



CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO
TECNOLÓGICO EN ELECTROQUÍMICA, S.C.

OPTIMIZACIÓN DE UN REACTOR PARA LA
PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL UTILIZANDO CAVITACIÓN
HIDRODINÁMICA

Tesis

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE

*Maestría en Ciencia y Tecnología
con Especialidad en Ingeniería Ambiental*

PRESENTA

I.Q. Alejandra Rodríguez Alfaro



Santiago de Querétaro, Qro., México, junio del 2023.



Este trabajo fue realizado en el Centro de Investigación y
Desarrollo Tecnológico en Electroquímica (CIDETEQ)

Bajo la dirección del:
M.C. Carlos Hernández Benítez



Dr. Luis Antonio Ortiz Frade
Director de Posgrado
PICYT – CIDETEQ
Querétaro

Los abajo firmantes, miembros del Jurado de Examen de la alumna ALEJANDRA RODRÍGUEZ ALFARO, una vez leída y revisada la Tesis **“OPTIMIZACIÓN DE UN REACTOR PARA LA PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL UTILIZANDO CAVITACIÓN HIDRODINÁMICA”**, aceptamos que la referida tesis revisada y corregida sea presentada por la alumna para aspirar al grado de Maestra en Ciencia y Tecnología con especialidad en INGENIERIA AMBIENTAL durante el Examen de Grado correspondiente

Y para que así conste, firmó la presente el 29 día del mes de junio del año 2023.

Dr. Fernando Felipe Rivera Iturbe
Presidente

Dr. David Benjamín Meza Ramírez
Secretario

M. en C. Jesús Cárdenas Mijangos
Vocal



Dr. Luis Antonio Ortiz Frade
Director de Posgrado
PICYT – CIDETEQ
Querétaro

Los abajo firmantes, miembros del comité tutorial de la alumna ALEJANDRA RODRÍGUEZ ALFARO, una vez leída y revisada la Tesis **“OPTIMIZACIÓN DE UN REACTOR PARA LA PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL UTILIZANDO CAVITACIÓN HIDRODINÁMICA”**, aceptamos que la referida tesis revisada y corregida sea presentada por la alumna para aspirar al grado de Maestra en Ciencia y Tecnología con especialidad en INGENIERIA AMBIENTAL durante el Examen de Grado correspondiente.

Y para que así conste, firmó la presente el 29 día del mes de junio del año 2023.

M. en C. Jesús Cárdenas Mijangos

Dr. Francisco Javier Rodríguez Valadez

M. en C. Carlos Hernández Benítez

AGRADECIMIENTOS

Principalmente a mis papás, hermanos, cuñadas y sobrinos. A Isa, Mari, Darío y el bebé que viene en camino; a toda mi familia.

Al comité tutorial y asesor integrado M.C. Carlos Hernández, Dr. Francisco Rodríguez y M.C. Jesús Cárdenas; por sus aportaciones, asesoría y apoyo durante dos años de realización de este proyecto.

Al comité evaluador, integrado por la Dra. Irma Robles, Dr. Fernando Rivera, Dr. David Meza y M.C. Jesús Cárdenas; por sus aportaciones y observaciones hacía la redacción de tesis.

A amigos y compañeros de CIDETEQ, Martha, Isa, Diana, Vale, Julio, Abi, Samantha, Arnulfo, Armando, Alfredo y Álvaro. A TA por permitir realizar mis experimentos en el laboratorio.

R1ESUMEN

La aplicación de la cavitación hidrodinámica (CH) para intensificar la síntesis de biodiésel a partir de la reacción de transesterificación ha resultado ser atractiva ya que presenta ventajas tales como de producción, consumo energético y de tiempo con respecto a los sistemas convencionales. En el presente proyecto se evaluó el efecto de la aplicación de la CH sobre la síntesis de biodiésel, en un prototipo de cavitación con capacidad máxima de volumen de trabajo de 60 L. La evaluación se llevó a cabo en dos bloques experimentales. En ambos bloques, se emplearon dos diseños de experimentos de tipo Box-Behnken. Además, las condiciones experimentales de presión, flujo y temperatura fueron controladas para obtener un número de cavitación (C_v) entre 0 y 1. Durante todos los experimentos no se aplicó agitación mecánica, ni control de temperatura. El objetivo del primer bloque experimental consistió en la optimización en los consumos de reactivos y tiempo de la reacción de transesterificación, empleando como dispositivo de cavitación un tubo Venturi de 2 mm de contracción. Los reactivos empleados fueron aceite vegetal de soya, metanol e Hidróxido de potasio (KOH) como catalizador. El volumen total de mezcla en cada experimento fue de 20 L. Los factores evaluados fueron: relación molar aceite-metanol, porcentaje de catalizador y tiempo. Las mejores condiciones de operación para la síntesis de biodiésel obtenidas por el ANOVA fueron al aplicar relación molar de 1:5.4, porcentaje de catalizador de 1.5 % m/m, en un tiempo de reacción de 25 min; siendo el porcentaje de catalizador y la relación molar, los factores con mayores efectos significativos. Los máximos porcentajes de conversión a biodiésel observado y estimado fueron de 94% y 94.4%, respectivamente. En el segundo bloque experimental la síntesis de biodiésel se llevó a cabo con aceite vegetal gastado del sector restaurantero, metanol e KOH como catalizador. En el diseño de experimentos (DDE) se tomaron como variables el volumen de mezcla, número de tubos Venturi y tiempo. El ANOVA arrojó que las mejores condiciones de reacción fueron: 3 tubos Venturi, 60 L en volumen de mezcla y en un tiempo de reacción de 29.12 min; siendo el volumen y el tiempo los factores más significativos. Los máximos porcentajes de conversión a biodiésel observado y estimado fueron de 98.14% y 98.59%, respectivamente. El consumo energético mínimo calculado fue de 18.10 Wh/kg, que es inferior en comparación con la producción convencional de biodiésel. La conversión de triglicéridos se determinó mediante el uso de HPLC.

ABSTRACT

The application of hydrodynamic cavitation (CH) to improve the synthesis of biodiesel from the transesterification reaction has turned out to be attractive since it presents advantages such as production, energy consumption, and time with respect to conventional systems. In this project, the effect of CH application on biodiesel synthesis was evaluated in a cavitation prototype with a maximum working volume capacity of 60 L. The evaluation was carried out in two experimental blocks. In both blocks, two Box Behnken-type experiment designs were used. Furthermore, the experimental conditions of pressure, flow, and temperature were controlled to obtain a cavitation number (C_v) between 0 and 1. During all the experiments neither mechanical compression nor temperature control was applied. The objective of the first experimental block consisted in optimizing reagent consumption and transesterification reaction time, using a 2 mm contraction Venturi tube as a cavitation device. The reagents used were vegetable soybean oil, methanol, and potassium hydroxide (KOH) as a catalyst. The total volume of the mixture in each experiment was 20 L. The factors evaluated were: oil to methanol molar ratio, percentage of catalyst, and time. The optimal operating conditions for the synthesis of biodiesel obtained by ANOVA were by applying a molar ratio of 1:5.4, a catalyst percentage of 1.5% m/m, in a reaction time of 25 min; the two most important factors with the effective effects were the percentage of catalyst and the molar ratio. The maximum conversion percentages to biodiesel observed and estimated were 94% and 94.4%, respectively. In the second experimental block, the synthesis of biodiesel was carried out with spent vegetable oil from the restaurant sector, methanol, and KOH as a catalyst. In the design of experiments (DOE) the volume of the mixture, number of Venturi tubes, and time were taken as variables. The ANOVA showed that the optimal reaction conditions were: 3 Venturi tubes, 60 L of the volume, and a reaction time of 29.12 min. Meanwhile, volume and time are the most significant factors. The maximum percentages of conversion to biodiesel observed and estimated were 98.14% and 98.59%, respectively. The calculated minimum energy consumption was 18.10 Wh/kg, which is lower compared to conventional biodiesel production. Triglyceride conversion was determined by HPLC.

ÍNDICE

RESUMEN	6
ABSTRACT	7
DEFINICIONES	11
1. INTRODUCCIÓN	13
2. MARCO TEÓRICO	15
2.1 Biodiésel	15
2.2 Producción de biodiésel	16
2.3 Reacción de transesterificación	17
2.4 Cavitación	19
2.4.1 Cavitación hidrodinámica (CH).....	20
2.5 Calidad de biodiésel.....	21
2.6 Situación de biodiésel en México y en el mundo	22
3. ANTECEDENTES	26
3.1. Revisión bibliográfica.....	26
3.2 Pruebas preliminares en el prototipo de cavitación hidrodinámica	29
4. JUSTIFICACIÓN	31
5. OBJETIVOS	34
5.1 . Objetivo general.....	34
5.2 . Objetivos específicos	34
6 HIPÓTESIS	34
7 METODOLOGÍA	35
7.1 . Descripción del prototipo.....	35
7.2 . Planteamiento de bloques experimentales I y II	36
7.3 . Reactivos y equipos	37
7.4 Bloque experimental I.....	37
7.4.1 Planteamiento de Diseño de experimentos 1 Box-Behnken (DDE 1).....	37
7.4.2 Desarrollo experimental para DDE1	38
7.5 Bloque experimental II	40
7.5.1 Planteamiento de diseño de experimentos 2 Box-Behnken (DDE2).....	40
7.5.2 Desarrollo de pruebas para DDE 2	41
7.5.3 Caracterización de aceite vegetal usado	43
7.6 Determinación de conversión de triglicéridos	45
7.7 Determinación de la calidad de biodiésel	46

7.8	Determinación del consumo energético.....	46
7.9	Determinación del rendimiento espacio-tiempo	47
8.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	49
8.1	Bloque experimental I. Optimización en el consumo de reactivos.....	49
8.1.1	Análisis estadístico	49
8.1.2	Desempeño de conversión de triglicéridos.....	54
8.1.3	Número de cavitación (Cv).....	58
8.2	Bloque experimental II. Optimización de diseño de reactor	59
8.2.1	Caracterización de aceite gastado.....	60
8.2.2	Análisis estadístico	61
8.2.3	Desempeño de conversión de triglicéridos.....	66
8.2.4	Número de cavitación (Cv).....	70
8.3	Calidad de biodiésel.....	73
8.4	Consumo energético	74
8.5	Comparación de rendimiento espacio-tiempo (ρ_{ET})	76
9.	CONCLUSIONES	78
10.	RECOMENDACIONES	80
	ANEXOS	81
	BIBLIOGRAFÍA	85

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2. 1 Procesos comunes para producción de biodiésel	16
Figura 2. 2 Reacción de transesterificación.....	17
Figura 2. 3 Reacción de saponificación.....	18
Figura 2. 4 Reacción de esterificación de ácidos grasos	19
Figura 2. 5 Principios de los tipos de cavitación	19
Figura 2. 6 Proceso de formación de cavidades en cavitación hidrodinámica	20
Figura 2. 7 Producción de biodiésel a nivel mundial por país en 2021	23
Figura 3.1 Gráfica comparativa de CH y transesterificación convencional	30
Figura 7. 1 (a) Reactor a escala piloto; (b) Tuvo Venturi.....	35
Figura 7. 2. Representación del DDE1 Box-Behnken.....	38
Figura 7. 3. Representación del DDE2 Box-Behnken.....	41
Figura 7. 4. Diagrama de flujo para preparación de muestras	45
Figura 8. 1 Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para DDE 1	51
Figura 8. 2 Superficie de respuesta fijada en t=30 min para DDE 1	52
Figura 8. 3. Efectos principales para el porcentaje de conversión de triglicéridos para DDE1	52
Figura 8. 4. Gráfica de porcentaje de conversión comparativa entre datos predichos y observados	53
Figura 8. 5 Conversión de triglicéridos a relación molar aceite metanol 1:4.....	55
Figura 8.6. Conversión de triglicéridos a relación molar aceite metanol 1:5	56
Figura 8.7. Conversión de triglicéridos a relación molar aceite metanol 1:6.....	56
Figura 8. 8 Gráfica de caja y bigotes para Cv en DDE 1	59
Figura 8. 9. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para DDE2	63
Figura 8. 10. Superficie de respuesta fijada en t=30 min para DDE2	64
Figura 8. 11. Efectos principales para porcentaje de conversión para DDE2	65
Figura 8. 12. Gráfica de porcentaje de conversión comparativa entre datos predichos y observados DDE2.....	65
Figura 8. 13. Conversión de triglicéridos a V=20 L.....	67
Figura 8. 14. Conversión de triglicéridos a V=40 L.....	68
Figura 8. 15. Conversión de triglicéridos a V=60 L.....	68
Figura 8. 16. Recirculación de tanque de mezclado	70
Figura 8. 17. Gráfica de caja y bigotes para Cv en DDE 2	72
Figura 8. 18. Gráfica comparativa de rendimiento espacio-tiempo con respecto a resultados a V de 20, 40 y 60 L, en t=10 min.....	77
Figura a. 1 Cromatograma de aceite de soya marca Imperial.....	81
Figura a. 2 Cromatograma de aceite gastado comestible	81
Figura a. 3 Cromatograma de muestra de biodiésel, prueba 11, t=30 min; bloque I	81
Figura a. 4. Cv para pruebas relación molar 1:4; Bloque experimental I.....	82
Figura a. 5. Cv para pruebas relación molar 1:5; de Bloque experimental I.....	82
Figura a. 6. Cv para pruebas relación molar 1:6; de Bloque experimental I.....	82
Figura a. 7. Cv para pruebas en V=20 L; bloque experimental II	83
Figura a. 8. Cv para pruebas en V=40 L; bloque experimental II	83
Figura a. 9. Cv para pruebas en V=60 L; bloque experimental II	83

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2. 1. Especificaciones de calidad para biodiésel B100 por ASTM D6751.....	22
Tabla 3. 1 Condiciones de operación para procesos de CH.....	28
Tabla 3. 2. Rendimiento tiempo-espacio (ρ_{ET}) para procesos de síntesis de biodiésel con CH	29
Tabla 3. 3 Condiciones experimentales en pruebas pre eliminars.....	30
Tabla 7. 1 Factores y niveles propuestos en DOE1.....	38
Tabla 7. 2. Condiciones de reacción en bloque experimental I.....	39
Tabla 7. 3. Factores y niveles propuestos en DDE2.....	40
Tabla 7. 4. Condiciones de reacción en bloque experimental II.....	42
Tabla 8. 1. Datos experimentales obtenidos mediante DDE Box-Behnken.....	49
Tabla 8. 2. Análisis de varianza de DDE1.....	50
Tabla 8. 3. Mejores condiciones para síntesis de biodiésel DDE 1.....	54
Tabla 8. 4 Resultados de porcentaje de conversión de triglicéridos con respecto al tiempo.....	55
Tabla 8. 5. Cv promedios obtenidos en pruebas de DDE 1.....	58
Tabla 8. 6. Caracterización del triglicérido.....	60
<i>Tabla 8. 7. Datos experimentales obtenidos mediante DDE Box-Behnken DDE 2.....</i>	<i>62</i>
Tabla 8. 8. Análisis de varianza de DDE2.....	63
Tabla 8. 9. Mejores condiciones de síntesis de biodiésel de DDE2.....	66
Tabla 8. 10. Resultados de porcentaje de conversión de triglicéridos con respecto al tiempo DDE2.....	67
<i>Tabla 8. 11. Cv promedios obtenidos en pruebas de DDE2.....</i>	<i>71</i>
Tabla 8. 12. Calidad de Biodiésel B100.....	73
Tabla 8. 13. Consumo energético de pruebas de cavitación hidrodinámica a t=30 min.....	74
Tabla 8. 14. Consumo energético de pruebas de cavitación hidrodinámica a t=10 min.....	75
Tabla 8. 15. Consumo energético de diferentes sistemas.....	75
Tabla 8. 15. Comparación de rendimiento espacio-tiempo.....	76

DEFINICIONES

% AGL	Porcentaje de ácidos grasos libres
I.S.	Índice de saponificación
atm	Atmósfera
ANOVA	Análisis de varianza
ASTM	Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (American Society for Testing and Materials)
B100	Biodiésel puro
°C	Centígrados
CE	Consumo energético
CH	Cavitación hidrodinámica
CO	Monóxido de Carbono
CO₂	Dióxido de Carbono
Cv	Número de cavitación
ρ	Densidad
DDE	Diseño de experimentos
DOF	Diario Oficial de la Federación
E_b	Energía consumida por la bomba
FAME	Éster metílico de ácidos grasos (Fatty acid methyl ester)
%HMV	Porcentaje de humedad y materia volátil
Hora	H
HP	Caballos de fuerza (horsepower)
HPLC	Cromatografía de Líquidos de Alta Resolución
HCl	Ácido clorhídrico
GEI	Gases de Efecto Invernadero
kg	Kilogramos
KOH	Hidróxido de potasio
L	Litros
m³	Metro cúbico
mg	Miligramo
µm	Micrómetros
min	Minutos
mm	Milímetros
MSR	Metodología de superficie de respuesta
NOM	Normas Oficiales Mexicanas
P.M.	Peso molecular
P	Potencia de la bomba
psi	Libra por pulgada cuadrada (pounds force per square inch)
rpm	Revoluciones por minuto
SADER	Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (anteriormente SAGARPA)
T	Temperatura
t	Tiempo
V	Volumen
W	Kilovatios
Wh	Kilovatios hora

1. INTRODUCCIÓN

La presente investigación se desarrolló con la finalidad de optimizar la producción de biodiésel asistida por cavilación hidrodinámica (CH), en un prototipo que fue diseñado por CIDETEQ, y cuyo diseño final y pruebas se presenta en el presente trabajo. La aplicación de CH se aprovecha para intensificar la reacción de transesterificación, ya que durante el fenómeno de cavitación se libera una alta concentración de energía derivada de la formación, crecimiento y colapso de cavidades (burbujas) en la interfaz del líquido, en este caso aceite-alcohol; en otras palabras, se puede definir como la ruptura de un medio líquido a bajas presiones (Gogate, 2008).

El biodiésel se puede definir como un biocombustible renovable utilizado en las máquinas de combustión interna; es un monoalquil éster de ácidos grasos, derivado de aceites vegetales o animales. Generalmente, la producción de biodiésel se lleva a cabo por transesterificación de aceites vegetales con un alcohol y, en presencia de un catalizador (Ferreira, 2010). El tiempo de reacción de transesterificación es de aproximadamente 1 a 2 horas, a una temperatura entre 50 y 60 °C. El consumo energético para este método que se ha reportado es de 36.55 Wh/kg o superior (Yu et al., 2010).

En términos ambientales y, debido al preocupante agotamiento de los combustibles fósiles, diversas investigaciones se han enfocado en la búsqueda de alternativas que puedan sustituir el uso de éstos por biocombustibles (Garibay et al., 2009). Entre ellos destaca el biodiésel, por las diversas ventajas que posee. La aplicación del biodiésel no afecta en la eficiencia térmica de los motores; ya sea utilizado en su forma pura, o en dilución con diésel fósil (Ghayal et al., 2013). Además, contribuye a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), ya que se promueve el uso de un residuo como materia prima; también la reducción en emisiones de partículas, hidrocarburo total y compuestos poliaromáticos, conocidos por sus efectos tóxicos sobre la salud humana (Lapuerta et al., 2008).

En términos económicos, en México, la principal desventaja en la producción de biodiésel es la escasa disponibilidad de materia prima específicamente aceites y grasas comestibles (Alva, 2020). Actualmente, el costo de producción de biodiésel se encuentra entre 10 y 50% por encima del precio de venta del diésel fósil (Rodríguez et al., 2022), debido a que entre el 70 a 90% del costo total de producción se debe al costo de la materia prima (Cabrera et al., 2022). Lo anterior

se concluyó ya que, para fines del desarrollo del presente trabajo, cada litro del aceite usado de la industria restaurantera se adquirió en \$19.00 MXN, a través de un distribuidor/recolector local. Mientras que, actualmente se reporta que, en el estado de Querétaro, el precio de diésel oscila $\$23.00 \pm \1.00 MXN (CRE, 2023). El alza de este producto se debe al desabastecimiento en la oferta de materia prima, que a su vez es la consecuencia a la falta de estrategias gubernamentales que promuevan la cohesión entre los sectores agrícolas y energéticos, así como la creación de incentivos económicos que permitan perfeccionar el mercado del biodiésel a nivel nacional (Alva, 2020).

Con la finalidad de contrarrestar los problemas ambientales y energéticos, diversos investigadores han desarrollado tecnologías con posibilidad de ser económicamente viables en la producción de biodiésel, tales como reactores asistidos por cavitación ultrasónica e hidrodinámica (Gogate, 2008; Ghayal et al., 2013; Pal et al., 2010; Chuah et al., 2017).

El propósito principal del presente trabajo de investigación es estudiar un prototipo de reactor de bajo costo de inversión que, de acuerdo con sus características, sea capaz de reducir el consumo energético; aprovechando el fenómeno de cavitación. Por lo tanto, el estudio se realizó a partir de dos diseños de experimentos (DDE) siguiendo la metodología de superficie de respuesta Box-Behnken; el cual permite la optimización, es decir, encontrar los niveles de los factores importantes que dan como resultado mejores valores de la respuesta.

En primera parte, se optimizaron los consumos de materia prima; tales como relación molar aceite-metanol y porcentaje de catalizador; disminuyendo el tiempo de reacción. En la segunda parte se estudió la capacidad máxima de prototipo para la producción de biodiésel, mediante una optimización de número de tubos Venturi operando en lote; volumen y tiempo de reacción.

Por último, se desea que el producto final posea las características fisicoquímicas deseables, establecidas por la normatividad aplicable internacional, como lo mencionado por la norma ASTM D6751.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Biodiésel

El biodiésel es un combustible renovable utilizado en las máquinas de combustión interna, es un monoalquil éster de ácidos grasos de cadena larga, derivado de aceites vegetales o grasas animales. La biomasa utilizada para la producción, debe ser un compuesto rico en triglicéridos (Rincón et al., 2014).

Las características fisicoquímicas del biodiésel deben ser similares al diésel, para que pueda ser potencialmente competitivo, con lubricidad, punto de inflamabilidad alto, bajo o nulo contenido de agua. Generalmente, se plantea que el biodiésel sea mezclado con una porción de diésel derivado de petróleo para su posterior combustión (Knothe, 2010). En diferentes países se permite mezclar el biodiésel con diésel para mejorar el rendimiento del combustible y evitar posibles daños al motor. Al biodiésel sin mezclar o en estado puro se le denomina B100. Por ejemplo, una mezcla B20, contiene 20% de biodiésel y 80% diésel de petróleo.

El interés por desarrollar un combustible alternativo al diésel empezó en la década de 1930. En 1937 fue otorgada la primera patente a G. Chavanne, por la síntesis de una mezcla de ésteres etílicos a partir de aceite de palma; en este caso se realizó por la reacción de transesterificación. Después, al observar un posible efecto negativo del cambio climático y la seguridad energética, se despertó el interés por seguir investigando por un combustible alternativo. Por lo que, en la década de 1970, diferentes científicos comenzaron a buscar alternativas de conversión de aceites vegetales a un biocombustible. Por consiguiente, la primera planta productora de biodiésel se creó en 1985 en Austria. A partir de 1992, el biodiésel comenzó a ser comercializado en Europa, siendo Alemania el mayor productor (Pacific Biodiésel, 2019; van Gerpen, 2019).

El agotamiento de las reservas para la generación de combustibles fósiles y la contaminación procedente por las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) hacia la atmósfera, han comprometido el suministro de energía para el futuro. Por tanto, la importancia de generar nuevas fuentes renovables de energía tales como biodiésel, creció a finales del siglo XX; especialmente cuando este recurso se produce a partir de un residuo, lo que da lugar a una bioeconomía más limpia y suministro de energía sostenible (Chuah, Klemeš, Yusup, Bokhari, Akbar, et al., 2017). En algunos estudios se ha reportado que las emisiones de GEI a partir del

diésel es 32.57 kg dióxido de carbono (CO₂)-eq/unidad funcional (UF), mientras que para el biodiésel proveniente de aceite usado de cocina son de 2,35 kg CO₂-eq/UF (Pleanjai et al., 2009).

2.2 Producción de biodiésel

La producción de biodiésel es posible mediante diferentes tecnologías, materia prima, condiciones, entre otros parámetros que han avanzado en las últimas décadas. Tabatabaei et al., (2019), divide los procesos en químicos y físicos, así como se mencionan en la figura 2.1.

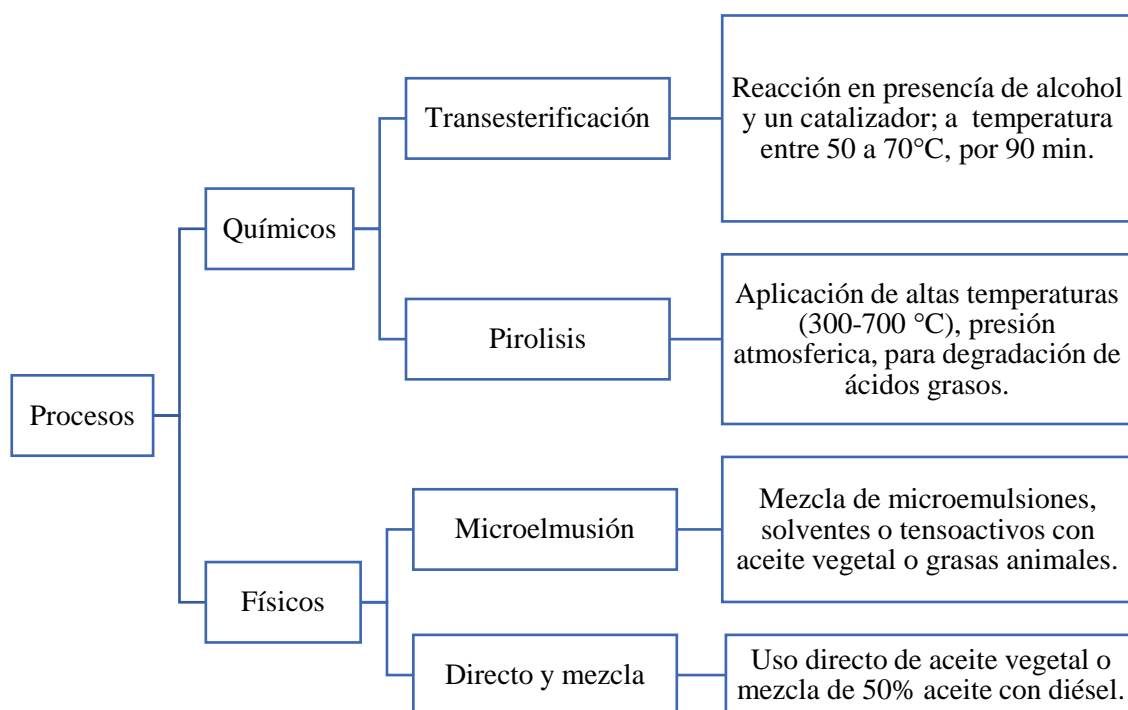


Figura 2. 1 Procesos comunes para producción de biodiésel

La transesterificación es el proceso a nivel industrial más común en la actualidad, además la producción de biodiésel se hace en proceso en lote. Algunas desventajas que presenta son la generación de subproductos (glicerina); el tiempo de producción es mayor a 1 hora; se requiere que la materia prima esté ausente de humedad para evitar la generación de reacción de saponificación. La Pirolisis suele ser un proceso costoso energéticamente. El uso directo del aceite, si bien podría ser barato, podría afectar al funcionamiento de los motores durante la combustión (Tabatabaei et al., 2019).

2.3 Reacción de transesterificación

La reacción de transesterificación a partir de aceite consiste en una reacción endotérmica en equilibrio, donde se requieren 3 moles de una cadena corta de un alcohol, por 1 mol de aceite. En la figura 2.2, se muestra un ejemplo general de la reacción del mecanismo de reacción de transesterificación (Günay et al., 2019).

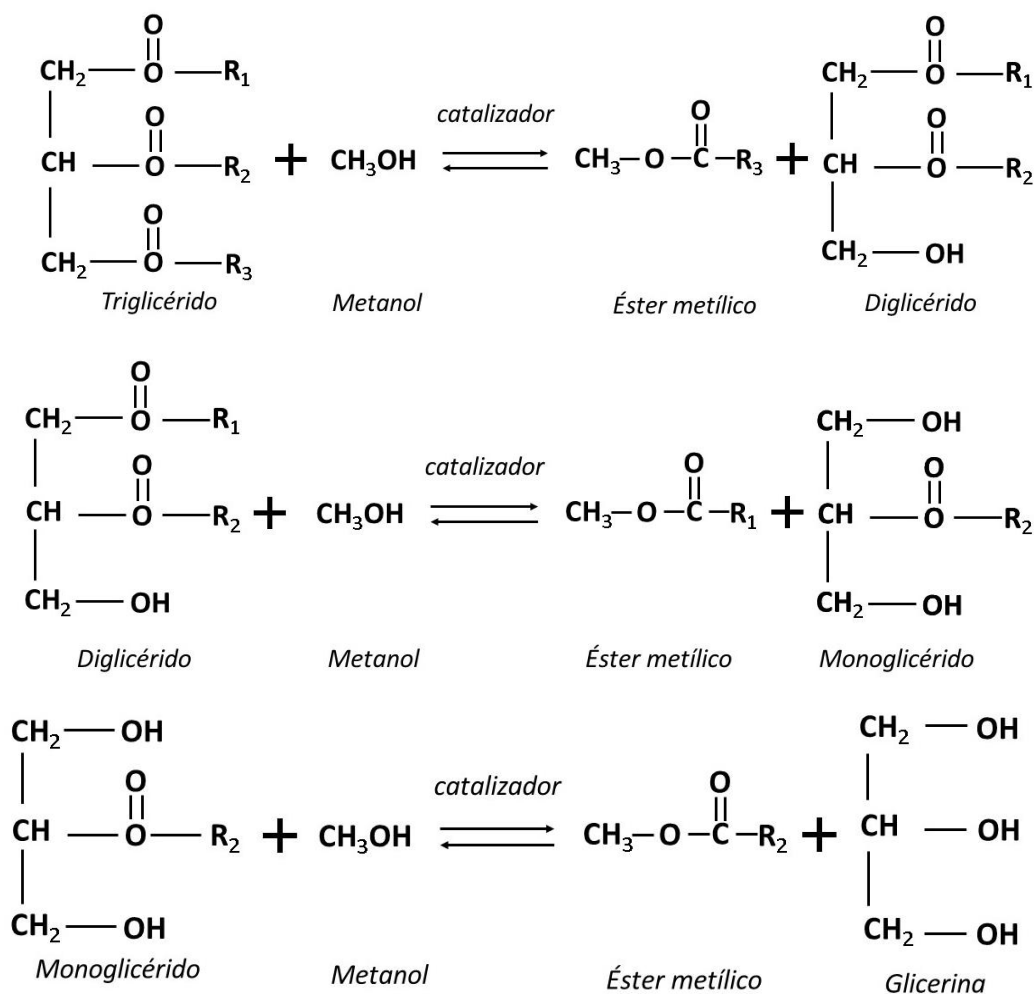


Figura 2. 2 Reacción de transesterificación
Elaboración propia; adaptado de Fundación CARTIF, (2017)

La molécula del triglicérido es el componente principal en los aceites, que, en la presencia de alcohol y catalizador, asistida por calor y agitación, se descompone en una molécula de diglicérido y a su vez se libera una molécula de un éster metílico. La siguiente reacción, es la descomposición del diglicérido, formando una molécula de monoglicérido y otra de éster metílico. Por último, la molécula de monoglicérido se transforma en metil éster y glicerina.

El tipo de catalizador empleado varía dependiendo de las necesidades de la experimentación o bien la disponibilidad existente. Por ejemplo, los catalizadores homogéneos alcalinos más empleados son Hidróxido de Sodio (NaOH), Metóxido de sodio (NaOCH₃) o Hidróxido de Potasio (KOH). También, se encuentran los catalizadores homogéneos ácidos tales como Ácido Sulfúrico (H₂SO₄) o Ácido Clorhídrico (HCl). Entre ellos, los catalizadores alcalinos son los más empleados, sin embargo, su aplicación genera una reacción de saponificación de la molécula de triglicérido o de ácidos grasos de los ésteres metílicos. Con el empleo de catalizadores ácidos no se lleva a cabo la reacción de saponificación, pero la velocidad de reacción es más lenta (Günay et al., 2019).

Con la presencia de un catalizador alcalino, se forman dos reacciones secundarias en este proceso: reacción de saponificación y esterificación de ácidos grasos libres. La reacción de saponificación ocurre principalmente al usar un catalizador alcalino de manera subsecuente por el ataque del grupo OH del catalizador sobre la molécula del triglicérido generando glicerina y grupos ésteres de los ácidos grasos; la presencia de agua favorece a este tipo de reacciones. Mientras tanto, la reacción de esterificación de los ácidos grasos libres sigue un mecanismo similar al anterior, a excepción de que ahora la formación de jabones parte de los ácidos grasos libres que se encuentran en disolución. Esta reacción se ve favorecida al emplear grasas o aceites con un elevado índice de acidez, como >2.5 mg KOH/g (Fundación CARTIF, 2017). En las figuras 2.3 y 2.4, se pueden observar la reacción de saponificación y esterificación de ácidos grasos libres, respectivamente.

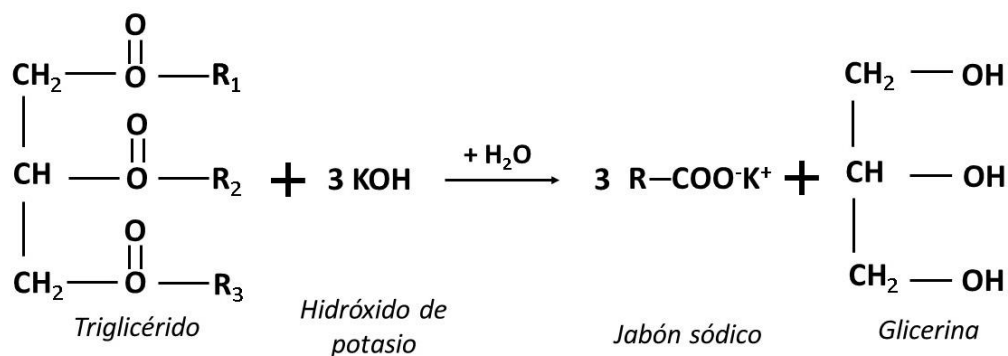


Figura 2. 3 Reacción de saponificación
Elaboración propia; adaptado de Fundación CARTIF, (2017)

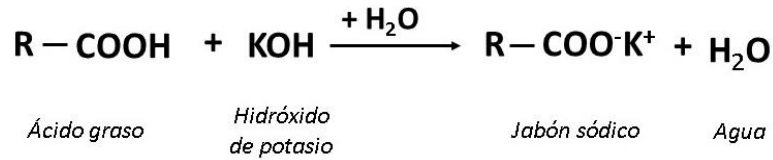


Figura 2. 4 Reacción de esterificación de ácidos grasos
Elaboración propia; adaptado de Fundación CARTIF, (2017)

2.4 Cavitación

La cavitación es un fenómeno en el cual, al aplicar una alta concentración de energía, se forman cavidades (burbujas), posteriormente crecen e implotan, o bien se puede definir como la ruptura de un medio líquido a presiones bajas. Los diferentes métodos de cavitación que existen son por ultrasonido, hidrodinámica, óptica y por partículas. Las condiciones de síntesis en conjunto con la aplicación de estas técnicas han sido evaluadas para eliminar o minimizar la resistencia a la transferencia de masa en producción de biodiésel frente a los métodos convencionales. En la figura 2.5, se muestra una breve descripción de los tipos de cavitación que existen (Chitsaz et al., 2018; Gogate, 2008b).

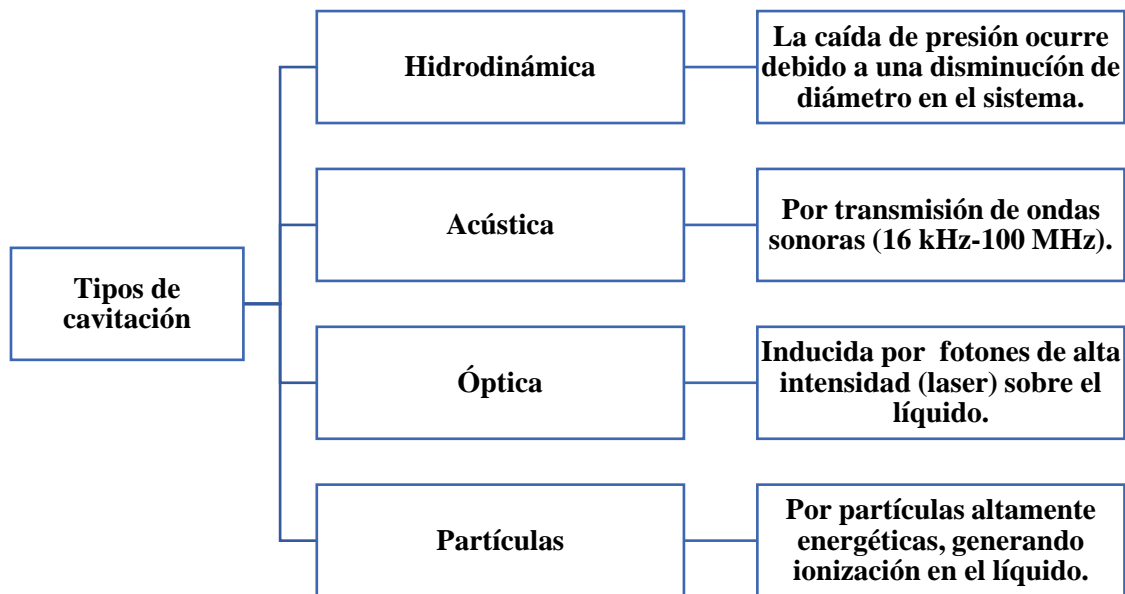


Figura 2. 5 Principios de los tipos de cavitación

La intensificación de la cavitación se debe a la energía liberada durante el choque de las cavidades. En el colapso de las cavidades se crean condiciones extremas en áreas localizadas,

alcanzando una temperatura de 5000 K y presión de 1000 bar aproximadamente (Ge, Sun, et al., 2022).

2.4.1 Cavitación hidrodinámica (CH)

El fenómeno de cavitación hidrodinámica ocurre cuando un líquido pasa a través de una contracción; reduciendo la presión hasta la presión de vapor (P_v) del líquido; es decir, las moléculas cambian de estado líquido a vapor, formando cavidades. Con la implosión de las cavidades, el vapor regresa al estado líquido (Domínguez, 2018). Mientras que el cambio de presión se da cuando el líquido pasa por una contracción en una tubería; es decir ocurre una caída de presión. En la figura 2.6, se muestra un ejemplo de un líquido atravesando por un tubo Venturi, que al pasar por la contracción; se generan las cavidades.

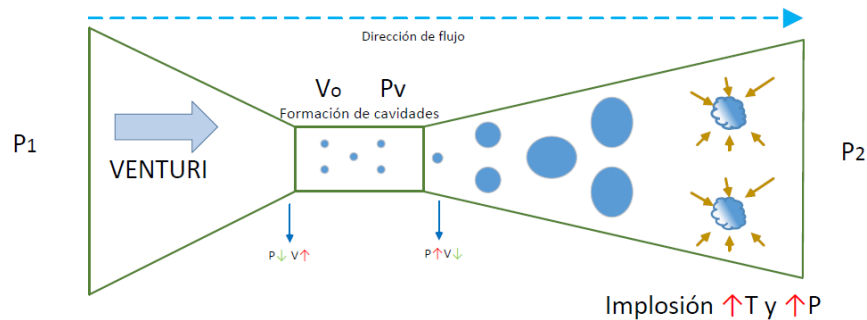


Figura 2. 6 Proceso de formación de cavidades en cavitación hidrodinámica
Elaboración propia; adaptado de Gutiérrez et al., (2019)

La intensidad de la cavitación se mide a partir del número de cavitación (C_v), que se muestra en la ecuación 1. Es un número adimensional y relaciona las condiciones del líquido que pasa a través del dispositivo de cavitación (Gogate, 2008a).

$$C_v = \frac{P_d - P_v}{\frac{1}{2} \rho v_o^2} \quad (ec. 2.1)$$

Donde:

P_d : Presión en la contracción

P_v : Presión de vapor del líquido

v_o : Velocidad del líquido en la contracción

ρ : Densidad del líquido

Idealmente, el C_v debe mantenerse entre 0 a 1 para efectos positivos en sobre la reacción de transesterificación. Sin embargo, se considera que a $C_v > 1$ y en fluidos altamente viscosos o presencia gases disueltos, partículas suspendidas en el líquido; es posible que se inicie el fenómeno de cavitación, esto debido a que la presión de vapor es menor, incremento así el C_v . A $C_v > 2$, se considera que las cavidades no implotan, es decir las cavidades pasan a través de ciclos continuos de expansión y contracción, pero sin contraerse. (Gogate & Pandit, 2000; Gutiérrez et al., 2019).

2.5 Calidad de biodiésel

La calidad puede ser determinada mediante estándares internacionales que especifican los límites mínimos o máximos permisibles de algunos parámetros o propiedades fisicoquímicas del biodiésel que aseguren su correcta aplicación. Algunas de las organizaciones internacionales más destacadas son las American Society for Testing and Materials (ASTM) y European Committee for Standardization (EN); de manera tal que, si el producto cumple con los lineamientos establecidos, es posible su comercialización (Ferreira, 2010). Las normas que indican los límites de los parámetros de calidad son la ASTM D6751 y la EN 14214. En la tabla 2.1, se muestran las especificaciones fisicoquímicas que establece la norma ASTM D6751 para biodiésel B100.

En México, en el año 2018 se publicaron en el Diario Oficial de la Federación (DOF) los “Lineamientos por los que se establecen las especificaciones de calidad y características para etanol anhidro (bioetanol), biodiésel y bioturbosina puros”; en donde se indican las especificaciones de calidad con las que debe cumplir el biodiésel para su comercialización, distribución, transporte y almacenamiento dentro del país. Cabe señalar que dichas especificaciones coinciden en su totalidad con las mencionadas en la tabla 2.1. Sin embargo, dentro de la publicación, se menciona que el biodiésel debe ser mezclado con petrolíferos, que cumplan con la NOM-016-CRE-2016 “Especificaciones de calidad de los petrolíferos” (DOF, 2018).

Tabla 2. 1. Especificaciones de calidad para biodiésel B100 por ASTM D6751

Propiedad	Método	Límite
Calcio y Magnesio, combinado, ppm (µg/g), máx	EN 14538	5
Punto de inflamabilidad, mín	D93	93
Control de alcohol		
Se debe cumplir uno de los siguientes:		
1. Contenido de metanol, % masa, máx	EN 14110	0.2
2. Punto de inflamabilidad, °C, mín	D93	130
Agua y sedimentos, % volumen, máx	D2709	0.05
Viscosidad cinemática, mrn²/s, 40 °C	D445	1.9-6.0
Cenizas sulfatadas, % masa, máx	D874	0.02
Corrosión, máx	D130	No. 3
Número de Cetano, mín	D613	47
Punto de nube, °C	D2500	-
Residuos de carbono, % masa, máx	D4530	0.05
Número ácido, mg KOH/g, máx	D664	0.5
Glicerina libre, % masa, máx	D6584	0.02
Glicerina total, % masa, máx	D6584	0.24
Contenido de Fósforo, % masa, máx	D4951	0.001
Temperatura de destilación, °C máx	D1160	360
Sodio y Potasio combinado, ppm, (µg/g), máx	EN 14538	5
Estabilidad oxidativa, horas, mín	EN 15751	3

Fuente: American Society for Testing and Materials, (2020)

2.6 Situación de biodiésel en México y en el mundo

En el año 2021, los países que lideraron la producción de biodiésel fueron Indonesia, Brasil, Estados Unidos, Alemania y Francia. Tal como se muestra en la figura 2.7, donde a través de la gráfica se observa la cantidad en billones de litros producidos de biodiésel durante ese año. Indonesia lideró la producción con 9.5 billones de litros en 1 año, seguido por Brasil, con una producción de 6.9 billones de litros (Aizarani, 2022; REN 21, 2022).

Indonesia produce el biodiésel en su mayoría, a partir de aceite de palma crudo, lo que se considera como una ventaja, debido a que también es el país con mayor producción de esta semilla. Otro factor es la implementación de programas gubernamentales que promueven la producción y uso de biodiésel B30, que consiste en una mezcla con 30% del contenido de biodiésel y el 70% con diésel (Indonesian Palm Oil Association, 2021). Mientras que en Estados Unidos (2020) y Brasil (2019), la principal materia prima para producir biodiésel ha sido en los

últimos años, el aceite de soya usado (Canabarro et al., 2023; U.S. Energy Information Administration, 2021).

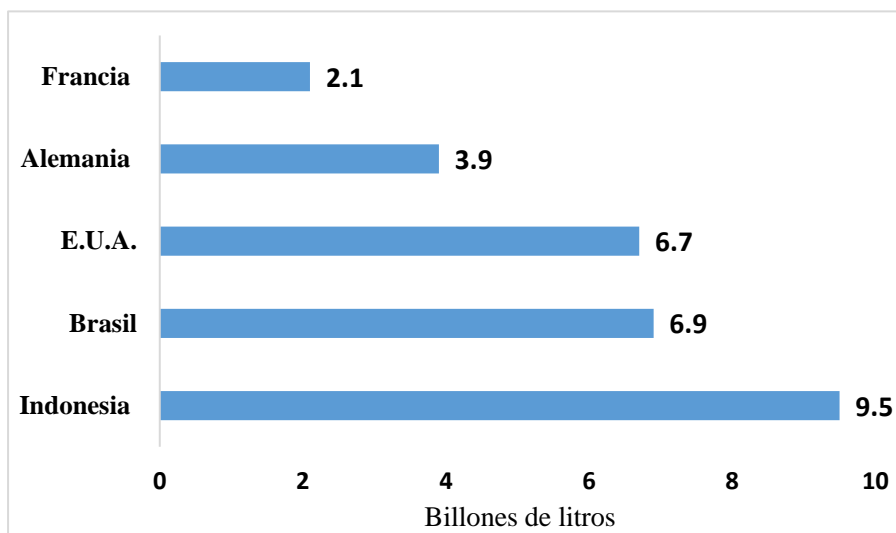


Figura 2. 7 Producción de biodiésel a nivel mundial por país en 2021

Fuente: Aizarani, 2022

Igualmente, en Estados Unidos y Brasil se cuentan con políticas públicas y programas que incentivan y mejoran la producción de biocombustibles. Por ejemplo, en el año 2020, en Brasil entró en vigor el programa “RenovaBio” empleado para la generación de biodiésel, bioetanol y biogás; el cual proporciona incentivos económicos basados en certificados para la reducción de GEI, llamados “CBIO”. Por 1 CBIO se vende en la bolsa de valores en aproximadamente \$10 dólares. El objetivo hacia el 2029, es lograr la reducción de carbón en 95.5 millones de CBIOs (1 CBIO = 1 t CO₂eq) (Canabarro et al., 2023).

En México la situación actual es diferente. Si bien, con el Acuerdo de París, México se comprometió a reducir en un 22% las emisiones de GEI para el 2030 (INECC, 2018a); no se cuentan con estrategias o programas públicos específicos hacia el sector de desarrollo y producción de energías limpias. En el año 2020, la producción nacional de energías renovables fue de 11.25% y un consumo de 9.74%. Mientras que, en el año 2021, se registró un incremento del 36.68% de oferta interna bruta de energías renovables con respecto al año anterior, obteniendo un resultado de 1041.82 PJ. Pero, no se cuentan con datos específicos de producción y consumo para biodiésel a nivel nacional. No obstante, se registró para el mismo año, que el

diésel obtuvo un 16.72 % de consumo con respecto al consumo final total energético (SENER, 2022). Lo que significa que el biodiésel podría tener un área de aprovechamiento para el consumo energético a nivel nacional.

La producción y consumo de biodiésel en México es limitada, a su vez la importación al país en los últimos años ha disminuido. En el año 2019, México compró a Estados Unidos 2240 t, mientras que, en el año 2016, México adquirió 20440 t (CEDRSSA, 2020).

La materia prima para la producción de este biocombustible abarca entre 70 a 90% del costo total del producto. En México, la síntesis se lleva a cabo mediante aceites vegetales comestibles nuevos o usados, lo que eleva el costo de producción, ya que resulta ser una materia prima de alta demanda, es decir también se emplea en la fabricación de alimento para ganado, mascotas y en la industria cosmética. Aunado, al problema de logística, recolección y comercialización del aceite (Alva, 2020; Cabrera et al., 2022).

Para la realización de los experimentos del presente proyecto, el costo del aceite vegetal usado proveniente de la industria restaurantera fue de \$19.00 MXN por litro. Actualmente, el costo de 1 litros de diésel está entre \$23.00 a \$25.00 MXN aproximadamente (CRE, 2023); a partir de estos costos, es posible concluir, que comercialmente el biodiésel no resultaría ser competitivo con el diésel.

A fin de contrarrestar el costo por materia prima, existen más opciones para la síntesis de biodiésel, tales como aceites vegetales no comestibles. Diferentes investigaciones se han enfocado a la síntesis de biodiésel a partir de aceite de palma, *Jatropha*, entre otros, obteniendo óptimos resultados (Ávila et al., 2018; Lertsathapornsuk et al., 2008).

Este tipo de oleaginosas no comestibles, presentan ventajas sobre las comestibles, ya que no compiten con la industria alimentaria, se siembran y cosechan en gran extensión del suelo. Por ejemplo, el aceite de palma, *Jatropha*, ricino y jojoba tienen potencial para producción en México, ya que se adaptan fácilmente en el sur del país, todas las partes de la planta o bien biomasa, son aprovechables energéticamente tanto para generación de biodiésel y biogás; ayudan a la fijación del CO₂ (Ávila et al., 2018; Cabrera et al., 2022).

No obstante, la falta de incentivos económicos por parte del gobierno hacia los productores y agricultores; falta de fondos de SADER (anteriormente SAGARPA) para establecer programas de cultivo de oleaginosas no comestibles; desconocimiento de la sociedad para el uso de biocombustibles; y ausencia del cumplimiento de la normatividad que asegura la calidad del biodiésel; son solo algunas de las barreras económicas, sociales y políticas, que evitan el crecimiento del consumo y producción de biocombustibles en México (Alva, 2020; Cabrera et al., 2022).

3. ANTECEDENTES

3.1. Revisión bibliográfica

El biodiésel puede ser producido por diferentes métodos, el más común es mediante la transesterificación convencional, empleando diferentes catalizadores, tales como: catálisis alcalina, catálisis ácida o catálisis enzimática, entre otros. También, se utilizan diferentes relaciones molares de reactivos aceite-alcohol, procurando que el alcohol esté en exceso, para favorecer el desplazamiento de la reacción hacia la formación del compuesto ésteres metílicos (Pal et al., 2010). Mientras que la aplicación de las técnicas de cavitación ha sido evaluada con la finalidad de optimizar el proceso de biodiésel, principalmente factores como el tiempo de reacción y consumo de materia prima. También, se busca optimizar el consumo energético durante el proceso, favoreciendo al rendimiento de la reacción. A continuación, se presenta un resumen de algunas investigaciones con resultados favorables hacia la síntesis de biodiésel asistida con cavitación hidrodinámica.

Chuah et al., (2017) diseñaron una planta piloto en donde se comparó el efecto de la aplicación de cavitación hidrodinámica contra la agitación mecánica (600 rpm), es decir evitando que la mezcla pase por el dispositivo de cavitación, durante la reacción de biodiésel. La cavitación se generó mediante un dispositivo, en forma de plato, de 21 orificios de 1 mm de diámetro cada uno. La conclusión fue que, la reacción resultó ser más eficiente aplicando cavitación hidrodinámica, que, al emplear solo agitación mecánica, obteniendo un óptimo desempeño en un tiempo de 15 minutos y 96% de eficiencia. Además, se consideró el beneficio del ahorro energético que se atribuye al no utilizar el agitador mecánico. Un efecto similar, se observó en el trabajo realizado por Kolhe et al., (2017) ya que se empleó un dispositivo similar al trabajo anteriormente mencionado. Sin embargo, al emplear menor cantidad de catalizador, y menor relación molar sobre los experimentos, se logró una conversión superior a 90% en 20 minutos.

Por otro lado, Bargole et al., (2019), llevaron a cabo una serie de experimentos de síntesis de biodiésel asistidos por tres diferentes modelos de dispositivos de cavitación, a fin de determinar aquel que conlleva a una mejor eficiencia. El primero fue un tubo Venturi con un diámetro de garganta de 3 mm; el segundo dispositivo consistió en una placa de 3 aberturas rectangulares, con longitud de 4.71 mm cada uno; el tercero fue una placa con 100 orificios de 0.3 mm de

diámetro cada uno. Los mejores resultados fueron aquellos obtenidos por el plato de 100 orificios, ya que la reacción llegó al equilibrio en un tiempo de 5 min. Por lo que se concluyó, que este tipo de geometría en el dispositivo genera un mayor número de cavidades activas, promoviendo la transferencia de masa entre reactivos.

Díez et al., (2019), evaluaron el desempeño de una planta piloto de producción de biodiésel a diferentes configuraciones. Primero se llevó la reacción en lote con agitación mecánica, es decir transesterificación convencional. Luego, se probó con dos dispositivos conectados en serie, un plato perforado de 2 orificios, seguido de otro de 3 orificios; cada orificio de un diámetro de 0.4 mm. En ambos experimentos se mantuvo la temperatura constante a 60 °C. Los resultados indicaron que fue más eficiente al aplicar los dispositivos de cavitación de manera consecutiva, ya que se obtuvo un porcentaje de conversión a FAME de 90%, mientras que con agitación mecánica fue de 85%. Además, se redujo el tiempo de reacción de 22 min con agitación mecánica, a 5 min con cavitación.

En la tabla 3.1, se muestra un resumen de diferentes proyectos o estudios, en donde se ha evaluado el efecto de la aplicación de la cavitación hidrodinámica sobre la síntesis de biodiésel. Las investigaciones concluyeron que las principales ventajas que otorga la cavitación hidrodinámica son: la reducción en el tiempo de reacción y en el consumo energético, con conversiones de biodiésel óptimas. Esto comparado con el suministro de energía por agitación mecánica y del calor externo para el control de la temperatura en la producción convencional de biodiésel. Las investigaciones se mencionan con fines de reconocimiento de las ventajas de la aplicación del fenómeno de cavitación hidrodinámica y, no de comparación entre los resultados de cada una.

Con la finalidad de comparar los resultados de diferentes investigaciones, con respecto al rendimiento de la reacción; se llevó a cabo una normalización de los resultados de las investigaciones mencionadas en la tabla 3.1. Por lo tanto, en la tabla 3.2 se muestran los valores de rendimiento espacio-tiempo (ρ_{ET}) que relaciona a la conversión, es decir, la cantidad de producto obtenido por unidad de volumen del reactor y tiempo de reacción de aquellos artículos donde fue posible, debido a la información disponible y descrita en el mismo (Walsh & Reade, 1994).

Tabla 3. 1 Condiciones de operación para procesos de CH

Referencia	aceite	alcohol	Catalizador, %	relación molar	T, °C	Dispositivo	Tiempo, min	Cv	Conversión %
Chuah et al., (2017)	Gastado de cocina	Metanol	KOH, 1%	1:6	60	Plato, 21 orificios, D=1 mm	15	No reportado	96
Kolhe et al., (2017)	Gastado de cocina	Metanol	KOH, 0.55 %	1:4.5	45	Plato, 16 orificios, D=3 mm	20	No reportado	93.6
Díez et al., (2019)	Grasa de cerdo	Metanol	NaOH, 1%	1:6	60	2 platos con 2 y 3 orificios 2 y 3, D=0.2 mm	5	0.2-1.24	88.89
Bargole et al., (2019)	usado de soya	Metanol	NaOH, 1%	1:6.8	35	Plato, 100 orificios, D=0.3 mm	5	0.34	> 99
Samuel et al., (2019)	aceite de semilla de caucho	Etanol	KOH, 4.5 %	1:6	-	Placa, 1 orificio	40	No reportado	92.5
Patil y Baral, (2021)	Semilla de Tuera	Metanol	TiO ₂ , 1.2%	1:6	60	Plato de 3 orificios; D=2 mm	60	0.25	71.8
Khan et al., (2022)	Extracto de microalgas	Metanol	KOH, 1.301%	1:6.5	60	Plato perforado; 7 orificios, D=4 mm	11.5	No reportado	97.3
Thakkar et al., (2022)	Aceite de ricino	Metanol	KOH, 1.06%	1:9.82	60.3	1 tobera, D=1.2 mm	50.86	No reportado	92.27
Alsaiari et al., (2023)	Aceite de espino amarillo	Metanol	KOH, 1%	1:6	55	Plato 21 orificios; D=1 mm	15	0.322	96.5

Tabla 3. 2. Rendimiento tiempo-espacio (ρ_{ET}) para procesos de síntesis de biodiésel con CH

Referencia	Tiempo, min	Volumen de reacción, L	Rendimiento tiempo-espacio (ρ_{ET})	
			mol biodiésel/ L*min	kg biodiésel/ L*min
Chuah et al., (2017)	15	50	0.17	0.05
Bargole et al., (2019)	5	2.5	0.50	0.14
Samuel et al., (2019)	40	25	0.01	0.004
Patil y Baral, (2021)	60	25	0.002	5×10^{-4}
Thakkar et al., (2022)	50.86	1.5	0.06	0.02

Fuente: elaboración propia

De acuerdo con lo reportado y determinado en la tabla 3.2, el mejor rendimiento fue el obtenido por la investigación de Bargole et al., (2019), con 0.17 mol biodiésel/L*min. Como se mencionó en párrafos anteriores, en este proyecto se logró un rendimiento superior al 99% en 5 min; la síntesis de biodiésel se llevó a cabo en volumen de 2.5 L. Por otro lado, con el menor rendimiento fue la investigación de Patil y Baral, (2021), ya que el tiempo de reacción es de 60 min, y una conversión de 71.8%.

3.2 Pruebas preliminares en el prototipo de cavitación hidrodinámica

Previo al presente trabajo de tesis, en CIDETEQ, S.C. por medio del grupo de investigación que participó en el “Clúster de biodiésel avanzado”, se realizaron pruebas de factibilidad de la cavitación hidrodinámica sobre síntesis de biodiésel. Con la finalidad de plantear las condiciones experimentales del presente trabajo, se revisaron los resultados que se plasmaron en los informes técnicos del proyecto del Clúster (SENER-CONACYT, 2016-2020).

Las pruebas preliminares se llevaron a cabo en un tubo Venturi de 2 mm de diámetro en la contracción, es decir de dimensiones y geometría iguales a las del dispositivo utilizado en el presente trabajo. También, se evaluó el efecto de la cavitación hidrodinámica sobre la síntesis de biodiésel, comparando el comportamiento con una prueba de transesterificación

convencional. Ambas pruebas se llevaron a cabo en el mismo prototipo, a excepción que la convencional, no pasó por el tubo Venturi. En la tabla 3.2, se muestran las condiciones experimentales de ambas pruebas. Mientras que en la figura 3.1, se puede observar las gráficas de conversión de triglicéridos con respecto al tiempo de ambas pruebas.

Tabla 3. 3 Condiciones experimentales en pruebas pre eliminares

Parámetro	Valor
Temperatura	50 °C
Volumen de trabajo	12 L
Relación molar aceite-metanol	1:6
Catalizador, KOH	2%
Tiempo de reacción	120 min

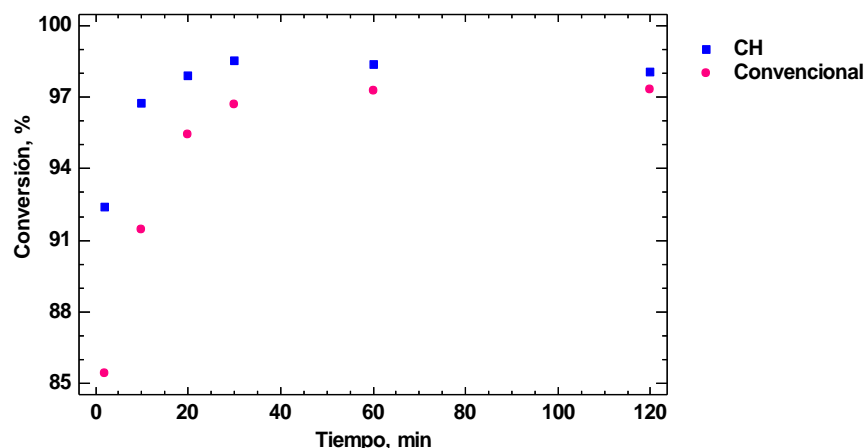


Figura 3. 1. Gráfica comparativa entre reacción en CH y transesterificación convencional

De acuerdo con los resultados anteriores, se observó que en la reacción con el tubo Venturi fue posible lograr una conversión de triglicéridos a metil ésteres superior a 95% en 10 min, mientras que, con transesterificación convencional, la conversión fue de 91%. Por lo tanto, fue posible concluir que existe un efecto positivo de la cavitación hidrodinámica sobre la síntesis de biodiésel. En cuanto a la selección de factores para el desarrollo de experimentos, específicamente en relación molar aceite-metanol y catalizador; se eligieron valores inferiores a los aplicados anteriormente (tabla 3.2), ya que uno de los objetivos del presente trabajo, es la optimización de reactivos. Para condiciones de operación, de igual manera se buscó la optimización de variables con efecto sobre el consumo energético, así como el C_v , ya que también se consideró conservar el C_v entre 0 a 1.

4. JUSTIFICACIÓN

De acuerdo con el Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero (INECC, 2018b), en México a partir del año 1990 hasta el 2015 las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) aumentaron 54%. La tasa de incremento por año fue de 1.7%. Del total de emisiones del año 2015, el 90.8% corresponden a emisiones derivadas del consumo de combustibles fósiles. Mientras que en el resumen de “Acciones de mitigación propuestas hacia el 2030” (INECC, 2018a), se menciona que en México se tiene el compromiso de introducir fuentes de generación de energía limpia en un 35% para el 2024.

Uno de los beneficios de la producción y consumo de biodiésel, es el aporte a la reducción de emisiones de GEI, al ser considerados como un biocombustible. La biomasa empleada como materia prima para producir este combustible es un aceite vegetal que proviene de materia carbonácea que, al no ser un derivado del petróleo, no incrementa las emisiones de dióxido de carbono (CO_2) y monóxido de carbono (CO) al medio ambiente. Por lo tanto, este biocombustible permanece dentro del ciclo natural del carbono.

Según un estudio realizado por el programa Nodo Binacional de Innovación en Manufactura Avanzada y Procesos (2019); se determinó que actualmente la mayoría de las empresas dedicadas a la producción, venta y distribución de biodiésel en México, cuentan con sistemas de transesterificación convencional. Como se mencionó en la introducción, convencionalmente este proceso se lleva a cabo en un tiempo mayor a 1 hora, que requiere calentamiento y agitación constante, lo que conlleva a elevados costos energéticos. En los últimos años, se están desarrollando nuevos sistemas para la producción de biodiésel que consuman menos energía. En literatura existen trabajos a nivel investigación donde se estudian y se tratan de entender diversos fenómenos principalmente utilizando la cavitación para reducir los tiempos de reacción y los consumos energéticos.

En CIDETEQ, se cuentan con investigaciones previas al presente proyecto, donde se estudiaron algunas de las variables que afectan sobre la reacción asistida por cavitación hidrodinámica. Tales variables como la temperatura, concentración de catalizador y relación molar de los reactivos. Estos estudios se llevaron a cabo en un prototipo con capacidad de 11 L. Donde se determinó que la

temperatura no tuvo un efecto significativo sobre la velocidad de reacción. También, se evaluó el efecto de la concentración de catalizador a niveles más altos que lo propuesto en la presente tesis, donde se concluyó que la diferencia del porcentaje de conversión con respecto a mayor concentración de catalizador es mínima.

Tal como se muestra en los antecedentes inmediatos, mediante la comparación de la reacción convencional (prueba “blanco”) con respecto a la llevada a cabo con cavitación hidrodinámica, se comprobó el efecto positivo de este fenómeno; ya que se disminuyó el tiempo de reacción de biodiésel.

Por lo que el siguiente paso fue diseñar un segundo prototipo, empleando los datos experimentales obtenidos a partir del prototipo anteriormente mencionado. Además, se consideró que este prototipo pudiera contar con características técnicas y comerciales a las de un producto mínimo viable. Es decir, de capacidad de producción similar a la requerida por el mercado, además de ser económico en costos de inversión y de operación.

A fin de minimizar el costo de operación, se descartó el control de temperatura y la agitación mecánica.

Para determinar el C_v , también se consideró en el diseño al control de las variables que afectan en a la intensidad del fenómeno de cavitación, tales como presión y velocidad de flujo.

Si bien al inicio del presente proyecto de investigación ya se contaban con antecedentes del funcionamiento de un prototipo de volumen de 11 L; y que el segundo prototipo se diseñó con una capacidad máxima de volumen de 60 L; aún debían desarrollarse experimentos a fin de obtener las mejores condiciones de operación.

Para lograr lo anterior, el presente trabajo se dividió en dos bloques experimentales. En el primer bloque se optimizó el consumo de reactivos, tales como aceite, metanol y catalizador; donde se operó a menores concentraciones que en las pruebas del prototipo de volumen de 11 L. Una vez obtenidos estos valores, en el segundo bloque experimental, se optimizaron los factores tales como, el número de tubos Venturi volumen de trabajo y tiempo de la reacción y, con ello poder determinar

la cantidad de energía consumida. Derivado de esto, es posible demostrar que con el presente prototipo es posible disminuir los costos energéticos comparado con lo que ya se realizó.

En resumen, en el presente estudio se desea desarrollar un sistema de producción de biodiésel asistido con cavitación hidrodinámica, que ofrezca ventajas técnicas y económicas en comparación con los sistemas actuales. Sin embargo, el uso de cavitación hidrodinámica para asistir en las reacciones de transesterificación para la producción de biodiésel es considerada como tecnología emergente, por la escasa disponibilidad en el mercado. En México, no existe la venta de este tipo de tecnología para producción de biodiésel, por lo que el costo por la adquisición y su aplicación resultaría elevado (NoBI, 2019). Así que, un impacto importante del presente trabajo es el desarrollo de una tecnología nacional con factibilidad económica, que a su vez aporte beneficios ambientales.

5. OBJETIVOS

5.1. Objetivo general

Especificar las variables de operación de un sistema de producción de biodiésel empleando transesterificación asistida por cavitación hidrodinámica.

5.2. Objetivos específicos

- Llevar a cabo una optimización sobre los consumos de reactivos y catalizador, por medio de un estudio estadístico, aplicando como variables la relación molar de aceite-metanol, porcentaje de catalizador y tiempo.
- Desarrollar una optimización sobre las variables de operación, tales como número de tubos de Venturi, volumen de mezcla y tiempo.
- Determinar el consumo energético de la síntesis de biodiesel asistida con cavitación hidrodinámica, con 1, 2 y 3 tubos Venturi.

6 HIPÓTESIS

En el prototipo asistido por cavitación hidrodinámica con tubos Venturi será posible optimizar el consumo de reactivos y energético para la síntesis de biodiésel; bajo el control del número de cavitación.

Estas páginas fueron eliminadas debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública 2021, y con el Artículo 116 de la Ley General de Transparencia y Acceso a la Información Pública 2021.

7.3. Reactivos y equipos

Para el bloque experimental I, para llevar a cabo la reacción de transesterificación se utilizaron como reactivos aceite de soya vegetal; metanol grado industrial marca Kem; como catalizador hidróxido de potasio (KOH) marca Macron, de grado reactivo al 86% de pureza; y para la neutralización de muestras de biodiésel se empleó ácido clorhídrico (HCl), marca JT Baker grado reactivo a 36% de pureza.

En el bloque experimental II se emplearon los mismos reactivos que en el primer bloque, a excepción del aceite. En este caso, se empleó aceite comestible usado, proveniente de la industria restaurantera local.

Para el análisis de muestras, se utilizaron solventes tales como: metanol marca JT Baker, grado HPLC; 2 propanol marca JT Baker, grado reactivo y; Hexano marca JT Baker, grado HPLC.

La determinación de conversión de triglicéridos se llevó a cabo en un equipo de cromatografía de líquidos de alta resolución (HPLC) marca Agilent modelo 1260.

7.4 Bloque experimental I

7.4.1 Planteamiento de Diseño de experimentos 1 Box-Behnken (DDE 1)

El primer bloque experimental se realizó con la finalidad de optimizar el empleo de reactivos sobre la producción de biodiésel. El análisis de este bloque análisis se llevó a cabo mediante la aplicación de un diseño de experimentos (DDE) de superficie de respuesta de Box-Behnken tal como se aprecia en la figura 7.2. Los puntos rojos que simbolizan a los tratamientos se encuentran en el centro de las aristas y centro del cubo, mientras que se excluyen los vértices del cubo (niveles extremos), que significan tratamientos en los niveles altos (1, 1, 1) y bajos (-1,-1,-1).

Por lo tanto, se evaluó el efecto de tres factores tales como: relación molar aceite:metanol (mol:mol), porcentaje de catalizador (% m/m KOH) y tiempo (min); sobre el porcentaje de conversión de triglicéridos, como variable de respuesta. Los datos experimentales fueron ajustados por medio del software “stagraphics Centaurion XVI” para análisis estadístico. En la tabla 7.2 se mencionan los factores y niveles empleados para el presente DDE.

A partir de los valores óptimos arrojados por el análisis estadístico de este bloque experimental; estos valores serán empleados en el desarrollo del segundo bloque experimental.

Tabla 7. 2 Factores y niveles propuestos en DDE 1

Factor	Unidades	Nivel bajo (-1)	Nivel medio (0)	Nivel alto (1)
A: Relación molar aceite:metanol	mol:mol	1:4	1:5	1:6
B: porcentaje de catalizador	%m/m	1	1.25	1.5
C: Tiempo	Min	10	20	30

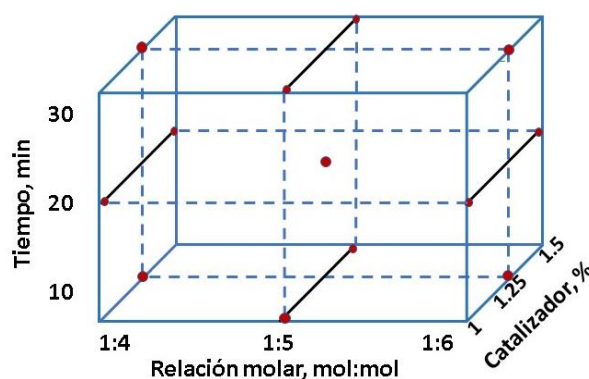


Figura 7. 2. Representación del DDE1 Box-Behnken

7.4.2 Desarrollo experimental para DDE1

Todos los experimentos propuestos por el DDE1 se realizaron en el prototipo que se muestra en la figura 7.1. Las pruebas se llevaron a cabo por reacción en lote. Previo a comenzar el desarrollo experimental; mediante pruebas hidráulicas con biodiésel se realizó un ajuste del juego de válvulas para controlar el Cv. En cada experimento el metanol y aceite se introdujeron en el tanque de mezcla, además del catalizador previamente diluido en una fracción de volumen de metanol (metóxido). Las cantidades empleadas de cada reactivo fueron ajustadas de acuerdo con el experimento y a los niveles de los factores indicados. Sin embargo, se consideró un volumen total de trabajo de 20 L para todos los experimentos. La cantidad de masa del catalizador (1%, 1.25% y 1.5% m/m) fue calculada con respecto a la masa del aceite.

Posterior a que los reactivos se introdujeron al tanque de mezcla, se accionó a la bomba, iniciando la reacción de transesterificación. El líquido pasó por el tubo Venturi continuamente durante 30 minutos; tomando muestras a los 2, 4, 6, 8, 10, 16, 20 y 30 min. A fin de favorecer la homogenización de reactivos; el líquido fue recirculado por la línea hidráulica regresando al tanque de mezcla. Por lo que no fue necesario la aplicación de agitación mecánica ni calor externo. Por medio de válvulas se controló el flujo de recirculación y la presión de entrada al dispositivo de cavitación; antes de empezar cada experimento, se ajustaban las válvulas a través de pruebas hidráulicas y conocer el punto de presión y flujo. Las condiciones de síntesis de biodiésel en cada experimento se muestran en la tabla 7.3, las cuales fueron controladas con la finalidad de controlar el Cv entre 0 y 1 durante cada experimento. Mientras que, el Cv fue calculado con la ecuación 2.1. En la figura 7.3 se puede observar un diagrama del prototipo de cavitación, donde se indican las válvulas que controlaban el paso del líquido por el tubo Venturi; es decir, estas fueron abiertas para un tubo, mientras que las que corresponden a los otros dos tubos, se mantuvieron cerradas. En la figura se ejemplifica con el segundo tubo. Además, se observa con la flecha el sentido en el que fluyo el líquido durante el desarrollo de los experimentos, recordando que las reacciones se llevaron a cabo en proceso en lote.

Tabla 7. 3. Condiciones de reacción en bloque experimental I

Parámetro	Valor	Unidades
Presión de entrada (P)	38 a 60	Psi
Temperatura (T)	18 a 40	°C
Flujo (Q)	2 a 5.3	L/min
Número de cavitación (Cv)	0 a 1	Sin dimensión
Tiempo de reacción (t)	30	Min
Volumen de trabajo (V)	20	L
Número de tubos Venturi	1	Unidades

Estas páginas fueron eliminadas debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública 2021, y con el Artículo 116 de la Ley General de Transparencia y Acceso a la Información Pública 2021.

$$I.S. = \frac{mg\ KOH}{g\ aceite} \quad (ec. 7.1)$$

La fórmula para conocer el peso molecular (P.M.) de cualquier elemento compuesto se expresa a continuación (ecuación 7.2):

$$P.M. = \frac{masa}{No. de moles} \quad (ec. 7.2)$$

En la reacción de saponificación reaccionan 1 mol de triglicérido con 3 moles de KOH, por lo que, a partir de esa consideración, se despeja a la masa de la ecuación 7.2 y, sustituyéndolo en la ecuación 7.1 (I.S.), se obtiene la ecuación 7.3:

$$I.S. = \frac{(P.M.KOH)(3\ mol\ KOH)}{(P.M. aceite)(1\ mol\ de\ aceite)} \quad (ec. 7.3)$$

Donde:

P.M. KOH= Peso molecular de KOH, g/mol

P.M. aceite= Peso molecular promedio de aceite, g/mol

Como la incógnita es el peso molecular promedio del aceite, es posible despejarlo de la ecuación 7.3, quedando la ecuación 7.4:

$$P.M. aciete = \frac{(P.M.KOH)(3\ mol\ KOH)}{(I.S.)(1\ mol\ de\ aceite)} \quad (ec. 7.4)$$

Donde:

P.M. aceite = Peso molecular promedio de aceite, g/mol

P.M. KOH= Peso molecular de KOH, g/mol

I.S.= Índice de saponificación de aceite, mg KOH/g aceite

O bien,

$$P.M. aciete = \frac{(P.M.KOH)(3)(1000)}{I.S. aceite} \quad (ec. 7.5)$$

Donde:

P.M. aceite = Peso molecular promedio de aceite, g/mol

P.M. KOH= Peso molecular de KOH, g/mol

I.S.= Índice de saponificación de aceite, mg KOH/g aceite

7.6 Determinación de conversión de triglicéridos

A partir de las muestras tomadas durante la reacción, fue posible la determinación del porcentaje de conversión de triglicéridos a metil ésteres aplicando una técnica de medición en HPLC. Todas las muestras tomadas en los experimentos fueron sometidas a un tratamiento, antes de ser analizadas por el HPLC.

Para detener la reacción de transesterificación, cada muestra recolectada fue neutralizada con una solución de ácido clorhídrico al 10%. Posteriormente, las muestras fueron centrifugadas a 4500 rpm por 10 minutos; lo anterior para extraer la fase de biodiésel. La fase de biodiésel fue filtrada a través de un filtro de 0.45 μm de porosidad. Después, se extrajo una alícuota de cada muestra filtrada, para disolverla con una solución de 2 propanol/n-hexano (5:4 V/V). La determinación de porcentaje de conversión de triglicéridos se llevó a cabo usando un equipo de HPLC. Este procedimiento fue propuesto por Avramović et al., (2010). En la figura 7.6 se muestra un diagrama del tratamiento de las muestras.



Figura 7. 6. Diagrama de flujo para preparación de muestras

El porcentaje de conversión de triglicéridos en cada muestra se calculó mediante la ecuación 7.6 (Meza, 2020).

$$\% \text{ conversión} = \left(1 - \frac{\sum \text{mono, di, tri glicéridos metil ésteres}}{\sum \text{mono, di, tri glicéridos aceite}} \right) \times 100 \quad (\text{ec. 7.6})$$

Donde:

Σ : Sumatoria de área bajo la curva de picos correspondientes, en el tiempo 8 a 12 min.

Los datos obtenidos de cada cromatograma fueron ajustados a través de una curva de calibración previamente elaborada, a partir de aceite de soya y aceite vegetal usado.

7.7 Determinación de la calidad de biodiésel

Con la finalidad de retirar el jabón sódico y el catalizador remanentes en el biodiésel producido, éste fue lavado con agua potable hasta obtener un pH neutro en la fase acuosa, en relación 1:1 v/v biodiésel:agua. Después, el biodiésel se calentó a 100 °C para evaporar el contenido de agua presente en el producto. Al concluir el procedimiento de lavado y secado, se procedió a la determinación de calidad del biodiésel; aplicando los métodos establecidos por las normas de la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales por cada parámetro (ASTM por sus siglas en inglés). La norma ASTM D6751 especifica los parámetros y límites físicos con los que debe cumplir el biodiésel (B100). A continuación, se mencionan los procedimientos seguidos para la determinación de los parámetros físicos:

- ASTM D2500. Determinación del punto de nube
- ASTM D93. Punto de inflamabilidad
- ASTM D445. Viscosidad cinemática
- ASTM D1298. Densidad relativa
- ASTM D2709. Contenido de agua y sedimentos

7.8 Determinación del consumo energético

Con la finalidad de determinar el consumo energético del reactor por la producción de biodiésel se contemplaron diferentes condiciones de operación de las pruebas del bloque experimental II. Únicamente se contempló la energía consumida por la bomba durante el tiempo establecido para la reacción de transesterificación. Es decir, no se consideró el consumo derivado por la preparación de reactivos, materia prima y, demás factores que intervienen en el proceso de reacción (Meza, 2020).

Primero se contempló que durante todos los experimentos el reactor operó como un sistema por lote en un tiempo de 30 min. También se consideró la potencia de la bomba con la que cuenta el prototipo, que es de 2HP o bien 1491.4 W. A continuación, se puede observar la ecuación 7.7 para el cálculo de energía consumida por la bomba durante el tiempo de operación.

$$E_b = P * t \quad (ec. 7.7)$$

Donde:

E_b = Energía consumida por la bomba, Wh

P = Potencia de la bomba, W

t = Tiempo de reacción, h

Al finalizar cada prueba se cuantificó el volumen generado de biodiésel y el de glicerina. Para convertir el volumen de biodiésel a masa (kg) fue necesario medir la densidad del biodiésel y, sustituir el valor en la ecuación 7.8.

$$m = \frac{\rho}{V} \quad (ec. 7.8)$$

Donde:

m = masa de biodiésel, kg

ρ = Densidad de biodiésel, kg/m³

V = Volumen de biodiésel, L

Por último, con la ecuación 7.9 se calculó el consumo energético por masa de biodiésel producido.

$$CE = \frac{E_b}{m} \quad (ec. 7.9)$$

Donde:

CE = Consumo energético, Wh/kg biodiésel

E_b = Energía consumida por la bomba, Wh

m = masa de biodiésel producido, kg

7.9 Determinación del rendimiento espacio-tiempo

Como se explicó en capítulos anteriores, con la finalidad de evaluar de manera normalizada los resultados de las investigaciones mencionadas en la tabla 3.2, se muestran los valores de rendimiento espacio-tiempo (ρ_{ET}) que relaciona a la conversión, es decir, la cantidad de producto obtenido por unidad de volumen del reactor y tiempo de reacción, para ello se utilizaron las expresiones 8.10 y 8.11 (Walsh y Reade, 1994). Estas ecuaciones también fueron utilizadas para la determinación del rendimiento (ρ_{ET}) que se muestran en la tabla 3.2 de los antecedentes.

$$\rho_{ET} = \frac{1}{V_r} \times \frac{n_p}{t_r} \quad (\text{ec. 8.10})$$

Donde:

ρ_{ET} : Rendimiento espacio-tiempo, mol/L•min

V_r : Volumen de reacción, L

n_p : Moles de biodiésel producidos, mol

t_r : Tiempo de reacción, min

O bien:

$$\rho_{ET} = \frac{m_p}{V_r \times t_r} \quad (\text{ec. 8.11})$$

Donde:

ρ_{ET} : Rendimiento espacio-tiempo, kg/L•min

V_r : Volumen de reacción, L

m_p : masa de biodiésel producida, kg

t_r : Tiempo de reacción, min

En la tabla 7.6, se pueden apreciar los datos numéricos contemplados para la determinación del rendimiento espacio-tiempo.

Tabla 7. 6. Datos para rendimiento espacio-tiempo

Parámetro	Valor	Unidades
Volumen de reacción	20, 40 y 60	L
Masa de biodiésel producida	14.72, 29.79 y 41.19	Kg
Tiempo de reacción	10	Min

8. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

8.1 Bloque experimental I. Optimización en el consumo de reactivos

8.1.1 Análisis estadístico

El análisis de datos experimentales para la optimización en el consumo de reactivos (catalizador, aceite y metanol), se realizó mediante la metodología de superficie de respuesta a fin de determinar cuáles factores tienen mayor efecto sobre la variable de respuesta y con ello determinar el consumo óptimo sobre la reacción. Con la aplicación de la herramienta de Análisis de varianza (ANOVA) se permite evaluar la importancia de uno o más factores, comparando las medias de la variable de respuesta en los 3 niveles aplicados (Meza, D., 2020).

En la tabla 8.1 se muestran los resultados de las pruebas realizadas, los cuáles sirvieron en la evaluación y desarrollo del análisis estadístico.

Tabla 8. 1. Datos experimentales obtenidos mediante DDE Box-Behnken

Experimento	Factores			Variable de respuesta
	Rel. Molar (A), mol:mol	Catalizador (B), %	Tiempo (C), min	Conversión, %
1	1.5	1.25	20	93.32
2	1.4	1	20	83.34
3	1.6	1	20	88.67
4	1.4	1.5	20	91.16
5	1.6	1.5	20	93.78
6	1.4	1.25	10	87.54
7	1.6	1.25	10	89.24
8	1.5	1.25	20	90.7
9	1.4	1.25	30	88.66
10	1.6	1.25	30	92.27
11	1.5	1	10	85.43
12	1.5	1.5	10	92.76
13	1.5	1	30	86.31
14	1.5	1.5	30	93.86
15	1.5	1.25	20	90.71

Estas páginas fueron eliminadas debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública 2021, y con el Artículo 116 de la Ley General de Transparencia y Acceso a la Información Pública 2021.

9. CONCLUSIONES

Del primer bloque experimental, se puede concluir que:

- Bajo las condiciones del prototipo y en todos los experimentos, se logró controlar el Cv en el intervalo de 0 a 1, a través de control manual de apertura y cierre de válvulas, obteniendo con ello validar el diseño económico, como costo de inversión y operación.
- El efecto de la cavitación hidrodinámica resultó favorable sobre la síntesis de biodiésel, ya que fue posible llegar al equilibrio de reacción en 10 min; se obtuvieron conversiones de 94.4%
- Los factores con efecto significativo sobre la variable de respuesta fueron el porcentaje de catalizador (B) y la relación molar (A). Debido a que la presencia de estos favorece a la formación de iones metóxido, que a su vez favorecen a la formación de moléculas de metil ésteres. Es importante, considerar que las concentraciones de los reactivos a emplear deben ser tales que permitan obtener a la conversión deseada de biodiésel.
- El factor tiempo (C) no resultó ser significativo, ya que después 10 minutos no se encontró diferencia significativa sobre la variable de respuesta.
- De acuerdo con el análisis estadístico, las mejores condiciones de operación para la síntesis de biodiésel fueron: 1.5% de catalizador, 1:5.4 de relación molar aceite-metanol y 25 minutos de tiempo. Considerando que, como objetivo específico, se buscó optimizar el consumo de reactivos dentro de los niveles propuestos.
- Se logró obtener un porcentaje de conversión de 94% con los niveles propuestos, por lo que se optimizó el consumo de reactivos de acuerdo con el primer objetivo específico propuesto.

Del segundo bloque experimental, se puede concluir que:

- De acuerdo con el análisis estadístico, los factores con efecto significativo fueron el tiempo (A) y volumen (B). Lo que significa que, al operar a volumen de 60 L, se incrementó el porcentaje de conversión hasta 98%.
- Las mejores condiciones de operación fueron: 3 tubos Venturi, 59.9 L de volumen y 29.9 minutos de tiempo.
- Al operar con un volumen de 60 L, la reacción se vio favorecida con 3 tubos Venturi. Pero, a volumen inferior, no fue necesario operar con los 3 tubos.

- De acuerdo con la superficie de respuesta, el prototipo operando con 3 tubos Venturi puede trabajar con un volumen superior a 60 L. Actualmente, es imposible realizar pruebas con mayor volumen, debido a que la capacidad máxima del tanque es de 60 L.
- Se logró cumplir con el segundo objetivo específico, obteniendo la optimización de operación del prototipo con las variables y niveles propuestos.
- El consumo energético de la síntesis de biodiésel con el prototipo asistido con cavitación hidrodinámica del presente proyecto es inferior, comparado con otros sistemas tales como convencionales y cavitación por ultrasonido. Por ejemplo, resultó un consumo 80% inferior que por ultrasonido. Por lo que se concluye que el emplear el prototipo de la presente investigación, asistido con cavitación hidrodinámica para producción de biodiésel, genera un menor consumo energético.
- Es posible el control de las variables de la intensidad de cavitación (C_v), tales como velocidad y presión de entrada al dispositivo de cavitación, con los que componentes actuales del prototipo, que permiten que el prototipo sea de bajo costo de inversión.
- En términos de rendimiento volumen-espacio, bajo las condiciones en que se llevaron a cabo las pruebas; el presente prototipo mostró un mejor rendimiento en comparación con otras investigaciones. A excepción de la investigación de Bargole et al., (2019) donde el tiempo de reacción óptimo fue de 5 min. Sin embargo, el consumo energético fue 84% mayor que lo determinado en la presente investigación.

10. RECOMENDACIONES

El objetivo principal del presente proyecto determinar aquellas variables de operación que son significativas para la síntesis de biodiésel, así como demostrar que, con el fenómeno de cavitación, es posible disminuir el consumo energético del proceso, para el equipo utilizado en la presente investigación, el cual fue diseñado por personal de CIDETEQ. Sin embargo, es importante mencionar que se deben realizar modificaciones para mejorar el desempeño del prototipo. A continuación, se mencionan ciertas recomendaciones:

- Realizar pruebas con una bomba de menor capacidad, por ejemplo, de 1 HP y, determinar si es posible disminuir más el consumo energético, que lo determinado en el presente proyecto.
- Instalar un tanque de mezcla de mayor volumen que el instalado actualmente. De acuerdo con el análisis del segundo bloque experimental, es posible realizar pruebas con mayor volumen de 60 L con 3 tubos Venturi. De manera que sea posible evaluar el volumen máximo de operación del prototipo.
- Instalar la línea de recirculación en la parte inferior del tanque de mezcla para mejorar el mezclado de los reactivos y, así favorecer en el tiempo de reacción de biodiésel.

Con el seguimiento de estas recomendaciones se podría reducir en mayor medida el consumo energético y mejorar el diseño del prototipo.

ANEXOS

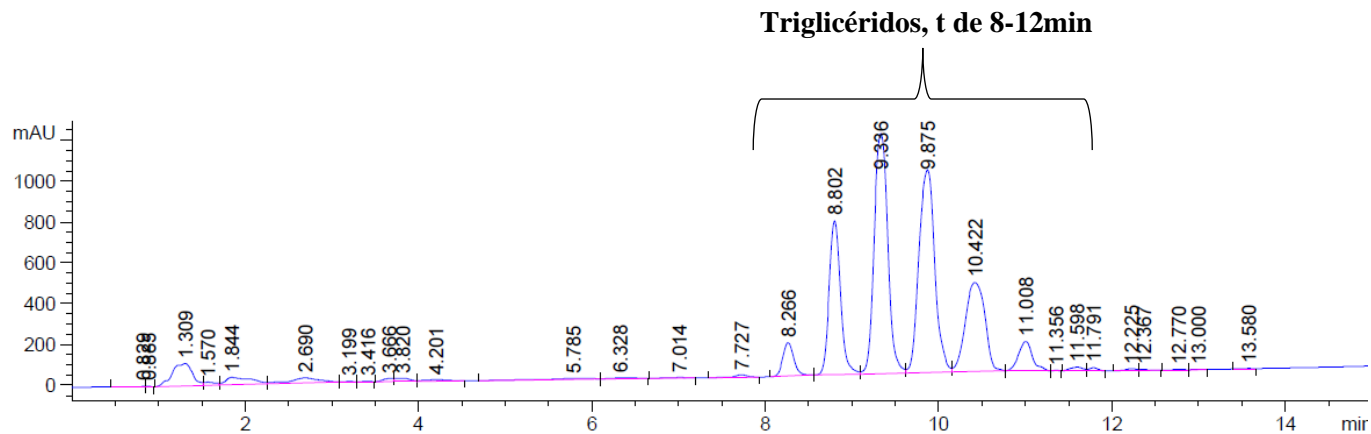


Figura a. 1 Cromatograma de aceite de soya marca Imperial

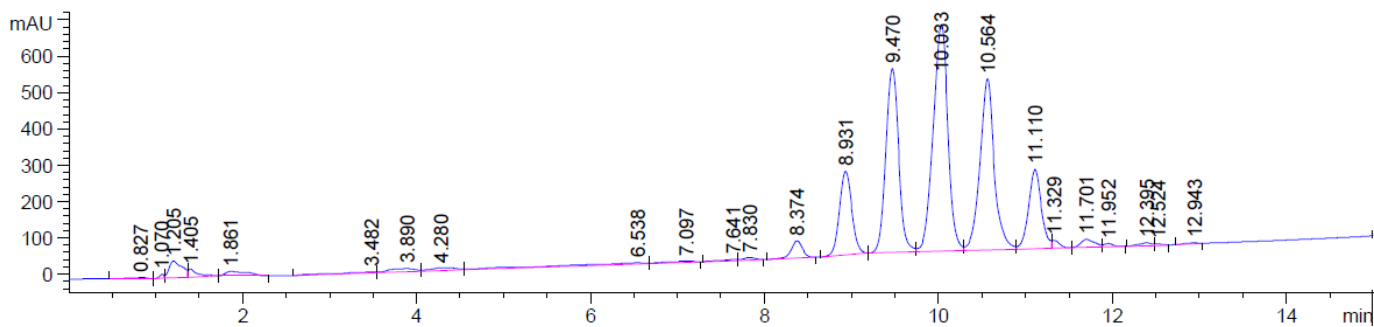


Figura a. 2 Cromatograma de aceite gastado comestible

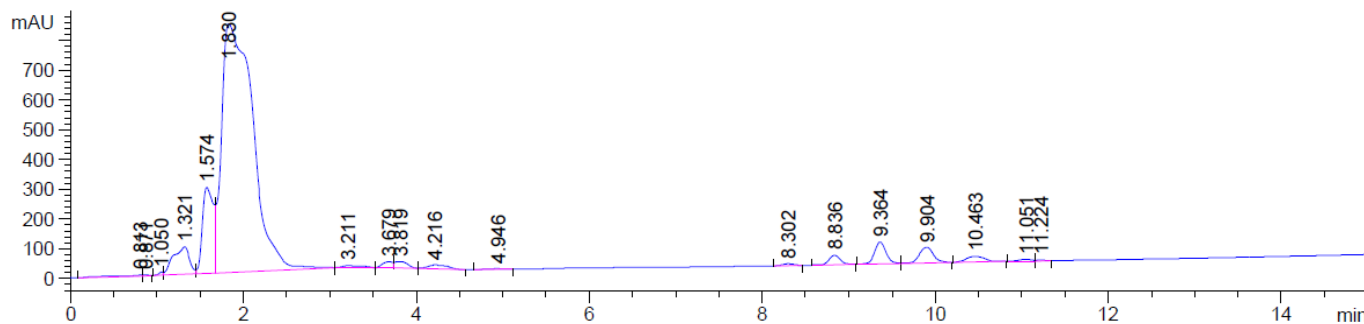


Figura a. 3 Cromatograma de muestra de biodiésel, prueba 11, t=30 min; bloque I

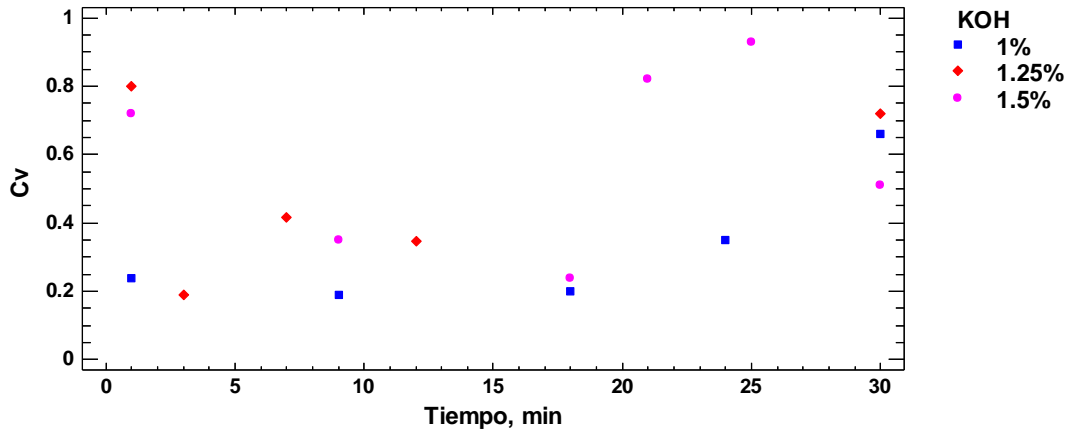


Figura a. 4. Cv para pruebas relación molar 1:4; Bloque experimental I

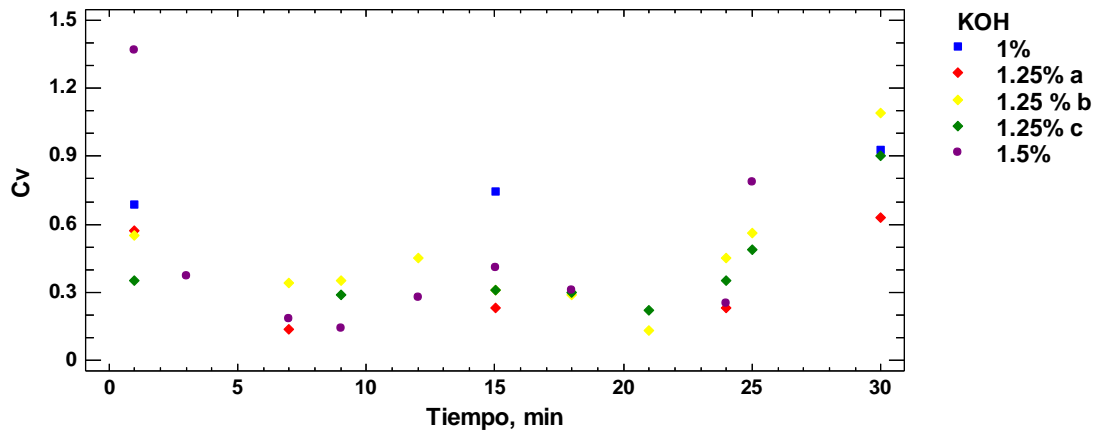


Figura a. 5. Cv para pruebas relación molar 1:5; de Bloque experimental I

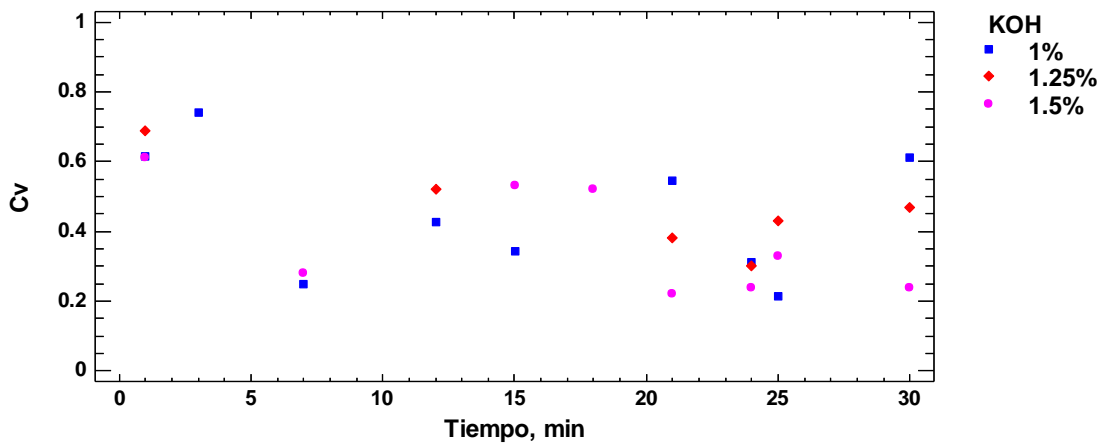


Figura a. 6. Cv para pruebas relación molar 1:6; de Bloque experimental I

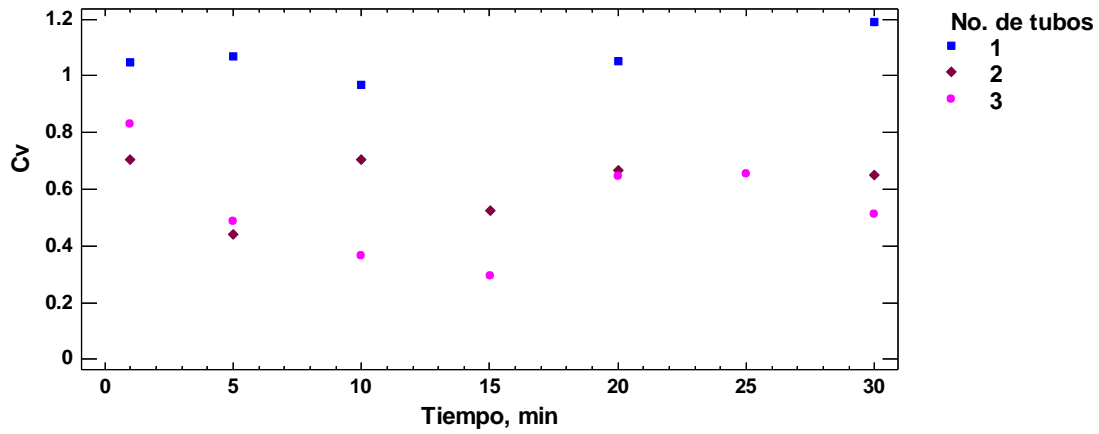


Figura a. 7. C_v para pruebas en $V=20$ L; bloque experimental II

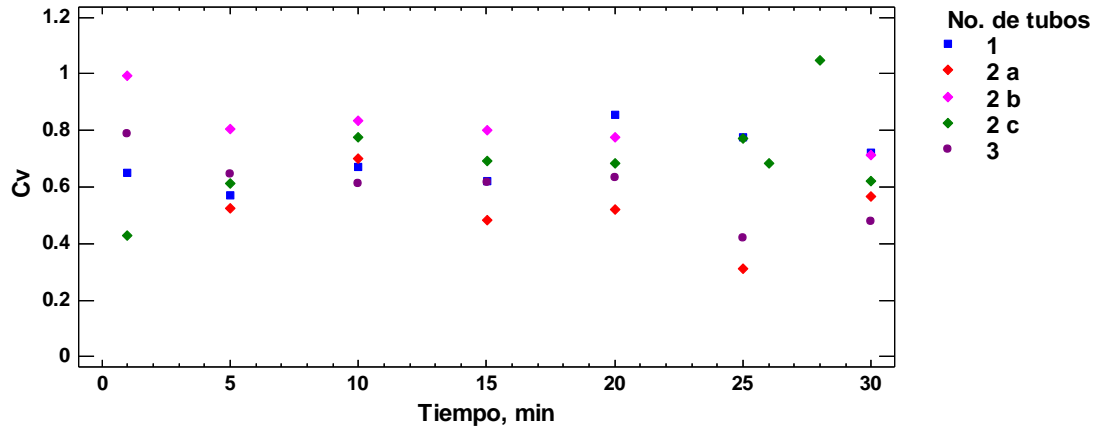


Figura a. 8. C_v para pruebas en $V=40$ L; bloque experimental II

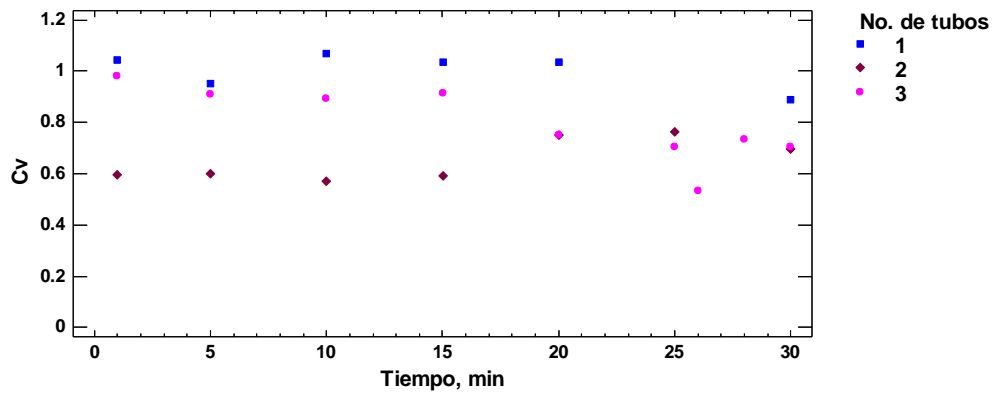


Figura a. 9. C_v para pruebas en $V=60$ L; bloque experimental II

Estas páginas fueron eliminadas debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública 2021, y con el Artículo 116 de la Ley General de Transparencia y Acceso a la Información Pública 2021.

BIBLIOGRAFÍA

- Aizarani, J. (2022, July). *Leading biodiesel producers worldwide in 2021, by country*. <https://www.statista.com/statistics/271472/biodiesel-production-in-selected-countries/#:~:text=The%20United%20States%20and%20Brazil,Gallons%20of%20biodiesel%20by%202025>.
- Alsaiani, M., Bokhari, A., Chuah, L. F., Mubashir, M., Harraz, F. A., Almohana, A. I., Show, P. L., Awasthi, M. K., & Rizk, M. A. (2023). Synthesis of methyl esters from *Hippophae rhamnoides* via pilot scale hydrodynamic cavitation intensification reactor. *Renewable Energy*, *205*, 238–247. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.01.072>
- Alva, G. (2020). *Mercado de Biodiésel en México*. Tesis para obtener el grado de Maestría en Economía, Universidad Autónoma Metropolitana. <http://hdl.handle.net/11191/7118>
- American Society for Testing and Materials. (2020). *ASTM D6751-20a. Standard Specification for Biodiesel Fuel Blend Stock (B100) for Middle Distillate Fuels*. <https://doi.org/10.1520/D6751-20A>
- Ávila, E., García, J., Valtierra, E., García, R., & Hoyos, G. (2018). Producción de Biodiésel derivado de la *Jatropha*: Un estudio de competitividad en el estado de Chiapas, México. *Rev. Fitotec. Méx.*, *41*(4), 461–468.
- Avramović, J. M., Stamenković, O. S., Todorović, Z. B., Lazić, M. L., & Veljković, V. B. (2010). The optimization of the ultrasound-assisted base-catalyzed sunflower oil methanolysis by a full factorial design. *Fuel Processing Technology*, *91*(11), 1551–1557. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2010.06.001>
- Bargole, S., George, S., & Kumar Saharan, V. (2019). Improved rate of transesterification reaction in biodiesel synthesis using hydrodynamic cavitating devices of high throat perimeter to flow area ratios. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, *139*, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2019.03.012>
- Bokhari, A., Chuah, L. F., Yusup, S., Klemeš, J. J., Akbar, M. M., & Kamil, R. N. M. (2016). Cleaner production of rubber seed oil methyl ester using a hydrodynamic cavitation: optimisation and parametric study. *Journal of Cleaner Production*, *136*, 31–41. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.091>
- Cabrera, D. A., Romero, A., Montes, R. A., Rios, L. J., & Leyva, Z. C. (2022). Producción de Biodiésel en México: Estado Actual y perspectivas. *CienciAcierta*, *72*.
- Canabarro, N. I., Silva-Ortiz, P., Nogueira, L. A. H., Cantarella, H., Maciel-Filho, R., & Souza, G. M. (2023). Sustainability assessment of ethanol and biodiesel production in Argentina, Brazil, Colombia, and Guatemala. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *171*. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.113019>
- CEDRSSA. (2020). *La producción y comercio de biocombustibles en México y en el mundo*.
- Chitsaz, H., Omidkhah, M., Ghobadian, B., & Ardjmand, M. (2018). Optimization of hydrodynamic cavitation process of biodiesel production by response surface methodology. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *6*(2), 2262–2268. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.02.047>
- Chuah, L. F., Klemeš, J. J., Yusup, S., Bokhari, A., & Akbar, M. M. (2017). A review of cleaner intensification technologies in biodiesel production. *Journal of Cleaner Production*, *146*, 181–193. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.05.017>

- Chuah, L. F., Klemeš, J. J., Yusup, S., Bokhari, A., Akbar, M. M., & Chong, Z. K. (2017). Kinetic studies on waste cooking oil into biodiesel via hydrodynamic cavitation. *Journal of Cleaner Production*, 146, 47–56. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.187>
- CRE. (2023). *Precios de gasolinas y diésel reportados por los permisionarios*. <https://www.cre.gob.mx/ConsultaPrecios/GasolinasyDiesel/GasolinasyDiesel.html>
- Crudo, D., Bosco, V., Cavaglià, G., Grillo, G., Mantegna, S., & Cravotto, G. (2016). Biodiesel production process intensification using a rotor-stator type generator of hydrodynamic cavitation. *Ultrasonics Sonochemistry*, 33, 220–225. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.05.001>
- Díez, D., Urueña, A., Barrios, C., & Antolín, G. (2019). Valorization of Rendering Fats to Produce Biodiesel by Single and Multi Orifice Plate Cavitation Reactor. *Waste and Biomass Valorization*, 10(12), 3773–3780. <https://doi.org/10.1007/s12649-019-00676-z>
- DOF. (2018, October 22). *Lineamientos por los que se establecen las especificaciones de calidad y características para etanol anhidro (bioetanol), biodiésel y bioturbosina puros*. Diario Oficial de La Federación. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5541659&fecha=22/10/2018#gsc.tab=0
- Domínguez, J. (2018). La cavitación hidrodinámica. *Ciencia Universitaria*, 16(1).
- Ferreira, J. L. (2010). *Producción de biodiesel a partir de residuos de aceites vegetales gastados procedentes de la industria restaurantera* [Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias Ambientales]. Universidad Autónoma de Querétaro.
- Fogler, H. S. (2001). *Elementos de Ingeniería de las Reacciones Químicas* (3°). Prentice Hall.
- Fundación CARTIF. (2017). *Diseño y construcción de prototipos: Producción de biodiesel (B1.3)*.
- Garibay, A., Vazquez, R., Sánchez, M. del P., Serrano, L., & Martínez, A. (2009). Biodiesel a partir de microalgas. *BioTecnología*, 13(3). <https://www.researchgate.net/publication/268207621>
- Ge, M., Sun, C., Zhang, G., Coutier-Delgosha, O., & Fan, D. (2022). Combined suppression effects on hydrodynamic cavitation performance in Venturi-type reactor for process intensification. *Ultrasonics Sonochemistry*, 86. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.106035>
- Ge, M., Zhang, G., Petkovšek, M., Long, K., & Coutier-Delgosha, O. (2022). Intensity and regimes changing of hydrodynamic cavitation considering temperature effects. *Journal of Cleaner Production*, 338. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130470>
- Ghayal, D., Pandit, A. B., & Rathod, V. K. (2013). Optimization of biodiesel production in a hydrodynamic cavitation reactor using used frying oil. *Ultrasonics Sonochemistry*, 20(1), 322–328. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2012.07.009>
- Gogate, P. R. (2008a). Cavitation reactors for process intensification of chemical processing applications: A critical review. In *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* (Vol. 47, Issue 4, pp. 515–527). <https://doi.org/10.1016/j.cep.2007.09.014>
- Gogate, P. R. (2008b). Cavitation reactors for process intensification of chemical processing applications: A critical review. In *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* (Vol. 47, Issue 4, pp. 515–527). <https://doi.org/10.1016/j.cep.2007.09.014>
- Gogate, P. R., & Pandit, A. B. (2000). Engineering Design Methods for Cavitation Reactors II: Hydrodynamic Cavitation. *AIChE Journal*, 46(8), 1641–1649.

- Günay, M. E., Türker, L., & Tapan, N. A. (2019). Significant parameters and technological advancements in biodiesel production systems. In *Fuel* (Vol. 250, pp. 27–41). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.03.147>
- Gutiérrez, L. F., Arias, S., & Cardona, D. F. (2019). Cavitación Hidrodinámica: un Enfoque desde la Ingeniería y la Agroindustria Hydrodynamic Cavitation: Engineering and Agribusiness Approach. *Scientia Et Technica*, 24(2), 283–304.
- Gutiérrez Pulido, H., & de la Vara Salazar, R. (2008a). *Análisis y diseño de experimentos* (Segunda edición). McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. de C.V. www.FreeLibros.org
- Gutiérrez Pulido, H., & de la Vara Salazar, R. (2008b). *Análisis y diseño de experimentos* (Segunda Edición). McGraw Hill-Interamericana, S.A de C.V. www.FreeLibros.org
- Indonesian Palm Oil Association. (2021). *Indonesia becomes world's largest producer of biodiesel*. <https://Gapki.Id/En/News/20107/Indonesia-Becomes-Worlds-Largest-Producer-of-Biodiesel#:~:Text=Indonesia%20produced%20the%20biodiesel%20with,Largest%20producer%20of%20palm%20oil>.
- INECC. (2018a). *ACCIONES DE MITIGACIÓN PROPUESTAS HACIA 2030. Resumen informativo*. www.gob.mx/inecc
- INECC. (2018b). *INVENTARIO NACIONAL DE EMISIONES DE GASES Y COMPUESTOS DE EFECTO INVERNADERO 1990-2015*. www.gob.mx/inecc
- Khan, T. A., Khan, T. A., & Kumar Yadav, A. (2022). A hydrodynamic cavitation-assisted system for optimization of biodiesel production from green microalgae oil using a genetic algorithm and response surface methodology approach. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(32), 49465–49477. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-20474-w>
- Knothe, G. (2010). Calidad del combustible biodiésel y la norma astm Biodiesel fuel quality and the astm standard Resumen Abstract Autor Palabras clave. *Palmas*, 31(2).
- Kolhe, N. S., Gupta, A. R., & Rathod, V. K. (2017). Production and purification of biodiesel produced from used frying oil using hydrodynamic cavitation. *Resource-Efficient Technologies*, 3(2), 198–203. <https://doi.org/10.1016/j.reffit.2017.04.008>
- Lapuerta, M., Armas, O., & Rodríguez, J. (2008). Effect of Biodiesel Fuels on Diesel Engine Emissions. *Progress in Energy and Combustion Science*, 34(2), 198–223.
- Lertsathapornsuk, V., Pairintra, R., Aryasuk, K., & Krisnangkura, K. (2008). Microwave assisted in continuous biodiesel production from waste frying palm oil and its performance in a 100 kW diesel generator. *Fuel Processing Technology*, 89(12), 1330–1336. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2008.05.024>
- Maddikeri, G. L., Gogate, P. R., & Pandit, A. B. (2014). Intensified synthesis of biodiesel using hydrodynamic cavitation reactors based on the interesterification of waste cooking oil. *Fuel*, 137, 285–292. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.08.013>
- Meza, D. (2020). *Diseño y optimización de una planta piloto de elaboración de biodiesel usando cavitación ultrasónica*. CIATEQ, A.C.
- Pacific Biodiesel. (2019). *Hystory of Biodiesel Fuel*. <https://www.Biodiesel.Com/History-of-Biodiesel-Fuel/>.
- Pal, A., Verma, A., Kachhwaha, S. S., & Maji, S. (2010). Biodiesel production through hydrodynamic cavitation and performance testing. *Renewable Energy*, 35(3), 619–624. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.08.027>

- Patil, A. D., & Baral, S. S. (2021). Process intensification of thumba methyl ester (Biodiesel) production using hydrodynamic cavitation. *Chemical Engineering Research and Design*, *171*, 277–292. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2021.05.007>
- Pleanjai, S., Gheewala, S. H., & Garivait, S. (2009). Greenhouse gas emissions from production and use of used cooking oil methyl ester as transport fuel in Thailand. *Journal of Cleaner Production*, *17*(9), 873–876. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2009.01.007>
- REN, 21. (2022). *Renewables 2022*.
- Rincón, L. E., Jaramillo, J. J., & Cardona, C. A. (2014). Comparison of feedstocks and technologies for biodiesel production: An environmental and techno-economic evaluation. *Renewable Energy*, *69*, 479–487. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.03.058>
- Rodríguez, A., Hernández, C., & Rodríguez, F. (2022). Optimización de un Reactor de escala piloto para la Producción de Biodiésel utilizando Cavitación Hidrodinámica. *SNIQBA*, *1*(2), 17–23. <http://sniqba.com.mx/revsniqba-2022-02-07/>
- Samuel, O. D., Okwu, M. O., Amosun, S. T., Verma, T. N., & Afolalu, S. A. (2019). Production of fatty acid ethyl esters from rubber seed oil in hydrodynamic cavitation reactor: Study of reaction parameters and some fuel properties. *Industrial Crops and Products*, *141*. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111658>
- SENER. (2022). *Balance Nacional de Energía, 2021*. <http://sie.energia.gob.mx>
- Tabatabaei, M., Aghbashlo, M., Dehghani, M., Panahi, H. K. S., Mollahosseini, A., Hosseini, M., & Soufiyan, M. M. (2019). Reactor technologies for biodiesel production and processing: A review. In *Progress in Energy and Combustion Science* (Vol. 74, pp. 239–303). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2019.06.001>
- Thakkar, K., Kachhwaha, S. S., & Kodgire, P. (2022). Multi-response optimization of transesterification reaction for biodiesel production from castor oil assisted by hydrodynamic cavitation. *Fuel*, *308*. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121907>
- U.S. Energy Information Administration. (2021, February 26). *PETROLEUM & OTHER LIQUIDS*. <https://www.eia.gov/biofuels/biodiesel/production/>.
- van Gerpen, J. (2019, April 3). *Hystory of Biodiesel*. <https://Farm-Energy.Extension.Org/HistoryofBiodiesel/#:~:Text=In%20the%20United%20States%2C%20biodiesel,And%20is%20still%20in%20use.>
- Smith, J., Petrovic, P., Rose, M., De Souza, C., Muller, L., Nowak, B., & Martinez, J. (2021). Placeholder Text: A Study. *The Journal of Citation Styles*, *3*. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2021.06.001>
- Yu, X., Wen, Z., Lin, Y., Tu, S. T., Wang, Z., & Yan, J. (2010). Intensification of biodiesel synthesis using metal foam reactors. *Fuel*, *89*(11), 3450–3456. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.06.011>