



Los alumnos deben llenar esta hoja y entregarla al supervisor junto con la versión final de su monografía.

Número de convocatoria del alumno

Nombre y apellido(s) del alumno

Número del colegio

Nombre del colegio

Convocatoria de exámenes (mayo o noviembre)

MAYO

Año

2013

Asignatura del Programa del Diploma en la que se ha inscrito la monografía: QUÍMICA

(En el caso de una monografía en lenguas, señale si se trata del Grupo 1 o el Grupo 2.)

Título de la monografía: ESTUDIO DEL PROCESO DE TRANSFORMACIÓN
DE UN RESIDUO (ACEITE USADO) EN UN RECURSO
(BIODIESEL)

Declaración del alumno

El alumno debe firmar esta declaración; de lo contrario, es posible que no reciba una calificación final.

Confirmando que soy el autor de este trabajo y que no he recibido más ayuda que la permitida por el Bachillerato Internacional.

He citado debidamente las palabras, ideas o gráficos de otra persona, se hayan expresado estos de forma escrita, oral o visual.

Sé que el máximo de palabras permitido para las monografías es 4.000, y que a los examinadores no se les pide que lean monografías que superen ese límite.

Esta es la versión final de mi monografía.

Firma del alumno:

Fecha:

Informe y declaración del supervisor

El supervisor debe completar este informe, firmar la declaración y luego entregar esta portada junto con la versión final de la monografía al coordinador del Programa del Diploma.

Nombre y apellido(s) del supervisor [MAYÚSCULAS]:

Si lo considera adecuado, escriba algunos comentarios sobre el contexto en que el alumno desarrolló la investigación, las dificultades que encontró y cómo las ha superado (ver página 13 de la guía para la monografía). La entrevista final con el alumno puede ofrecer información útil. Estos comentarios pueden ayudar al examinador a conceder un nivel de logro para el criterio K (valoración global). No escriba comentarios sobre circunstancias adversas personales que puedan haber afectado al alumno. En el caso en que el número de horas dedicadas a la discusión de la monografía con el alumno sea cero, debe explicarse este hecho indicando cómo se ha podido garantizar la autoría original del alumno. Puede adjuntar una hoja adicional si necesita más espacio para escribir sus comentarios.

El supervisor debe firmar esta declaración; de lo contrario, es posible que no se otorgue una calificación final.

He leído la versión final de la monografía, la cual será entregada al examinador.

A mi leal saber y entender, la monografía es el trabajo auténtico del alumno.

He dedicado horas a discutir con el alumno su progreso en la realización de la monografía.

Firma del supervisor:

Fecha

Formulario de evaluación (para uso exclusivo del examinador)

Criterios de evaluación	Nivel de logro					
	Examinador 1	Máximo	Examinador 2	Máximo	Examinador 3	
A Formulación del problema de investigación	1	2		2		
B Introducción	1	2		2		
C Investigación	2	4		4		
D Conocimiento y comprensión del tema	2	4		4		
E Argumento razonado	2	4		4		
F Aplicación de habilidades de análisis y evaluación apropiadas para la asignatura	2	4		4		
G Uso de un lenguaje apropiado para la asignatura	2	4		4		
H Conclusión	1	2		2		
I Presentación formal	2	4		4		
J Resumen	2	2		2		
K Valoración global	2	4		4		
Total (máximo 36)	19					



Albacete, 18 de enero de 2013

, PROFESORA DE QUÍMICA DE
BACHILLERATO INTERNACIONAL Y RESPONSABLE DE LA MONOGRAFÍA-
DEL ALUMNO

INFORMA:

Que la parte experimental de la monografía realizada por
alumno de Bachillerato Internacional del Instituto de Bachillerato
ha sido realizada en el laboratorio de Ingeniería Química y Tecnología de los
Alimentos de la Universidad de Cádiz, aprovechando la estancia de una semana en di-
cha Universidad, en el Campus Científico de verano de 2012, con una beca concedida a
dicho alumno por el Ministerio de Educación y Cultura.

El motivo de no realizar esta parte experimental en el laboratorio del Instituto,
ha sido por no disponer de cromatógrafo líquido de alta eficiencia con el fin de averi-
guar la cantidad exacta y pura de glicerina existente en el volumen correspondiente a la
fase glicerina y con esta cantidad poder calcular el rendimiento de la reacción de tran-
sesterificación.

Este trabajo ha sido supervisado por el profesor lo
que firma para que conste y surta los efectos oportunos.

**ESTUDIO DEL PROCESO DE
TRANSFORMACIÓN
DE UN RESIDUO (ACEITE USADO)
EN UN RECURSO (BIODIÉSEL)**

Nº de palabras: 3923

Índice:

	Pág
1. Introducción.....	5
1.1. Elección del tema.....	5
1.2. Fundamento teórico.....	5
1.2.1. Reacción de transesterificación.....	5
1.2.2. Aspectos a tener en cuenta en el aceite a transformar.....	6
1.2.3. Factores que influyen.....	6
1.3. Pregunta de investigación.....	7
2. Plan de trabajo y metodología.....	7
2.1. Preparación del aceite para la reacción.....	7
2.1.1. Filtrado y desecado.....	7
2.1.2. Valoración de la acidez del aceite.....	8
2.2. Estudio del rendimiento de la reacción de transesterificación en función de las proporciones metanol/aceite y catalizador/aceite.....	9
2.2.1. Establecimiento de constantes y variables.....	9
2.2.2. Método de control de variables.....	10
2.2.3. Método de obtención de datos.....	16
2.2.4. Fase experimental.....	21
2.2.5. Obtención y procesamiento de datos.....	22
3. Conclusiones.....	26
3.1. Sobre la preparación del aceite para la reacción.....	26
3.2. Sobre la reacción de transesterificación.....	26
3.2.1. En cuanto al factor proporción metanol/aceite.....	27
3.2.2. En cuanto al factor proporción catalizador/aceite.....	27
3.3. Conclusión final.....	28
4. Bibliografía.....	29
5. Agradecimientos.....	29

Índice de figuras:

Figura 1: La reacción de transesterificación.....	5
Figura 2: Gráfica ejemplo rendimiento - porcentaje catalizador/aceite.....	18
Figura 3: Gráfica ejemplo rendimiento - porcentaje catalizador/aceite (series 1, 2 y 3). Concentración de KOH constante (rendimientos de distintas proporciones metanol/aceite de una misma disolución).....	19
Figura 4: Gráfica ejemplo rendimiento - porcentaje catalizador/aceite (series 4, 5 y 6). Cantidad de metanol constante (mismo volumen añadido de cada disolución).....	20
Figura 5: Agitador magnético con la mezcla de aceite en reacción.....	21
Figura 6: Decantador con la fase biodiésel (amarilla y arriba) y la fase glicerina (marrón y abajo).....	21
Figura 7: Rendimiento de las reacciones de transesterificación de los nueve experimentos.....	24
Figura 8: Rendimiento de las reacciones de transesterificación de los nueve experimentos (gráfico de barras).....	24
Figura 9: Rendimientos en función del porcentaje catalizador/aceite p/p (series 1,2 y 3). Concentración de KOH constante: (rendimientos de distintas proporciones metanol/aceite de una misma disolución).....	25
Figura 10: Rendimientos en función de el porcentaje catalizador/aceite p/p (series 4,5 y 6). Cantidad de metanol constante: (mismo volumen añadido de cada disolución).....	25

Índice de tablas:

Tabla 1: Experimentos según la variación de las cantidades de metanol y de catalizador.....	12
Tabla 2: Metanol añadido según la proporción metanol/aceite para los distintos experimentos.....	14
Tabla 3: Características de los nueve experimentos a realizar.....	16
Tabla 4: Tabla de series para la concentración KOH en metanol constante.....	19
Tabla 5: Tabla de series para la proporción metanol/aceite constante (cantidad de metanol constante).....	20
Tabla 6: Datos iniciales de cada experimento.....	22
Tabla 7: Cálculo del rendimiento y las cantidades de biodiesel obtenido a partir de los datos dados por el cromatógrafo (concentraciones de la fase glicerina).....	23

Resumen:

El presente trabajo pretende analizar el proceso químico de obtención del biodiésel, combustible alternativo derivado de lípidos.

La investigación parte del interés de averiguar la viabilidad y rentabilidad de un procedimiento que transformaría un residuo (aceite usado) en una fuente de energía (biodiésel).

Para ello, he realizado la reacción de transesterificación (transformación del aceite en biodiésel) con proporciones distintas de metanol y de catalizador con una cantidad fija de aceite.

Este proceso depende de múltiples factores, nos hemos centrado solamente en dos: la proporción metanol/aceite y la proporción catalizador/aceite. Así, he estudiado la influencia de estos dos factores en el rendimiento del proceso.

También hemos observado la influencia del índice de acidez de los aceites en función de las veces que se hayan usado, propiedad a tener en cuenta en el rendimiento de la reacción de transesterificación. Un aceite demasiado ácido no sería apto para su transformación en biodiésel.

De esta investigación hemos obtenido que el índice de acidez de un aceite aumenta cuánto más usado está, y eso nos lleva a la conclusión de que el proceso sólo resultaría rentable para aceites poco usados.

En nuestras conclusiones, he obtenido que para ambos casos el rendimiento aumenta cuanto mayor es la proporción hasta un determinado punto máximo de inflexión, a partir del cuál empieza a bajar. Ese punto de inflexión sólo puede obtenerse mediante experimentación, y debe ser encontrado para hacer el proceso de transformación del aceite usado en biodiésel rentable.

1. Introducción:

1.1. Elección del tema:

El presente trabajo pretende analizar el proceso de producción del biodiésel, combustible alternativo derivado de lípidos.

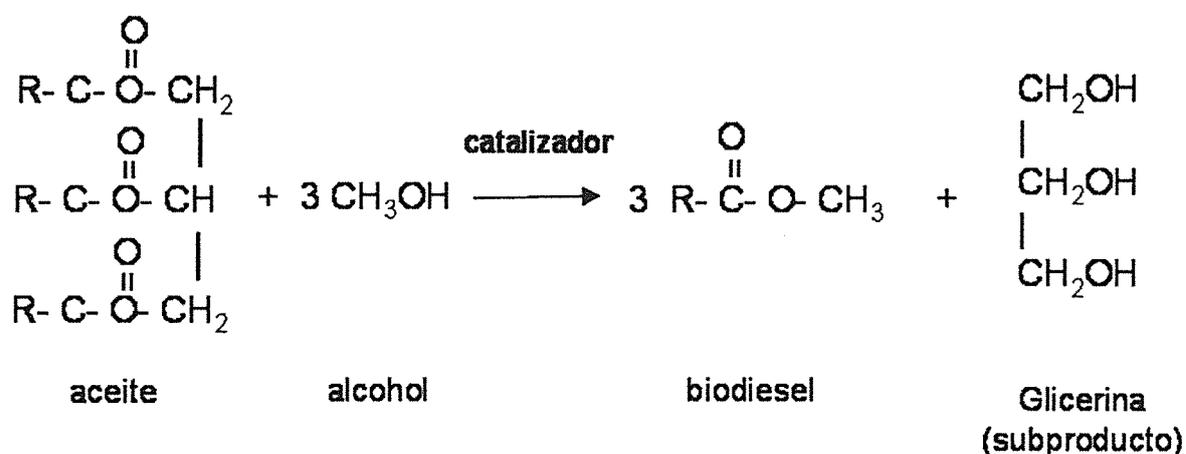
Si bien ya existe una cantidad de información considerable publicada sobre el tema, me centraré en factores concretos (rendimiento de la reacción, en relación con las concentraciones de metanol y catalizador) a escalas concretas del proceso, y no en el tema en general.

El objetivo del trabajo es estudiar las condiciones más favorables de dichas concentraciones para obtener el mayor rendimiento.

1.2. Fundamento teórico:

1.2.1. La reacción de transesterificación:

Figura 1: La reacción de transesterificación



Lo que pretendo es transformar aceite en biodiésel mediante esta reacción.

El aceite, es un triglicérido, con mayor o menor número de carbonos en cada cadena en función del tipo de aceite.

Durante la reacción los ácidos grasos del triglicérido se separan del mismo por la acción de las moléculas de metanol. Primero el triglicérido se convierte en diglicérido y luego en monoglicérido, conforme actúan las tres moléculas de metanol. El resultado son los alquilésteres, resultado de la unión del alcohol al ácido graso, y la glicerina, que queda de la unión de los carbonos extremos del triglicérido con los grupos OH.

Los alquilésteres son el biodiésel, y la glicerina queda como subproducto, aunque puede ser utilizada en alimentación, farmacia y productos cosméticos.

1.2.2. Aspectos a tener en cuenta en el aceite a transformar:

a. La acidez del aceite:

Si el aceite es ácido, quiere decir que tiene ácidos grasos libres en su composición. Éstos, se combinan con el catalizador básico (KOH) para producir jabones, mediante la reacción de saponificación. Esto interfiere en la reacción de transesterificación disminuyendo de manera considerable el rendimiento.

Pregunta de interés:

¿Qué hace que el aceite se acidifique?

b. El contenido en agua e impurezas:

Las impurezas en el aceite dificultan la reacción por dificultar los choques entre partículas. Por tanto, debemos encontrar un proceso para limpiar el aceite de esas impurezas.

El contenido en agua es igualmente perjudicial, pues al igual que los ácidos grasos libres, el agua, en presencia de KOH, produce la reacción de saponificación. Por tanto, debemos encontrar un proceso para eliminar la mayor cantidad de agua contenida en el aceite posible.

1.2.3. Factores que influyen:

Según las proporciones estequiométricas, por cada molécula de aceite que reaccione, deberían formarse tres moléculas de biodiésel. Sin embargo, si esta proporción se cumpliera, y todo el aceite reaccionara con todo el metanol, alcanzaríamos un rendimiento máximo que en la práctica, no se da.

Esto se debe a la reversibilidad de la reacción. Si consideramos la reacción como un equilibrio, (que es lo que es en la práctica), para alcanzar el rendimiento máximo, debemos desplazar la reacción hacia los productos, hacia el biodiésel. Y para ello, lo que hacemos es modificar las proporciones de metanol/aceite y las de catalizador/aceite, procurando desplazar el equilibrio hacia la derecha para así obtener el rendimiento óptimo.

1.3. Pregunta de investigación:

La pregunta en general:

¿Cuáles son las condiciones más favorables químicamente para producir biodiésel a partir de aceites usados?

Las preguntas concretas de investigación (centrándonos en los factores a estudiar y teniendo en cuenta el fundamento teórico):

1. ¿Cómo varía el rendimiento de la reacción de transesterificación en función de la proporción metanol/aceite y la proporción catalizador (KOH)/aceite?
2. ¿Cuáles son las características que debe tener el aceite para su transformación en biodiésel?

2. Plan de trabajo y metodología:

2.1. Preparación del aceite para la reacción:

2.1.1. Filtrado y desecado:

El aceite usado contiene restos de otras sustancias que dificultarían o incluso impedirían la reacción. Estas sustancias son, básicamente dos y deben ser retiradas:

1. Los restos sólidos que han quedado de las frituras:

Filtrado del aceite: este proceso separará los restos sólidos del aceite mediante un colador sencillo.

2. Los restos de agua que ha pasado de los alimentos al aceite al cocinar:

Desecado del aceite: someteremos el aceite a una temperatura superior a 100 °C para que evapore todo el agua que pueda contener.

El exceso de agua produciría la formación de jabones (saponificación).

2.1.2. Valoración de la acidez del aceite:

La acidez del aceite, se mide como "índice de acidez", el cual según la norma UNE-EN 14104 se denomina como:

Número de miligramos de hidróxido de potásico necesarios para neutralizar los ácidos grasos libres presentes en 1 g de FAME.

Si el índice de acidez es muy alto la cantidad de catalizador que será necesaria para llevar a cabo la transesterificación será mayor, al igual que el riesgo de formación de jabones.

Se suele descartar aquellos aceites con un índice de acidez mayor de 1.

Procedimiento para la valoración del índice de acidez:

1. Se toma una muestra de aceite para realizar la valoración y se mide su masa. En nuestro caso, usaremos una muestra de 7 g de aceite al cual le añadimos 50 ml de etanol y agitamos para disolver.
2. Posteriormente añadimos 4-5 gotas de fenoftaleína.
3. Añadir (valorar) la solución de KOH 0,05 N previamente preparada hasta producir una coloración rosada que permanezca por más de 1 min.

Una vez realizados todos estos pasos, calcularemos el índice de acidez = mg de KOH necesarios para neutralizar 1 g de aceite.

$$M(\text{KOH}) = N(\text{KOH}) = \frac{\text{g KOH}/P_m \text{ KOH}}{V(\text{L})} \rightarrow N(\text{KOH}) \times V(\text{L})/P_m \text{ KOH} = \text{g KOH}$$

$$\text{g de KOH} / \text{g de aceite valorados} = \text{índice de acidez}$$

Si el resultado es un número mayor que 1 despreciaremos el aceite, por considerarlo demasiado ácido.

En este apartado realizaré la valoración con el aceite de girasol usado y compararé con otra muestra de aceite de girasol limpio, para observar si la variación de acidez es muy grande:

Aceite usado:

g de aceite = 7 g

Índice de acidez = $(0,05 \text{ N} \times 2,2 \text{ ml} \times 56,1) / 7 \text{ g} = 0,88$

Aceite sin usar:

g de aceite = 7 g

Índice de acidez = $(0,05 \text{ N} \times 0,65 \text{ ml} \times 56,1) / 7 \text{ g} = 0,26$

Como se puede observar, el aceite de girasol sin usar es mucho menos ácido, y es al usarlo para cocinar cuando adquiere su acidez. Como es menor que 1, es apto para transformarlo en biodiésel.

Sin embargo este factor es importante, porque observo que al usar el aceite para cocinar adquiere acidez, y por tanto los aceites que hayan sido usados demasiadas veces no serán aptos para la producción de biodiésel.

2.2. Estudio del rendimiento de la reacción de transesterificación en función de las proporciones metanol/aceite y catalizador/aceite:

En este apartado estudiaré las mejores condiciones para producir la reacción de transesterificación con el mayor rendimiento posible.

Al tratarse del estudio del rendimiento de una reacción química, se poseen múltiples variables que pueden alterar su rendimiento. Para que la investigación fuera adecuada y fiable, se debería estudiar todos esos factores, tales como temperatura, cantidades de sustancia etc... Yo me centraré en dos factores: la cantidad de metanol (CH_3OH), y la cantidad de catalizador (KOH) empleados en la reacción.

2.2.1. Establecimiento de constantes y variables:

Variable dependiente:

El rendimiento de la reacción. El planteamiento del experimento es ver como afecta al rendimiento la distinta proporción catalizador/aceite y metanol/aceite

Para que los otros factores no influyan, los mantendré constantes.

Variable independiente:

Las variables manipuladas serán la proporción metanol/aceite, y la proporción catalizador/aceite. Usaré hidróxido de potasio como catalizador. En función de estas cantidades variará el rendimiento.

Primero estudiaré el rendimiento de la reacción con una proporción metanol/aceite de 6:1, equivalente a 50 ml de metanol y 180 g de aceite, y variaré la cantidad de catalizador, usando como variables, 0,5 1,0 y 1,5 % p/p de KOH/aceite.

Usaré esta proporción metanol aceite, porque es la que aporta el rendimiento máximo según el trabajo: Production of biodiésel from waste frying oils. Waste Management, 26(5), 487-494.

Partiendo de eso, lo que estudiaré es como varía en el rendimiento la proporción catalizador aceite (ó % KOH/aceite p/p). He elegido 0,5 1,0 y 1,5 % p/p KOH/aceite porque son números pequeños y redondos, separados por la misma variación (0,5).

Posteriormente, estudiaré la influencia de la cantidad de metanol en el rendimiento, y para eso, y para comprobar si efectivamente la proporción más eficaz es la 6:1, variaré las proporciones a 3:1 y 4,4:1.

3:1 porque es la proporción estequiométrica original de la reacción.

La proporción 4,4 se ha elegido porque se pretendía una proporción 4,5:1 (que es la mitad de las proporciones 6:1 y 3:1) pero esta proporción daba una cantidad de metanol decimal (37,456 ml) y se ha redondeado a 37 ml, cantidad para la cual, la proporción es 4,4:1.

Constantes:

Mantendré constantes las cantidades de aceite que reaccionarán, así como la temperatura, la presión y el tiempo de reacción y decantación (explicado posteriormente).

2.2.2. Método de control de variables:

Variable dependiente:

Rendimiento de la reacción de transesterificación.

Dependerá de:

La proporción metanol/aceite usada en cada caso:

-3,0 moles/1 mol

-4,4 moles/1 mol

-6,0 moles/1 mol

La proporción catalizador/aceite usada en cada caso:

Usaré tanto para la proporción 6:1 como para las demás proporciones metanol/aceite tres disoluciones cuyas concentraciones se correspondan con las requeridas para que con 50 ml de las mismas obtengamos unos porcentajes de 0,5 1,0 y 1,5 % p/p KOH/aceite.

Las distintas concentraciones se calcularán más adelante.

Preparación previa de disoluciones:

Las disoluciones las prepararemos de forma que para la proporción 6:1 (50ml de metanol y 180 g de aceite), el % p/p de KOH/aceite sea 0,5 1,0 y 1,5.

Cálculo de los gramos de KOH necesarios:

- 0,5 % p/p:

$$\text{g de KOH necesarios} = \frac{\% \text{ p/p} \times \text{g aceite}}{100} = 0,5 \times 180/100 = 0,9 \text{ g}$$

- 1,0 % p/p:

$$\text{g de KOH necesarios} = \frac{\% \text{ p/p} \times \text{g aceite}}{100} = 1,0 \times 180/100 = 1,8 \text{ g}$$

- 1,5 % p/p:

$$\text{g de KOH necesarios} = \frac{\% \text{ p/p} \times \text{g aceite}}{100} = 1,5 \times 180/100 = 2,7 \text{ g}$$

Cálculo de las concentraciones de la disolución en función de los g de KOH necesarios y la proporción 6:1 metanol/ aceite:

- 0,5 % p/p:

$$\text{Concentración (g/L)} = \frac{\text{g de KOH necesarios}}{0,05 \text{ L metanol}} = 0,9/0,05 = 18 \text{ g/L}$$

- 1,0 % p/p:

$$\text{Concentración (g/L)} = \frac{\text{g de KOH necesarios}}{0,05 \text{ L metanol}} = 1,8/0,05 = 36 \text{ g/L}$$

- 1,5 % p/p:

$$\text{Concentración (g/L)} = \frac{\text{g de KOH necesarios}}{0,05 \text{ L metanol}} = 2,7/0,05 = 54 \text{ g/L}$$

Por tanto añadiré 18, 36 y 54 g de KOH a tres L de metanol respectivamente para formar las disoluciones.

Una vez que tenemos las disoluciones, añadiré parte de ellas a una misma cantidad de aceite (180 g). Realizaré 9 experimentos, variando para cada disolución, el volumen añadido. Esto lo haré con el objetivo de variar, además de la cantidad de catalizador, la cantidad de metanol, que influirá en el proceso.

Tabla 1: Experimentos según la variación de las cantidades de metanol y de catalizador:

Proporción metanol/aceite	Concentración de las disoluciones que determinará el % p/p		
	18 g/L	36 g/L	54 g/L
Proporción 3 : 1	Experimento 1	Experimento 2	Experimento 3
Proporción 4,4 : 1	Experimento 4	Experimento 5	Experimento 6
Proporción 6 : 1	Experimento 7	Experimento 8	Experimento 9

Variable independiente:

Las variables independientes son dos:

1. La proporción metanol/aceite:

Para controlar esta variable usaré distintos volúmenes de las tres distintas disoluciones preparadas, de forma que al aumentar el volumen de la disolución, aumentará también la cantidad de metanol añadida (pues el metanol es el disolvente de las disoluciones)

Dado que pretendo conseguir unas proporciones de 3: 1 mol, 4,4: 1 mol y 6: 1 mol, debo añadir unos volúmenes correspondientes a las cantidades de sustancia requeridas. Para ello debo calcular primero los volúmenes necesarios:

Partiendo de:

Cantidad fija de aceite: 180 g de aceite.

Peso molecular del aceite: 874,8 g/mol

Peso molecular del metanol: 32 g/mol

Densidad del metanol: 0,791 g/ml

Primero calcularemos los moles de aceite correspondientes a 180 g:

$$\frac{\text{g de aceite}}{\text{peso molecular aceite}} = \frac{180 \text{ g}}{874,8 \text{ g/mol}} = 0,206 \text{ moles de aceite.}$$

Luego calcularé los moles de metanol necesarios para cada una de las tres proporciones:

Moles de aceite x moles en proporción = moles de metanol necesarios.

3: 1

0,206 moles de aceite x 3 = 0,618 moles de metanol necesarios.

4,4: 1

0,206 moles de aceite x 3 = 0,906 moles de metanol necesarios.

6: 1

0,206 moles de aceite x 3 = 1,24 moles de metanol necesarios.

Posteriormente calcularé los volúmenes de metanol correspondientes a los moles de metanol calculados:

$$\frac{\text{Moles de metanol necesarios} \times \text{peso molecular metanol}}{\text{Densidad del metanol} \times 1000} = \text{volumen necesario (L)}$$

- 3: 1

$$\frac{0,618 \text{ moles de metanol necesarios} \times 32 \text{ g/mol}}{791 \text{ g/L}} = 0,025 \text{ L}$$

- 4,4: 1

$$\frac{0,906 \text{ moles de metanol necesarios} \times 32 \text{ g/mol}}{791 \text{ g/L}} = 0,037 \text{ L}$$

- 6: 1

$$\frac{1,24 \text{ moles de metanol necesarios} \times 32 \text{ g/mol}}{791 \text{ g/L}} = 0,050 \text{ L}$$

Ya tenemos los volúmenes de metanol que debemos añadir, que corresponderán a los volúmenes de disoluciones que añadiremos al aceite.

Tabla 2: Metanol añadido según la proporción metanol/aceite para los distintos experimentos:

Proporción metanol/aceite	Volumen de disolución añadido cada vez (Volumen de metanol)	Concentración de las disoluciones que determinará el % p/p		
		18 g/L	36 g/L	54 g/L
Proporción 3 : 1	25 ml de metanol	Experimento 1	Experimento 2	Experimento 3
Proporción 4,4 : 1	37 ml de metanol	Experimento 4	Experimento 5	Experimento 6
Proporción 6 : 1	50 ml de metanol	Experimento 7	Experimento 8	Experimento 9

2. La proporción catalizador/aceite:

Controlaremos esta variable con las concentraciones de KOH de cada disolución y los volúmenes de disolución que añadamos.

Así, calcularemos ahora los porcentajes de KOH en peso en función de la cantidad de aceite:

$$\frac{\text{Volumen añadido (L)} \times \text{concentración de la disolución (g/L)}}{\text{g de aceite}} = \% \text{ p/p}$$

- 50 ml de disolución 18 g/L:

$$\frac{0,050 \text{ L} \times 18 \text{ g/L}}{180 \text{ g de aceite}} \times 100 = 0,50 \%$$

- 37 ml de disolución 18 g/L:

$$\frac{0,037 \text{ L} \times 18 \text{ g/L}}{180 \text{ g de aceite}} \times 100 = 0,37\%$$

- 25 ml de disolución 18 g/L:

$$\frac{0,025 \text{ L} \times 18 \text{ g/L}}{180 \text{ g de aceite}} \times 100 = 0,25 \%$$

- 50 ml de disolución 36 g/L:

$$\frac{0,050 \text{ L} \times 36 \text{ g/L}}{180 \text{ g de aceite}} \times 100 = 1,00 \%$$

- 37 ml de disolución 36 g/L:

$$\frac{0,037 \text{ L} \times 36 \text{ g/L}}{180 \text{ g de aceite}} \times 100 = 0,74 \%$$

- 25 ml de disolución 36 g/L:

$$\frac{0,025 \text{ L} \times 36 \text{ g/L}}{180 \text{ g de aceite}} \times 100 = 0,50 \%$$

- 50 ml de disolución 54 g/L:

$$\frac{0,050 \text{ L} \times 54 \text{ g/L}}{180 \text{ g de aceite}} \times 100 = 1,50 \%$$

- 37 ml de disolución 54 g/L:

$$\frac{0,037 \text{ L} \times 54 \text{ g/L}}{180 \text{ g de aceite}} \times 100 = 1,11 \%$$

- 25 ml de disolución 54 g/L:

$$\frac{0,025 \text{ L} \times 54 \text{ g/L}}{180 \text{ g de aceite}} = 0,75 \%$$

Tabla 3: características de los nueve experimentos a realizar:

Proporción metanol/aceite	Volumen de disolución añadido cada vez (Volumen de metanol)	Concentración de las disoluciones que determinará el % p/p		
		18 g/L	36 g/L	54 g/L
Proporción 3 : 1	25 ml de metanol	Experimento 1	Experimento 2	Experimento 3
% p/p KOH/aceite	→	0,25	0,50	0,75
Proporción 4,4 : 1	37 ml de metanol	Experimento 4	Experimento 5	Experimento 6
% p/p KOH/aceite	→	0,37	0,74	1,11
Proporción 6 : 1	50 ml de metanol	Experimento 7	Experimento 8	Experimento 9
% p/p KOH/aceite	→	0,50	1,00	1,50

2.2.3. Método de obtención de datos:

a. Forma de obtener los datos:

Los datos que debemos obtener son los rendimientos de las reacciones correspondientes a cada experimento. Estos datos los obtendremos a partir de las cantidades de glicerina obtenidas y la fórmula:

$$\text{Rendimiento} = \frac{\text{Cantidad de glicerina obtenida}}{\text{Cantidad teórica}} \times 100$$

Usaremos la cantidad de glicerina en vez de la de biodiésel para calcular el rendimiento, ya que la glicerina se separa en un estado más puro de la mezcla resultante de la reacción que el biodiésel.

Cálculo de la cantidad de glicerina obtenida:

Calcularemos la cantidad de glicerina obtenida midiendo el volumen obtenido de glicerina y tomamos una muestra que pasaremos por un cromatógrafo líquido de alta eficiencia con el fin de averiguar la cantidad exacta y pura de glicerina existente en el volumen correspondiente a la fase glicerina y con esta cantidad poder calcular el rendimiento de la reacción.

El procedimiento para usar el cromatógrafo es complejo y no lo realizaré yo personalmente. Aún así, explicaré brevemente lo que tendré que hacer:

1. Prepararé una dilución 1:100 con una muestra de la glicerina decantada.
2. Esa disolución será sometida al espectrómetro y obtendré la concentración de glicerina de la fase de glicerina decantada.

3. Una vez que conozca la concentración, medirá el volumen de la fase de glicerina decantada y calculará la masa de glicerina obtenida usando la concentración.
4. Con la cantidad de glicerina podrá calcular la cantidad de biodiésel estequiométricamente, así como el rendimiento de la reacción.

Concentración de la fase glicerina (g/L) x volumen de la fase glicerina x concentración dilución = g glicerina obtenidos.

Observamos que hay que multiplicar la concentración de glicerina dada por el espectrómetro por la concentración de la dilución, para hallar la concentración de la fase glicerina.

Cálculo de la cantidad teórica de glicerina:

A partir de la reacción:

Triglicéridos (aceite) + 3 Metanol ----- 3 Alquil-ésteres (biodiésel) + Glicerina

Para realizar todos los cálculos necesarios, necesito los pesos moleculares de cada sustancia.

Peso molecular aceite= 874,8 g/mol

Peso molecular del metanol= 32 g/mol

Peso molecular del biodiésel= 292,9 g/mol

Peso molecular de la glicerina= 92 g/mol

Los pesos moleculares que no pueden ser calculados mediante suma de masas moleculares los he obtenido del trabajo *Production of biodiésel from waste frying oils. Waste Management, 26(5), 487-494.*

El del metanol y la glicerina los he calculado a partir de las masas moleculares de los átomos que forman las moléculas.

Con las masas moleculares y las proporciones molares, podemos hallar la proporción de masas:

Primero, dado que el espectrómetro nos dará masas de glicerina, debemos hallar la proporción de masas glicerina/biodiésel

Proporción de masas biodiésel/glicerina:

Proporción molar glicerina/biodiésel → 1: 3

Proporción masas glicerina/biodiésel → 1 mol x 92 g/mol: 3 moles x 292,9 g/mol = 0,10

Proporción masas biodiésel/ glicerina $\rightarrow 1/0,10 = 10$

Proporción de masas aceite/biodiésel:

Proporción molar aceite/biodiésel $\rightarrow 1: 3$

Proporción masas $\rightarrow 1 \text{ mol} \times 874,8 \text{ g/mol}: 3 \text{ moles} \times 292,9 = 1,00$

A partir de estas proporciones, calcularemos la cantidad teórica de glicerina:
 $\text{g de biodiésel}/10 = \text{g de aceite}/10 = \text{g glicerina teóricos}.$

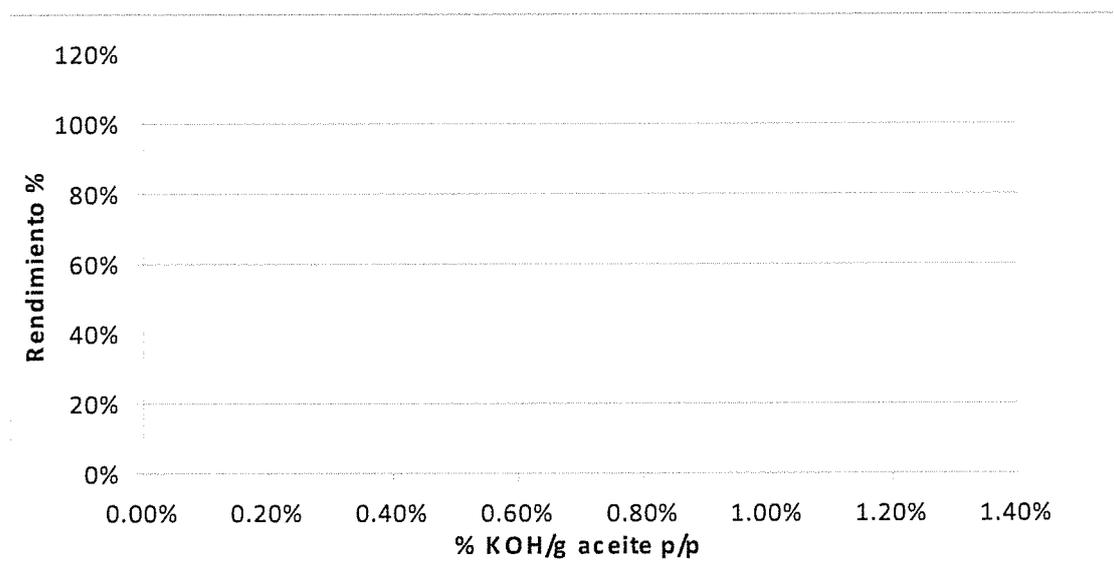
Cálculo de la cantidad de biodiésel puro obtenido:

Multiplicación de los gramos de glicerina pura obtenidos por la proporción de masas biodiésel/glicerina anteriormente calculada (10:1) $\rightarrow \text{g biodiésel}$

b. Forma de procesar los datos:

Los rendimientos para cada experimento los colocaremos en una gráfica. En el eje de abscisas, colocaremos el porcentaje de catalizador/metanol y en el eje de ordenadas el rendimiento:

Figura 2: Gráfica ejemplo rendimiento - porcentaje catalizador/aceite:



Obtendré así rendimientos distintos para cada uno de los 9 experimentos. Para observar mejor los resultados, clasificaré los datos en seis series de tres y los colocaremos en gráficas en las que mantendré primero la concentración KOH en metanol constante, y luego la proporción metanol/aceite constante.

Tabla 4: Tabla de series para la concentración KOH en metanol constante:

Concentración de KOH constante: (rendimientos de distintas proporciones metanol/aceite de una misma disolución)	
Serie 1 (18 g/L):	
Proporción 3:	1 de metanol/aceite de disolución de 18 g/L de KOH en metanol
Proporción 4,4:	1 de metanol/aceite de disolución 18 g/L de KOH en metanol
Proporción 6:	1 de metanol/aceite de disolución 18 g/L de KOH en metanol
Serie 2 (36 g/L):	
Proporción 3:	1 de metanol/aceite disolución 36 g/L de KOH en metanol
Proporción 4,4:	1 de metanol/aceite de disolución 36 g/L de KOH en metanol
Proporción 6:	1 de metanol/aceite de disolución 36 g/L de KOH en metanol
Serie 3 (54 g/L):	
Proporción 3:	1 de metanol/aceite de disolución 54 g/L de KOH en metanol
Proporción 4,4:	1 de metanol/aceite de disolución 54 g/L de KOH en metanol
Proporción 6:	1 de metanol/aceite de disolución 54 g/L de KOH en metanol

Figura 3: Gráfica ejemplo rendimiento - porcentaje catalizador/aceite (series 1, 2 y 3). Concentración de KOH constante: (rendimientos de distintas proporciones metanol/aceite de una misma disolución).

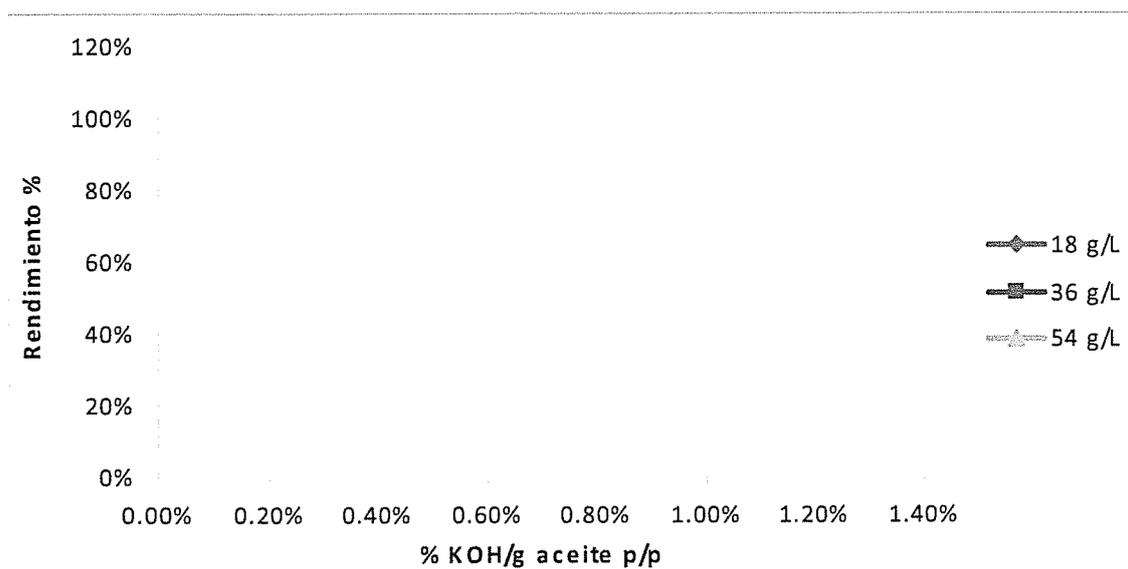
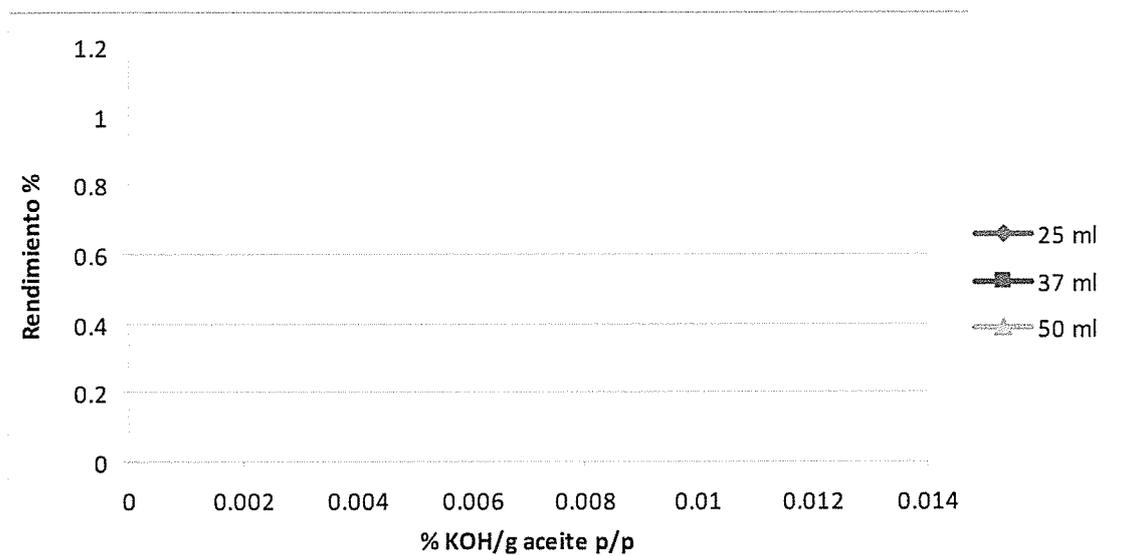


Tabla 5: Tabla de series para la proporción metanol/aceite constante (cantidad de metanol constante):

Cantidad de metanol constante: (mismo volumen añadido de cada disolución)
Serie 4 (Proporción 3: 1):
Proporción 3: 1 de metanol/aceite de disolución de 18 g/L de KOH en metanol
Proporción 3: 1 de metanol/aceite de disolución de 36 g/L de KOH en metanol
Proporción 3: 1 de metanol/aceite de disolución de 54 g/L de KOH en metanol
Serie 5 (Proporción 4,4: 1):
Proporción 4,4: 1 de metanol/aceite de disolución 18g/L de KOH en metanol
Proporción 4,4: 1 de metanol/aceite de disolución 36 g/L de KOH en metanol
Proporción 4,4: 1 de metanol/aceite de disolución 54 g/L de KOH en metanol
Serie 6 (Proporción 6: 1):
Proporción 6: 1 de metanol/aceite de disolución 18 g/L de KOH en metanol
Proporción 6: 1 de metanol/aceite de disolución 36 g/L de KOH en metanol
Proporción 6: 1 de metanol/aceite de disolución 54 g/L de KOH en metanol

Figura 4: Gráfica ejemplo rendimiento - porcentaje catalizador/aceite (series 4, 5 y 6). Cantidad de metanol constante: (mismo volumen añadido de cada disolución)



2.2.4. Fase experimental:

Realizaremos los nueve experimentos una vez conocidos los datos necesarios de volúmenes de disolución a añadir y calculados los porcentajes KOH/aceite.

Los nueve experimentos se llevarán a cabo mediante el mismo procedimiento, por lo que sólo lo indicaremos una vez:

1. Añadimos la cantidad de aceite al vaso mezclador magnético.
2. Añadimos la cantidad correspondiente de la disolución correspondiente (dependerá de cada experimento) al vaso.
3. Fijamos la temperatura a 70 ° C (la mantendremos constante durante todo el experimento).
4. Ponemos el mezclador magnético (imán) a 300 r.p.m.
5. Dejaremos la mezcla reaccionar media hora, para asegurarnos de que la reacción se produce por completo.
6. Al pasar la media hora, vertemos la mezcla en un decantador y lo dejamos decantar un día.

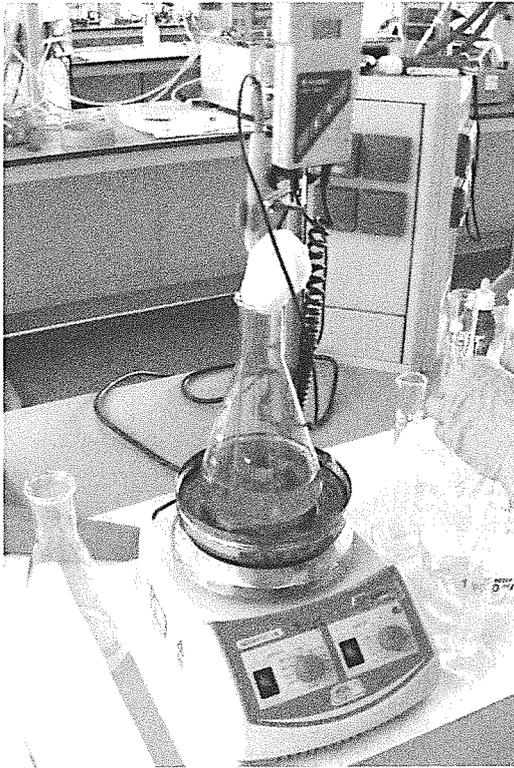


Figura 5:
Agitador magnético con la mezcla
de aceite en reacción.

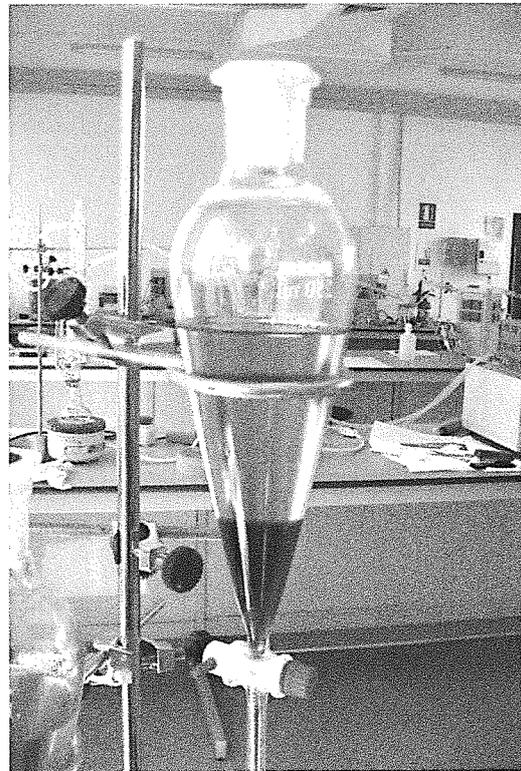


Figura 6:
Decantador con la fase biodiésel
(amarilla y arriba) y la fase glicerina
(marrón y abajo)

Tras producirse la decantación, obtenemos dos fases diferenciadas: la fase de glicerina, más densa y por tanto abajo, y la fase de biodiésel y restos de aceite (impurezas) menos densos y por tanto arriba.

Para obtener la cantidad de biodiésel conseguido no basta con medir la fase de biodiésel, pues no es pura y cometeríamos mucho error. Por ello, medimos el volumen obtenido de glicerina y tomamos una muestra que pasaremos por un cromatógrafo líquido de alta frecuencia con el fin de averiguar la cantidad exacta y pura de glicerina existente en el volumen correspondiente a la fase glicerina y con esta cantidad poder calcular el rendimiento de la reacción.

2. 2. 5. Obtención y procesamiento de datos:

a. Registro de datos:

Tabla 6: Datos iniciales de cada experimento:

Experimento	Volumen de metanol añadido	Concentración de KOH de la disolución	Moles de metanol	Masa constante del aceite	Moles constantes de aceite	Proporción molar metanol/aceite	El porcentaje en peso de catalizador aceite
Experimento	ml CH ₃ OH	g KOH/L	mol CH ₃ OH	g aceite	mol aceite	n CH ₃ OH/naceite	% KOH/aceite p/p
1	25	18	0.62	180	0.206	3.0	0.25%
2	25	36	0.62	180	0.206	3.0	0.50%
3	25	54	0.62	180	0.206	3.0	0.75%
4	37	18	0.91	180	0.206	4.4	0.37%
5	37	36	0.91	180	0.206	4.4	0.74%
6	37	54	0.91	180	0.206	4.4	1.11%
7	50	18	1.24	180	0.206	6.0	0.50%
8	50	36	1.24	180	0.206	6.0	1.00%
9	50	54	1.24	180	0.206	6.0	1.50%

(Ver características de los experimentos en tabla 3 página 16)

Datos recogidos y procesados tras la experimentación:

Hemos obtenido los datos realizando los cálculos mencionados en el apartado método de obtención de datos:

$$\text{Rendimiento} = \frac{\text{Cantidad de glicerina obtenida}}{\text{Cantidad teórica}} \times 100$$

g de aceite/10 = g glicerina teóricos.

180/10 = 18 g de glicerina teóricos.

$$\text{Rendimiento} = \frac{\text{Cantidad de glicerina obtenida}}{18 \text{ g}} \times 100$$

Aplicando los datos obtenidos del cromatógrafo, calculamos los rendimientos y las cantidades de biodiésel obtenido. Los datos quedarán registrados en la tabla 3:

Tabla 7: Cálculo del rendimiento y las cantidades de biodiésel obtenido a partir de los datos dados por el cromatógrafo (concentraciones de la fase glicerina):

	Volumen de la fase glicerina decantada	Concentración de la fase glicerina dada por el cromatógrafo	Dilución realizada para el cromatógrafo	g glicerina pura obtenidos	g biodiésel puro obtenidos	Rendimiento calculado a partir de la cantidad de glicerina
Experimento	V.glic. (ml)	g/L.glic.	Dilución	g glicerina	g biodiésel	Rendimiento
1	3.3	7.74	100	2.6	25.5	14%
2	20	4.50	100	9.0	90.0	50%
3	21.5	4.54	100	9.8	97.6	54%
4	20.5	6.83	100	14.0	140.1	78%
5	28	5.60	100	15.7	156.9	87%
6	25.5	7.07	100	18.0	180.2	100%
7	27.1	5.55	100	15.0	150.4	84%
8	33.5	4.77	100	16.0	159.8	89%
9	33	2.85	100	9.4	93.9	52%

b. Procesamiento de datos:

Presentaremos los datos correspondientes a los rendimientos en las gráficas seleccionadas en el apartado de procesamiento de datos:

Figura 7: Rendimiento de las reacciones de transesterificación de los nueve experimentos:

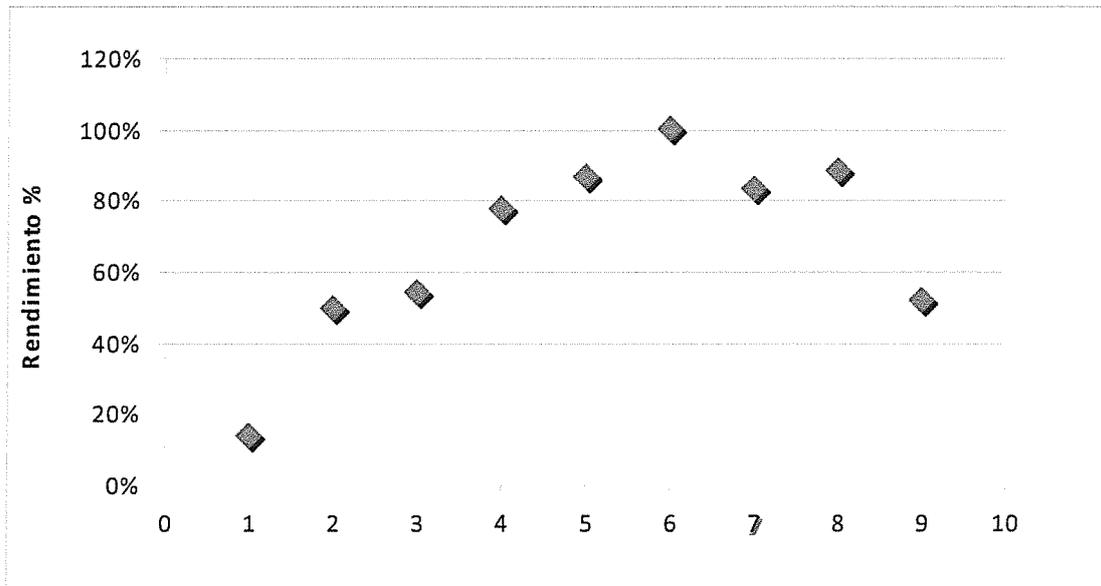


Figura 8: Rendimiento de las reacciones de transesterificación de los nueve experimentos (gráfico de barras):

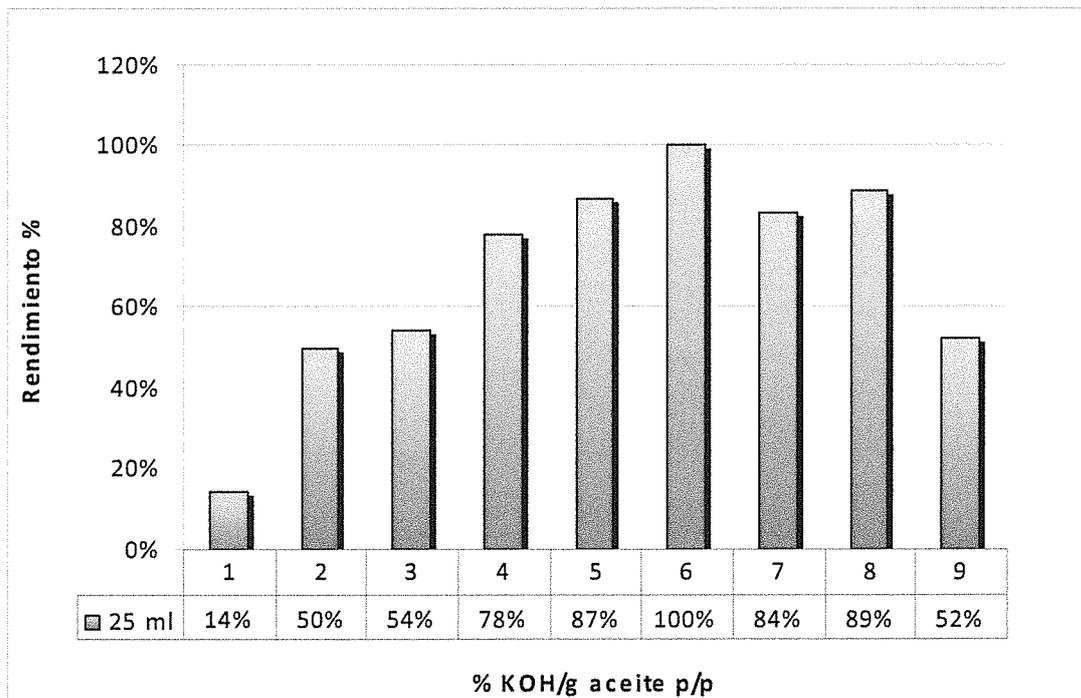


Figura 9: Rendimientos en función de el porcentaje catalizador/aceite p/p (series 1,2 y 3). Concentración de KOH constante: (rendimientos de distintas proporciones metanol/aceite de una misma disolución):

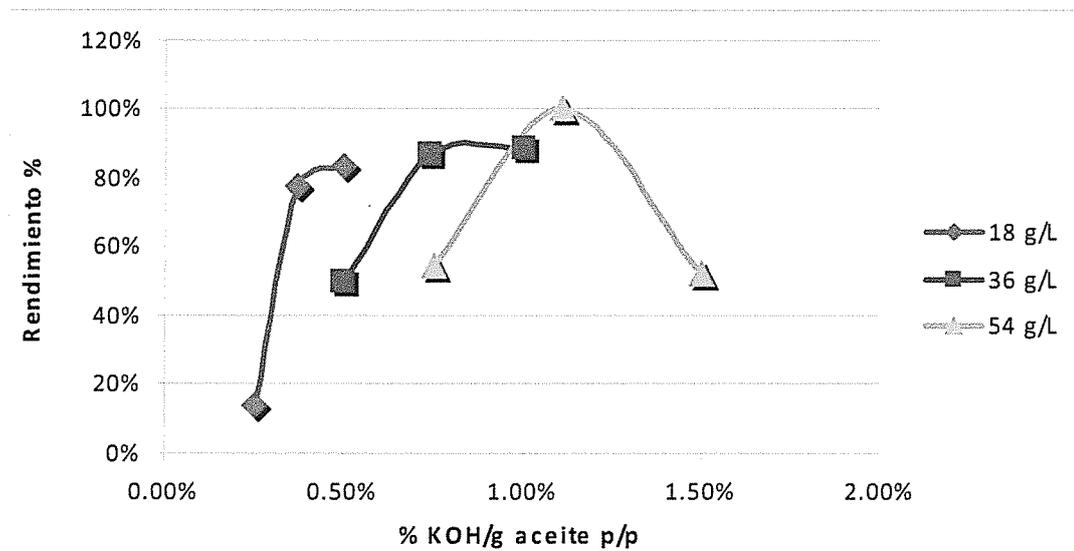
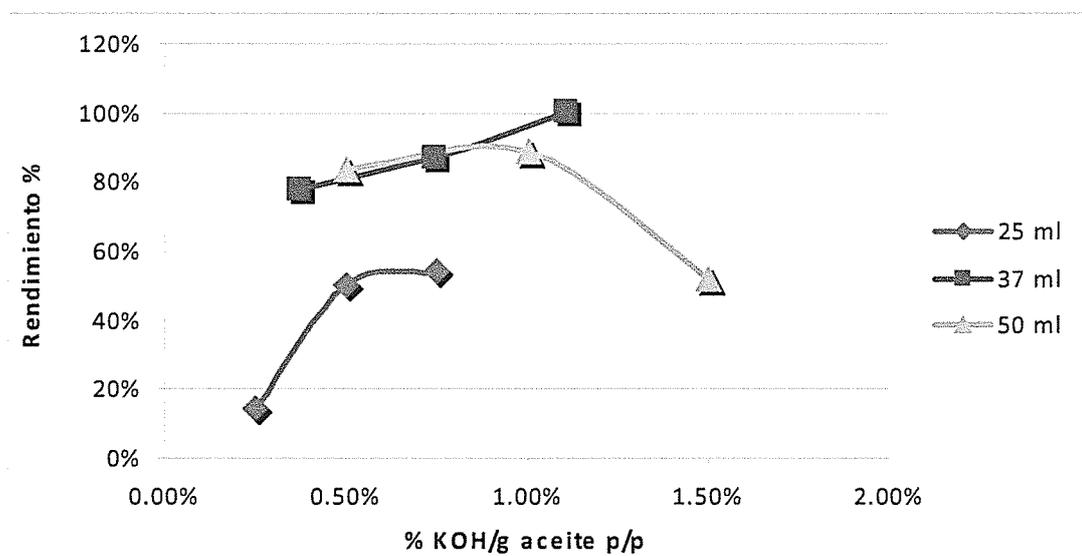


Figura 10: Rendimientos en función de el porcentaje catalizador/aceite p/p (series 4,5 y 6). Cantidad de metanol constante: (mismo volumen añadido de cada disolución):



3. Conclusiones:

Como hemos visto, el proceso consta de dos partes, la preparación del aceite para la reacción y la reacción de transesterificación.

3. 1. Preparación del aceite para la reacción:

En este apartado se observa cómo un aceite usado es claramente más ácido que uno sin usar. Este detalle es importante, porque el fundamento del proceso que investigo, es el usar aceite que ya haya sido usado previamente, de forma que transformemos un residuo, en una fuente de energía.

Así, comprobamos que al usar aceites usados, debemos tener muy en cuenta que estos van a ser ácidos.

De este apartado podemos concluir que es fundamental comprobar el índice de acidez de los aceites que vayamos a usar y descartar aquellos que posean un índice de acidez superior a 1. También podemos decir que cuánto más usado esté el aceite, mayor será su índice de acidez. Esto se debe a que al someter el aceite al calor, liberamos de la molécula de triglicéridos los ácidos grasos.

Los ácidos grasos entorpecen y dificultan la reacción haciendo necesario añadir más cantidad de catalizador para conseguir la misma cantidad de biodiésel.

Por tanto, como nuestro objetivo es estudiar las mejores condiciones en las que debe darse el proceso, cuanto menos ácido, y por tanto menos usado sea el aceite, más rentable será para su transformación en biodiésel.

Esto nos hace pensar, que para conseguir rentabilizar el proceso, deberíamos escoger los aceites que han sido usados en menor cantidad o bien buscar formas de neutralizar la acidez de los aceites más usados, si pretendemos reciclar todo el aceite residual.

3. 2. Reacción de transesterificación:

Los factores que hemos estudiado son la proporción metanol/aceite y la proporción catalizador/aceite.

Lo primero que observamos es que en el experimento nº 6 hemos alcanzado un rendimiento del 100 %.

(Ver Figura 12)

Si bien esto es imposible, está claro que el 100% se ha alcanzado debido a algún error de aproximación, y que el rendimiento real fuera muy cercano a 100 % pero no exacto.

Independientemente de esto, el rendimiento ha sido muy alto, y por tanto, las mejores condiciones para producir biodiésel a partir de aceite usado son las que se dan en el experimento 6, es decir:

Proporción 4,4: 1 de disolución 54 g/L de KOH en metanol → 0,94 % KOH

Observamos que este experimento no es ni de los que más proporción metanol/aceite tiene ni el que más proporción KOH/aceite tiene. Esto nos indica que ninguno de los dos factores tiene una relación directa con el rendimiento, pues en el máximo tanto de uno como de otro, el rendimiento no lo es.

3.2.1 En cuanto al factor proporción metanol/aceite:

(Ver Figura 10)

Observamos como, en el primer y segundo punto de cada serie al aumentar la proporción metanol/aceite aumenta el rendimiento. Sin embargo, a partir del segundo punto, el aumento es mínimo y en el caso de la serie 6, negativo.

Así pues, parece que el rendimiento aumenta conforme se añade metanol a la reacción hasta un cierto punto, en el cuál, dependiendo de la concentración de la disolución añadida, o bien ya no aumenta más, o bien descende.

Por tanto, lo ideal para la producción de biodiésel, es encontrar ese punto de inflexión a partir del cuál se deja de crecer y se empieza a decrecer.

En este caso, y para esta cantidad de aceite (a pequeña escala) lo hemos encontrado, pues parece que la mejor proporción metanol /aceite es 4,4: 1. Si variamos la cantidad de aceite como sería lógico prever para un estudio completo del proceso, que se llevaría a cabo a mayor escala, debería repetirse la experimentación aquí realizada para encontrar ese punto de inflexión.

Por último en este apartado, nos percatamos de que el rendimiento máximo no ha sido alcanzado con la proporción 6:1 mencionada en mis fuentes como la más favorable. Puede haberse debido a un error o a un problema de diferencia de escalas.

3.2.2. En cuanto a la proporción catalizador aceite:

(Ver Figura 9)

Se observa un crecimiento en el rendimiento conforme crece la cantidad de catalizador (la concentración de la disolución es mayor). Si embargo a partir

del segundo punto, es decir, cuando la concentración pasa de 36 g /L a 54 g/L, el crecimiento es menor en el caso de la serie de 25 ml y negativo en el caso de la serie de 50 ml. Sin embargo, en la serie de los 37 ml, el crecimiento apenas varía. No hay ninguna explicación aparente para esto, salvo el hecho de que de nuevo se da un punto de inflexión a partir del cual los rendimientos bajan.

De nuevo habrá que buscar el punto de inflexión para cada cantidad de aceite combinando las proporciones de catalizador/aceite.

Sin embargo, en este caso la serie que contiene el rendimiento mayor, dibuja una línea que no decrece, y el rendimiento mayor no se encuentra en un punto de inflexión, sino en el extremo, por lo que se podría considerar que si seguimos aumentando la concentración de la disolución, el rendimiento seguiría aumentando.

No obstante, aunque gráfica y matemáticamente esto parezca posible por la línea que traza la gráfica de la serie de 37 ml, sabemos que químicamente es imposible alcanzar un rendimiento superior al 100 %, por lo que no parece probable que el rendimiento siguiera creciendo.

3.3. Conclusión final:

El proceso es perfectamente viable, y razonablemente rentable si se estudia bien. Deben usarse aceites poco ácidos, lo que podría limitar la rentabilidad del proceso, pues si se trata de transformar un residuo en una fuente de energía, es de esperar que el aceite (por ser residuo y estar más usado) sea más ácido, y por tanto menos apto. No obstante, pueden buscarse métodos eficaces de corrección de la acidez, o bien reservar la transformación para aquellos aceites que hayan sido poco usados y aún así vayan a tirarse. Estos aceites seguirían siendo un residuo, y podrían transformarse fácilmente en biodiésel, pues a pesar de ser ácidos, su índice de acidez no superaría el 1.

Para realizarlo a gran escala, habría que realizar un estudio similar, para encontrar los puntos de inflexión mencionados en las conclusiones anteriores, que permitirían con la menor cantidad de reactivos y catalizador, obtener el máximo rendimiento. El único impedimento es que al variar la escala, estos puntos de inflexión varían, por lo que habría que realizar el estudio de nuevo.

Con todo esto, se muestra que aunque no es un proceso fácil, sí resulta viable y rentable, y constituiría un gran avance para el medio ambiente y la producción de energía, pues estaríamos transformando un residuo ya inservible y contaminante en una nueva fuente de energía.

4. Bibliografía:

1. Cram, Donald J. Hammond, George S. Richards, John H. *Elementos de química orgánica*. Traducción y adaptación de Alonso Folgueras. J.A y Aguilar Bartolomé, F.J. Primera edición. Madrid. Editorial ediciones del Castillo S.A, 1968. (Primera edición original en inglés en 1967, Estados Unidos).
2. Felizardo, P., Neiva Correia, M.J., Raposo, I., Mendes, J.F., Berkemeier, R., Bordado, J.M. 2006. Production of biodiésel from waste frying oils. *Waste Management*, 26(5), 487-494.
3. Norma UNE-EN 14104 (Productos derivados de aceites y grasas. Ésteres metílicos de ácidos grasos (FAME). Determinación del índice de acidez, Septiembre 2003).
4. Ing. Christian Lenoir - Univ. Católica Argentina. Fac. de Cs. Fisicomatemáticas e Ingeniería. Juncal 189, Martínez (1640), Buenos Aires, Argentina. Trabajo obtenido de:
<http://www.ingenieroambiental.com/biodiesel/biodiesel.htm>
Accesible en la fecha: 21 de diciembre de 2012.
5. Figura 1 obtenida de:
<http://www.madrimasd.org/blogs/energiasalternativas/2009/07/31/122559>
Accesible en la fecha:21 de diciembre de 2012.

5. Agradecimientos:

En primer lugar, al Ministerio de Educación y Cultura por concederme la beca que me permitió realizar parte de mi trabajo en la Universidad de Cádiz.

En segundo lugar, a la Universidad de Cádiz, por facilitarme todos los medios de los que disponían para realizar la investigación. En especial a los Sres. profesores _____, por su ayuda durante mi estancia en Cádiz y sus consejos y disponibilidad mientras trabajaba con los datos, ya fuera de la Universidad.

Por último, a _____, directora de este trabajo, por orientarme, ayudarme aconsejarme, y disponer siempre de tiempo suficiente para mis preguntas.