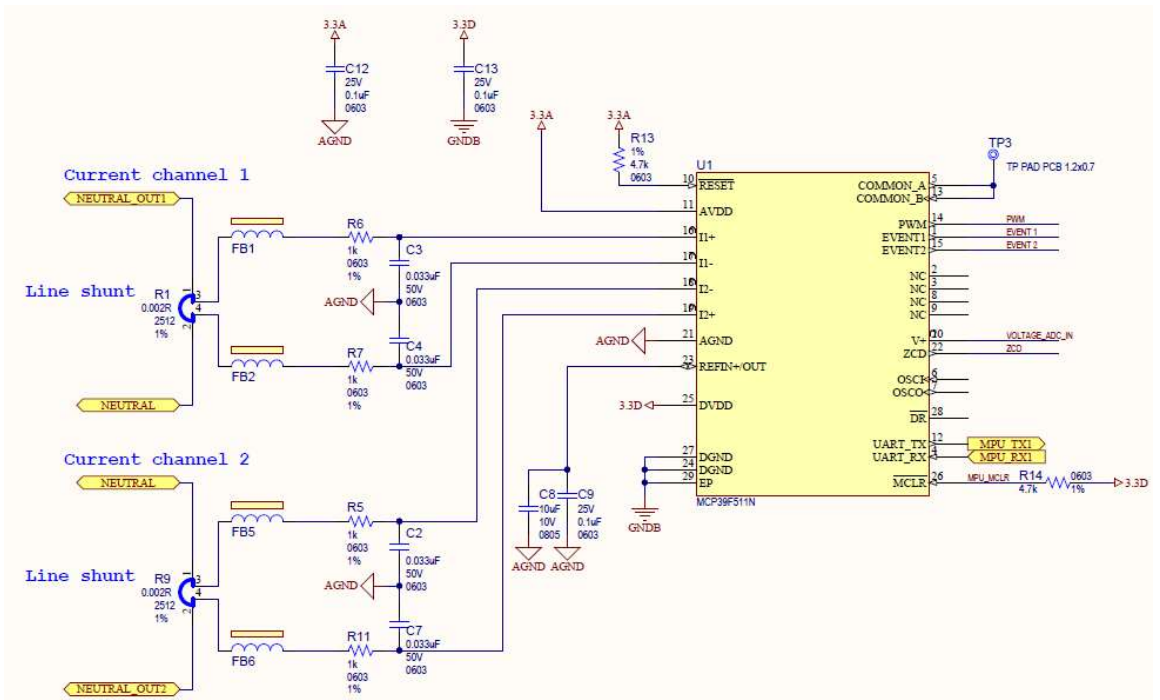


Figura 20: Sistema mínimo para el MCP39F511N

6.8.2. Comunicación serial

Para el manejo de los datos obtenidos por la plataforma se requirió de un circuito especial para comunicarse con la computadora, el cual estuvo conformado por un comunicador de protocolo serial ACSL-7210

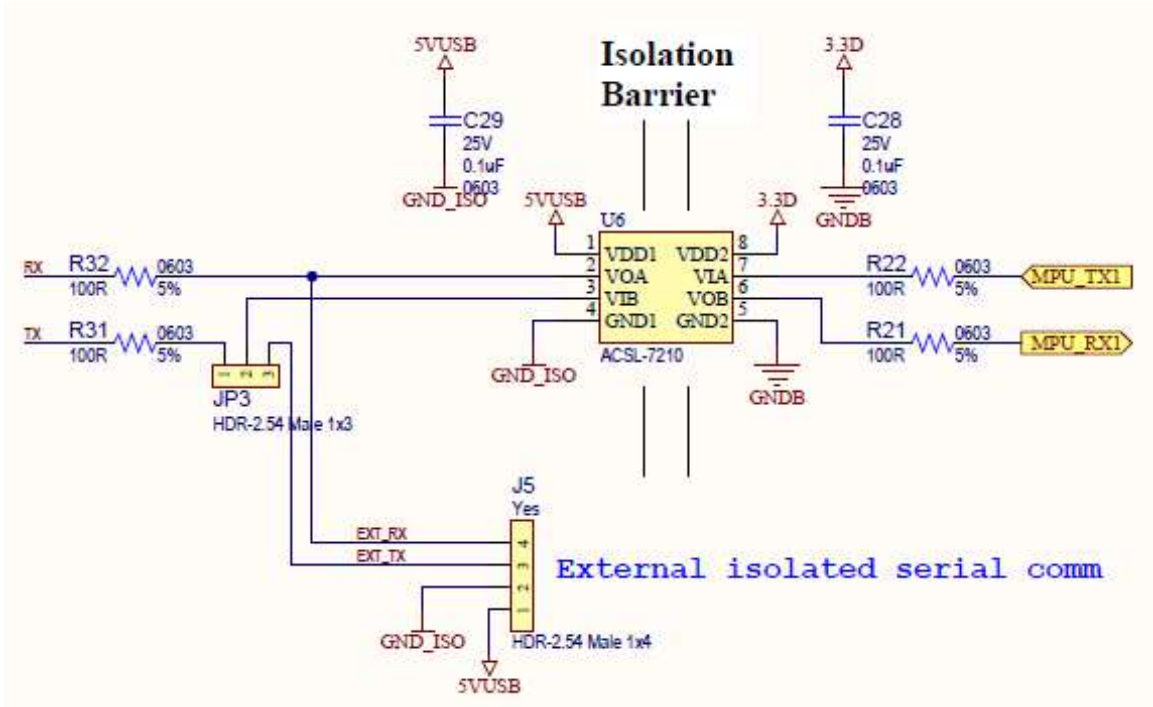


Figura 21: Circuito de comunicación serial para el MCP

6.8.3. Detector de cruce por cero

Para la determinación de las potencias activa, reactiva y aparente se requiere conocer el ángulo de desfase entre el voltaje de la fuente de alimentación y la corriente consumida, para esto se mide el tiempo de desfase que hay entre ambas señales y se realiza midiendo la diferencia de tiempo que existe entre los cruces por cero de la corriente alterna como punto de partida. Este es el propósito del circuito HCPL-181.

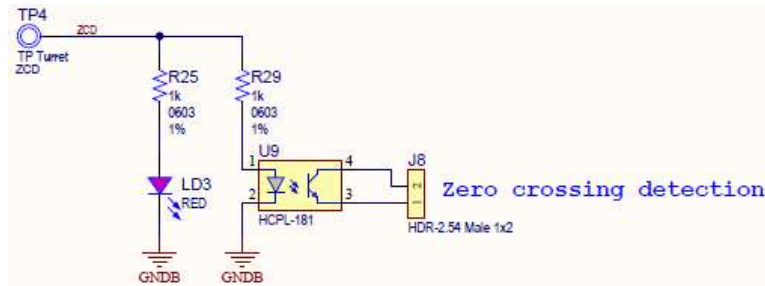


Figura 22: Detector de cruce por cero

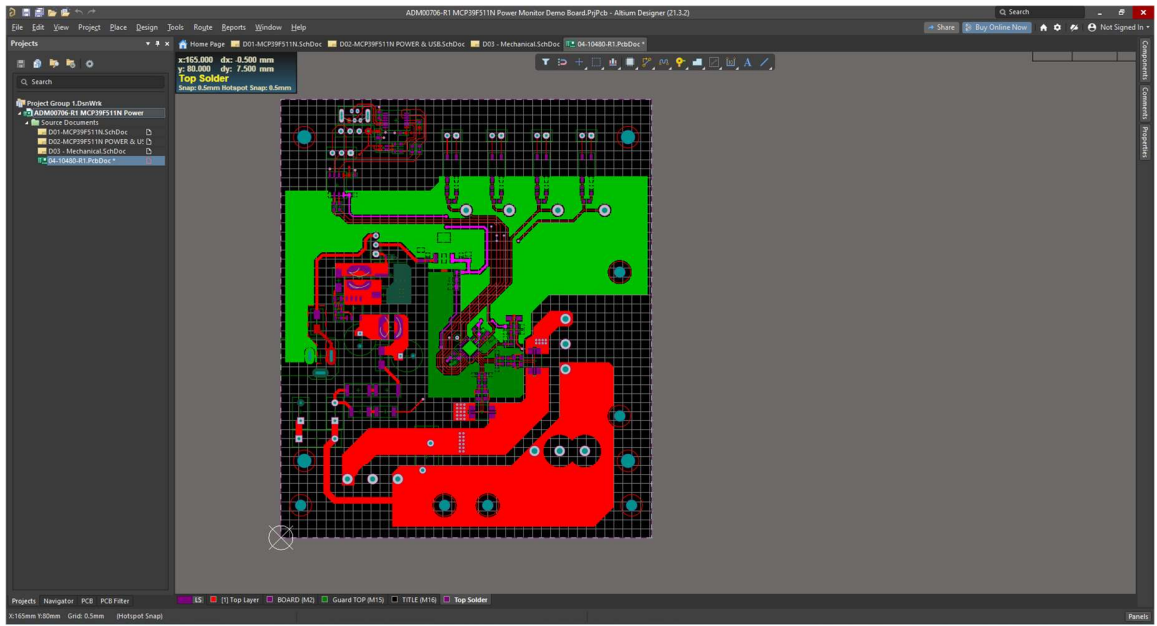


Figura 25: Diseño de PCB en ALTIUM DESIGNER®

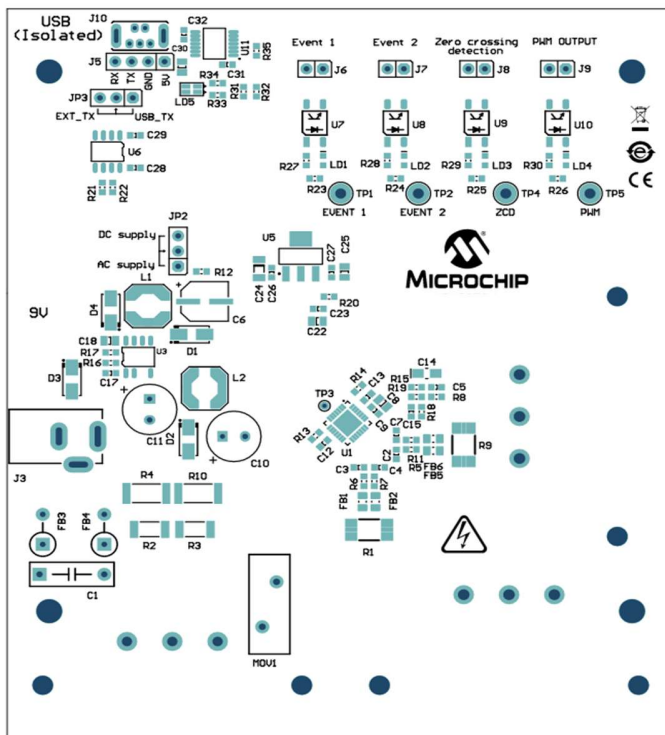


Figura 26: Vista de componentes del diseño de PCB

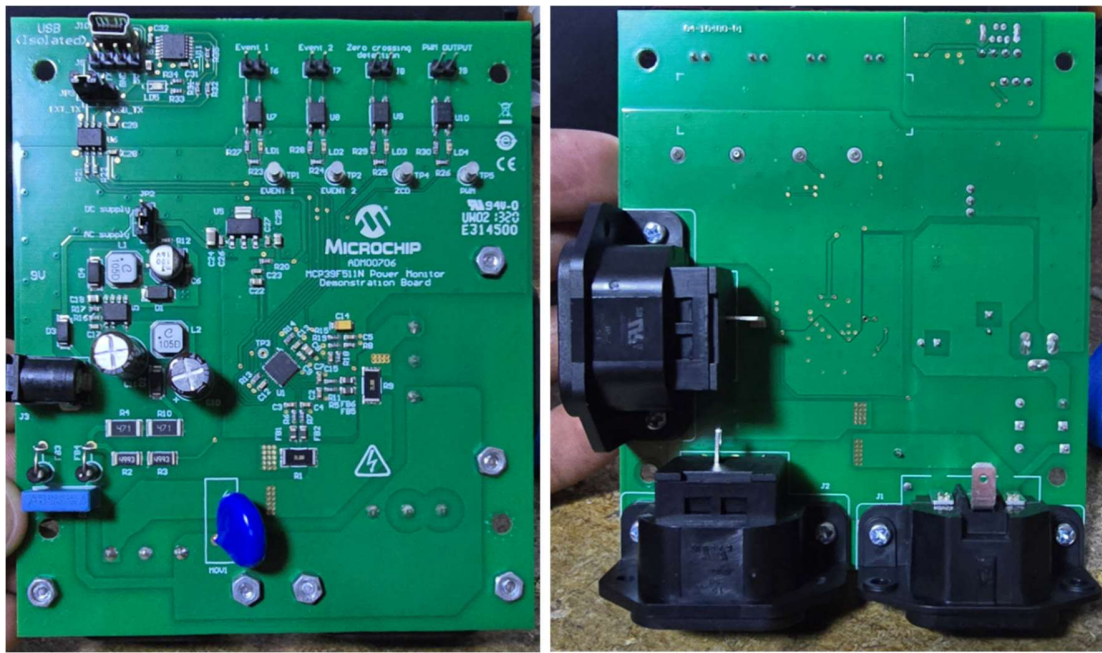


Figura 27: Placa circuito con componentes

6.9. Determinación del EROEI

Una vez realizado el sistema de análisis de energía y estandarizadas las condiciones de transesterificación, se realizaron mediciones de energía para cada lote experimental, el proceso sucedió de la siguiente manera:

Una vez sellado el reactor con los reactivos correspondientes al experimento, se conectó el reactor al sistema de medición de energía (Figura 28) y se comenzaron a capturar datos en un archivo de texto .txt desde la plataforma mediante una interfaz serial. (Figura 29) se encendió el reactor y la plataforma capturó datos en intervalos de 1 segundo, los datos fueron visibles en todo momento mediante la interfaz gráfica incorporada de MICROCHIP® (Figura 30).



Figura 28: Sistema de medición de energía montado con reactor

23/10/2024 11:45,, -0.01,-0.23,1.61,-0.01,0,0,0,0, QUADRANT III,0.0063,-0.01,0,1.61,-0.01,0,0,0,0, QUADRANT III,0.0063,256.1,60.11
 23/10/2024 11:45,, -0.24,1.61,0,0,0,0,0, QUADRANT III,0.0063,0,0,1.61,0,0,0,0,0, QUADRANT III,0.0063,255.8,60.10
 23/10/2024 11:45,, -0.02,-0.22,1.61,-0.01,0,0,0,0, QUADRANT III,0.0063,-0.01,0,1.61,-0.01,0,0,0,0, QUADRANT III,0.0063,255.9,60.08
 23/10/2024 11:45,, -0.22,1.61,0,0,0,0,0, QUADRANT III,0.0063,-0.01,0,1.61,-0.01,0,0,0,0, QUADRANT III,0.0063,256.5,60.12
 23/10/2024 11:45,, -0.22,1.61,0,0,0,0,0, QUADRANT III,0.0063,-0.01,0,1.61,-0.01,0,0,0,0, QUADRANT III,0.0063,256.5,60.12
 23/10/2024 11:45,, -0.22,1.61,0,0,0,0,0, QUADRANT III,0.0063,-0.01,0,1.61,-0.01,0,0,0,0, QUADRANT III,0.0063,256.1,60.12
 23/10/2024 11:45,, -0.01,-0.22,1.62,-0.01,0,0,0,0, QUADRANT III,0.0063,-0.02,0,1.62,-0.01,0,0,0,0, QUADRANT III,0.0063,256.8,60.11
 23/10/2024 11:45,, -0.25,1.61,0,0,0,0,0, QUADRANT III,0.0063,0,0,1.61,0,0,0,0,0, QUADRANT III,0.0063,256.6,60.12
 23/10/2024 11:45,, -0.13,25.89,0,0,0,0,0, QUADRANT III,0.0063,-0.02,0,1.61,-0.01,0,0,0,0, QUADRANT III,0.0063,256.1,60.12
 23/10/2024 11:46,, 6.06,-3.46,7.67,0.79,0.001,0,0,0.001, QUADRANT IV,0.03,-0.01,0,1.61,-0.01,0,0,0,0, QUADRANT III,0.0063,255.8,60.12
 23/10/2024 11:46,, 6.09,-3.4,7.66,0.8,0.004,0,0,0.002, QUADRANT IV,0.03,-0.02,0,1.61,-0.01,0,0,0,0, QUADRANT III,0.0063,255.5,60.12
 23/10/2024 11:46,, 6.08,-3.4,7.66,0.79,0.005,0,0,0.003, QUADRANT IV,0.03,0,1.6,0,0,0,0,0, QUADRANT III,0.0063,255.5,60.10
 23/10/2024 11:46,, 6.07,-5.33,491.2,0.79,0.025,0,0,0.004, QUADRANT IV,0.03,0,1.55,0,0,0,0,0, QUADRANT III,0.0063,255.6,60.10
 23/10/2024 11:46,, 811.96,-5.2,805.04,1,0.266,0,0,0.006, QUADRANT IV,3.5687,-0.13,0,1.43,-0.09,0,0,0,0, QUADRANT III,0.0063,227.2,60.12
 23/10/2024 11:46,, 791.59,-5.25,786.53,1,0.501,0,0,0.007, QUADRANT IV,3.4643,-0.12,0,1.43,-0.08,0,0,0,0, QUADRANT III,0.0063,228.2,60.07
 23/10/2024 11:46,, 776.25,-5.2,768.64,1,0.732,0,0,0.009, QUADRANT IV,3.3868,-0.13,0,1.43,-0.09,0,0,0,0, QUADRANT III,0.0063,228.9,60.07
 23/10/2024 11:46,, 761.67,-5.08,757.99,1,0.958,0,0,0.01, QUADRANT IV,3.3213,-0.14,0,1.44,-0.1,0,0,0,0, QUADRANT III,0.0063,229.60.11
 23/10/2024 11:46,, 751.05,-5.03,748.84,1,1.18,0,0,0.012, QUADRANT IV,3.2731,-0.14,0,1.44,-0.1,0,0,0,0, QUADRANT III,0.0063,229.2,60.12
 23/10/2024 11:46,, 747.25,-5.06,744.82,1,1.456,0,0,0.014, QUADRANT IV,3.2399,-0.14,0,1.45,-0.1,0,0,0,0, QUADRANT III,0.0063,230.3,60.11
 23/10/2024 11:46,, 739.99,-5.08,742.19,1,1.676,0,0,0.015, QUADRANT IV,3.2099,-0.13,0,1.45,-0.09,0,0,0,0, QUADRANT III,0.0063,230.2,60.12
 23/10/2024 11:46,, 736.79,-5.07,735.73,1,1.895,0,0,0.017, QUADRANT IV,3.1878,-0.12,0,1.45,-0.08,0,0,0,0, QUADRANT III,0.0063,230.8,60.12
 23/10/2024 11:46,, 737.82,-5.08,738.95,1,2.169,0,0,0.019, QUADRANT IV,3.1814,-0.14,0,1.46,-0.1,0,0,0,0, QUADRANT III,0.0063,231.6,60.12
 23/10/2024 11:46,, 736.43,-5.01,733.08,1,2.387,0,0,0.02, QUADRANT IV,3.1704,-0.13,0,1.45,-0.09,0,0,0,0, QUADRANT III,0.0063,232.60.12
 23/10/2024 11:46,, 730.18,-5.728,48,1,2.603,0,0,0.022, QUADRANT IV,3.1514,-0.14,0,1.45,-0.1,0,0,0,0, QUADRANT III,0.0063,231.4,60.12
 23/10/2024 11:46,, 726.09,-4.99,724.25,1,2.872,0,0,0.023, QUADRANT IV,3.1372,-0.16,0,1.45,-0.11,0,0,0,0, QUADRANT III,0.0063,231.2,60.12
 23/10/2024 11:46,, 724.07,-4.97,724.32,1,3.087,0,0,0.025, QUADRANT IV,3.1301,-0.13,0,1.45,-0.09,0,0,0,0, QUADRANT III,0.0063,231.8,60.12
 23/10/2024 11:46,, 725.3,-5.04,726.2,1,3.355,0,0,0.027, QUADRANT IV,3.1285,-0.14,0,1.46,-0.1,0,0,0,0, QUADRANT III,0.0063,231.5,60.12
 23/10/2024 11:46,, 725.65,-5.02,722.28,1,3.57,0,0,0.028, QUADRANT IV,3.1269,-0.13,0,1.45,-0.09,0,0,0,0, QUADRANT III,0.0063,231.7,60.12
 23/10/2024 11:46,, 725.3,-5.09,724.87,1,3.838,0,0,0.03, QUADRANT IV,3.1237,-0.14,0,1.46,-0.1,0,0,0,0, QUADRANT III,0.0063,231.9,60.12
 23/10/2024 11:46,, 724.58,-5.07,722.29,1,4.052,0,0,0.032, QUADRANT IV,3.1206,-0.15,0,1.45,-0.1,0,0,0,0, QUADRANT III,0.0063,231.9,60.12
 23/10/2024 11:46,, 724.47,-5.06,724.28,1,4.32,0,0,0.033, QUADRANT IV,3.119,-0.11,0,1.46,-0.08,0,0,0,0, QUADRANT III,0.0063,232,60.12
 23/10/2024 11:46,, 723.07,-5.06,724.9,1,4.535,0,0,0.035, QUADRANT IV,3.115,-0.13,0,1.46,-0.09,0,0,0,0, QUADRANT III,0.0063,231.8,60.12
 23/10/2024 11:46,, 723.94,-5.1,723.35,1,4.749,0,0,0.036, QUADRANT IV,3.1158,-0.13,0,1.46,-0.09,0,0,0,0, QUADRANT III,0.0063,232,60.12
 23/10/2024 11:46,, 721.8,-5.27,719.96,1,4.963,0,0,0.038, QUADRANT IV,3.1111,-0.16,0,1.45,-0.11,0,0,0,0, QUADRANT III,0.0063,231.7,60.12
 23/10/2024 11:46,, 718.81,-5.03,718.6,1,5.176,0,0,0.039, QUADRANT IV,3.104,-0.12,0,1.45,-0.08,0,0,0,0, QUADRANT III,0.0063,231.3,60.12
 23/10/2024 11:46,, 718.4,-4.99,717.57,1,5.388,0,0,0.041, QUADRANT IV,3.1024,-0.12,0,1.45,-0.08,0,0,0,0, QUADRANT III,0.0063,231.3,60.15
 23/10/2024 11:46,, 717.03,-5.05,717.39,1,5.654,0,0,0.043, QUADRANT IV,3.0984,-0.15,0,1.45,-0.1,0,0,0,0, QUADRANT III,0.0063,231.1,60.11
 23/10/2024 11:46,, 715.99,-4.96,715.18,1,5.919,0,0,0.045, QUADRANT IV,3.0961,-0.14,0,1.45,-0.1,0,0,0,0, QUADRANT III,0.0063,231,60.11

Figura 29: Captura de datos de la plataforma via serial

The screenshot displays the Microchip Power Monitor software interface for the MCP39F511. The main window is divided into several sections:

- Meter State:** A grid of real-time data including Voltage (RMS) at 128.8, Frequency at 60.252, Power Quadrant at QUADRANT IV, Active Power at 23.26, Reactive Power at -37.85, Apparent Power at 45.45, Active Energy Import at 769.185, Analog Voltage at 0.822, and Thermistor Temperature at 34.
- Manual Register Configuration:** A table listing various registers and their values.
- Transmit History and Receive History:** Logs of data bytes and commands sent and received via the serial port.
- Connection Status:** Shows 'Meter Connected' and 'Firmware Version: 14/10/2015'.

Register Address	Registers	Attribute	Register Length (Bits)	Value (Hex)
0x0000	InstructionPointer	R	16	
0x0002	SystemStatus	R	16	
0x0004	SystemVersion	R	16	
0x0006	VoltageRMS	R	16	
0x0008	LineFrequency	R	16	
0x000A	ThermistorVoltage	R	16	
0x000C	PowerFactor	R	16	
0x000E	CurrentRMS	R	32	
0x0012	ActivePower	R	32	
0x0016	ReactivePower	R	32	
0x001A	ApparentPower	R	32	
0x001E	ImportEnergyActiveCounter	R	64	

Figura 30: Visualización en tiempo real de los datos de energía gastada

Una vez capturados los datos se les realizó un tratamiento para separar la visualización de corriente RMS, potencia aparente, energía total y la hora, esto se realizó convirtiendo el .txt en un archivo delimitado por comas (.csv) y filtrando los datos necesarios anteriormente mencionados mediante hojas de cálculo en Excel, el formato de la corriente se midió en amperes, la potencia aparente en volt-amperes, la energía total en watts y el formato de tiempo se convirtió en sets de datos comenzando en 0. El resultado de este filtrado de datos se pudo visualizar mediante gráficas en Excel (ilustraciones 41 a 43). Al final de los lotes se guardaron estos datos y se determinó el gasto total de energía para el experimento, se anotó y posteriormente se comparó contra la energía contenida en el biodiésel obtenido. La cual que por definición el retorno de la inversión en energía (ERoEI) se define como la relación entre la producción de energía de una tecnología y el insumo de energía requerido para entregar esa energía, lo que refleja la eficiencia y el valor de la conversión de energía en la sociedad, según Carbajales-Dale., (2023), Cucchiella & Dadamo., (2012), Fthenakis & Raugei., (2017), González-López., (2021), A. Gupta., (2018) y Huke et al., (2017).

6.10. Determinación de las características fisicoquímicas del biodiésel obtenido a partir de aceite de ricino

Para este propósito se determinó TGA, Cromatografía de gases, densidad, viscosidad

6.10.1. TGA (Thermo gravimetric analysis - TGA)

Con el fin de establecer la temperatura de degradación térmica del biodiésel, se empleó un dispositivo marca TA Instruments (Delaware, EE. UU.), modelo Q500. Dicho análisis se llevó a cabo en las instalaciones de la Facultad de Ingeniería, dentro del campus Aeropuerto de la Universidad Autónoma de Querétaro (Figura 31). Se introdujeron porciones de aproximadamente 5 g en la unidad de análisis, procediendo a incrementar el calor en intervalos de 10 °C.



Figura 31: TGA Q500 TA

6.11. Determinación de los componentes principales del biodiésel

Para la identificación de los componentes principales del biodiésel se realizó cromatografía de gases (GC) mediante un cromatógrafo de gases acoplado a masas. Esto se realizó con una alicuota de 1 μL de la muestra separada en una columna capilar HP-88 (30 m \times 0,25 mm \times 0,25 μm) instalada en un sistema Agilent 7890 GC (Wilmington, DE, EE. UU.) acoplada a un Agilent 5975C EI-SQ MS. Se utilizó helio como gas portador a un caudal constante de 1,5 mL/min. El inyector se utilizó en modo split a 250°C. El programa de temperatura del horno fue el siguiente: temperatura inicial de 50°C (mantenida durante 1 minuto), aumentada a 175°C a 15°C min^{-1} , y luego aumentada a 210°C a 1°C min^{-1} . La ionización electrónica (EI) se realizó a 70 eV, y el rango de masas de barrido fue m/z 50–1100. Los ésteres metílicos de ácidos grasos (FAMES) se identificaron comparando con el estándar FAME Mix de Supelco de 37 componentes y se cuantificaron mediante el método del estándar externo. La adquisición y procesamiento de datos se realizó utilizando el software Agilent ChemStation, esto se realizó en la facultad de química de la universidad autónoma de Querétaro.

6.12. Densidad

Dicho valor se estableció a través del vínculo entre un volumen cercano a los 10 mL de biocombustible y su masa registrada en una balanza analítica. El proceso se efectuó a una temperatura de 27 °C y se desarrolló por triplicado para cada variante dentro del laboratorio de compuestos naturales e insecticidas de la Facultad de Química de la Universidad Autónoma de Querétaro.

6.13. Viscosidad

Este parámetro se estableció empleando un viscosímetro a una temperatura constante de 27 °C, ejecutando tres mediciones por cada muestra para garantizar la repetibilidad. El análisis se llevó a cabo en las instalaciones del laboratorio de compuestos naturales e insecticidas, perteneciente a la Facultad de Química de la Universidad Autónoma de Querétaro.

6.14. Contenido de cenizas

La cuantificación se realizó siguiendo el protocolo de la normativa ASTM D482, empleando para ello una mufla y un mechero Bunsen. Se utilizaron crisoles acondicionados a masa constante, los cuales fueron sometidos a 700 °C durante 10 minutos en la mufla y posteriormente enfriados en un desecador de vidrio. Se vertieron 17 g de biodiésel en el recipiente pesado, añadiendo 2 mL de alcohol isopropílico; la mezcla se homogeneizó con una varilla de papel filtro cuyo residuo sólido ya había sido determinado. El crisol se calentó sobre un triángulo de porcelana con el mechero, evitando la ebullición del líquido y procediendo a la combustión de los vapores hasta su consumo total. El remanente se calcinó a 800 °C por una hora en la mufla, permitiendo un reposo posterior de una hora antes de

registrar el peso final. El porcentaje de cenizas se calculó mediante la diferencia entre la masa final del crisol, el peso constante inicial y la corrección por el papel filtro. Esta prueba se llevó a cabo en el laboratorio de compuestos naturales e insecticidas de la Facultad de Química de la Universidad Autónoma de Querétaro.

7. Análisis estadístico

Se realizó un diseño factorial mixto con 3 factores, los cuales fueron:

- relación molar alcohol/aceite
- relación molar aceite/agua
- tiempo

Para cada uno de estos factores se tuvieron respectivamente

- 6 niveles
- 3 niveles
- 3 niveles

Además de que se tuvieron 2 constantes las cuales fueron temperatura (270° C) y presión (1200 PSI), para la variable de salida se seleccionó la cantidad de glicerol, ya que realizar cromatografía de gases para cada uno de los experimentos sería incosteable. Se consideró la cantidad de glicerol obtenido por cada lote debido a que la presencia de este indica la conversión de esteres metílicos a biodiesel.

En base a lo anterior se seleccionó el mejor tratamiento contra un control que no contenía alcohol ni agua para la reacción, el experimento final fue un factorial mixto 6 x 3 x 3 (Figura 32) completamente aleatorizado con 2 réplicas, contando con un total de 54 unidades experimentales (Figura 33) y 162 corridas con análisis de varianza (ANDEVA).

Gramos Aceite	Relacion Alcohol Aceite	Relacion Aceite Agua	Temperatura	Presion	Tiempo	Relacion Glicerol
	RelAlcAce0 : 0	RelAceAgua0 : 0	T1 : 270 °C	P1: 1200 Psi	T1: 10	
	RelAlcAce1 : 10	RelAceAgua1 : 5			T2: 30	
	RelAlcAce2 : 30	RelAceAgua2 : 10			T3: 60	
	RelAlcAce3 : 35					
	RelAlcAce4 : 40					
	RelAlcAce5 : 50					

Figura 32: factores y niveles del experimento (RelAlcAce: Relación alcohol/aceite, RelAceAgua: Relación aceite/agua)

Gramos Aceite	Relacion Alcohol Aceite	Relacion Aceite Agua	Temperatura	Presion	Tiempo
	RelAlcAce0 : 0	RelAceAgua0 : 0	T1 : 270 °C	P1: 1200 Psi	T1: 10
	RelAlcAce0 : 0	RelAceAgua0 : 0	T1 : 270 °C	P1: 1200 Psi	T2: 30
	RelAlcAce0 : 0	RelAceAgua0 : 0	T1 : 270 °C	P1: 1200 Psi	T3: 60
	RelAlcAce0 : 0	RelAceAgua1 : 5	T1 : 270 °C	P1: 1200 Psi	T1: 10
	RelAlcAce0 : 0	RelAceAgua1 : 5	T1 : 270 °C	P1: 1200 Psi	T2: 30
	RelAlcAce0 : 0	RelAceAgua1 : 5	T1 : 270 °C	P1: 1200 Psi	T3: 60
	RelAlcAce0 : 0	RelAceAgua2 : 10	T1 : 270 °C	P1: 1200 Psi	T1: 10
	RelAlcAce0 : 0	RelAceAgua2 : 10	T1 : 270 °C	P1: 1200 Psi	T2: 30
	RelAlcAce0 : 0	RelAceAgua2 : 10	T1 : 270 °C	P1: 1200 Psi	T3: 60
	RelAlcAce1 : 10	RelAceAgua0 : 0	T1 : 270 °C	P1: 1200 Psi	T1: 10
	RelAlcAce1 : 10	RelAceAgua0 : 0	T1 : 270 °C	P1: 1200 Psi	T2: 30
*	RelAlcAce1 : 10	RelAceAgua0 : 0	T1 : 270 °C	P1: 1200 Psi	T3: 60
*	RelAlcAce1 : 10	RelAceAgua1 : 5	T1 : 270 °C	P1: 1200 Psi	T1: 10
	RelAlcAce1 : 10	RelAceAgua1 : 5	T1 : 270 °C	P1: 1200 Psi	T2: 30
	RelAlcAce1 : 10	RelAceAgua1 : 5	T1 : 270 °C	P1: 1200 Psi	T3: 60
*	RelAlcAce1 : 10	RelAceAgua2 : 10	T1 : 270 °C	P1: 1200 Psi	T1: 10
	RelAlcAce1 : 10	RelAceAgua2 : 10	T1 : 270 °C	P1: 1200 Psi	T2: 30
	RelAlcAce1 : 10	RelAceAgua2 : 10	T1 : 270 °C	P1: 1200 Psi	T3: 60
	RelAlcAce2 : 30	RelAceAgua0 : 0	T1 : 270 °C	P1: 1200 Psi	T1: 10
	RelAlcAce2 : 30	RelAceAgua0 : 0	T1 : 270 °C	P1: 1200 Psi	T2: 30
	RelAlcAce2 : 30	RelAceAgua0 : 0	T1 : 270 °C	P1: 1200 Psi	T3: 60
*	RelAlcAce2 : 30	RelAceAgua1 : 5	T1 : 270 °C	P1: 1200 Psi	T1: 10
	RelAlcAce2 : 30	RelAceAgua1 : 5	T1 : 270 °C	P1: 1200 Psi	T2: 30
	RelAlcAce2 : 30	RelAceAgua1 : 5	T1 : 270 °C	P1: 1200 Psi	T3: 60
	RelAlcAce2 : 30	RelAceAgua2 : 10	T1 : 270 °C	P1: 1200 Psi	T1: 10
*	RelAlcAce2 : 30	RelAceAgua2 : 10	T1 : 270 °C	P1: 1200 Psi	T2: 30
	RelAlcAce2 : 30	RelAceAgua2 : 10	T1 : 270 °C	P1: 1200 Psi	T3: 60
	RelAlcAce3 : 35	RelAceAgua0 : 0	T1 : 270 °C	P1: 1200 Psi	T1: 10
	RelAlcAce3 : 35	RelAceAgua0 : 0	T1 : 270 °C	P1: 1200 Psi	T2: 30
	RelAlcAce3 : 35	RelAceAgua0 : 0	T1 : 270 °C	P1: 1200 Psi	T3: 60
	RelAlcAce3 : 35	RelAceAgua1 : 5	T1 : 270 °C	P1: 1200 Psi	T1: 10
	RelAlcAce3 : 35	RelAceAgua1 : 5	T1 : 270 °C	P1: 1200 Psi	T2: 30
*	RelAlcAce3 : 35	RelAceAgua1 : 5	T1 : 270 °C	P1: 1200 Psi	T3: 60
	RelAlcAce3 : 35	RelAceAgua2 : 10	T1 : 270 °C	P1: 1200 Psi	T1: 10
*	RelAlcAce3 : 35	RelAceAgua2 : 10	T1 : 270 °C	P1: 1200 Psi	T2: 30
*	RelAlcAce3 : 35	RelAceAgua2 : 10	T1 : 270 °C	P1: 1200 Psi	T3: 60
	RelAlcAce4 : 40	RelAceAgua0 : 0	T1 : 270 °C	P1: 1200 Psi	T1: 10
	RelAlcAce4 : 40	RelAceAgua0 : 0	T1 : 270 °C	P1: 1200 Psi	T2: 30
	RelAlcAce4 : 40	RelAceAgua0 : 0	T1 : 270 °C	P1: 1200 Psi	T3: 60
	RelAlcAce4 : 40	RelAceAgua1 : 5	T1 : 270 °C	P1: 1200 Psi	T1: 10
	RelAlcAce4 : 40	RelAceAgua1 : 5	T1 : 270 °C	P1: 1200 Psi	T2: 30
*	RelAlcAce4 : 40	RelAceAgua1 : 5	T1 : 270 °C	P1: 1200 Psi	T3: 60
*	RelAlcAce4 : 40	RelAceAgua2 : 10	T1 : 270 °C	P1: 1200 Psi	T1: 10
	RelAlcAce4 : 40	RelAceAgua2 : 10	T1 : 270 °C	P1: 1200 Psi	T2: 30
	RelAlcAce4 : 40	RelAceAgua2 : 10	T1 : 270 °C	P1: 1200 Psi	T3: 60
	RelAlcAce5 : 50	RelAceAgua0 : 0	T1 : 270 °C	P1: 1200 Psi	T1: 10
	RelAlcAce5 : 50	RelAceAgua0 : 0	T1 : 270 °C	P1: 1200 Psi	T2: 30
	RelAlcAce5 : 50	RelAceAgua0 : 0	T1 : 270 °C	P1: 1200 Psi	T3: 60
	RelAlcAce5 : 50	RelAceAgua1 : 5	T1 : 270 °C	P1: 1200 Psi	T1: 10
	RelAlcAce5 : 50	RelAceAgua1 : 5	T1 : 270 °C	P1: 1200 Psi	T2: 30
	RelAlcAce5 : 50	RelAceAgua1 : 5	T1 : 270 °C	P1: 1200 Psi	T3: 60
	RelAlcAce5 : 50	RelAceAgua2 : 10	T1 : 270 °C	P1: 1200 Psi	T1: 10
	RelAlcAce5 : 50	RelAceAgua2 : 10	T1 : 270 °C	P1: 1200 Psi	T2: 30
	RelAlcAce5 : 50	RelAceAgua2 : 10	T1 : 270 °C	P1: 1200 Psi	T3: 60

Figura 33: Unidades experimentales del diseño (RelAlcAce: Relación alcohol/aceite, RelAceAgua: Relación aceite/agua)

Terminado este experimento se realizó una optimización con base a los resultados obtenidos y se planteó un nuevo experimento, el cual fue un factorial completamente aleatorizado con 3 factores y 3 niveles completamente aleatorizado (Factorial 3 x 3 x 3), para este experimento se realizaron 2 réplicas. Los resultados de ambos experimentos fueron analizados por medio del software R®.

Gramos Aceite	Relación Alcohol Aceite	Relación Aceite Agua	Temperatura	Presión	Tiempo	Relación glicerol
	RelAlcAce6 : 20	RelAceAgua0 : 0	T1 : 270 °C	P1 : 1200 Psi	T1 : 10	
	RelAlcAce7 : 15	RelAceAgua1 : 5			T2 : 30	
	RelAlcAce8 : 25	RelAceAgua2 : 10			T3 : 60	

Figura 34: Experimento para optimización de factores (RelAlcAce: Relación alcohol/aceite, RelAceAgua: Relación aceite/agua)

8. Resultados y discusión

8.1. Determinación de las condiciones óptimas de transesterificación supercrítica con aceite de ricino

Para las 162 unidades experimentales realizadas en el ensayo preliminar, se efectuó un análisis de varianza y se obtuvieron los siguientes resultados (Tabla 1), en esta se puede observar que los factores estadísticamente significativos son la relación de alcohol/aceite, la relación aceite/agua, la presión y el efecto combinado de la temperatura y la presión. Gracias a los resultados obtenidos decidimos realizar el experimento de la figura 34, ya que se observó que las relaciones alcohol/aceite de 10:1 y 30:1 tuvieron mejores resultados en cuanto a la producción de glicerol y se propusieron valores intermedios de entre 15 y 25 para estos.

Cabe mencionar que para la presión y el efecto combinado de la temperatura y la presión la significancia estadística debería ser nula debido a que fueron constantes del sistema, sin embargo, en algunos experimentos llegó a haber variación de estas 2 constantes en a lo mucho 5 unidades para la presión y 2 unidades para la temperatura según los datos capturados, gracias a esto podemos ver claramente que cambios significativos de estas 2 constantes puede tener efectos beneficiosos para la generación de glicerol y por tanto para la generación de biodiesel al hacer nuevos experimentos.

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Fvalor	Pvalor
RelAlcAce	8	104.25	13.031	15.206	1.36E-09*
RelAceAgua	2	14.56	7.282	8.498	0.000919*
Temperatura	1	0.25	0.254	0.297	0.589138
Presión	1	4.83	4.827	5.633	0.022927*
Tiempo	2	1.49	0.744	0.868	0.427993
RelAlcAce:RelAlcAgua	8	9.76	1.220	1.424	0.219311
RelAlcAce:Temperatura	2	0.01	0.006	0.007	0.993225
RelAlcAgua:Temperatura	1	0.00	0.000	0.000	0.985709
RelAlcAce:Presión	3	0.06	0.019	0.022	0.995396
RelAlcAgua:Presión	1	1.31	1.306	1.523	0.224879
Temperatura:Presión	1	3.45	3.449	4.025	0.052176*
RelAlcAce:Tiempo	10	9.34	0.934	1.090	0.394369
RelAlcAgua:Tiempo	4	1.88	0.469	0.547	0.702066
Temperatura:Tiempo	2	0.01	0.004	0.004	0.995747
Presión:Tiempo	2	0.58	0.289	0.337	0.715943

Tabla 1: ANDEVA del experimento del ensayo preliminar

Además del ANDEVA se realizaron gráficos de interacción para observar cuales niveles de estas relaciones molares tuvieron los mayores efectos en la generación de glicerol con relación al preso del aceite utilizado, siendo así que se puede observar en la Figura 36 que los mayores resultados se obtuvieron con relaciones molares alcohol/aceite de entre 10 y 30 con tiempos prolongados de entre 30 y 60 min, además en la gráfica de interacción de

relación aceite/agua (Figura 37) se observó que a relaciones molares de 10:1 se obtuvieron mejores relaciones de glicerol con tiempos prolongados de 30 y 60 min al igual que con la relación alcohol/aceite sin embargo se cuestionó que la adición de más agua al experimento pudiera favorecer de manera negativa, debido a la reversibilidad del proceso de hidrólisis descrito en la Figura 16 y de acuerdo a observaciones de Portilho Trentini et al., (2019), por esta razón se decidió que los nuevos niveles del experimento variaran de 15:1 a 25:1 para alcohol/aceite y se mantuvieran de 0 a 10 para aceite/agua, así mismo se decidió que el tiempo evaluado fuera de 60 min de reacción.

Con los datos del experimento de optimización de la figura 34 se determinaron los valores óptimos, estos se muestran en la tabla 2.

Temperatura	270° C
Presión	1200 PSI
Relación molar alcohol/aceite	25:1
Relación molar agua/aceite	10:1
tiempo de reacción	1 hora
Relación de glicerol obtenido y aceite utilizado	3.65%

Tabla 2: Condiciones óptimas para el experimento

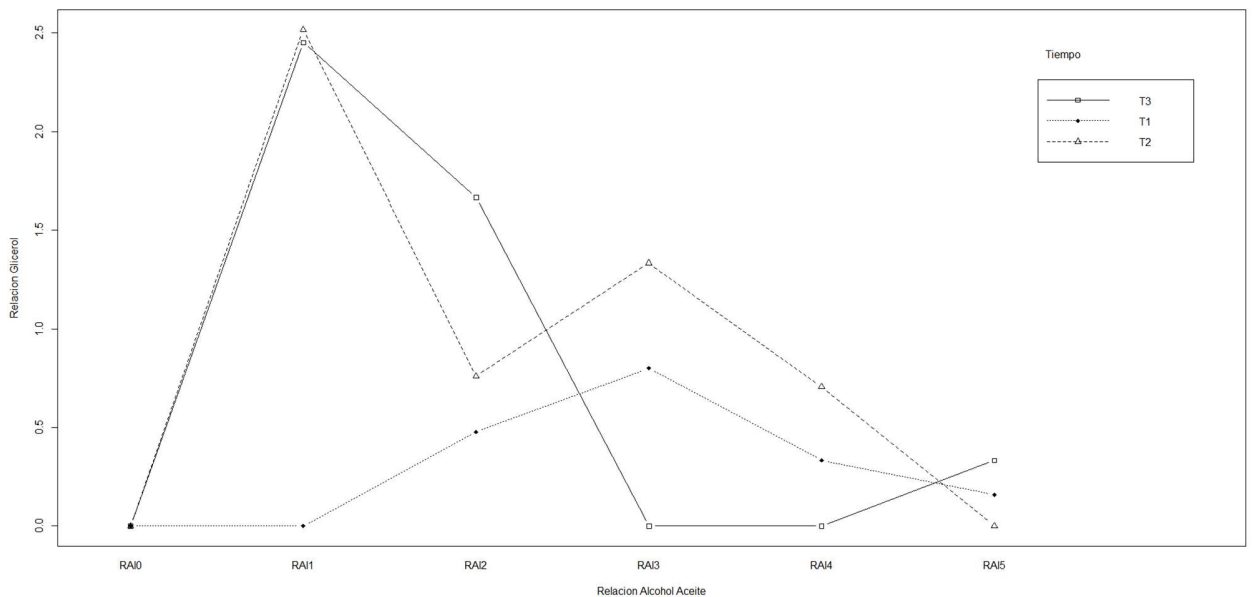


Figura 35: gráfica de interacción alcohol/aceite, tiempo y relación de glicerol

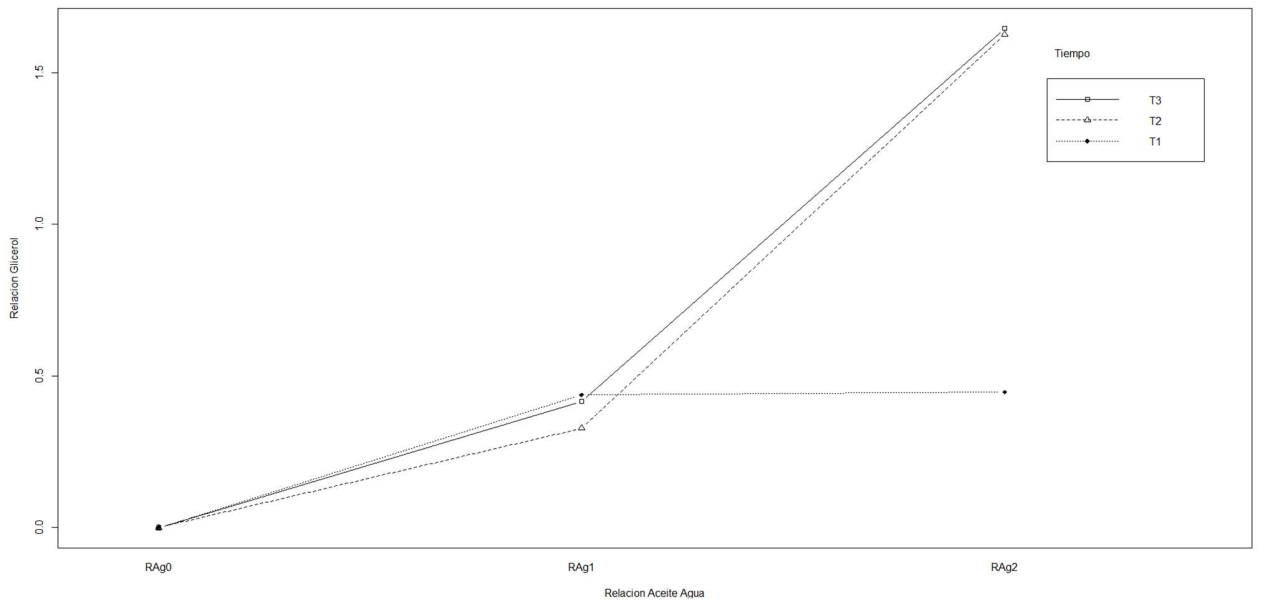


Figura 36: gráfica de interacción aceite/agua, tiempo y relación de glicerol

El experimento nuevo se puede observar en la Figura 34, para este experimento se realizaron nuevamente las pruebas estadísticas y los gráficos de interacción para encontrar los niveles más adecuados para los factores, siendo así se notó un aumento de más del 5% en relación de volumen de glicerol a aceite con relaciones molares de 25:1 en alcohol/aceite (Figura 38) y con relaciones molares de 10:1 en aceite/agua (Figura 39) para tiempos de 60 min.

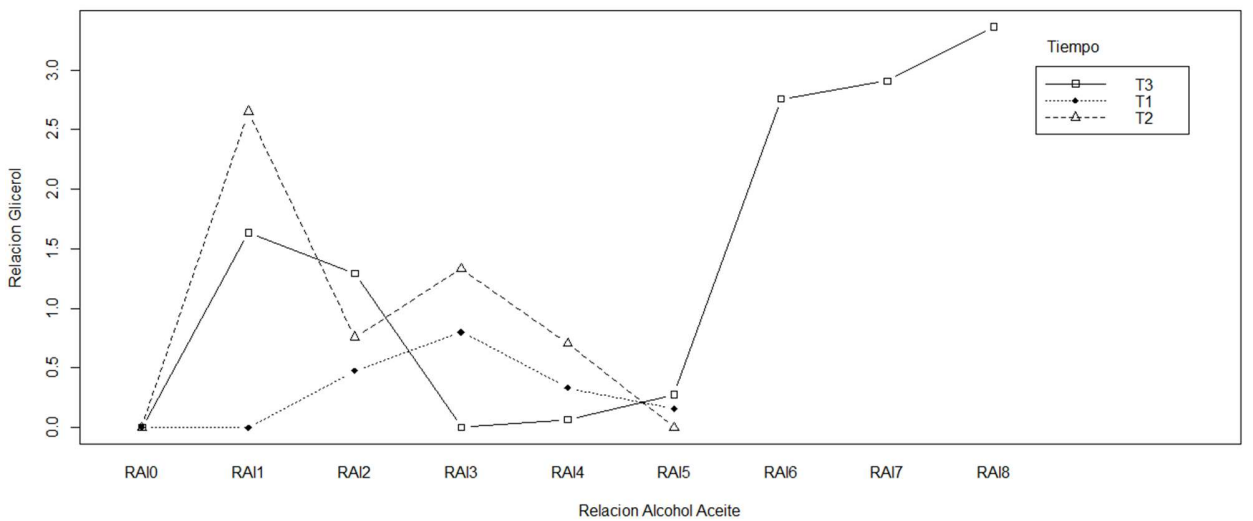


Figura 37: gráfica de interacción alcohol/aceite, tiempo y relación de glicerol para nuevo experimento

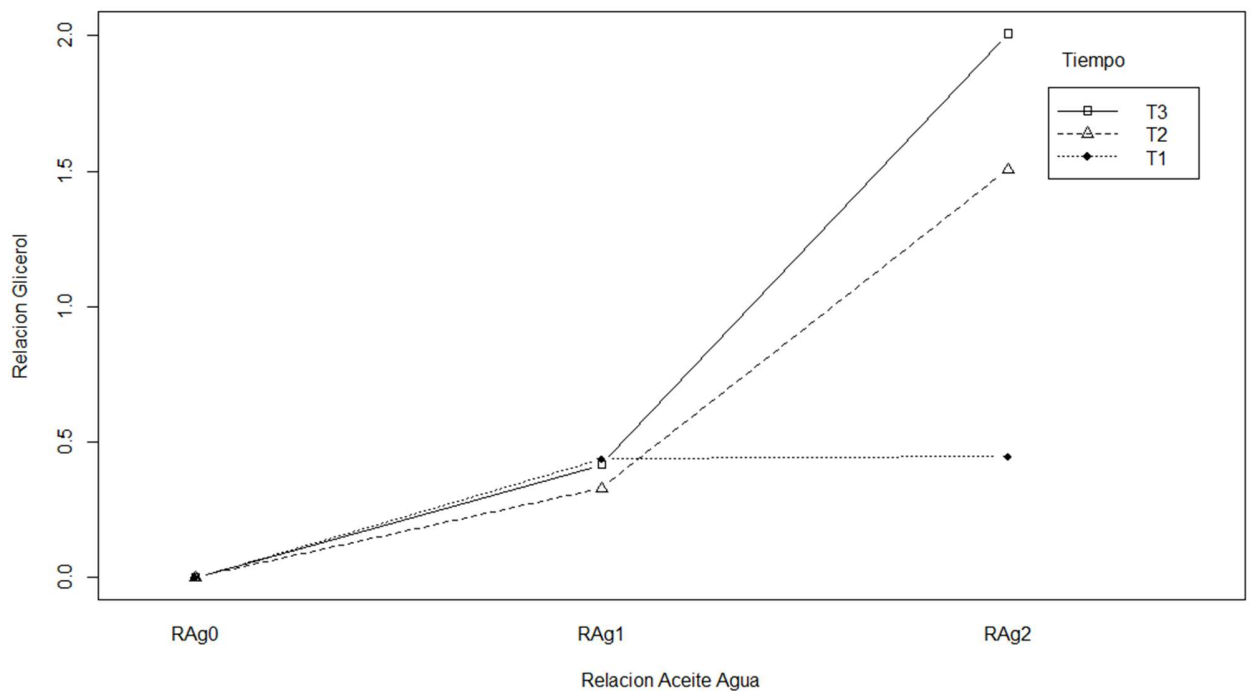


Figura 38: gráfica de interacción aceite/agua, tiempo y relación de glicerol para el nuevo experimento

En estos resultados se puede observar que la relación de alcohol/aceite influyó de manera significativa debido a que obtuvimos más glicerol en relación de peso, además de que se acerca bastante a las relaciones molares de otros trabajos de investigación como el de Saka & Kusdiana., (2001) quienes realizaron transesterificación supercrítica con metanol y aceite de colza a 270° C con 7 MPa con relaciones molares de 20:1 a 50:1, encontrando 95% de conversión de aceite en biodiesel, en comparación con este trabajo contra el que se obtuvieron resultados de conversión de entre 85 y 91%, por otro lado, Umar et al., (2022) En su trabajo de producción mejorada de biodiésel con estabilidad a la oxidación mejorada mediante la adición de agua a la metanólisis supercrítica, descubrieron que el agua (hasta un 6% en v.) mejoraba el rendimiento del biodiésel a través de la vía de hidrólisis-esterificación de aceite usado de cocina de un 80 a un 82%, lo cual se asemeja bastante a los rendimientos obtenidos de nuestro trabajo, que utilizó alrededor del 5% de agua en volumen de aceite con una relación molar 10:1, en un estudio un poco menos reciente, (Han et al., 2005) en su trabajo de esterificación de aceite de soya usando metanol supercrítico con CO₂ como cosolvente, encontraron que la mejor relación molar de alcohol/aceite fue de 10:1 con temperaturas similares a las de este trabajo (245° C) pero con presiones de 14.3 MPa, obteniendo resultados de conversión de 99.8%, comparado contra la relación molar de 25:1 de este trabajo, con 270° C y 85 a 91% de conversión de aceite en ésteres metílicos.

8.2. Determinación de las características fisicoquímicas del biodiésel obtenido a partir de aceite de ricino

8.2.1. Densidad, viscosidad, contenido de cenizas y punto de inflamabilidad

Con los valores óptimos del experimento encontradas se realizaron lotes de biodiesel y se determinaron las siguientes propiedades:

Densidad (g mL⁻¹)	0.88±0.00487
Viscosidad (mm² s⁻¹)	20.37±0.0584
Contenido de cenizas (%)	0.8%±0.0002
Punto de inflamabilidad (° C)	250°

Tabla 3: Propiedades del biodiesel obtenido

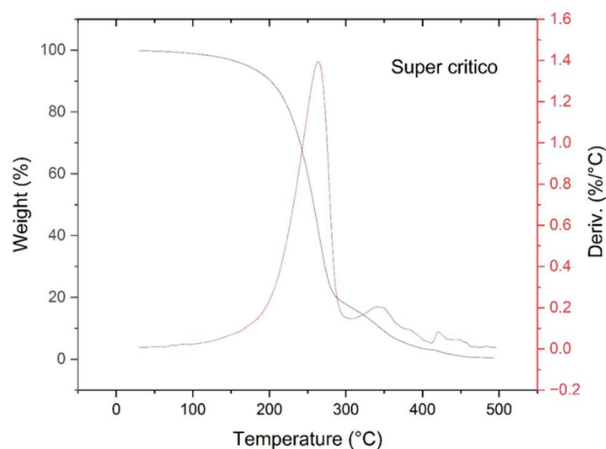


Figura 39: Curva TGA/DTG para la muestra de biodiesel obtenido

De las propiedades resultantes se puede decir lo siguiente. En cuanto a la densidad, esta se encuentra dentro de los estándares internacionales ASTM D6751 y EN 14214 que especifican un rango de densidad para el biodiésel (B100) a 15°C de 0.86 a 0.90 g/mL, por otro lado, en el resumen del libro de Fatimah et al., (2022) se me se menciona que el biodiésel de aceite de ricino generalmente tiene una densidad de 0.89 g/mL a 0.96 g/mL, para la parte de la viscosidad, el estándar ASTM D6751 (a 40°C) exige una viscosidad entre 1.9 y 6.0 mm²/s. comparado contra el de este trabajo que es de 20 mm²/s, sin embargo esta determinación se realizó a 25° C, por lo cual puede haber una ligera variación en el valor a una temperatura de 40° C, la alta viscosidad de este biocombustible pudiera indicar que la conversión a esteres metílicos no se realizó de manera completa, esto se puede corroborar un poco más a detalle en el contenido de cenizas, dado que este trabajo mostró un 0.8% del mismo, y comparando con el estándar ASTM D6751, este exige un máximo de 0.02% de ceniza sulfatada (EN 14214 exige <0.01%). En otros trabajos como el de Armendáriz et al. (2015) se encontraron porcentajes de ceniza relativamente bajos de 0.037% y en el trabajo de Conceição et al. (2007) se tuvo un porcentaje de ceniza de 0.0001% comparado contra este trabajo en el que se

obtuvo 0.8%. Ambos autores anteriormente mencionados realizaron biodiesel a partir de aceite de ricino.

En la parte de la temperatura de descomposición (250°), se cumple con el estándar internacional ASTM D6751 solo requiere un mínimo de 130°C. Sin embargo, esta temperatura es relativamente alta contra otros trabajos como el de Aboelazayem et al., (2018) quienes para la producción de biodiesel a partir de desechos de aceite de cocina, obtuvieron puntos de temperatura de descomposición de 161° C, por otro lado Ramezani et al., (2010) en su trabajo de transesterificación de aceite de ricino tuvieron temperaturas de descomposición de 190° C. La temperatura de descomposición de este trabajo se determinó como antes mencionado mediante TGA/DTG, la curva de descomposición de puede ver en la Figura 40, Se puede ver claramente, la presencia de un pico de alta intensidad centrado aproximadamente en 250°C, que se asigna a la descomposición de los metil ésteres saturados de cadena corta. Además, se puede observar la presencia de un segundo pico de baja intensidad a una temperatura centrada aproximadamente en 350°C, que corresponde a la descomposición de los metil ésteres saturados de cadena larga.

Sin embargo, de la curva de DTG, se aprecian dos picos, uno antes de los 400°C, que indica la presencia de triglicéridos (390-440°C) que no se transformaron, y el otro después de los 400°C, que podría indicar la presencia de residuos de carbón (por arriba de 450°C). Lo cual se complementa con los resultados de contenidos de cenizas previamente discutidos. Además de esto se determinó mediante el software ORIGIN® que se obtuvo una conversión del 85 % hacia los metil ésteres saturados de cadena corta. En la tabla 4 se puede observar una comparación de rendimientos para distintos trabajos con aceites vía supercrítica.

Aceite	Solvente	Relación molar	T (° C)	P (PSI)	Tiempo (min)	Rendimiento	Referencia	Bioproductos
Colza	MeOH	25:1	270	2400	60	80%	(Kusdiana & Saka, 2004)	Biodiesel/glicerol
Jatrofa	MeOH	43:1	320	1160	4	100%	(Hawash et al., 2009)	Biodiesel/glicerol
Microalgas	MeOH	10:1 w/w	269	2900	40	>90%	(Mani Rathnam & Madras, 2019)	Biodiesel/glicerol
Canola	MeOH	2:1 w/w	270	1450	45	100%	(Lee et al., 2012)	Biodiesel/glicerol
Canola	MeOH	40:1	350	2900	10	100%	(Farobie & Matsumura, 2015)	Biodiesel/glicerol
Ricino	MeOH	50:1	265	987	5	96.34%	(Torrentes-Espinoza et al., 2017)	Biodiesel/glicerol
Palma	Metil acetato	30:1	399	N/R	59	97.6%	(Tan et al., 2009)	Biodiesel/triacetina
Ricino	MeOH	25:1	270	1200	60	85%	Este trabajo	Biodiesel/glicerol

Tabla 4: Comparación de rendimientos para diferentes procesos de transesterificación supercrítica

8.2.2. Determinación de los componentes principales del biodiesel

Se analizaron 2 muestras para su comparación, la primera de biodiesel a partir de aceite de ricino obtenido mediante el método supercrítico (Tabla 5) y el segundo obtenido mediante un proceso de catálisis (Tabla 6) de una muestra de un trabajo anterior del grupo de investigación.

Pico #	Tiempo de retención	Area	Contenido relativo (%)	Compuesto	Ref	CAS		
1	6.762	46368758	0.18	Heptanal		7421 000111-71-7		
2	6.929	236665993	0.91	Nonanal dimethyl acetal		51526 018824-63-0		
3	8.179	22009326	0.08	1-Heptanol		8311 000111-70-6		
4	10.624	852321207	3.27	10-Undecenoic acid, methyl ester		59558 000111-81-9	Metil undecenato	C11:1
5	13.297	10197222	0.04	Octadecanoic acid, 3-hydroxy-, methyl ester		156562 002420-36-2		
6	14.633	567492298	2.18	Hexadecanoic acid, methyl ester		119400 000112-39-0	Metil palmitato	C16:0
7	18.229	2012194435	7.71	11-Octadecenoic acid, methyl ester		141291 052380-33-3	Metil 11-octadecenoato	C18:1 Δ
8	19.445	1936048845	7.42	9,12-Octadecadienoic acid, methyl ester		139708 002462-85-3	Metil linoleato	C18:2
9	41.593	2.0403E+10	78.21	9-Octadecenoic acid, 12-hydroxy-, methyl ester, [154825 000141-24-2	Metil oleato	C18:1 Δ

Tabla 5: Resultados de cromatografía de gases acoplado a masas para biodiesel a partir de transesterificación supercrítica

Pico #	Tiempo de retención	Area	Contenido relativo (%)	Compuesto	Ref	CAS		
1	7.986	11560452	0.05	Octanoic acid, methyl ester		30233 000111-11-5		
2	14.668	327246039	1.42	Pentadecanoic acid, 14-methyl-, methyl ester		119425 005129-60-2		
3	18.218	1424786356	6.18	6-Octadecenoic acid, methyl ester		141277 052355-31-4	Metil petroselinato	C18:1 Δ6
4	19.502	1389747340	6.03	9,12-Octadecadienoic acid (Z,Z)-, methyl ester		139726 000112-63-0	Metil linoleato	C18:2
5	21.275	200999276	0.87	9,12,15-Octadecatrienoic acid, methyl ester, (Z,Z,		138097 000301-00-8		
	41.665	1.969E+10	85.44	9-Octadecenoic acid, 12-hydroxy-, methyl ester, [154825 000141-24-2	Metil oleato	C18:1 Δ9

Tabla 6: Resultados de cromatografía de gases acoplado a masas para biodiesel a partir de transesterificación catalítica

Los resultados del biodiesel obtenido a partir de transesterificación supercrítica indican la presencia de metil-esteres de cadena larga en al menos 91% de la muestra, siendo los 3 principales componentes el metil oleato, metil linoleato y el metil 11-octadecenoato, sin embargo, para la muestra de biodiesel obtenido a partir de transesterificación catalítica se encuentran esterres de cadena larga en el 100% de la muestra, siendo los 3 principales componentes metil oleato, metil linoleato y el metil petroselinato.

En la muestra de biodiesel obtenido a partir de transesterificación supercrítica se encuentran también componentes como el Heptanal, Nonanal dimethyl acetal y el 1-Heptanol que son compuestos orgánicos (aldehídos y un alcohol respectivamente) los cuales indican pobre estabilidad oxidativa y podrían estar fuertemente ligados al alto contenido de cenizas, por ejemplo, en un estudio realizado por Zuleta et al., (2012), se establece que este tipo de compuestos se forma cuando el biodiésel se degrada. Confirma que los aldehídos, cetonas y alcoholes son los productos de reacción esperados, componentes como los encontrados en nuestras muestras de biodiesel. Por otra parte, en el trabajo de investigación de Trinidad Pérez-Quiroz et al., (2017), se menciona que el alto contenido de cenizas es la causa de degradación por la pobre estabilidad oxidativa debido a la presencia de metales que catalizan la oxidación, la presencia de dichos

metales en nuestras muestras podría estar ligada directamente al contenido de ceniza y a la degradación del reactor debido a las altas presiones que se utilizaron en el proceso y al uso intenso del mismo.

8.2.3. Análisis de energía

Se registraron los datos de gasto energético todos los lotes como anteriormente mencionado, una vez se encontraron las condiciones óptimas se trataron los datos y se encontraron las siguientes mediciones para corriente, potencia aparente y energía utilizada

Voltaje	220 VAC
rango de corriente	0 ~ 3.5 Amperes
Potencia aparente	0 ~ 800 VA
Energía utilizada	1032.752 Wh

Tabla 7: Datos de gasto energético para el lote con las condiciones óptimas

En la Figura 41 se puede observar cómo la plataforma registró desde un inicio la corriente utilizada por el reactor, por ejemplo, el pico que se muestra al inicio corresponde al arranque del motor del agitador magnético y posteriormente la gráfica se sitúa en un nivel que baja desde los 3.1 A hasta los 2.8 A aproximadamente, dicho efecto se debe a que la resistencia misma del calentador cambia a medida que esta va adquiriendo temperatura, por lo mismo la corriente va disminuyendo; a partir de la iteración 2926 aproximadamente se puede observar que el mecanismo de control enciende y apaga las resistencias del reactor, esto debido a que se llegó a la temperatura de proceso y solamente se encienden las resistencias para evitar que baje la temperatura por radiación al ambiente.

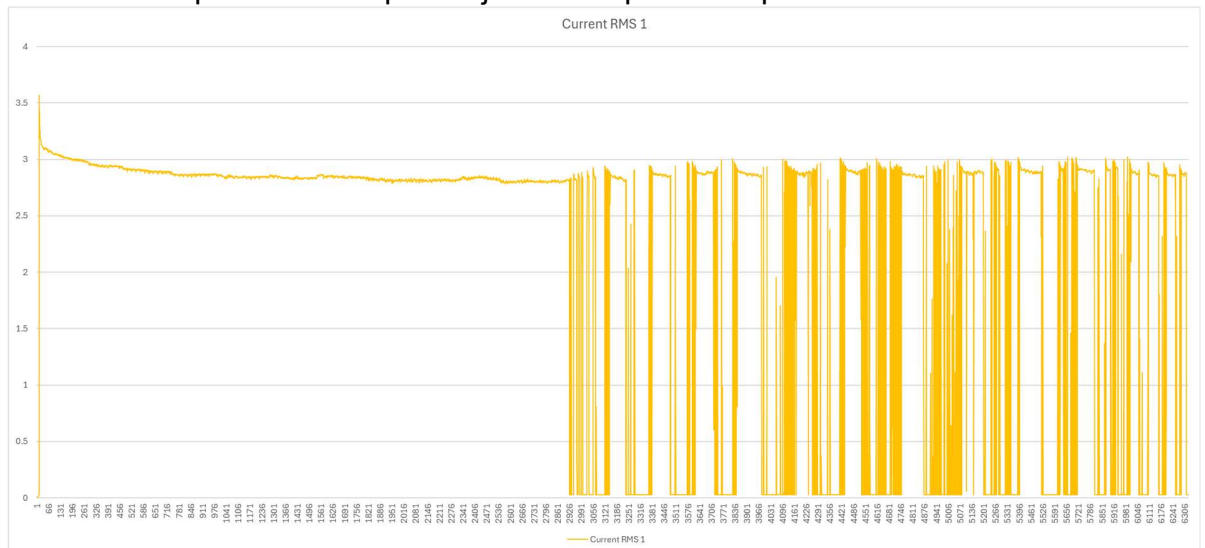


Figura 40: Corriente utilizada (Amperes en eje Y vs iteraciones en eje X) durante el proceso de transesterificación supercrítica

Por otro lado, y de manera análoga, en la Figura 42 se observa que la potencia aparente sigue el mismo curso que la corriente.

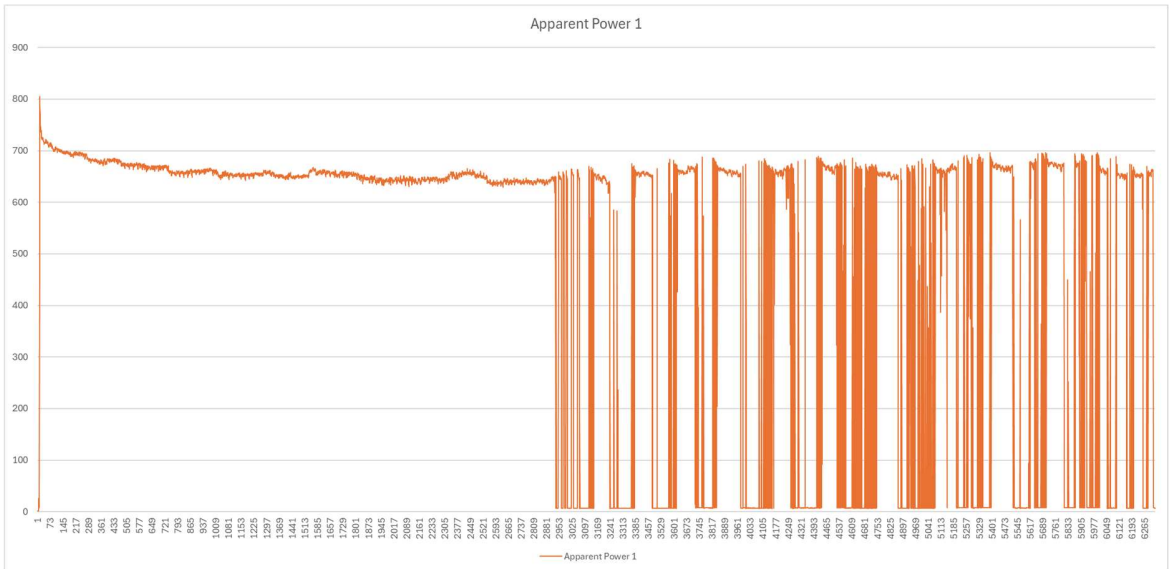


Figura 41: Potencia aparente del reactor utilizada (Volt-Amperes en eje Y vs iteraciones en eje X) durante el proceso de transesterificación supercrítica

Por último en la Figura 43 se observa el total de energía utilizada por el sistema desde un inicio y hasta el final del proceso, aquí se puede observar cómo la energía utilizada aumenta de manera lineal desde el inicio y hasta la iteración 2926 aproximadamente, en donde se empieza a ver cómo en intervalos regulares de tiempo esta no aumenta al ser graficada como una línea recta paralela al eje x, esto se debe al sistema de control que apaga las resistencias de la misma manera mencionada en la gráfica de la corriente.

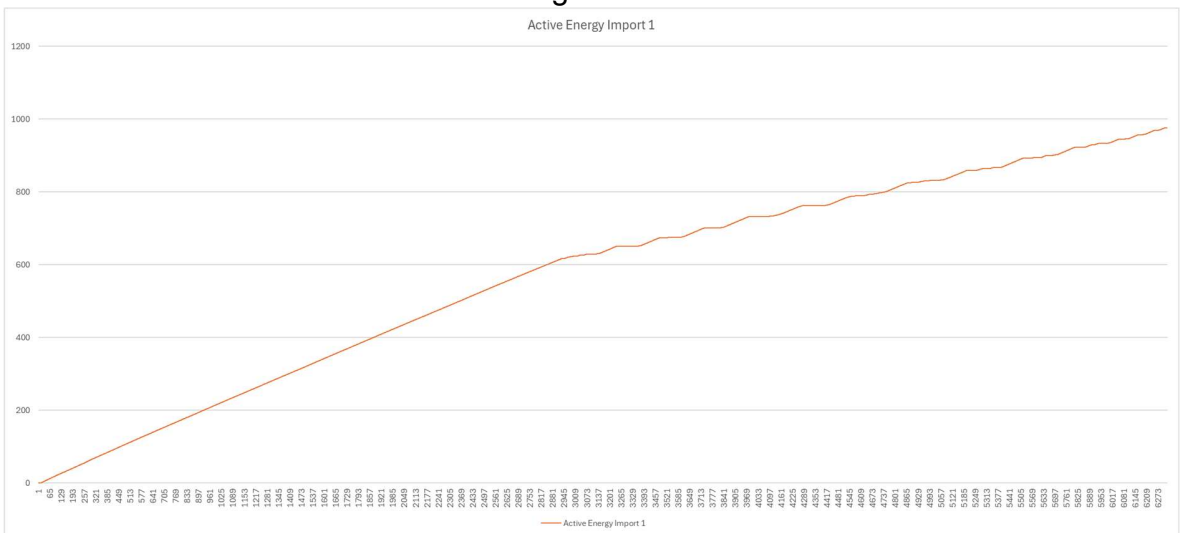


Figura 42: Energía del reactor utilizada (Wh en eje Y vs iteraciones en eje X) durante el proceso de transesterificación supercrítica

8.2.4. Determinación del EROEI

Con los datos de la tabla 6, los datos de calorimetría aproximados encontrados en literatura (37.2 a 39.5 MJ/kg según) y los datos de peso de biodiesel para la muestra con condiciones óptimas de transesterificación (41 g) se realizó la determinación del EROEI, la cual se hizo de la siguiente manera:

Convertimos la Energía Invertida de Wh a MJ.

- 1 Watt-hora (Wh) = 3600 Julios (J)
- 1 Megajulio (MJ) = 1,000,000 Julios (J)
- Conversión: 1 Wh = 3600 J/ 1000000 J/ MJ = 0.0036 MJ =

Energía Invertida = 1032.752 Wh x 0.0036 MJ/Wh = **3.7179 MJ**

Convertimos la Energía Obtenida de Wh a MJ.

- Masa del Lote: 41 g = 0.041 kg

Energía obtenida = 37.2 MJ/Kg x 0.041 kg = **1.5252 MJ**

$$EROEI = \frac{\text{Energía obtenida}}{\text{Energía Invertida}} = \frac{1.5252 \text{ MJ}}{3.7179 \text{ MJ}} = 0.4102$$

9. Conclusiones

- Se logró la adecuación de un reactor de tipo batch para la transesterificación supercrítica de aceite de ricino con las condiciones de seguridad y de proceso requeridas para la experimentación planteada mediante la adición de sistemas de seguridad y válvulas para el proceso de transesterificación supercrítica como descrito en la sección 6.1.
- El biodiesel elaborado a partir de la vía supercrítica demostró tener el mismo tipo de cadenas que el obtenido por vía catalítica, además de un 85 a un 91% de conversión de esteres metílicos, esto demostrado mediante TGA y cromatografía de gases respectivamente, asegurando que el biodiesel tiene al menos la misma calidad que el de la vía catalítica.
- La determinación del ERoEI nos indica que se invierte el 40% de la energía que se podría recuperar del biocombustible obtenido, aunque este número es relativamente alto, a escala industrial podría ser menor y por tanto ser también una alternativa de proceso para la obtención de combustibles de fuentes renovables.
- Por último, el biodiesel obtenido cumplió en su mayor parte con los estándares internacionales para su uso en vehículos automotores de ciclo Diesel como el ASTM D6751, EN 14214 y ASTM D6751, sin embargo se requiere de más investigación de materiales y experimentación para reducir el porcentaje de ceniza a un nivel aceptable y pueda cumplirse con la EN 14214.

10. Referencias

- Abdulkareem-Alsultan, G., Asikin-Mijan, N., Lee, H. V., & Taufiq-Yap, Y. H. (2020). Biofuels: Past, Present, Future. In A. K. Gupta, A. De, S. K. Aggarwal, A. Kushari, & A. Runchal (Eds.), *Innovations in Sustainable Energy and Cleaner Environment* (pp. 489–504). Springer Singapore. http://link.springer.com/10.1007/978-981-13-9012-8_21
- Aboelazayem, O., El-Gendy, N. Sh., Abdel-Rehim, A. A., Ashour, F., & Sadek, M. A. (2018). Biodiesel production from castor oil in Egypt: Process optimisation, kinetic study, diesel engine performance and exhaust emissions analysis. *Energy*, *157*, 843–852. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.05.202>
- Aboelazayem, O., Gadalla, M., & Saha, B. (2018). Biodiesel production from waste cooking oil via supercritical methanol: Optimisation and reactor simulation. *Renewable Energy*, *124*, 144–154. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2017.06.076>
- Akpan, U. G., Jimoh, A., & MOHAMMED, A. (2006). Extraction, Characterization and Modification of Castor Seed Oil. *Leonardo Journal of Sciences*, *8*. https://www.researchgate.net/publication/26449157_Extraction_Characterization_and_Modification_of_Castor_Seed_Oil
- Anderson, D., Hossain, A., & Shahidi, F. (2020). A Primer on Oils Processing Technology. In *Bailey's Industrial Oil and Fat Products* (pp. 1–47). American Cancer Society. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/047167849X.bio077.pub2>
- Arbab, M. I., Masjuki, H. H., Varman, M., Kalam, M. A., Imtenan, S., & Sajjad, H. (2013). Fuel properties, engine performance and emission characteristic of common biodiesels as a renewable and sustainable source of fuel. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *22*, 133–147. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.01.046>
- Arisanu, A. O. (2013). *MECHANICAL CONTINUOUS OIL EXPRESSION FROM OILSEEDS: OIL YIELD AND PRESS CAPACITY*. 6.
- Armendáriz, J., Lapuerta, M., Zavala, F., García-Zambrano, E., & del Carmen Ojeda, M. (2015). Evaluation of eleven genotypes of castor oil plant (*Ricinus communis* L.) for

- the production of biodiesel. *Industrial Crops and Products*, 77, 484–490.
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.09.023>
- Arora, R. (2014). *Esterification of Free Fatty Acids in Waste Oil Using a Carbon-based Solid Acid Catalyst*.
https://www.researchgate.net/publication/286567800_Esterification_of_Free_Fatty_Acids_in_Waste_Oil_Using_a_Carbon-based_Solid_Acid_Catalyst
- Arumugamurthi, S. S., Sivanandi, P., & Kandasamy, S. (2022). Biodiesel production from non-edible crops using waste tyre heterogeneous acid catalyst. *Https://Doi.Org/10.1080/15567036.2022.2062492*, 44(2), 3223–3238.
<https://doi.org/10.1080/15567036.2022.2062492>
- ASMT. (2015). *Specification for Biodiesel Fuel Blend Stock (B100) for Middle Distillate Fuels*. ASTM International. <http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?D6751-20>
- Atabani, A. E., Silitonga, A. S., Badruddin, I. A., Mahlia, T. M. I., Masjuki, H. H., & Mekhilef, S. (2012). A comprehensive review on biodiesel as an alternative energy resource and its characteristics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(4), 2070–2093.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.01.003>
- Attia, A. M. A., Nour, M., & Nada, S. A. (2018). Study of Egyptian castor biodiesel-diesel fuel properties and diesel engine performance for a wide range of blending ratios and operating conditions for the sake of the optimal blending ratio. *Energy Conversion and Management*, 174, 364–377. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.08.016>
- Azad, K., & Rasul, M. (2019). Performance and combustion analysis of diesel engine fueled with grape seed and waste cooking biodiesel. *Energy Procedia*, 160, 340–347.
<https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2019.02.166>
- Balat, M. (2011). Potential alternatives to edible oils for biodiesel production – A review of current work. *Energy Conversion and Management*, 52(2), 1479–1492.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.10.011>

- Bart, J. C. (2011). *Biodiesel Science and Technology - From Soil to Oil - Knovel*.
<https://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpBSTFS004/viewerType:toc/>
- Bartocci, P., Tschentscher, R., Yan, Y., Yang, H., Bidini, G., & Fantozzi, F. (2020). *Biofuels: Types and Process Overview*. 1–36. https://doi.org/10.1007/978-981-13-8637-4_1
- Bhan, S., Kumar, S., Gautam, R., Yadav, P. S., Gautam, G. D., & Mahajan, S. (2025). Innovative catalytic approaches for optimizing biodiesel production: A review of homogeneous, heterogeneous, enzymatic, and nanostructured catalysts. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 44(5), e70052. <https://doi.org/10.1002/EP.70052>
- Bhatol, K. (2013). *Castor Oil Obtained by Cold Press Method. Shri Bhgwati Oil*.
- Boopathi, D., Thiyagarajan, S., Edwin Geo, V., Madhankumar, S., & Gheith, R. (2018). Effect of geraniol on performance, emission and combustion characteristics of CI engine fuelled with gutter oil obtained from different sources. *Energy*, 157(C), 391–401. <https://ideas.repec.org/a/eee/energy/v157y2018icp391-401.html>
- Bryan, L. A., & Bryan, E. A. (1997). *Programmable controllers: theory and implementation* (2nd ed). Industrial Text Co.
- Bueno, A. V., Pereira, M. P. B., de Oliveira Pontes, J. V., de Luna, F. M. T., & Cavalcante, C. L. (2017). Performance and emissions characteristics of castor oil biodiesel fuel blends. *Applied Thermal Engineering*, 125, 559–566. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.06.114>
- Buenrostro, M., & López-Munguia, A. C. (1986). Enzymatic extraction of avocado oil. *Biotechnology Letters*, 8(7), 505–506. <https://doi.org/10.1007/BF01025210>
- Canoira, L., García Galeán, J., Alcántara, R., Lapuerta, M., & García-Contreras, R. (2010). Fatty acid methyl esters (FAMES) from castor oil: Production process assessment and synergistic effects in its properties. *Renewable Energy*, 35(1), 208–217. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.05.006>

- Carbajales-Dale, M. (2023). Life cycle assessment: a meta-analysis of cumulative energy demand and greenhouse gas emissions for wind energy technologies. *Wind Energy Engineering: A Handbook for Onshore and Offshore Wind Turbines*, 423–442. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99353-1.00028-1>
- Carr, R. (2014). *Global Biofuels Status Update*.
- Chandra Kishore, S., Perumal, S., Atchudan, R., Sundramoorthy, A. K., Alagan, M., Sangaraju, S., & Lee, Y. R. (2022). A Review of Biomass-Derived Heterogeneous Catalysts for Biodiesel Production. *Catalysts* 2022, Vol. 12, Page 1501, 12(12), 1501. <https://doi.org/10.3390/CATAL12121501>
- Cheng, J. J., & Timilsina, G. R. (2011). Status and barriers of advanced biofuel technologies: A review. *Renewable Energy*, 36(12), 3541–3549. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2011.04.031>
- Choi, S. K., Choi, Y. S., Kim, S. J., & Jeong, Y. W. (2016). Characteristics of flame stability and gaseous emission of biocrude-oil/ethanol blends in a pilot-scale spray burner. *Renewable Energy*, 91, 516–523. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.01.066>
- Chung, K.-H., Lee, C.-J., Kim, J.-H., Hur, D., Kim, B.-H., & Park, J.-B. (2007). Development of Customer Oriented Load Management Software for Savings on Utility Bills in the Electricity Market. *Journal of Electrical Engineering and Technology*, 2(1), 42–49. <https://doi.org/10.5370/JEET.2007.2.1.042>
- Conceição, M. M., Candeia, R. A., Silva, F. C., Bezerra, A. F., Fernandes, V. J., & Souza, A. G. (2007). Thermoanalytical characterization of castor oil biodiesel. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(5), 964–975. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2005.10.001>
- Cotrina Mamani, K. S. (2024). Comparación de la capacidad fitorremediadora de la higuera (Ricinus communis L.) y ortiga mayor (Urtica dioica) en la remoción de metales pesados en suelos afectados por pasivos ambientales mineros. *Universidad de Huánuco*. <https://repositorio.udh.edu.pe/xmlui/handle/20.500.14257/5549>

- Cucchiella, F., & Dadamo, I. (2012). Estimation of the energetic and environmental impacts of a roof-mounted building-integrated photovoltaic systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *16*(7), 5245–5259. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.04.034>
- Da Costa Evangelista, J. P., Gondim, A. D., Souza, L. Di, & Araujo, A. S. (2016). Alumina-supported potassium compounds as heterogeneous catalysts for biodiesel production: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *59*, 887–894. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2016.01.061>
- Dawidowicz, A., Rado, E., Wianowska, D., Mardarowicz, M., & Gawdzik, J. (2008). Application of PLE for the determination of essential oil components from *Thymus vulgaris* L. *Talanta*, *76*(4), 878–884. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2008.04.050>
- del Valle, J. M., & Aguilera, J. M. (1999). Revision: Extracción con CO₂ a alta presión. Fundamentos y aplicaciones en la industria de alimentos / Review: High pressure CO₂ extraction. Fundamentals and applications in the food industry. *Food Science and Technology International*, *5*(1), 1–24. <https://doi.org/10.1177/108201329900500101>
- Demirbaş, A. (2001). Biomass resource facilities and biomass conversion processing for fuels and chemicals. *Energy Conversion and Management*, *42*(11), 1357–1378. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(00\)00137-0](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(00)00137-0)
- Demirbas, A. (2005). Biodiesel production from vegetable oils via catalytic and non-catalytic supercritical methanol transesterification methods. *Progress in Energy and Combustion Science*, *31*(5–6), 466–487. <https://doi.org/10.1016/J.PECS.2005.09.001>
- Demirbas, A. (2008). Comparison of transesterification methods for production of biodiesel from vegetable oils and fats. *Energy Conversion and Management*, *49*(1), 125–130. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2007.05.002>
- Dhawane, S. H., Chowdhury, S., & Halder, G. (2019). Lipase immobilised carbonaceous catalyst assisted enzymatic transesterification of Mesua ferrea oil. *Energy Conversion and Management*, *184*, 671–680. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2019.01.038>

- Dhawane, S. H., Kumar, T., & Halder, G. (2018). Recent advancement and prospective of heterogeneous carbonaceous catalysts in chemical and enzymatic transformation of biodiesel. *Energy Conversion and Management*, 167, 176–202. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2018.04.073>
- DOF. (n.d.). *DOF - Diario Oficial de la Federación*. Retrieved November 8, 2025, from https://dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5541659
- ETIP. (n.d.). *ETIP Bioenergy – European Technology and Innovation Platform*. Retrieved November 8, 2025, from <https://www.etipbioenergy.eu/>
- Falasca, S. L., Ulberich, A. C., & Ulberich, E. (2012). Developing an agro-climatic zoning model to determine potential production areas for castor bean (*Ricinus communis* L.). *Industrial Crops and Products*, 40(1), 185–191. <https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2012.02.044>
- Farobie, O., & Matsumura, Y. (2015). Biodiesel Production in Supercritical Methanol Using a Novel Spiral Reactor. *Procedia Environmental Sciences*, 28, 204–213. <https://doi.org/10.1016/J.PROENV.2015.07.027>
- Fatimah, I., Sagadevan, S., Murugan, B., & Muraza, O. (2022). Castor Oil (*Ricinus communis*). *Biorefinery of Oil Producing Plants for Value-Added Products: Volume 1*, 1, 51–78. <https://doi.org/10.1002/9783527830756.CH4>
- Fthenakis, V., & Raugei, M. (2017). Environmental life-cycle assessment of photovoltaic systems. *The Performance of Photovoltaic (PV) Systems: Modelling, Measurement and Assessment*, 209–232. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-336-2.00007-0>
- Gad, M. S., El-Araby, R., Abed, K. A., El-Ibiari, N. N., El Morsi, A. K., & El-Diwani, G. I. (2018). Performance and emissions characteristics of C.I. engine fueled with palm oil/palm oil methyl ester blended with diesel fuel. *Egyptian Journal of Petroleum*, 27(2), 215–219. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2017.05.009>

- Gómez-Castro, F. I., Rico-Ramírez, V., Segovia-Hernández, J. G., & Hernández-Castro, S. (2011). Esterification of fatty acids in a thermally coupled reactive distillation column by the two-step supercritical methanol method. *Chemical Engineering Research and Design*, *89*(4), 480–490. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2010.08.009>
- González-López, R. (2021). Why energy return on energy investment is not useful for policy. *Energy Research and Social Science*, *74*. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.101915>
- Guo, M., Song, W., & Buhain, J. (2015). Bioenergy and biofuels: History, status, and perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *42*, 712–725. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.013>
- Gupta, A. (2018). Energy Return on Energy Invested (EROI) and Energy Payback Time (EPBT) for PVs. *A Comprehensive Guide to Solar Energy Systems*, 407–425. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811479-7.00021-X>
- Hadiyanto, H., Aini, A. P., Widayat, W., Kusmiyati, K., Budiman, A., & Rosyadi, A. (2020). Multi-feedstock biodiesel production from esterification of Calophyllum inophyllum oil, castor oil, palm oil, and waste cooking oil. *International Journal of Renewable Energy Development*, *9*(1), 119–123. <https://doi.org/10.14710/IJRED.9.1.119-123>
- Han, H., Cao, W., & Zhang, J. (2005). Preparation of biodiesel from soybean oil using supercritical methanol and CO₂ as co-solvent. *Process Biochemistry*, *40*(9), 3148–3151. <https://doi.org/10.1016/J.PROCBIO.2005.03.014>
- Hashemi, S. M. B., Michiels, J., Asadi Yousefabad, S. H., & Hosseini, M. (2015). Kolkhoung (*Pistacia khinjuk*) kernel oil quality is affected by different parameters in pulsed ultrasound-assisted solvent extraction. *Industrial Crops and Products*, *70*, 28–33. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.03.023>
- Hawash, S., Kamal, N., Zaher, F., Kenawi, O., & Diwani, G. El. (2009). Biodiesel fuel from *Jatropha* oil via non-catalytic supercritical methanol transesterification. *Fuel*, *88*(3), 579–582. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2008.09.007>

- He, H., Wang, T., & Zhu, S. (2007). Continuous production of biodiesel fuel from vegetable oil using supercritical methanol process. *Fuel*, 86(3), 442–447. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.07.035>
- Huke, A., Ruprecht, G., Weißbach, D., Czernski, K., Gottlieb, S., Hussein, A., & Herrmann, F. (2017). Dual-fluid reactor. *Molten Salt Reactors and Thorium Energy*, 619–633. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101126-3.00025-7>
- IEA. (2022). *Bioenergy - IEA*. <https://www.iea.org/energy-system/renewables/bioenergy>
- Ijaz, M., Sher, A., Sattar, A., Shahid, M., Nawaz, A., Ul-Allah, S., Tahir, M., Ahmad, S., & Saqib, M. (2019). Response of canola (*Brassica napus* L.) to exogenous application of nitrogen, salicylic acid and gibberellic acid under an arid climate. *Soil & Environment*, 38, 90–96. <https://doi.org/10.25252/SE/19/71619>
- INIFAP, S.-. (2011). *Balance energético del cultivo de la higuera (Ricinus communis L.) para la producción de biodiésel*. http://www.inifap.gob.mx/Documents/transparencia/trans_foca/2016/Transparencia_Focalizada/Higuera/Balance_Biodiesel/BALANCE-ENERGETICO-DEL-CULTIVO-DE-HIGUERILLA-PARA-LA-PRODUCCION-DE-BIODIESEL.pdf.
- Kirk, R. E., Othmer, D. F., & Mann, C. A. (1949). Encyclopedia of Chemical Technology. Vol. II. *The Journal of Physical and Colloid Chemistry*, 53(4), 591. <https://doi.org/10.1021/j150469a016>
- Kiss, F. E., Micic, R. D., Tomić, M. D., Nikolić-Djorić, E. B., & Simikić, M. C. D. S. (2014). Supercritical transesterification: Impact of different types of alcohol on biodiesel yield and LCA results. *The Journal of Supercritical Fluids*, 86, 23–32. <https://doi.org/10.1016/J.SUPFLU.2013.11.015>
- Knothe, G. (2010). Biodiesel and renewable diesel: A comparison. *Progress in Energy and Combustion Science*, 36(3), 364–373. <https://doi.org/10.1016/J.PECS.2009.11.004>

- Kumar, A., & Sharma, S. (2011). Potential non-edible oil resources as biodiesel feedstock: An Indian perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(4), 1791–1800. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2010.11.020>
- Kusdiana, D., & Saka, S. (2001). Methyl Esterification of Free Fatty Acids of Rapeseed Oil as Treated in Supercritical Methanol. *JOURNAL OF CHEMICAL ENGINEERING OF JAPAN*, 34(3), 383–387. <https://doi.org/10.1252/jcej.34.383>
- Kusdiana, D., & Saka, S. (2004). Effects of water on biodiesel fuel production by supercritical methanol treatment. *Bioresource Technology*, 91(3), 289–295. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(03\)00201-3](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(03)00201-3)
- Latif, S., & Anwar, F. (2008). Quality assessment of Moringa concanensis seed oil extracted through solvent and aqueous-enzymatic techniques. *Grasas y Aceites*, 59. <https://doi.org/10.3989/gya.2008.v59.i1.493>
- Lee, S., Posarac, D., & Ellis, N. (2012). An experimental investigation of biodiesel synthesis from waste canola oil using supercritical methanol. *Fuel*, 91(1), 229–237. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2011.08.029>
- Leung, D. Y. C., & Guo, Y. (2006). *Transesterification of neat and used frying oil: optimization for biodiesel production*. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2006.06.003>
- Lim, S. S., Vos, T., Flaxman, A. D., Danaei, G., Shibuya, K., Adair-Rohani, H., Amann, M., Anderson, H. R., Andrews, K. G., Aryee, M., Atkinson, C., Bacchus, L. J., Bahalim, A. N., Balakrishnan, K., Balmes, J., Barker-Collo, S., Baxter, A., Bell, M. L., Blore, J. D., ... Ezzati, M. (2012). A comparative risk assessment of burden of disease and injury attributable to 67 risk factors and risk factor clusters in 21 regions, 1990–2010: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2010. *The Lancet*, 380(9859), 2224–2260. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(12\)61766-8](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(12)61766-8)
- Loera-Quezada, M. M., & Olguín, E. J. (2010). *Las microalgas oleaginosas como fuente de biodiesel: retos y oportunidades | REVISTA LATINOAMERICANA DE BIOTECNOLOGIA*

<http://www.solabiaa.org/ojs3/index.php/RELBAA/article/view/17>

- Macawile, M. C., & Auresenia, J. (2022). Utilization of Supercritical Carbon Dioxide and Co-solvent n-hexane to Optimize Oil Extraction from *Gliricidia sepium* Seeds for Biodiesel Production. *Applied Science and Engineering Progress*, 15(1), 5404. <https://doi.org/10.14416/J.ASEP.2021.09.003>
- Madras, G., Kolluru, C., & Kumar, R. (2004). Synthesis of biodiesel in supercritical fluids. *Fuel*, 83(14–15), 2029–2033. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2004.03.014>
- Maleki, E., Aroua, M. K., & Sulaiman, N. M. N. (2013). Castor oil — a more suitable feedstock for enzymatic production of methyl esters. *Fuel Processing Technology*, 112, 129–132. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2013.03.003>
- Mani Rathnam, V., & Madras, G. (2019). Conversion of *Shizochitrium limacinum* microalgae to biodiesel by non-catalytic transesterification using various supercritical fluids. *Bioresource Technology*, 288, 121538. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2019.121538>
- Martínez Valencia, B. B. (2011). *Calidad fisicoquímica de insumos bioenergéticos para la producción de biodiesel en México (SIBE)*. SIBE. <http://www.bioenergeticos.gob.mx/wp-content/uploads/2015/06/CALIDAD-FISICOQUIMICA-DE-INSUMOS-BIOENERGETICOS-PARA-LA-PRODUCCION-DE-BIODIESEL-EN-MEXICO.pdf>
- Marulanda, V. F., Anitescu, G., & Tavlarides, L. L. (2010). Investigations on supercritical transesterification of chicken fat for biodiesel production from low-cost lipid feedstocks. *The Journal of Supercritical Fluids*, 54(1), 53–60. <https://doi.org/10.1016/J.SUPFLU.2010.04.001>
- McKendry, P. (2002). Energy production from biomass (part 2): conversion technologies. *Bioresource Technology*, 83(1), 47–54. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00119-5](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00119-5)

- MICROCHIP. (2025). *MCP39F511N* | *Microchip Technology*, 2025. <https://www.microchip.com/en-us/product/MCP39F511N>
- Mondal, B., & Das, S. K. (2019). Comparative evaluation of mahua (*Bassia latifolia*) oil cake and castor bean (*Ricinus communis*) seed as fish toxicants for tilapia (*Oreochromis mossambicus*) and panchax (*Aplocheilus panchax*) with residual toxicity assessment on Labeo bata. *Aquaculture Research*, 50(9), 2341–2349. <https://doi.org/10.1111/ARE.14115>
- Mukesh, D., Iyer, R. S., Wagh, J. S., Mokashi, A. A., Banerji, A. A., Newadkar, R. V., & Bevinakatti, H. S. (1993). Lipase catalysed transesterification of castor oil. *Biotechnology Letters*, 15(3), 251–256. <https://doi.org/10.1007/BF00128314>
- Muzenda, L., Mgudu, L., Kabuba, J., & Belaid, M. (2012). *Microwave –Assisted Extraction of Castor Oil*.
- Mwithiga, G., & Moriasi, L. (2007). A Study of Yield Characteristics During Mechanical Oil Extraction of Preheated and Ground Soybeans. *Journal of Applied Sciences Research*, 3. https://www.researchgate.net/publication/265405352_A_Study_of_Yield_Characteristics_During_Mechanical_Oil_Extraction_of_Preheated_and_Ground_Soybeans
- Naik, S. N., Goud, V. V., Rout, P. K., & Dalai, A. K. (2010). Production of first and second generation biofuels: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(2), 578–597. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.10.003>
- Naylor, R. L., & Higgins, M. M. (2018). The rise in global biodiesel production: Implications for food security. *Global Food Security*, 16, 75–84. <https://doi.org/10.1016/J.GFS.2017.10.004>
- Nguyen, T. B., Pai, M. A., & Hiskens, I. A. (2002). Sensitivity approaches for direct computation of critical parameters in a power system. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 24(5), 337–343. [https://doi.org/10.1016/S0142-0615\(01\)00050-3](https://doi.org/10.1016/S0142-0615(01)00050-3)

- Nwafor, O. M. I. (2003). The effect of elevated fuel inlet temperature on performance of diesel engine running on neat vegetable oil at constant speed conditions. *Renewable Energy*, 28(2), 171–181. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(02\)00032-0](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(02)00032-0)
- Ogunniyi, D. (2006). Castor oil: A vital industrial raw material. *Bioresource Technology*, 97(9), 1086–1091. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.03.028>
- Olaniyan, A. M. (2010). *Effect of extraction conditions on the yield and quality of oil from castor bean*. 1(*Journal of Cereals and Oilseeds*). 24–33. <https://doi.org/https://doi.org/DOI: 10.4236/gsc.2015.54019>
- Oluwole, F., Aviara, N. A., Umar, B., & Muhammad, A. (2015). Influence of Variety and Pre-treatment on Oil Properties of Mechanically Expressed Castor Oil. *Global Advanced Research Journal of Engineering, Technology and Innovation*, 4, 1–9. https://www.researchgate.net/publication/299398041_Influence_of_Variety_and_Pre-treatment_on_Oil_Properties_of_Mechanically_Expressed_Castor_Oil
- Ovando-Chacón, S. L., & Waliszewski, K. N. (2005). *PREPARATIVOS DE CELULASAS COMERCIALES Y APLICACIONES EN PROCESOS EXTRACTIVOS*. 11.
- Oyinlola, A., Ojo, A., & Adekoya, L. O. (2004). Development of a laboratory model screw press for peanut oil expression. *Journal of Food Engineering*, 64(2), 221–227. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2003.10.001>
- Panwar, N. L., Shrirame, H. Y., Rathore, N. S., Jindal, S., & Kurchania, A. K. (2010). Performance evaluation of a diesel engine fueled with methyl ester of castor seed oil. *Applied Thermal Engineering*, 30(2–3), 245–249. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2009.07.007>
- Patel, V. R., Dumancas, G. G., Viswanath, L. C. K., Maples, R., & Subong, B. J. J. (2016). Castor Oil: Properties, Uses, and Optimization of Processing Parameters in Commercial Production. *Lipid Insights*, 9, LPI.S40233. <https://doi.org/10.4137/LPI.S40233>
- Pérez-Bravo, S. G., Aguilera-Vázquez, L., Castañeda-Chávez, M. del R., Gallardo-Rivas, N. V., Pérez-Bravo, S. G., Aguilera-Vázquez, L., Castañeda-Chávez, M. del R., & Gallardo-Rivas,

- N. V. (2022). Condiciones del proceso de transesterificación en la producción de biodiésel y sus distintos mecanismos de reacción. *TIP. Revista Especializada En Ciencias Químico-Biológicas*, 25. <https://doi.org/10.22201/FESZ.23958723E.2022.481>
- Pinto, A. C., Guarieiro, L. L. N., Rezende, M. J. C., Ribeiro, N. M., Torres, E. A., Lopes, W. A., De Pereira, P. A. P., & De Andrade, J. B. (2005). Biodiesel: an overview. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 16(6 B), 1313–1330. <https://doi.org/10.1590/S0103-50532005000800003>
- Portilho Trentini, C., Postaué, N., Cardozo-Filho, L., Reis, R. R., Sampaio, S. C., & da Silva, C. (2019). Production of esters from grease trap waste lipids under supercritical conditions: Effect of water addition on ethanol. *The Journal of Supercritical Fluids*, 147, 9–16. <https://doi.org/10.1016/J.SUPFLU.2019.02.008>
- Ramanadhan, B. (2005). *Microwave extraction of essential oils (from black pepper and coriander) at 2.46 GHz*. <https://harvest.usask.ca/handle/10388/etd-10262005-135622>
- Ramezani, K., Rowshanzamir, S., & Eikani, M. H. (2010). Castor oil transesterification reaction: A kinetic study and optimization of parameters. *Energy*, 35(10), 4142–4148. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.06.034>
- Rapier, R. (2014). *Global Biofuels Status Update*. <http://www.energytrendsinsider.com/2014/08/28/global-biofuels-status-update/>
- Rassem, H. H. A., Nour, A. H., & Yunus, R. M. (2016). Techniques For Extraction of Essential Oils From Plants: A Review. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 11.
- Rizwanul Fattah, I. M., Ong, H. C., Mahlia, T. M. I., Mofijur, M., Silitonga, A. S., Ashrafur Rahman, S. M., & Ahmad, A. (2020). State of the Art of Catalysts for Biodiesel Production. *Frontiers in Energy Research*, 8, 546060. <https://doi.org/10.3389/FENRG.2020.00101/XML>
- Rossiter, A. (2005). *Make your plant more energy efficient*, *Chemical Engineering Progress* 12. 31–36.

- Saka, S., & Kusdiana, D. (2001). Biodiesel fuel from rapeseed oil as prepared in supercritical methanol. *Fuel*, *80*(2), 225–231. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(00\)00083-1](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(00)00083-1)
- Sandoval, G. (2010). *Biocombustibles avanzados en mexico*. <http://rembio.org.mx/wp-content/uploads/2014/12/CT2.pdf>
- Saurabh, T. (2011). *EPOXIDATION OF VEGETABLE OILS: A REVIEW*. 8.
- Scholz, V., & da Silva, J. N. (2008). Prospects and risks of the use of castor oil as a fuel. *Biomass and Bioenergy*, *32*(2), 95–100. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2007.08.004>
- Singh, C. S., Kumar, N., & Gautam, R. (2021). Supercritical transesterification route for biodiesel production: Effect of parameters on yield and future perspectives. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, *40*(6), e13685. <https://doi.org/10.1002/EP.13685>
- Singh, R. P., & Heldman, D. R. (2016). *Introduction to Food Engineering - 3rd Edition*. <https://www.elsevier.com/books/introduction-to-food-engineering/singh/978-0-08-057449-3>
- Sinha, L. K., Haldar, S., & Majumdar, G. C. (2015). Effect of operating parameters on mechanical expression of solvent-soaked soybean-grits. *Journal of Food Science and Technology*, *52*(5), 2942–2949. <https://doi.org/10.1007/s13197-014-1340-8>
- Stanisavljević, I. T., Lazić, M. L., & Veljković, V. B. (2007). Ultrasonic extraction of oil from tobacco (*Nicotiana tabacum* L.) seeds. *Ultrasonics Sonochemistry*, *14*(5), 646–652. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2006.10.003>
- Stoytcheva, M., & Montero, G. (2021). *Biodiesel - Feedstocks and Processing Technologies | IntechOpen*. <https://www.intechopen.com/books/biodiesel-feedstocks-and-processing-technologies>

- Subramaniam, D., Murugesan, A., Avinash, A., & Kumaravel, A. (2013). Bio-diesel production and its engine characteristics—An expatiated view. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 22, 361–370. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.02.002>
- Tabatabaei, M., Karimi, K., Sárvári Horváth, I., & Kumar, R. (2015a). Recent trends in biodiesel production. *Biofuel Research Journal*, 2(3), 258–267. <https://doi.org/10.18331/BRJ2015.2.3.4>
- Tabatabaei, M., Karimi, K., Sárvári Horváth, I., & Kumar, R. (2015b). Recent trends in biodiesel production. *Biofuel Research Journal*, 2(3), 258–267. <https://doi.org/10.18331/BRJ2015.2.3.4>
- Taha, F. S., & Hassanein, M. M. (2007). Pretreatment of cottonseed flakes with proteases and an amylase for higher oil yields. *Grasas y Aceites*, 58(3), 297–306. <https://doi.org/10.3989/gya.2007.v58.i3.186>
- Takadas, F., & Doker, O. (2017). Extraction Method and Solvent Effect on Safflower Seed Oil Production. *Chemical and Process Engineering Research*, 51(0), 9. <https://iiste.org/Journals/index.php/CPER/article/view/36830>
- Tan, K. T., Lee, K. T., & Mohamed, A. R. (2009). Production of FAME by palm oil transesterification via supercritical methanol technology. *Biomass and Bioenergy*, 33(8), 1096–1099. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2009.04.003>
- Taylor, G. (2008). Biofuels and the biorefinery concept. *Energy Policy*, 36(12), 4406–4409. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.09.069>
- Tian, Y., Xu, Z., Zheng, B., & Martin Lo, Y. (2013). Optimization of ultrasonic-assisted extraction of pomegranate (*Punica granatum* L.) seed oil. *Ultrasonics Sonochemistry*, 20(1), 202–208. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2012.07.010>
- Torrentes-Espinoza, G., Miranda, B. C., Vega-Baudrit, J., & Mata-Segreda, J. F. (2017). Castor oil (*Ricinus communis*) supercritical methanolysis. *Energy*, 140, 426–435. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.08.122>

- Trinidad Pérez-Quiroz, J., Letcia Araujo-Arreola, N., Isabel Torres-Murillo, A., Porcayo-Calderón, J., Rendón-Belmonte, M., Terán-Guillen, J., Martínez-Madrid, M., & Pérez-Campos, R. (2017). *Capítulo 4 Corrosión y degradación de materiales por biocombustibles Referenciar este capítulo*. <https://doi.org/10.3926/oms.157>
- Tropical and Subtropical Agroecosystems*. (n.d.). Retrieved November 8, 2025, from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=93952506010>
- Umar, Y., Aboelazayem, O., Gadalla, M. A., & Saha, B. (2022). Enhanced biodiesel production with improved oxidation stability by water addition to supercritical methanolysis. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 100(9), 2587–2607. <https://doi.org/10.1002/CJCE.24475>
- US DOE. (n.d.). *Department of Energy*. Retrieved November 8, 2025, from <https://www.energy.gov/>
- Vilas Bôas, R. N., Mendes, M. F., Vilas Bôas, R. N., & Mendes, M. F. (2022). A REVIEW OF BIODIESEL PRODUCTION FROM NON-EDIBLE RAW MATERIALS USING THE TRANSESTERIFICATION PROCESS WITH A FOCUS ON INFLUENCE OF FEEDSTOCK COMPOSITION AND FREE FATTY ACIDS. *Journal of the Chilean Chemical Society*, 67(1), 5433–5444. <https://doi.org/10.4067/S0717-97072022000105433>
- Warabi, Y., Kusdiana, D., & Saka, S. (2004). Biodiesel Fuel from Vegetable Oil by Various Supercritical Alcohols. In M. Finkelstein, J. D. McMillan, B. H. Davison, & B. Evans (Eds.), *Proceedings of the Twenty-Fifth Symposium on Biotechnology for Fuels and Chemicals Held May 4–7, 2003, in Breckenridge, CO* (pp. 793–801). Humana Press. http://link.springer.com/10.1007/978-1-59259-837-3_64
- World Coal Association rebrands to FutureCoal | World Coal*. (2025). <https://www.worldcoal.com/coal/21112023/world-coal-association-rebrands-to-futurecoal/>

- Zhang, H., Xu, Z., Zhou, D., & Cao, J. (2017). Waste cooking oil-to-energy under incomplete information: Identifying policy options through an evolutionary game. *Applied Energy*, *185*, 547–555. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2016.10.133>
- Ziolkowska, J. R. (2020). Biofuels technologies: An overview of feedstocks, processes, and technologies. *Biofuels for a More Sustainable Future: Life Cycle Sustainability Assessment and Multi-Criteria Decision Making*, 1–19. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815581-3.00001-4>
- Zuleta, E. C., Rios, L. A., & Calderón, J. A. (2012). Estudio de la estabilidad oxidativa de biodiésel de aceite de palma en contacto con materiales metálicos y poliméricos automotrices. *Ingeniería y Competitividad*, *14*(2), 83–90. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-30332012000200007&lng=en&nrm=iso&tlng=es

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD DE ESTUDIANTE:

Declaro que los datos propios obtenidos en esta investigación fueron generados durante el desarrollo de mi trabajo de tesis de forma ética y que reporto detalles necesarios para que los resultados de esta tesis sean reproducibles en eventuales investigaciones futuras. Finalmente, este manuscrito de tesis es un trabajo original en el cual se declaró y dio reconocimiento a cualquier colaboración o cita textual presentadas en el documento.

M en C. Luis Armando Galván Camacho
