

Estudio de las Variables de Reacción de la Transesterificación Asistida por Microondas

Resumen: La irradiación de microondas es una fuente de energía no convencional que viene siendo utilizada para un gran número de reacciones químicas, comprobando que éstas pueden ser aceleradas bajo condiciones de irradiación de microondas. Debido a que la reacción de transesterificación contiene tanto componentes polares como iónicos, el calentamiento con microondas se compara favorablemente con los métodos convencionales. En este trabajo se realizaron estudios de los efectos de la irradiación de microondas en la síntesis de biodiesel con aceite de algodón y metanol usando hidróxido de sodio como catalizador. Se ha comprobado mediante ensayos de laboratorio que utilizando las mismas condiciones que con el método convencional de calentamiento se pueden alcanzar los mismos rendimientos, incluso mayores, que utilizando la irradiación microonda como fuente de energía, con la ventaja de una considerable reducción del tiempo de reacción.

Palabras claves: microondas; biodiesel; metil ésteres; transesterificación

Abstract: Microwave radiation is a source of non-conventional energy that is being used for a large number of chemical reactions, ensuring that these can be accelerated under microwave irradiation conditions.

Due to that the transesterification reaction contains both polar and ionic components, the microwave heating is comparing favorably with conventional methods. In this paper we study the effects of microwave irradiation on the synthesis of biodiesel with cottonseed oil and methanol, using sodium hydroxide as catalyst. We have found, using laboratory trials at the same conditions that in the conventional heating method it is possible achieve the same yields or even higher, than using irradiation microwaves as energy source, with the advantage of a considerable reduction of the reaction time.

Keywords: Variability, Version Management, Product Family, Ontologies.

Walter G.Morales^{1,2}, Nazareno Roggero Luque¹, Alfredo Sequeira¹, Ester Chamorro¹

¹Centro de Investigación en Química Orgánica Biológica (QUIMOBIO). Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Resistencia, French 414, C.P. H3500CHJ, Resistencia, Argentina, Tel. (0362) 4432928

Mail: wmorales@frre.utn.edu.ar

INTRODUCCIÓN

El incremento en la demanda de los combustibles derivados del petróleo, el calentamiento global y la contaminación medioambiental llevan a la búsqueda de combustibles alternativos para satisfacer la demanda energética, y que a la vez reduzcan el impacto medioambiental (Blanco-Marigorta et al., 2013). El biodiesel ofrece numerosos beneficios técnicos y medioambientales, frente a los combustibles fósiles. Especialmente, las similitudes entre las propiedades de combustión del biodiesel y el diésel de petróleo, lo han posicionado como un combustible alternativo prometedor, renovable y sustentable para los automóviles de motores diésel (Lin et al., 2011; Talebian-Kiakalaieh et al., 2013). El desarrollo del biodiesel procura reducir las emisiones de los motores diésel sin modificarlos (Chen et al., 2012; Viola et al., 2012).

Químicamente el biodiesel es una mezcla de ésteres mono alquílicos de ácidos grasos de cadena larga obtenidos de aceites vegetales y grasas animales a través de una reacción de transesterificación con un alcohol de cadena corta (Zhang et al., 2012). La reacción requiere alcohol en presencia de un catalizador para reaccionar con los triglicéridos (Endalew et al., 2011).

Las variables más importantes de la reacción de transesterificación que tienen influencia significativa en la conversión y rendimiento finales son: temperatura de reacción, tipo de catalizador, cantidad de catalizador, tiempo de reacción, relación molar de alcohol/aceite, tipo de alcohol e intensidad de agitación (Talebian-Kiakalaieh et al., 2013; Endalew et al., 2011).

La irradiación con microonda, una fuente de energía no convencional, ha sido utilizada para una variedad de aplicaciones donde reacciones químicas son aceleradas debido a la selectiva absorción de la microonda por moléculas polares, siendo las moléculas no polares inertes a la microonda (Shakinaz et al., 2010; Zhang

et al., 2012). La microonda, es una radiación no ionizante, influye en los movimientos moleculares como migración de iones o rotaciones dipolares sin alterar la estructura molecular (Shakinaz et al., 2010). De esta manera, la irradiación con microondas activa el grado más pequeño de variación de la molécula polar con el continuo cambio del campo magnético (Asakuma et al., 2011; Azcan et al., 2007).

El calentamiento con microondas es inducido por un campo electromagnético a través de dos mecanismos: rotación dipolar y conducción iónica. En el primer mecanismo, un dipolo cuando es expuesto a un campo eléctrico, tratará de alinearse con la polaridad del correspondiente campo. Cuando el campo aplicado se encuentra rápidamente cambiando, las moléculas dipolares tratan de realinearse con la nueva dirección (también rápidamente) y a cierta frecuencia, el dipolo termina girando alrededor. En este esfuerzo de alineación, las moléculas raspan entre sí causando fricción y subsecuente calentamiento. En la conductancia iónica, iones cargados oscilan a través de la solución bajo la influencia del mismo campo eléctrico aplicado. Como la dirección del campo eléctrico cambia, los iones se retardan y cambian de dirección. En el proceso, este movimiento causa colisiones resultando en la conversión de energía cinética en energía calórica (Asakuma et al., 2011; Azcan et al., 2007; Muley et al., 2013; Lam et al., 2010).

La reacción de transesterificación, con objeto de obtener metil ésteres, posee una mezcla de componentes polares e iónicos, y como esta energía interactúa con la muestra a escala molecular, se logra un calentamiento muy eficiente (Shakinaz et al., 2010). Cuando la reacción de transesterificación, para la producción de biodiesel, es realizada bajo irradiación de microondas se obtiene alta eficiencia de calentamiento, reducción del tiempo de reacción, disminución de subproductos

y una mejora en el rendimiento del producto durante la reacción (Zhang et al., 2012; Lin et al., 2011).

El calentamiento convencional puede ser relativamente lento e ineficiente debido a que la transferencia de energía en la muestra depende de las corrientes de convección y la conductividad térmica en la mezcla de reacción (Shakinazet al., 2010; Chen et al., 2012), lo que comparando con microonda lo hace a éste muy favorablemente y eficiente. Las diferentes intensidades de vibración de los carbonos carboxílicos entre moléculas de alto y bajo momento dipolar causa la reactividad, a diferencia del calentamiento convencional, la reacción con microonda ocurre vía un estado de transición del carbono carboxilo (Asakuma et al., 2011). De todas formas, todavía no está claro con exactitud cuál es el verdadero mecanismo que origina velocidades de reacción tan cortos.

En la actualidad, la investigación acerca del uso de microondas como fuente de energía para llevar a cabo reacciones de transesterificación para la obtención de biodiesel se encuentra en creciente desarrollo. Diferentes publicaciones (Zhang et al., 2012; Muley et al., 2013; Chen et al., 2012) reflejan que no es necesario un equipo especial para desarrollar este método, basta realizar las correspondientes modificaciones a un equipo microondas doméstico para llevar a cabo las reacciones. Uno de los inconvenientes que se puede presentar, es al momento de trasladar estas reacciones a escalas mayores con grandes volúmenes de reactivos, ya que la penetración de la microonda a la mezcla de reacción, se cree que es de unos pocos centímetros (Juan de Mata Muñoz Molina, 2009). Esto último hace suponer que un método continuo es más factible al hablar de escalas industriales que el método discontinuo comúnmente utilizado. Sin embargo, los elevados rendimientos, la mayor eficiencia de calentamiento

por el mejor aprovechamiento de la energía y el corto tiempo de reacción, suponen que la irradiación con microonda puede reemplazar los métodos tradicionales para la producción de biodiesel.

En este trabajo estudiamos los efectos de la irradiación con microondas en la síntesis de biodiesel con hidróxido de sodio como catalizador homogéneo, metanol y aceite de algodón como materia prima. Para dicho objetivo, se adaptó un horno de microondas de uso doméstico para adecuarlo al uso de laboratorio.

MATERIALES Y MÉTODOS

Materiales

El metanol e hidróxido de sodio fueron comprados de firmas comerciales del medio y usados como se recibieron. El aceite de semilla de algodón fue provisto por la empresa Tante Lote, dedicada a la producción con aceite de algodón en la provincia de Chaco, Argentina.

Se utilizó un microondas comercial marca MARS-HALL con capacidad de 45 litros y de 700 watts de salida, el cual fue modificado para utilizarlo como fuente de energía para la síntesis de metil ésteres. Las modificaciones mecánicas fueron realizadas con objeto de evitar fugas de radiaciones a los alrededores, dado que es conocida la posibilidad de que las microondas puedan ser reflejadas por una superficie metálica, la modificación de este microondas fue presentado en trabajos previos (Roggero Luque et al., 2014).

Reacción de transesterificación.

Se elaboró un plan de reacciones en el cual se adoptaron diferentes valores para los parámetros más importantes de la reacción, con objeto de llegar a la

mejor combinación de ellos, con lo cual se lograría el mayor rendimiento de metil ésteres. Los parámetros que se evaluaron fueron: tiempo de reacción, relación aceite:alcohol, cantidad de catalizador, potencia del horno microondas, y por último masa de aceite. Los valores adoptados para cada una de las variables oscilaron en torno a los correspondientes a aquellos que brindan mayores rendimientos para reacciones de transesterificación bajo el método convencional de calentamiento.

La síntesis de metil ésteres se llevó a cabo en balón de vidrio de 100 ml de capacidad, solamente las reacciones donde se varió la cantidad de masa se realizó en balón de 500 ml de capacidad, estos se conectaron a un refrigerante a reflujo para evitar pérdida de alcohol y trabajar a presión atmosférica. En el balón se colocó el aceite de semilla de algodón y el catalizador mezclado con la proporción de alcohol (metóxido de sodio) preparado previamente. El balón se introdujo dentro del horno microondas, el cual se programó para controlar los parámetros tiempo de reacción y potencia. Para evitar problemas por exceso de radiación de regreso al magnetrón y ocasionar su deterioro, se ubicaron vasos de precipitado con agua para absorber aquellas radiaciones de microondas que no fueron absorbidas por la mezcla de reacción.

Una vez finalizada la reacción, el balón se colocó en baño de agua fría con objeto de detener la reacción y evitar que los reactantes continúen reaccionando. La mezcla de productos de reacción se colocó en una ampolla de decantación donde se separaron las dos fases obtenidas, la fase superior conteniendo metil ésteres y glicerol en la fase inferior. Una vez separadas ambas fases se procedió a un primer lavado de los metil ésteres con una solución de ácido clorhídrico (HCl) al 10% para neutralizar restos de catalizador.

Luego del lavado ácido se separaron las dos fases obtenidas y se procedió a un segundo lavado con solución saturada de cloruro de sodio (NaCl). Los lavados se realizaron de la misma forma, a temperatura ambiente y en ampolla de decantación. Luego de los lavados se procedió a centrifugar el producto obtenido durante 5 minutos para mejor separación de los metil ésteres de la fase acuosa, finalmente se procedió al secado de los mismos con sulfato de sodio anhidro. Los metil ésteres se rotularon y guardaron a bajas temperaturas para su evaluación por cromatografía gaseosa y en placa.

Análisis por cromatografía en placa y cromatografía gaseosa.

Los productos obtenidos de las reacciones fueron analizados por cromatografía en placa delgada (TLC) usando sílica gel con indicador de fluorescencia de 0,25 mm de espesor y diámetro de poro medio de 60 micrones, sobre aluminio, como fase estacionaria. La fase móvil utilizada fue n-hexano-éter etílico en las proporciones 90:10. Se utilizó MnO_4K , en medio ácido, como agente cromógeno para visualizar los productos de reacción.

El rendimiento en metil ésteres de cada una de las reacciones fue cuantificado por cromatografía gaseosa. Se utilizó un cromatógrafo de gases Shimadzu GC 14B, con una columna de 2 metros de longitud de tipo Mega Bore DB-1 (0,53 mm ID x 1,5 μ m espesor de film). Se usó nitrógeno como gas carrier a un caudal de 1 mL/min y la siguiente programación de temperatura: 100°C, durante 1 minuto, con un rango de aumento de temperatura de 10°C/min hasta alcanzar 320°C, allí se mantuvo por 10 min. La temperatura del inyector fue de 320°C y la del detector (FID) 320°C.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Adaptación del horno de microondas:

El acondicionamiento del horno microondas consistió en modificaciones en el bastidor del horno, incorporación de agitación magnética y eléctrica. Al bastidor se le hizo una perforación de un orificio de 20 mm en la parte superior para la entrada del tubo conector del balón de reacción y refrigerante. En la parte inferior se colocó un motor para la agitación magnética de los reactivos, cubierto por una tapa de metal pintada.

En cuanto a las modificaciones eléctricas, se colocó un regulador de velocidad para el motor del agitador en la zona de comando del equipo y un interruptor de corte para la iluminación y la agitación. Mayor detalle de las modificaciones se puede consultar con trabajos previos (Roggero Luque et al., 2014).

Rendimientos de reacciones

Se llevaron a cabo reacciones donde se evaluaron las variables tiempo de reacción, relación aceite: alcohol, cantidad de catalizador, potencia del microondas y masa de aceite. En la Tabla 1 pueden observarse los valores adoptados y los resultados de las reacciones.

En cuanto a la variable tiempo se tomaron los siguientes valores: 1, 3, 5 y 10 minutos; con relaciones molares de aceite/alcohol de 1/4, 1/6, 1/12 y 1/18; cantidades de catalizador del 0,5%, 0,8%, 1,0% y 2,0% correspondiente a la masa de aceite; potencia baja (200 watt), media (500 watt) y alta (700 watt); y masa de aceite de 20, 50, 100, 150, 200 y 350 gramos.

Las reacciones se realizaron variando un parámetro por vez, para lo cual se fijaron los otros parámetros constantes. Adoptando tiempo de reacción de 3

Tiempo (min)	Relación molar Alcohol	Masa de ac. (g)	Cant. de cat. (%)	Potencia (Watt)	Rendimiento % M.E.
1	6	20	0,8	500	86,60
3	6	20	0,8	500	92,47
5	6	20	0,8	500	96,53
10	6	20	0,8	500	96,95
3	4	20	0,8	500	91,89
3	6	20	0,8	500	96,21
3	12	20	0,8	500	97,78
3	18	20	0,8	500	98,48
3	6	20	0,5	500	90,39
3	6	20	0,8	500	97,34
3	6	20	1,0	500	98,56
3	6	20	2,0	500	99,80
3	6	20	0,8	200	94,78
3	6	20	0,8	500	95,03
3	6	20	0,8	700	96,09
3	6	50	0,8	500	96,95
3	6	100	0,8	500	98,72
3	6	150	0,8	500	97,67
3	6	200	0,8	500	97,99
3	6	350	0,8	500	93,74

Fig.6: Instanciación de la ontología de versiones. Tabla 1 Variables de reacción, valores adoptados y rendimiento de las mismas.

minutos, relación molar de aceite/alcohol 1/6, cantidad de catalizador del 0,8% respecto a la masa de aceite, potencia media (500 watt) y masa de 20 g de aceite.

Efecto del tiempo de reacción

Para los ensayos en los que se varió el tiempo de reacción se dejaron fijos los parámetros de masa de aceite en 20 g,

relación molar aceite/alcohol igual a 1/6, cantidad de catalizador 0,8% relativa a la masa de aceite y potencia media de 500 watt. Los valores de tiempos que se evaluaron fueron de 1, 3, 5 y 10 minutos. Los rendimientos obtenidos se puede observar en el Figura 1.

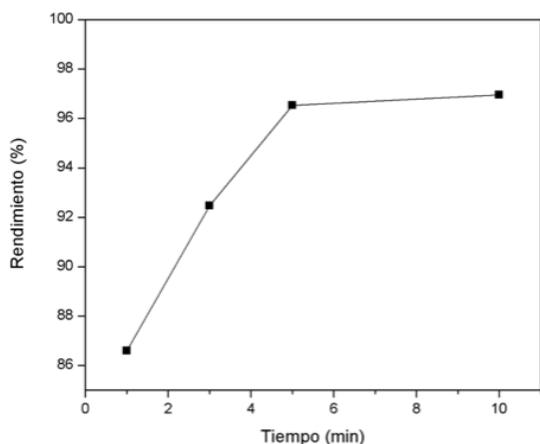


Figura 1 Efecto del tiempo en el rendimiento de la reacción

Se aprecia que el rendimiento obtenido al cabo en tan sólo 1 minuto resulta el más bajo, 86,60%. Los resultados obtenidos luego de 3, 5 y 10 minutos van de menor a mayor, pero no son tan alejados unos de otros, los valores son 92,47%, 96,53% y 96,95% respectivamente. Con lo que se fija el parámetro “tiempo de reacción” en 3 minutos para evaluar las otras variables, ya que es un tiempo corto y suficiente para lograr rendimiento superior al 90%.

Efecto de la relación molar aceite/alcohol

Para los ensayos en los que se varió la relación molar aceite/alcohol se dejaron fijos los parámetros de tiempo de reacción en 3 minutos, masa de aceite en 20 g, cantidad de catalizador 0,8% relativa a la masa de aceite y potencia media de 500 watt. Las relaciones molares de aceite/alcohol que se evaluaron fueron

1/4, 1/6, 1/12 y 1/18. Los rendimientos obtenidos se puede observar en el Figura 2.

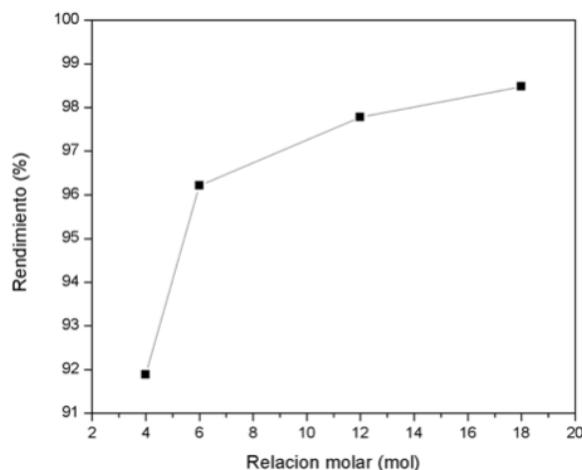


Figura 2 Efecto de la relación molar (aceite:alcohol) en el rendimiento de la reacción

En este caso, los rendimientos logrados en todas las reacciones son muy elevados, incrementando su valor a medida que incrementa la relación molar. Podemos observar que la mayor diferencia en rendimiento fue al pasar de la relación molar 1/4 a la 1/6 con un incremento de 91,89% a 96,21% respectivamente, lo cual representa tan solo el 4,7%. Entre las relaciones molares de 1/6 a la 1/12, se observa un incremento de un 1,6% en el rendimiento al pasar de 96,21% a 97,78% respectivamente. En cuanto a las relaciones molares 1/12 y 1/18, los rendimientos obtenidos son bastante similares (97,78% y 98,48%). Esto último nos indica que no se justifica el uso de una mayor cantidad de metanol para asegurar el rendimiento del producto deseado. Con estos ensayos se establece dejar fijo el parámetro de relación aceite/alcohol en 1/6, ya que es la que asegura un rendimiento con una cantidad de reactivo suficiente para alcanzarlo, además de poder comparar con las condiciones óptimas publicadas con calentamiento convencional.

Efecto de la cantidad de catalizador

Para los ensayos en los que se varió la cantidad de catalizador se dejaron fijos los parámetros de tiempo de reacción en 3 minutos, masa de aceite en 20 g, relación molar aceite/alcohol igual a 1/6 y potencia media de 500 watt. Las proporciones de cantidad de catalizador respecto a la masa de aceite que se utilizaron fueron de 0,5%, 0,8%, 1,0% y 2,0%. Los rendimientos obtenidos, que se pueden observar en el Figura 3, en todas las reacciones son superiores al 90%, incrementando su valor a medida que incrementa la cantidad de catalizador utilizado.

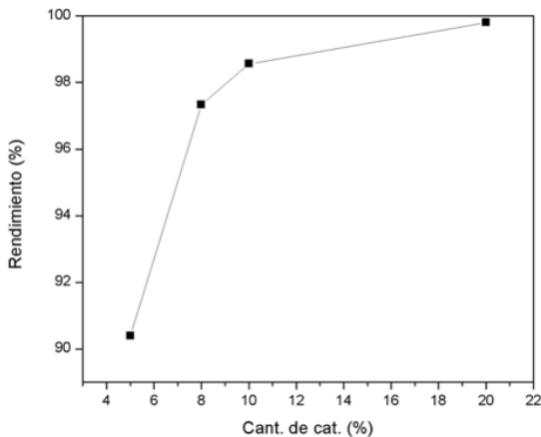


Figura 3 Efecto de la cantidad de catalizador en el rendimiento de la reacción.

Podemos observar una mayor diferencia en el rendimiento al pasar de 0,5% a 0,8% con un incremento de 91,89% a 96,21% respectivamente. Finalmente, los rendimientos obtenidos utilizando 1,0% y 2,0% son bastante similares (97,78% y 98,48%), no diferenciándose mucho del obtenido utilizando un 0,8% de cantidad de catalizador nombrado anteriormente. Podemos decir que no se justifica el uso de una mayor cantidad de hidróxido de sodio como catalizador para asegurar la conversión al producto deseado. Con estos resultados se fijó el parámetro

“cantidad de catalizador” en 0,8% ya que es la que asegura un rendimiento superior al 96%.

Efecto de la potencia

Para los ensayos en los que se varió la potencia del microondas se dejaron fijos los parámetros de tiempo de reacción en 3 minutos, masa de aceite en 20 g, relación molar aceite/alcohol igual a 1/6 y cantidad de catalizador en 0,8%. Las potencias utilizadas fueron potencia baja, media y alta, correspondiente a valores de 200, 500 y 700 watt. Los rendimientos obtenidos, Figura 4 son de 94,78% (200 watt), 95,03% (500 watt) y 96,09% (700 watt). Son rendimientos muy similares, observándose el incremento esperado al pasar de potencia baja a media y finalmente a alta. De todas maneras, se decide trabajar a potencia media y dejar fijado este parámetro en dicho valor, para no forzar el buen funcionamiento del equipo microondas a su máxima potencia.

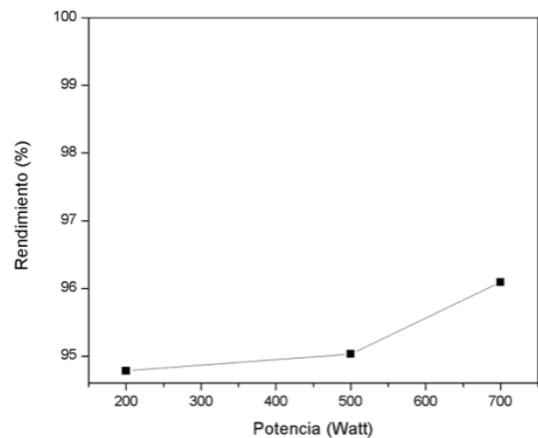


Figura 4 Efecto de la potencia en el rendimiento de la reacción.

Efecto de la masa de aceite

Por último, se evaluó la eficiencia de la microonda como fuente de energía para llevar a cabo reacciones de transesterificación aumentando la masa de aceite

utilizado, para verificar la limitación de la penetración de la microonda en el seno de la masa de reacción, lo cual podría presentar algún inconveniente.

Para los ensayos en los que se varió la masa de aceite se dejaron fijos los parámetros evaluados anteriormente, tiempo de reacción en 3 minutos, relación molar aceite/alcohol igual a 1/6, cantidad de catalizador en 0,8% y potencia media de 500 watt. Los ensayos se llevaron a cabo con masa de aceite de 50, 100, 150, 200 y 350 g. Se puede observar en la Figura 5, que los rendimientos obtenidos son muy elevados, verificándose el rendimiento más bajo en los ensayos con 350 g de aceite (93,74%), ensayo en el cual el balón de reacción se encontraba ocupado en más del 85% de su capacidad por la mezcla de reacción. Por motivos de volumen del horno microondas no se evaluaron masas mayores.

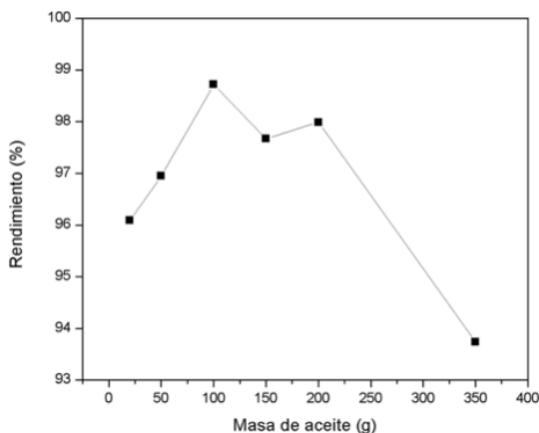


Figura 5 Efecto de la cantidad de masa en la reacción asistida por microondas.

CONCLUSIONES

La utilización de microondas como fuente de energía alternativa para llevar a cabo la reacción de transesterificación, en lugar del método convencional de calentamiento, resulta ser una técnica muy eficiente con la cual se logra alcanzar rendimientos de metil ésteres de ácidos

grasos elevados, con tiempos de reacción muy cortos. En contraste con el método convencional de calentamiento, en el cual se conoce que para obtener altos rendimientos de reacción son necesarios tiempos de 60 minutos, el calentamiento con microondas requiere un tiempo de tan sólo 3 minutos. En este trabajo se evaluó también los demás parámetros importantes para la reacción de transesterificación, como la relación aceite/alcohol, la cual se verificó como la óptima en un valor de 1/6. El mismo análisis se llevó a cabo con la cantidad de catalizador utilizado, la cual se probó que con 0,8% respecto a la masa del aceite utilizado es suficiente para lograr altos rendimientos. Los valores de éstos últimos dos parámetros son los mismos que se utilizan para llevar a cabo reacciones de transesterificación por el método convencional de calentamiento. Además, al trabajar con un nuevo equipo (horno microondas) se agregó una nueva variable propia del mismo, la potencia, con la cual se observó que rendimientos mayores son alcanzados a potencias más altas. Por otra parte, se evaluó también como varía el rendimiento de la reacción al aumentar la masa de reacción y se observó que con una buena agitación el incremento de masa no parece ser un problema al momento de pensar en producir biodiesel a mayor escala.

Es decir, se requiere un 5% del tiempo utilizado por el método convencional, manteniendo parámetros de relación aceite/alcohol y cantidad de catalizador iguales en ambos métodos, para obtener rendimientos similares, incluso mayores. Esto último se traduce en un menor consumo de energía y por lo tanto bajos costos de producción.

Finalmente, se comprueba que la irradiación de microondas para promover el calentamiento y reacción de transesterificación para obtener metil ésteres de ácidos grasos, es una técnica que puede reemplazar al método convencional de calentamiento.

REFERENCIAS

- A.M. Blanco-Marigorta, J. Suarez-Medina, A. Vera-Castellano, "Exergetic analysis of a biodiesel production process from *Jatropha curcas*", *Applied Energy*; 101, 218-225, (2013).
- Lin Lin, Zhou Cunshan, Saritporn Vittayapadug, Shen Xiangqian, Dong Mingdong, "Opportunities and challenges for biodiesel fuel", *Applied Energy*; 88, 1020-1031 (2011).
- Amin Talebian-Kiakalaieh, Nor Aishah Saidina Amin, Hossein Mazaheri, "A review on novel processes of biodiesel production from waste cooking oil", *Applied Energy*; 104, 683-710, (2013).
- Kang-Shin Chen, Yuan-Chung Lin, Kuo-Hsiang Hsu, Hsin-Kai Wang, "Improving biodiesel yields from waste cooking oil by using sodium methoxide and a microwave heating system", *Energy*; 38, 151-156, (2012).
- Egidio Viola, Alessandro Blasi, Vito Valerio, Ivan Guidi, Francesco Zimbardi, Giacobbe Braccio, Girolamo Giordano, "Biodiesel from fried vegetable oils via transesterification by heterogeneous catalysis", *Catalysis Today*; 179, 185-190, (2012).
- Honglei Zhang, Jincheng Ding, Zengdian Zhao, "Microwave assisted esterification of acidified oil from waste cooking oil by CERP/PES catalytic membrane for biodiesel production", *Bioresource Technology*; 123, 72-77, (2012).
- Abebe K. Endalew, Yohannes Kiro, Rolando Zanzi, "Heterogeneous catalysis for biodiesel production from *Jatropha curcas* oil (JCO)", *Energy*; 36, 2693-2700, (2011).
- Shakinaz A. El Sherbiny, Ahmed A. Refaat, Shakinaz T. El Sheltawy, "Production of biodiesel using the microwave technique", *Journal of Advanced Research*; 1, 309-314, (2010).
- Yusuke Asakuma, Yosuke Ogawa, Kouji Maeda, Keisuke Fukui, Hidetoshi Kuramochi, "Effects of microwave irradiation on triglyceride transesterification: Experimental and theoretical studies", *Biochemical Engineering Journal*; 58-59, 20-24, (2011).
- Nezihe Azcan, Aysegul Danisman, "Alkali catalyzed transesterification of cottonseed oil by microwave irradiation", *Fuel*; 2639-2644, (2007).
- Pranjali D. Muley, Dorin Boldor, "Investigation of microwave dielectric properties of biodiesel components", *Bioresource Technology*; 127, 165-174, (2013).
- Man Kee Lam, Keat Teong Lee, Abdul Rahman Mohamed, "Homogeneous, heterogeneous and enzymatic catalysis for transesterification of high free fatty acid oil (waste cooking oil) to biodiesel: A review", *Biotechnology Advances*; 28, 500-518, (2010).
- Juan de Mata Muñoz Molina, "Efectos de la radiación microondas. Aplicación a Química en Flujo y funcionalización de nanotubos de carbono", Tesis (Doctorado Europeo en Ciencias Químicas), Universidad de Castilla-La Mancha, Ciudad Real, 367, (2009).
- Roggero Luque Nazareno N., Giacobello Nicolás, Morales Walter G., Sequeira Alfredo, Chamorro Ester, "Transesterificación de ácidos grasos para la obtención de metiles ésteres asistida por microondas", *Actas de la III Jornada de investigación en Ingeniería del NEA y países limítrofes - Resistencia, Chaco - Argentina, junio de 2014*, (2014).