

Reconversión de aceite de cocina usado a biodiésel por medio de destilación reactiva

Conversion of waste cooking oil to biodiesel through reactive distillation

Valadez-Ramírez Edgar Fabián¹, López-Mejía Blanca Rosa¹, Alcázar-Martínez Yareli Azucena¹, Guerrero-Muñoz Miguel Ángel¹, Barroso-Muñoz Fabricio Omar^{1*}

¹ Departamento de Ingeniería Química, División de Ciencias Naturales y Exactas, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato
faobamu@ugto.mx

*Autor de correspondencia

Resumen

En este proyecto se estudió la producción de biodiesel a partir de aceite de cocina usado. El trabajo se llevó a cabo en dos fases complementarias. La primera tuvo un carácter social, con el objetivo de generar impacto en las comunidades de origen de los estudiantes participantes. En esta etapa se recolectó el aceite residual de cocina y se aplicó una breve encuesta para conocer la disposición final del aceite a nivel doméstico. La segunda fase consistió en el pretratamiento del aceite recolectado para eliminar sólidos en suspensión y, posteriormente, en la producción experimental de biodiesel mediante destilación reactiva. Los resultados de la encuesta revelaron que, en el 89% de los hogares encuestados, se utilizan entre 1 y 4 litros de aceite por semana. Además, que el 55% no reutiliza el aceite usado y el 53% de la totalidad de las familias encuestadas lo desecha directamente al fregadero. En cuanto al procedimiento experimental, el sistema se mantuvo a una temperatura de 60 °C, una relación (w/w) de metanol y aceite de 3 a 7 y un %w de catalizador del 1%. Los resultados demostraron la factibilidad de producir biodiesel por medio de una destilación reactiva, destacando que la etapa de pretratamiento es esencial para facilitar el proceso. También, el aprovechamiento de este residuo como materia prima para generar un producto de alto valor, contribuye a reducir el impacto ambiental, fomenta la conciencia social y promueve el concepto de economía circular.

Palabras clave: biodiésel, aceite de cocina usado, destilación reactiva, economía circular.

Introducción

Las fuentes de energía alternativas y renovables se han vuelto más atractivas en los últimos años debido al agotamiento de las reservas mundiales de petróleo, la creciente demanda energética, la creciente preocupación ambiental por el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero y el alza en los precios del petróleo. El biodiésel es un combustible renovable compuesto por ésteres alquílicos obtenidos de aceite vegetal y grasa animal. Las principales ventajas del biodiésel son su renovabilidad, mayor lubricidad, biodegradabilidad y una reducción significativa de las emisiones de partículas, hidrocarburos no quemados y monóxido de carbono, en comparación con el diésel de petróleo [1].

El biodiésel se produce típicamente mediante transesterificación, que es la reacción de aceites vegetales con alcohol para producir ésteres de alquilo y glicerol mediante un catalizador adecuado [1].

En comparación con el diésel derivado del petróleo, el alto precio del biodiésel producido a partir de aceites vírgenes constituye un obstáculo importante para su comercialización. Dado que el precio del aceite de cocina usado (ACO) es entre dos y tres veces menor que el del aceite vegetal virgen. El uso de materias primas de bajo costo como el ACO podría reducir el costo de producción de biodiésel, ya que este último suele representar más de la mitad del costo final del biodiésel. La producción de aceite de cocina usado ha aumentado debido al creciente consumo de alimentos en restaurantes y establecimientos de alimentación. La conversión de ACO en biodiésel no solo elimina el impacto ambiental causado por la eliminación de estos aceites usados, sino que también reduce significativamente el costo de producción de biodiésel [1].

El biodiésel se produce actualmente en procesos discontinuos, los cuales presentan importantes deficiencias. Algunas de ellas son: la alta demanda de alcohol necesaria para desplazar el equilibrio hacia los ésteres grasos, la necesidad de neutralizar el catalizador, lo que genera un flujo de residuos salinos, los altos costos de separación de los ésteres grasos de la mezcla de reacción y los altos costos derivados de procesos complejos que incluyen múltiples reactores y unidades de separación. Como resultado, las tecnologías de intensificación de procesos, como la destilación reactiva, se han vuelto más atractivas en los últimos años [1].

La destilación reactiva es un proceso intensificado en el que la reacción química y la separación se realizan en un mismo equipo. Es decir, la reacción química se realiza en una sección del equipo y la destilación en una sola unidad donde los productos pueden eliminarse para impulsar una reacción reversible hasta su finalización. La separación del producto de la mezcla de reacción no requiere una unidad de destilación independiente, lo que ahorra energía (p. ej., para calentamiento), materiales e inversión. Esta técnica es especialmente favorable para sistemas donde se producen reacciones de equilibrio, como la esterificación y la transesterificación. Una de las ventajas de la destilación reactiva radica en que la conversión de los reactivos a productos puede aumentar mucho más allá de lo esperado por el equilibrio químico debido a la eliminación continua de productos de reacción de la zona de reacción, lo que reduce los costos de capital e inversión [2].

Características del aceite de cocina usado

Las características del aceite residual son considerablemente distintos con respecto al aceite vegetal fresco, sin embargo, conserva su capacidad para producir biodiésel. Las propiedades pueden variar principalmente al tipo de aceite y el tratamiento que se le da durante su vida útil (tiempos de cocción, temperatura, tipo de alimento cocinado, etc.). Las altas temperaturas de cocción y el agua de los alimentos favorecen la hidrólisis de los triglicéridos formando ácidos grasos libres (AGL) por lo que el aceite adquiere una coloración más oscura y un olor desagradable [3][4][5].

Transesterificación de aceites

Uno de los métodos principalmente utilizados para la síntesis de biodiésel es la reacción de transesterificación. Dicha reacción ocurre debido a que el aceite como materia prima reacciona con un alcohol de cadena corta en presencia de un catalizador, dicho catalizador puede ser ácido o alcalino [4]. La transesterificación consiste en tres etapas consecutivas reversibles donde los triglicéridos son convertidos en diglicéridos, los diglicéridos a monoglicéridos y estos a glicerol, cuya sustancia es el subproducto principal de esta reacción, por lo tanto, en cada etapa son necesarias tres moléculas de alcohol por una de triglicéridos. Estequiométricamente, se producen tres moléculas de éster por cada molécula de triglicérido [3].

Por otro lado, la cantidad de ácidos grasos libres en el aceite residual puede generar reacciones indeseables que afectan la eficiencia de la reacción. Utilizar cierto catalizador en condiciones de operación específicas también favorecen estas reacciones. Por ejemplo, una de las principales desventajas de implementar un catalizador alcalino es su alta sensibilidad a la pureza de los reactivos, así como el contenido de ácidos grasos libres y el agua [3][6]. Si la cantidad de AGL rebasa ciertos límites, se promueven reacciones de saponificación, lo que disminuye la eficiencia del catalizador y dificulta los procesos de separación del producto.

Elección del catalizador

Se ha comprobado, que la mejor ruta para llevar a cabo una reacción de transesterificación de aceites con alta concentración de ácidos grasos libres es la ácida. Los catalizadores ácidos son tolerantes con estos compuestos y producen buenos resultados en aceites que contienen más del 1% de AGL. Algunos investigadores han utilizado ácidos inorgánicos como el ácido clorhídrico, sulfúrico, fosfórico y el ácido sulfónico para realizar esta reacción. A diferencia de una catálisis alcalina, la materia prima no debe ser sometida a una esterificación previa para que luego se lleve a cabo la transesterificación, es decir, utilizar catalizadores ácidos te garantiza una sola etapa de reacción. Sin embargo, con estos catalizadores se tiene una actividad muy lenta, por lo que los periodos de reacción suelen ser muy largos en comparación a la ruta alcalina [4]. Investigaciones posteriores han descubierto que los ésteres catalizados por ácidos tienen mejor rendimiento que los catalizados por bases. Además, el ácido sulfúrico funciona mejor que el clorhídrico para generar biodiésel de mayor calidad [4][7].

Destilación reactiva

La implementación de una columna de destilación reactiva para la producción del biodiésel es una parte fundamental del proyecto. La destilación reactiva es un proceso integrado que combina reacciones químicas y destilación en una sola unidad de proceso o transformación. Esta integración presenta varias ventajas con respecto a otros procesos convencionales, por ejemplo, reduce de manera considerable los costos de operación, mejora la eficiencia energética y minimiza el impacto ambiental [5]. En los últimos años, se han producido muchos avances en este tipo de tecnología, por lo que ha aumentado el potencial considerablemente en aplicaciones industriales. Con esto en mente, utilizar una columna de estas características para reconvertir aceite de cocina residual a un biocombustible, podría generar una mayor eficiencia con el menor impacto posible, contribuyendo así con los principios de una economía circular.

Metodología

En primer lugar, se aplicó una encuesta en la comunidad de origen para conocer el destino final del aceite de cocina usado (ACO) que desechan las familias y, al mismo tiempo, informarles sobre el impacto ambiental de este residuo y su potencial energético. Posteriormente, se recolectaron muestras de ACO donadas por los participantes de la encuesta. La materia prima fue sometida a un pretratamiento para eliminar agentes que pudieran afectar el rendimiento de la reacción. Luego se llevó a cabo la reacción de transesterificación mediante destilación reactiva, empleando diversos parámetros previamente consultados en la bibliografía. Finalmente, se separó el producto con ayuda de un embudo de separación. A continuación, se describen de forma detallada estos pasos.

1. Realización de la encuesta

El objetivo de la encuesta fue conocer el destino final que las familias vecinas dan al aceite de cocina usado, con el fin de evaluar el nivel de conciencia ambiental en la comunidad, determinar el potencial de aprovechamiento de este residuo como materia prima para la producción de biodiésel y el conocimiento de conceptos clave en el cuidado ambiental. Se aplicó una encuesta de 12 preguntas a un total de 53 familias de las comunidades de origen de los participantes del proyecto. Las familias seleccionadas fueron habitantes de viviendas particulares que utilizan aceite vegetal en sus actividades domésticas de cocina. La encuesta se realizó de manera directa, con preguntas sencillas y específicas relacionadas con el manejo del aceite después de su uso.

2. Recolección de la materia prima

El aceite de cocina usado que se recolectó fue donado por distintas familias y un establecimiento de comida (Figura 1). El aceite se clasificó en dos grupos debido a sus características perceptibles a simple vista. El aceite proveniente de las familias presenta material particulado y una coloración amarillenta, parecido al aceite de cocina fresco, sin embargo, emite mal olor. A esta muestra se le etiquetó como Muestra 1 (M1). Por otra parte, el aceite del establecimiento de comida presenta una coloración rojiza y un mal olor fuerte, además de que también contiene material particulado y se etiquetó como Muestra 2 (M2). Se recolectaron aproximadamente 1304 ml de M1 y 918 ml de M2.



Figura 1. Aceite recolectado.
Fuente: Autoría propia.

3. Procedimiento experimental

La columna de destilación reactiva que se se utilizó a nivel laboratorio consta de tres secciones fundamentales: el rehervidor (donde se calienta la mezcla), la columna de destilación empacada y un condensador. Como se puede observar en la Figura 2, la columna esta cubierta de un aislante térmico para evitar la pérdida de energía en el proceso. Debajo del condensador se encuentran dos válvulas, que funcionan como válvula de reflujo y como válvula para la obtención del destilado respectivamente. El reactor es un matraz bola de 500 ml con fondo plano de tres bocas, la boca intermedia va conectada a la columna empacada y en las otras dos se colocaron un termómetro y el termostato de la parrilla. El termostato ayuda monitorear y controlar la temperatura de operación del reactor. El calentamiento ocurre mediante una mantilla eléctrica para este tipo de matraz. La columna opera a presión atmosférica. Todos los reactivos utilizados para la realización de los experimentos fueron de grado analítico. El alcohol empleado fue metanol de la marca Sigma Aldrich. Por otro lado, el catalizador empleado es ácido sulfúrico de la marca Fermont.



*Figura 2. Columna de destilación reactiva para la reacción de transesterificación en el laboratorio.
Fuente: Autoría propia.*

3.1. Pretratamiento de la materia prima

De acuerdo con [3] el pretratamiento de la muestra consistió en la remoción física del material particulado con una filtración a vacío. Previamente, se calentaron las muestras a una temperatura aproximada de 45°C para disminuir su viscosidad y facilitar el filtrado al vacío. Una vez terminado el proceso de filtración, las muestras se almacenaron en recipientes herméticos de 250 ml cada uno.

3.2. Transesterificación ácida con metanol

Para la reacción se utilizó una relación de metanol y aceite en volumen de 3:7, recordando que el alcohol es el reactivo en exceso. Por su parte, el catalizador se agregó a la mezcla con una relación del 1% en peso. La temperatura en reactor se mantuvo entre 60 °C y 65 °C y el tiempo de reacción fue de aproximadamente 2 horas. De acuerdo con [4] y [9] estas son las condiciones ideales para la producción de biodiesel a partir de aceites con alto contenido de ácidos grasos libres.

La reacción se repitió por triplicado, sin embargo, en la primera prueba (P1) se utilizó un volumen de 150 ml de aceite de la M1. Por las condiciones operativas de la reacción y del equipo de destilación reactiva empleado, para las pruebas dos (P2) y tres (P3) respectivamente, se empleó un volumen de 100 ml de aceite. Para la P3 se utilizó la M2. En cada una de las pruebas se mantuvo la temperatura y el tiempo de reacción de acuerdo con las referencias consultadas, cuidando en todo momento que hubiera metanol dentro del reactor con ayuda de la válvula de reflujo para que la reacción se llevara a cabo. Luego del tiempo de reacción, mediante la destilación se destiló el metanol excedente.

3.3 Obtención del producto

Una vez finalizada la reacción de cada una de las pruebas y haber extraído todo el metanol, el contenido del reactor se vacía en un embudo de separación y se deja reposar por poco menos de 24 horas. Se agregó un poco de agua destilada y se agitó suavemente el embudo para tratar de arrastrar el contenido de ácido y metanol que pudiera haberse quedado en producto final.

Resultados

Encuesta

En las Figuras 3 a 12, se muestran los resultados de la encuesta realizada.

Como se puede observar, las Figuras 3 y 5 muestran que la mayoría de las familias encuestadas vive en hogares con 5 integrantes o más y admiten el uso cotidiano de aceite vegetal, lo que significa que hay un mayor volumen de consumo de aceite y, por lo tanto, un alto nivel de residuos que deben ser gestionados correctamente. Otro dato relevante es que la mayoría de la gente entrevistada consume la marca "Nutrioli", entre otros aceites, como especifica la Figura 4. Por su parte, la Figura 6, indica que el uso mensual de aceite de cocina por familia estaría entre 1 y 3 litros, lo que nos da una idea general de la cantidad de aceite que se consume en nuestra comunidad, así como del potencial de su uso como materia prima para producir biodiesel.

Sin embargo, los datos de la Figura 7 muestran que poco más de la mitad de la población que consume aceite no lo reutiliza. Entre quienes sí lo reutilizan, solo el 23% lo hace dos veces o más, como se observa en la Figura 8. Una vez que el aceite alcanza el final de su vida útil, es más común que las familias lo desechen en el fregadero o en la basura, tal como se presenta en la Figura 9. Este comportamiento sugiere que no existen centros de recolección disponibles o que falta información acerca del manejo de este residuo, a pesar de que la comunidad muestra una alta disposición para colaborar, como se evidencia en la Figura 10.

La Figura 11 muestra que gran parte de las familias tiene información de que el aceite puede ser reutilizado para transformarlo en energía limpia. De hecho, el 51% saben lo qué es biodiesel y pocos más conocen el concepto de economía circular (Figuras 12 y 13 respectivamente). Esta información es muy útil, ya nos ayuda a identificar una gran área de oportunidad y que las personas están dispuestas a contribuir para reducir el impacto ambiental. Y de acuerdo con la Figura 14, la mayoría de las personas están de acuerdo en que el agua es el recurso más afectado por esta problemática.

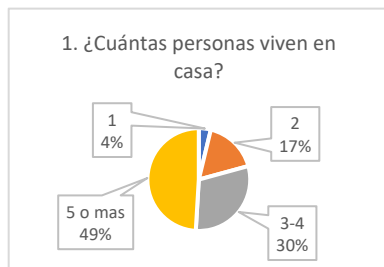


Figura 3. Cantidad de personas que habitan en una casa.
Fuente: Autoría propia.

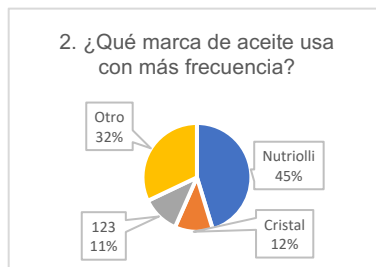


Figura 4. Muestra de aceite más utilizado.
Fuente: Autoría propia.

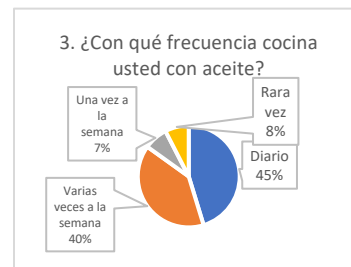


Figura 5. Frecuencia de aceite utilizado por familia.
Fuente: Autoría propia.

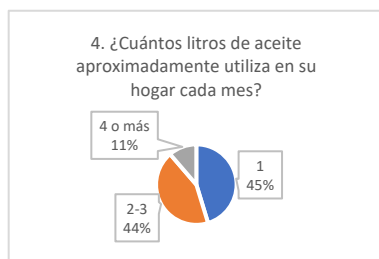


Figura 6. Cantidad de aceite utilizado mensualmente en litros.
Fuente: Autoría propia.

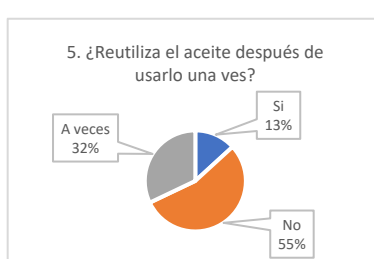


Figura 7. Familias que reutilizan aceite.
Fuente: Autoría propia.

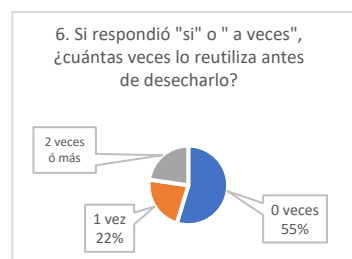


Figura 8. Cantidad de veces que se reutiliza.
Fuente: Autoría propia.

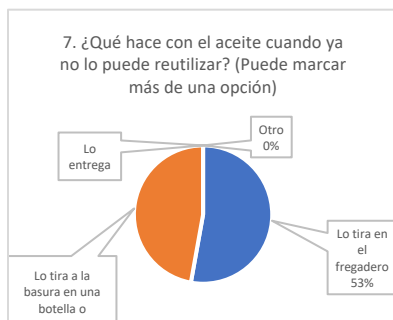


Figura 9. Uso que se le da al aceite una vez reutilizado.
Fuente: Autoría propia.

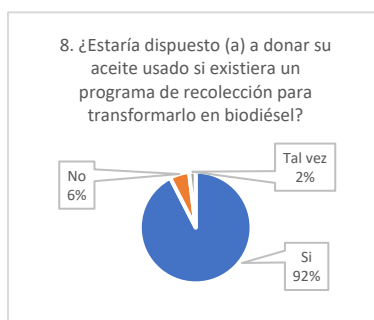


Figura 10. Familias dispuestas a donar su aceite.
Fuente: Autoría propia.

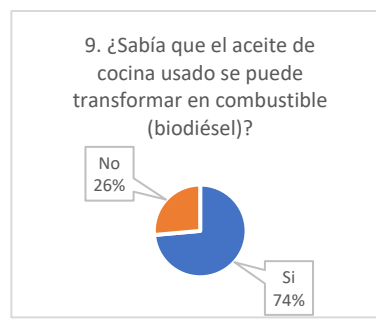


Figura 11. Conocimiento acerca de la conversión del aceite.
Fuente: Autoría propia.

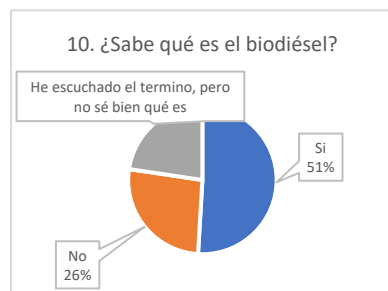


Figura 12. Conocimiento acerca del biodiesel.
Fuente: Autoría propia.

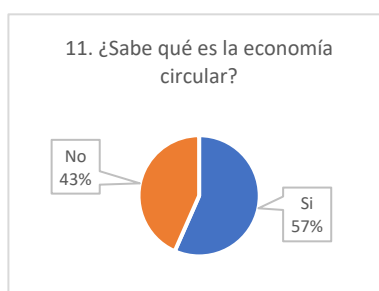


Figura 13. Conocimiento de economía circular.
Fuente: Autoría propia.

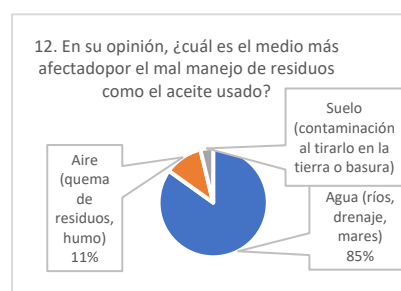


Figura 14. Medio más afectado por el desecho del aceite.
Fuente: Autoría propia.

Pretratamiento del aceite

La Figura 15 muestra parte del residuo y material sólido que se encontraba suspendido en cada una de las muestras. Luego del filtrado a vacío, las muestras estaban preparadas para la reacción.



Figura 15. Filtración a vacío de la muestra.
Fuente: Autoría propia.

Reacción

En la Tabla 1 se muestra el volumen de aceite de cocina usado en cada una de las pruebas experimentales para la obtención de biodiesel mediante destilación reactiva.

Tabla 1. Volumen de aceite de cocina usado empleado en cada una de las pruebas experimentales.

Prueba	Volumen de Aceite (ml)
P1	150
P2	100
P3	100

Fuente: Autoría propia.

Las Figuras 16, 17 y 18 muestran el momento de la reacción de las tres pruebas realizadas respectivamente con los parámetros antes descritos. Posteriormente, en las Figuras 19, 20 y 21 se observa la separación de fases del producto de la reacción luego de 24h de reposo. Se observa la presencia del biodiesel y glicerina. Como se puede observar en la Figura 20, no alcanza a distinguirse con facilidad ambas fases, siendo necesario recurrir a algún método instrumental de análisis para conocer si está presente glicerina en el producto. Sin embargo, cabe señalar que la muestra utilizada en esta muestra se obtuvo de restaurantes donde el aceite de cocina se reutiliza varias veces.



Figura 16. Prueba 1.
Fuente: Autoría propia.



Figura 17. Prueba 2.
Fuente: Autoría propia.



Figura 18. Prueba 3.
Fuente: Autoría propia.



Figura 19. Separación de fases del producto P1. Fuente: Autoría propia.



Figura 20. Separación de fases del producto en P2. Fuente: Autoría propia.



Figura 20. Separación de fases del producto P3. Fuente: Autoría propia.

Es importante señalar que una de las ventajas de la destilación reactiva es que existe la posibilidad de retirar uno de los productos o reactivos al mismo tiempo que se efectúa la reacción química, con la ventaja de eliminar una etapa posterior de separación y la eliminación de un equipo adicional dentro del proceso. En ese sentido, en este proceso, se recuperaba metanol de manera simultánea, mientras se realizaba la reacción química para la producción de biodiesel. Considerando que el metanol se requirió en exceso, en las pruebas 1 y 2 (P1 y P2) donde se utilizó M1, se recuperó un volumen de metanol de 262 ml y 178 ml. En única prueba (P3) realizada para la muestra M2 se recuperaron 180 ml de metanol.

En cuanto a características físicas, se observan en la Figura 22 diferencias mínimas en el color de P1 y P2, siendo notorio una mayor turbidez en P1. Si bien, en la producción de ambas muestras de biodiesel, se empleó M1, probablemente el tratamiento posterior a la reacción tuvo un impacto en la apariencia física. El producto 3 (Figura 23), tiene un color mucho más oscuro que los primeros 2, a pesar de que se realizó con los mismos factores que los anteriores, esto puede ser debido a que la muestra se obtuvo mayormente de un restaurante, y acuerdo a las diferentes referencias consultadas, debido a la degradación térmica, pueden existir compuestos químicos diferentes a los presentes en los aceites de cocina usados solamente una o dos veces. Es importante señalar que el análisis instrumental del producto obtenido se realizará en una etapa posterior al presente estudio ya que no se cuenta con disponibilidad del equipo requerido.



*Figura 22. Producto de biodiesel; P1 (derecha), P2 (izquierdo).
Fuente: Autoría propia.*



*Figura 23. Producto de biodiesel M2, P3.
Fuente: Autoría propia.*

Conclusión

Con el presente trabajo y de acuerdo con los resultados de la encuesta se resalta la importancia de concientizar a las personas acerca del uso y manejo que se puede dar a los residuos de aceite de cocina usado convirtiéndolos en biodiesel. Así como indicarles que existe una alternativa para evitar desechar este residuo en los sistemas municipales de alcantarillado y drenaje doméstico, pues las personas no saben cómo tratar el aceite después de usarlo, lo que provoca que termine contaminando ríos, lagos y demás fuentes de agua. Por lo cual, este proyecto contribuye a la protección de la salud pública y la conservación del medio ambiente y promoviendo la economía circular al reutilizar un residuo que puede ser empleado como materia prima para generar un producto de alto valor agregado como lo es el biodiésel.

Los resultados obtenidos en este proyecto sugieren que la producción de biodiesel a partir de aceite de cocina usado empleando destilación reactiva puede ser una opción factible y amigable con el medio ambiente para crear fuentes de energía y reducir el uso de combustibles fósiles. Así mismo, destaca la importancia de la intensificación de procesos en ingeniería química. Cabe señalar que, bajo las condiciones analizadas, se obtuvo un rendimiento del 63%. Sin embargo, es necesario encontrar las condiciones adecuadas para obtener el máximo rendimiento para este proceso intensificado.

Este proyecto puede servir como base para futuras investigaciones y aplicaciones prácticas en la producción de biodiesel, la gestión de residuos y el generar empleos y desarrollo económico, ya que viéndose como un proyecto a futuro que se pueda implementar en México puede llegar a generar empleos en el proceso de recolección, procesamiento y comercialización del aceite de cocina usado para la producción de biodiesel. De igual forma se debe mencionar como trabajo futuro el encontrar las mejores condiciones para obtener la mayor producción de biodiesel.

Finalmente, y que debe ser considerado de vital importancia es que se logró la socialización del proyecto de investigación realizado, tomándolo como un modelo para la educación y la conciencia ambiental, demostrando la importancia de la gestión sostenible de los residuos y la producción de energías renovables, a través de cosas de uso cotidiano y fácil acceso como lo es el aceite de cocina usado, teniendo un impacto positivo en la población y contribuyendo a los objetivos del desarrollo sostenible de la ONU.

Referencias

- [1] Noshadi, I., Amin, N. A. S., & Parnas, R. S. (2012). Continuous production of biodiesel from waste cooking oil in a reactive distillation column catalyzed by solid heteropolyacid: Optimization using response surface methodology (RSM). *Fuel*, 94, 156–164. doi: 10.1016/j.fuel.2011.10.018.
- [2] Reactive Distillation - an overview | ScienceDirect Topics. Accessed: Jul. 22, 2025. [Online]. <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/reactive-distillation>
- [3] Tacias Pascacio, V. G., Rosales Quintero, A., & Torrestiana Sánchez, B. (2016). Evaluación y caracterización de grasas y aceites residuales de cocina para la producción de biodiésel: Un caso de estudio. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 32(3). doi: 10.20937/RICA.2016.32.03.05.
- [4] Monika, S., Banga, & Pathak, V. V. (2023). Biodiesel production from waste cooking oil: A comprehensive review on the application of heterogenous catalysts. *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.nexus.2023.100209.
- [5] Felizardo, P., Neiva Correia, M. J., Raposo, I., Mendes, J. F., Berkemeier, R., & Bordado, J. M. (2006). Production of biodiesel from waste frying oils. *Waste Management*, 26(5). doi: 10.1016/j.wasman.2005.02.025.
- [6] Ganesan, K., Sukalingam, K., & Xu, B. (2019). Impact of consumption of repeatedly heated cooking oils on the incidence of various cancers- A critical review. *Taylor and Francis Inc.* doi: 10.1080/10408398.2017.1379470.
- [7] Al-Widyan, M. I., & Al-Shyoukh, A. O. (2002). Experimental evaluation of the transesterification of waste palm oil into biodiesel. *Bioresour Technol*, 85(3). doi: 10.1016/S0960-8524(02)00135-9.
- [8] Barrientos, D. A., Fernandez, B., Morante, R., Rivera, H. R., Simeon, K., & Lopez, E. C. R. (2023). Recent Advances in Reactive Distillation. *Engineering Proceedings*, 56(1). doi: 10.3390/ASEC2023-15278.
- [9] Jain, S., Sharma, M. P., & Rajvanshi, S. (2011). Acid base catalyzed transesterification kinetics of waste cooking oil. *Fuel Processing Technology*, 92(1), 32–38. doi: 10.1016/j.fuproc.2010.08.017.
- [10] El biodiésel un biocombustible esencial para la sostenibilidad energética. Accessed: Jul. 22, 2025. [Online]. <https://fedebiocombustibles.com/el-biodiesel-un-biocombustible-esencial-para-la-sostenibilidad-energetica/>