

## OPTIMIZACIÓN DE UN REACTOR DE ESCALA PILOTO PARA LA PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL UTILIZANDO CAVITACIÓN HIDRODINÁMICA

### OPTIMIZATION OF A PILOT SCALE REACTOR FOR BIODIESEL PRODUCTION USING HYDRODYNAMIC CAVITATION

*Alejandra Rodríguez Alfaro\*, Carlos Hernández Benítez, Francisco Javier Rodríguez Valadez*

*Subdirección de Biotecnología y Electroquímica Ambiental. Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica, S.C., Parque Tecnológico Querétaro s/n, Sanfandila, Pedro Escobedo, Querétaro, 76703, México*

*E-mail: [arodrigueza@cideteq.mx](mailto:arodrigueza@cideteq.mx)*

**Received September 28, 2022; Revised: October 31, 2022; Accepted November 02, 2022**

#### **Resumen**

En esta investigación se determinaron las condiciones óptimas de producción de biodiésel a partir de aceite de soya y metanol, en un reactor a escala piloto asistido por un dispositivo de cavitación hidrodinámica (CH); el dispositivo de cavitación consiste en un tubo Venturi de 2 mm de diámetro en la contracción; el cual está instalado dentro del prototipo de escala piloto. Las condiciones óptimas de operación para la síntesis de biodiésel obtenidas por el ANOVA, fueron al aplicar relación molar aceite:metanol de 1:5.4, porcentaje de catalizador (% KOH) de 1.5 %m/m, en un tiempo de reacción de 25 min. El máximo porcentaje de conversión a biodiésel observado y estimado fue de 94% y 94.4%, respectivamente. Las condiciones experimentales de presión, flujo y temperatura fueron controladas para obtener un número de cavitación ( $C_v$ ) entre 0 y 1. El volumen total de mezcla para cada experimento (aceite y metanol) fue de 20 L, es decir "volumen de operación". La conversión de triglicéridos fue determinada mediante el uso de cromatografía de líquidos de alta resolución (HPLC). Durante cada experimento no se aplicó agitación mecánica, así como control de temperatura. El consumo energético fue de 17 Wh/kg, es inferior en comparación con la producción convencional de biodiésel.

**Palabras clave:** biodiésel, cavitación hidrodinámica, número de cavitación, Venturi, optimización

#### **Abstract**

In this research, the optimum conditions to produce biodiesel from soybean oil and methanol were determined in a pilot-scale prototype assisted by a hydrodynamic cavitation device (HC), this device consists of a 2 mm diameter Venturi tube in the contraction, which is installed inside the prototype. The optimal operating conditions for the synthesis of biodiesel obtained by ANOVA were applying a molar ratio of oil: methanol of 1:5.4, percentage of catalyst (% KOH) of 1.5% m/m, in a reaction time of 25 min. The maximum percentage of conversion to biodiesel observed and estimated was 94% and 94.4%, respectively. The experimental conditions, such as pressure, flow, and temperature were controlled to obtain a cavitation number ( $C_v$ ) between 0 and 1. The total volume of mixture for each experiment (oil and methanol) was 20 L, it means "operational volume". The triglycerides conversion was determined by high-performance liquid chromatography (HPLC). During each experiment, no mechanical agitation was applied, as well as temperature control. The energy consumption was 17 Wh/kg, lower than the conventional method for biodiesel production.

**Palabras clave:** biodiesel, Hydrodynamic cavitation, cavitation number, Venturi, optimization

## Introducción

El biodiesel es un combustible 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 biodiesel se lleva a cabo por transesterificación de aceites vegetales con un alcohol y, en presencia de un catalizador (alcalino, ácido, entre otros). El tiempo de reacción 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 (Yu et al., 2010). Sin embargo, la principal desventaja en la producción de biodiesel es la escasa disponibilidad de materia prima en México y, los altos costos de producción. Actualmente, el costo de producción de biodiesel se encuentra entre 10 y 50% por encima del precio de venta del diésel fósil (Zhang et al., 2003).

Debido al 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 biodiesel, por las diversas ventajas que posee. La aplicación de biodiesel 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, partículas, hidrocarburo total y compuestos polis aromáticos, conocidos por sus efectos tóxicos sobre la salud humana (Lapueta et al., 2008). También, se han desarrollado tecnologías con posibilidad de ser económicamente viables en la producción de biodiesel, tales como reactores asistidos por cavitación ultrasónica e hidrodinámica (Gogate, 2008; Ghayal et al., 2013; Pal et al., 2010; Chuah et al., 2017).

La cavitación es un fenómeno que al aplicar una alta concentración de energía sobre un líquido se forman cavidades (burbujas), que posteriormente crecen e implotan; o bien se puede definir como la ruptura de un medio líquido a bajas presiones (Gogate, 2008). 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.

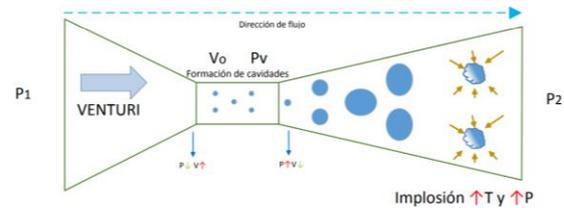


Figura 1. Proceso de formación de cavidades por cavitación hidrodinámica

En la Figura 1, se muestra un ejemplo de un líquido atravesando por un tubo Venturi, que al pasar por la contracción; se generan las cavidades.

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, 2008).

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

Donde  $P_d$  es la presión en la contracción;  $P_v$  es la presión de vapor del líquido;  $v_o$  es la velocidad del líquido en la contracción y  $\rho$  es la densidad del líquido. Idealmente, el  $C_v$  debe mantenerse entre 0 a 1 para efectos positivos en sobre la reacción de transesterificación. A  $C_v > 1$ , las cavidades no implotan (Gogate et al, 2000).

En el presente trabajo presentan los resultados de la producción de biodiesel a partir de aceite de soya y metanol, con hidróxido de potasio (KOH) como catalizador. La síntesis de biodiesel se llevó a cabo por medio de una reacción de transesterificación asistida con cavitación hidrodinámica. Los experimentos se llevaron a cabo en un prototipo a escala piloto con un volumen de trabajo de 20 L; además permite controlar el  $C_v$  entre 0 y 1. El propósito del presente trabajo de investigación es desarrollar 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. Además, se optimizaron los consumos de materia prima; tales como relación molar aceite:metanol y porcentaje de catalizador; disminuyendo el tiempo de reacción.

## Sección Experimental

El reactor a escala piloto fue construido para operar en lote (Figura 2). Los principales componentes son: una bomba de capacidad de 2 HP; tubería de recirculación; tanque de mezcla y tres tubos Venturi de 2 mm de diámetro de contracción. Sin embargo, en el presente trabajo, únicamente se empleó un tubo como dispositivo de cavitación.

Los reactivos empleados fueron aceite de soya de comercial (sin usar); metanol grado industrial; como catalizador KOH, grado reactivo (Macron).

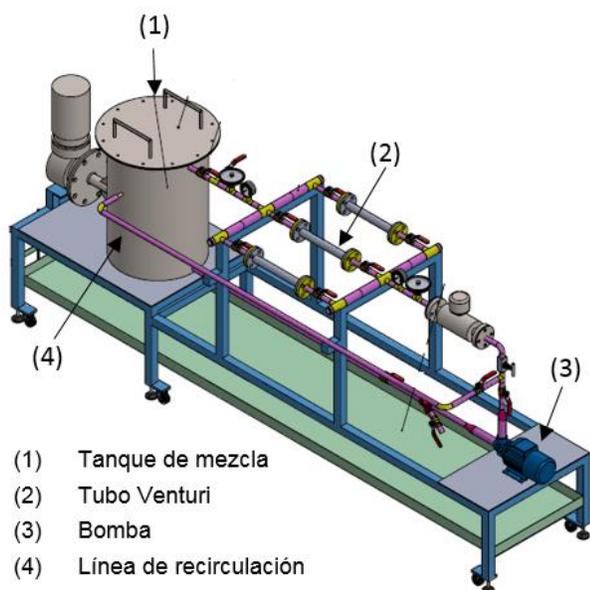


Figura 2. Reactor a escala piloto

Mediante un diseño de experimentos (DOE) de superficie de respuesta Box-Behnken, se evaluó el efecto de tres factores tales como: relación molar aceite:metanol, porcentaje de catalizador (%m/m KOH) y tiempo; sobre el porcentaje de conversión de triglicéridos. Los datos experimentales fueron ajustados por medio de un software para análisis estadístico. En la Tabla 1 se mencionan los datos experimentales empleados para el DOE.

En cada experimento, los reactivos se introdujeron en el tanque de mezcla (metanol, catalizador y aceite). La mezcla de un volumen de 20 L pasó por el tubo Venturi continuamente durante 30 minutos; tomando muestras a los 2, 4, 6, 8, 10, 16, 20 y 30 minutos. A fin de favorecer la homogenización de reactivos; el fluido fue recirculado por toda la línea hidráulica regresando al tanque de mezcla. Por lo que no se aplicaron agitación mecánica ni calor externos. Por medio de válvulas se controló el flujo de recirculación

y la presión de entrada al dispositivo de cavitación. Las condiciones de operación en cada experimento se muestran en la Tabla 2, las cuales fueron controladas con la finalidad de mantener el Cv entre 0 y 1 durante cada experimento. Por otro lado, el Cv fue calculado con la ecuación 1.

Tabla 1. Factores y niveles propuestos para el DOE

Factor	Nivel bajo	Nivel medio	Nivel alto
A: Relación molar aceite:metanol, mol:mol	1:4	1:5	1:6
B: porcentaje de catalizador KOH, %m/m	1	1.25	1.5
C: Tiempo, min	10	20	30

Tabla 2. Condiciones experimentales

Parámetro	Valor
Presión de entrada P, psi	38 a 60
Temperatura T, °C	18 a 40
Flujo Q, L/min	2 a 5.3
Cv	0 a 1
Tiempo de reacción, min	30
Volumen de reacción, L	20

Para detener la reacción de transesterificación, cada muestra recolectada fue neutralizada con una solución de ácido clorhídrico (HCl, JT Baker) 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  $\mu\text{m}$  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 % de conversión de triglicéridos se llevó a cabo usando un equipo de HPLC (Agilent 1260 Series con una columna C18); siguiendo el método propuesto por Avramović et al., (2010).

## Resultados y Discusión

El análisis de datos experimentales se realizó mediante la metodología de superficie de respuesta a fin de determinar cuáles factores tienen mayor efecto sobre la variable de respuesta. En la Tabla 3, se puede observar el ANOVA obtenido a partir de las corridas planteadas. Un factor es significativo si el

valor P es inferior a 0.05, mientras que el valor de F es mayor. Por lo que de acuerdo con la Tabla 3, los factores más significativos fueron porcentaje de catalizador ( $P=0.0003$ ) y relación molar ( $P=0.0092$ ). Mientras que, el tiempo y las interacciones entre factores no resultaron ser significativas.

Los resultados descritos anteriormente, se pueden observar mediante la gráfica de superficie de respuesta de la Figura 3, la cual muestra que al incrementar la relación molar y porcentaje de catalizador; se incrementa el porcentaje de conversión. De acuerdo con los resultados, fue posible determinar las condiciones óptimas de síntesis de biodiésel, los cuales fueron: 1:5.4 de relación molar; 1.5% de catalizador y 25 minutos de tiempo de reacción. Los resultados se muestran en la Tabla 4.

Tabla 3. Análisis de varianza

Fuente	Suma de cuadrados	g.l.	Cuadrado medio	Razón F	Valor P
A	21.9784	1	21.9784	16.92	0.0092
B	96.6745	1	96.6745	74.43	0.0003
C	4.69711	1	4.69711	3.62	0.1156
A <sup>2</sup>	5.77693	1	5.77693	4.45	0.0887
AB	1.83602	1	1.83602	1.41	0.2878
AC	0.912025	1	0.912025	0.7	0.4402
B <sup>2</sup>	4.37343	1	4.37343	3.37	0.126
BC	0.0121	1	0.0121	0.01	0.9269
C <sup>2</sup>	2.9797	1	2.9797	2.29	0.1903
Error total	6.49399	5	1.2988		
Total (Corr.)	144.033			$R^2=95.49\%$ $R^2$ ajustada=87.37%	

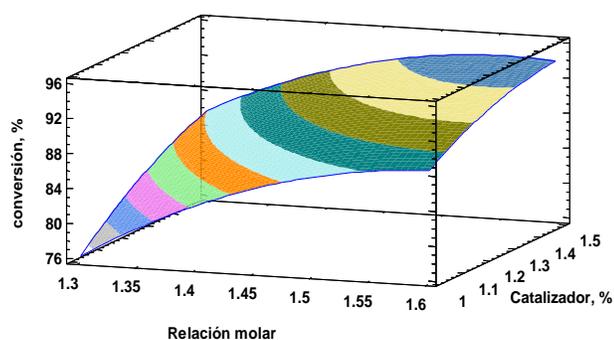


Figura 3. Superficie de respuesta

En general, en la reacción de transesterificación el porcentaje de conversión de triglicéridos a metil ésteres es dependiente del porcentaje de catalizador empleado (Chuah et al, 2017). Las curvas de conversión de triglicéridos con respecto al tiempo se muestran en las figuras 4, 5 y 6. En dichas figuras se puede observar que los mayores % de conversión se obtuvieron en aquellas pruebas donde el porcentaje de catalizador fue el más alto (1.5% KOH m/m). Esto, debido a que, al incrementar el porcentaje de catalizador, se incrementa la generación de iones metóxido que reaccionan con la molécula del triglicérido; favoreciendo a la formación de metil ésteres durante el mecanismo de reacción. También, se atribuye a que, durante la reacción de transesterificación se llevan a cabo reacciones secundarias; donde el catalizador alcalino reacciona con los ácidos grasos libres presentes en el aceite comercial; dando lugar a la formación de jabón sódico, donde una fracción del catalizador es consumida. Por lo tanto, a mayor cantidad de álcali, resulta mayor remanente para la síntesis de biodiésel. Por otro lado, durante los primeros 10 minutos, se observa que la velocidad inicial de reacción es mayor conforme se incrementó el porcentaje de catalizador; aumentando a la conversión. En todos los experimentos, a los 10 minutos de reacción se observa que se llegó al punto de equilibrio de la reacción.

Tabla 4. Condiciones óptimas de síntesis de biodiesel

Factor	Bajo	Alto	Óptimo
Relación molar	1.4	1.6	1.54
Catalizador, %	1	1.5	1.5
Tiempo, min	10	30	25
Conversión, %	94.44 %		

La relación molar aceite:alcohol es uno de los factores más importantes, ya que en la estequiometría de la reacción de transesterificación, se requiere 1 mol de triglicérido por 3 moles de alcohol; para producir 3 moles de metil éster y 1 mol de glicerol. Generalmente en la síntesis de biodiésel, se propone que el alcohol sea el reactivo en exceso, o bien, emplear una relación molar superior a 1:4 aceite:alcohol.

Analizando el efecto de la relación molar aceite:metanol se observa que, durante los minutos 2 y 4; los porcentajes de conversión determinados fueron ligeramente superiores con relación molar 1:4 y 1:5, que con 1:6. Los valores obtenidos hasta el minuto 10 se pueden observar en la Tabla 5.

Este efecto, posiblemente ocurrió, ya que al tener menor volumen de metanol y, con el efecto de la cavitación; se aumentó la transferencia de masa entre los dos líquidos inmiscibles. Por lo tanto, la velocidad inicial de reacción se incrementó, ya que es considerada como la etapa limitante.

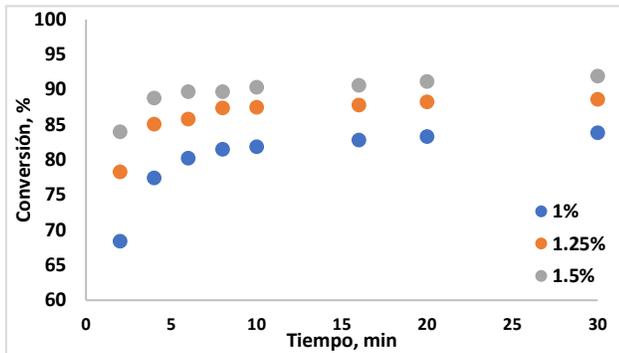


Figura 4. Conversión de triglicéridos a relación molar 1:4

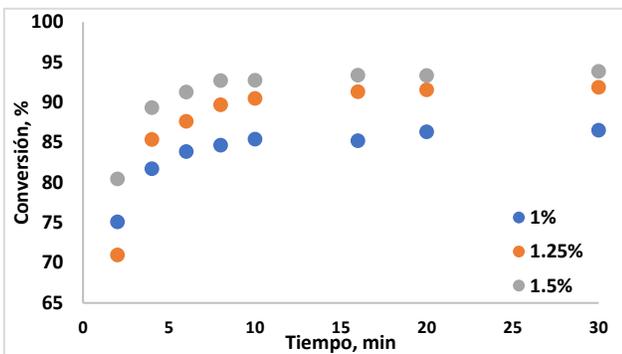


Figura 5. Conversión de triglicéridos a relación molar 1:5

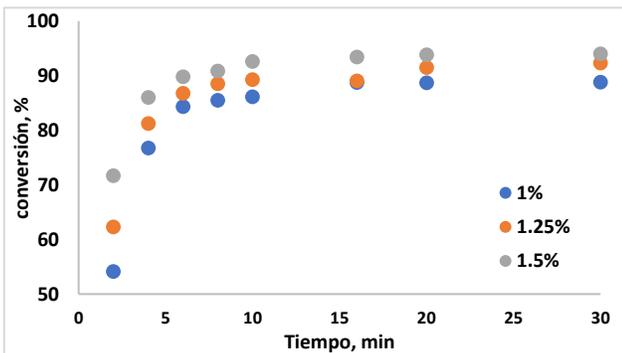


Figura 6. Conversión de triglicéridos a relación molar 1:6

Sin embargo, al transcurrir 10 minutos, los mayores porcentajes de conversión se obtuvieron con la relación molar 1:5 y 1:6; siendo 94% el máximo valor, con 1.5% de catalizador empleado. El mismo efecto

fue observado por Chuah et al., (2017), donde evaluó la síntesis de biodiésel con relación molar 1:4 a 1:7; obteniendo el valor óptimo con relación molar 1:6. Debido que, a menor cantidad de metanol, la formación de metil ésteres se limita, ya que este reactivo también se consume en la formación de glicerol. Pero, al aplicar una relación molar superior a 1:6, ya no es un efecto significativo sobre la conversión.

Tabla 5. Conversión de triglicéridos

Relación molar, mol:mol	Catalizador, %	Muestra, min				
		2	4	6	8	10
1:4	1	68.42	77.45	80.27	81.53	81.90
	1.25	78.33	85.11	85.83	87.41	87.54
	1.5	84.02	88.85	89.73	89.72	90.39
1:5	1	75.11	81.74	83.88	84.68	85.43
	1.25	71.00	85.39	87.65	89.70	90.50
	1.5	80.47	89.35	91.29	92.74	92.76
1:6	1	54.14	76.71	84.33	85.50	86.10
	1.25	62.25	81.24	86.75	88.53	89.24
	1.5	71.68	85.98	89.80	90.81	92.61

En la Tabla 6, se muestran los Cv promedio determinados por cada experimento, así como el porcentaje de conversión máximo. Como se mencionó anteriormente, para lograr obtener Cv entre 0 a 1; se controlaron las variables independientes que impactan sobre el Cv. La presión de entrada ( $P_d$ ) se mantuvo en 30 a 60 psi; la temperatura de 18 a 40 °C; y el flujo volumétrico de recirculación de 2 a 5.3 L/min; tal como se mencionan en la Tabla 2.

Tabla 6. Cv promedio obtenidos

Prueba	relación molar, mol:mol	catalizador, %	Cv	Conversión, %
1	5,1	1	0.79	86.52
2	5,1	1.25	0.39	86.7
3	4,1	1	0.33	83.90
4	6,1	1	0.45	88.80
5	4,1	1.5	0.60	91.95
6	6,1	1.5	0.37	94.0
7	4,1	1.25	0.49	88.66
8	6,1	1.25	0.46	92.27
9	5,1	1.25	0.45	91.13
10	5,1	1.5	0.34	93.86
11	5,1	1.25	0.40	91.06

De acuerdo con el comportamiento del Cv durante los experimentos, se observó que conforme se aumenta la presión de entrada ( $P_a$ ); manteniendo la velocidad constante; el Cv aumenta. Mientras que si se aumenta la velocidad y la presión se mantiene constante; el Cv disminuye. Por lo que se debió realizar un arreglo de válvulas del prototipo entre presión y flujo volumétrico; a fin de mantener las variables en el intervalo deseado (Tabla 2). El Cv esperado debe ser inferior a 1 ( $C_v < 1$ ) ya que se asume que la implosión de las cavidades es más violenta; favoreciendo en la ruptura de la interfaz entre el aceite y el metanol, además de favorecer a la transferencia de masa entre reactivos (Bargole et al., 2019). Por otro lado, durante el fenómeno de cavitación se crean regiones locales altamente energéticas; es decir debido a la recuperación de presión (aproximadamente 1000 atm); se genera temperatura del orden de 5000 K, seguido de la generación de turbulencia en el líquido (Gutiérrez et al., 2019). Los fenómenos mencionados anteriormente, favorecen en la disminución del tiempo de reacción, así como los costos operativos; ya que no es necesario agregar calor externo para mantener una temperatura entre 50 a 60°C; tal como se realiza en los métodos convencionales de producción de biodiésel.

Anteriormente, en las actividades desarrolladas por Coronado et al., (2018), se compararon los datos experimentales de dos pruebas; una con cavitación hidrodinámica (tubo Venturi de 2 mm de diámetro) y la segunda sin cavitación, denominado "blanco"; es decir, el líquido no pasó por el tubo Venturi. Ambas pruebas se desarrollaron en el mismo prototipo, bajo condiciones similares de catalizador (2% KOH m/m); relación molar (6:1); temperatura (50°C) y presión (72 psi). Transcurridos 10 min, se determinaron 91% y 96% de conversión para las pruebas blanco y con CH, respectivamente. En comparación con los resultados del presente trabajo; en la prueba con relación molar 1:6 y 1.5% de catalizador; el valor de conversión de triglicéridos determinado fue de 92.61%; es decir, se comprueba que existe un efecto significativo positivo en la aplicación de CH sobre la síntesis de biodiésel.

El fenómeno de cavitación favorece en la reducción del consumo energético, ya que se comprobó que, debido a las condiciones energéticas generadas durante el fenómeno, se acelera el proceso de transferencia de masa en regiones puntuales del líquido; a su vez es posible obtener una conversión mayor a 90% en 10 minutos. Por lo tanto, se disminuye el tiempo de reacción.

Con la finalidad de determinar el consumo energético; se cuantificaron los volúmenes de biodiésel y glicerina producidos al final de cada experimento. También se contempló a la potencia de la bomba (2 HP), en un tiempo de reacción de 10 minutos; resultando un consumo energético de 17 Wh/kg de biodiésel. En la Tabla 7, se muestran datos comparativos de consumo energético en diferentes trabajos de investigación, así como con la producción convencional de biodiésel. En la síntesis de biodiésel por transesterificación convencional se ha reportado un consumo 36.55 Wh/kg, mayor a 50% comparado con lo determinado en el presente trabajo.

Tabla 7. Consumo energético de diferentes sistemas

Tipo	Consumo energético	Referencia
Ultrasonido	32.79 Wh/kg	Meza, (2020)
Convencional	36.55 Wh/kg	Yu et al., (2010)
Hidrodinámica	17 Wh/kg	Presente trabajo

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. 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). Mientras que la norma ASTM D6751 especifica los parámetros y límites físicos con los que debe cumplir el biodiésel (B100). En la tabla 8, se muestran los valores de calidad obtenidos en las muestras de biodiésel, mientras se comparan con lo establecido con la norma ASTM D6751. Por lo tanto, el biodiésel obtenido, cumple con la calidad recomendada para ser aplicado como combustible.

Tabla 8. Calidad de Biodiésel B100

Parámetro	Método ASTM	Resultado	Límite por ASTM D6751
Punto de nube	D2500	0 °C	-
Punto de inflamabilidad	D93	104 °C	93°C mínimo
Viscosidad cinemática	D445	5.7 mm <sup>2</sup> /s	1.9-6.0 mm <sup>2</sup> /s
Densidad	D1298	0.865 g/cm <sup>3</sup>	-
Agua y sedimentos	D2709	0%	0.05% máximo

## Conclusiones

La aplicación de CH con tubo Venturi, resultó favorable sobre la reacción de transesterificación, ya que se obtuvo porcentaje de conversión > 90% en 25 minutos; sin necesidad de agregar calor y agitación externos. Mientras que el factor con mayor efecto sobre la variable de respuesta es el porcentaje de catalizador (B). El segundo factor resultó ser la relación molar (A). De acuerdo con el análisis estadístico, las condiciones óptimas de operación para la síntesis de biodiesel son: 1.5% de catalizador; 1:5.4 de relación molar aceite:metanol; y 25 minutos de tiempo. Pero se estableció que, transcurridos 10 minutos, se alcanzó el equilibrio de reacción. Por lo que se concluye que, mediante la aplicación de CH, se reducen costos energéticos y se disminuye el tiempo de reacción. El biodiésel producido cumple con las especificaciones de los parámetros físicos establecidas en la norma ASTM D675.

## Referencias

- Avramović, J., Stamenković, O., Todorović, Z., Lazić, M., & Veljković, V., (2010). The optimization of the ultrasound-assisted base-catalyzed sunflower oil methanolysis by a full factorial design. *Fuel Processing Technology*, 91(11), 1551–1557.
- Bargole, S., Carpenter, J., George, S., & Saharan, V. K., (2017). Process intensification of synthesis of biodiesel using a novel recirculating flow ultrasonication reactor. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 122, 21–30.
- Chuah, L., Klemeš, J., Yusup, S., Bokhari, A., Akbar, M., & Chong, Z., (2017). Kinetic studies on waste cooking oil into biodiesel via hydrodynamic cavitation. *Journal of Cleaner Production*, 146, 47–56.
- Coronado, A., Hernández, C., & Rodríguez, J., (2018). Reporte de: Clúster de biodiesel avanzado. CONACYT-SENER, México.
- Domínguez, J. (2018). La cavitación hidrodinámica. *Ciencia Universitaria*, 16(1).
- Garibay, A., Vazquez, R., Serrano, L., Martínez, A., & Sánchez, M., (2009). Biodiesel a partir de microalgas. *BioTecnología*, 13(3).
- Ghayal, D., Pandit, A., & Rathod, V., (2013). Optimization of biodiesel production in a hydrodynamic cavitation reactor using used frying oil. *Ultrasonics Sonochemistry*, 20(1), 322–328.
- Gogate, P., & Pandit, A. B., (2000). *Engineering Design Methods for Cavitation Reactors II: Hydrodynamic Cavitation*. *AIChE Journal*, 46(8), 1641–1649.
- Gogate, P., (2008). Cavitation reactors for process intensification of chemical processing applications: A critical review. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 47 (4), 515–527.
- Gutiérrez, L., Arias, S., & Cardona, D., (2019). Cavitación Hidrodinámica: un Enfoque desde la Ingeniería y la Agroindustria. *Hydrodynamic Cavitation: Engineering and Agribusiness Approach*. *Scientia Et Technica*, 24(2), 283–304.
- Lapuerta M., Armas, O., & Fernandez, J., (2008). Effect of Biodiesel Fuels on Diesel Engine Emissions. *Progress in Energy and Combustion Science*, 34(2), 198-223.
- Meza, D. (2020). Diseño y optimización de una planta piloto de elaboración de biodiésel usando cavitación ultrasónica. Tesis para obtener el grado de doctorado en Manufactura Avanzada. CIATEQ, A.C., México.
- Pal, A., Verma, A., Kachwaha, S., & Maji, S. (2010). Biodiesel production through hydrodynamic cavitation and performance testing. *Renewable Energy*, 35(3), 619–624.
- 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.
- Zhang, Y., Dube, M.A., McLean, D. D., & Kates M., (2003): Biodiesel production from waste cooking oil: 2. Economic assessment and sensitivity analysis *Bioresource Technology* 90, 229–240.