

UCH-FC
Q. Ambiental
S 586
C.1



FACULTAD DE CIENCIAS
UNIVERSIDAD DE CHILE

**“ELABORACIÓN DE BODIESEL A NIVEL LABORATORIO UTILIZANDO
ACEITES VEGETALES REFINADOS - ACEITES VEGETALES USADOS Y
ESTUDIO TEÓRICO PLANTA DE PRODUCCIÓN”**

Seminario de Título entregado a la Universidad de Chile en cumplimiento parcial
de los requisitos para optar al Título de:

Químico Ambiental

TAMARA CECILIA SILVA SALINAS

Director de Seminario de Título: José Leiva F.
Profesor Patrocinante: M.Cs. Héctor Bravo

Diciembre de 2015
Santiago – Chile



INFORME DE APROBACIÓN SEMINARIO DE TÍTULO

Se informa a la Escuela de Pregrado de la Facultad de Ciencias, de la Universidad de Chile que el Seminario de Título, presentado por la candidata:

TAMARA CECILIA SILVA SALINAS

“ELABORACIÓN DE BIODIESEL A NIVEL LABORATORIO UTILIZANDO ACEITES VEGETALES REFINADOS - ACEITES VEGETALES USADOS Y ESTUDIO TEÓRICO PLANTA DE PRODUCCIÓN ”

Ha sido aprobado por la Comisión de Evaluación, en cumplimiento parcial de los requisitos para optar al Título de Químico Ambiental

COMISIÓN DE EVALUACIÓN

José Leiva Fuenzalida
Director Seminario de Título



M.Cs. Héctor Bravo
Profesor Patrocinante

Una firma manuscrita en tinta azul sobre una línea horizontal.

M.Cs. Sylvia Copaja
Presidente

Una firma manuscrita en tinta azul sobre una línea horizontal.

M.Cs. Julio Hidalgo
Corrector

Una firma manuscrita en tinta negra sobre una línea horizontal.



Tamara Silva Salinas ingresó a la carrera de Química Ambiental, de la Universidad de Chile el año 2005, con la motivación de adquirir nuevos conocimientos, alcanzar un perfeccionamiento profesional óptimo, para posteriormente poder desempeñarse de buena forma en el ámbito laboral.

El área de la química no siempre llamó su atención, no así el área ambiental, por la cual sentía que existían demasiados vacíos en el país, factor que influyó firmemente en tomar la decisión de iniciar este camino de estudios enfocados a las problemáticas medio ambientales.

Los años que pasó en la Facultad de Ciencias, le permitieron desarrollarse en todas las áreas ambientales, acercándose más a la química de suelos, lo cual, la llevó a realizar su Unidad de Investigación titulada “Caracterización química en sedimentos fluviales y determinación de metales pesados, en embalses La Paloma-Cogotí”.

Durante los años de estudios desarrolló grandes lazos con sus profesores y compañeras que aún mantiene a pesar de haber terminado esta etapa tan importante en su vida.

DEDICATORIA

Este camino no fue nada fácil de recorrer, existieron muchos momentos en los que quise abandonar mis sueños y dejarme llevar por el fracaso. Sin embargo sabía que existía un pequeño ángel en mi vida que seguía atenta a mis pasos, lo cual me hizo sacar valor y seguir adelante, pese a todas las adversidades que se presentaron. Por este motivo dedico todo este esfuerzo, que quedará plasmado en este proyecto a mi hija Javiera, a quien amo con el alma y deseo dejarle como enseñanza que cualquier propósito en la vida es posible de lograr.

Quiero además dedicárselo a mi mamá, mi fiel compañera y eterna amiga, la cual dio todo de sí misma para que esto fuese posible. Faltan palabras para poder expresar mi infinito agradecimiento y lo mucho que te amo.

...“No te rindas que la vida es eso, continuar el viaje, perseguir tus sueños, destrabar el tiempo, correr los escombros y destapar el cielo”...

AGRADECIMIENTOS

En lo académico quiero agradecer a mis profesores guías, Sylvia Copaja y Héctor Bravo, por su paciencia, por la confianza y por el apoyo que me brindaron hasta el final de este proyecto.

En lo profesional quiero agradecer a mi grupo de trabajo de los cuales aprendí muchísimas cosas, me ayudaron a desarrollar este aspecto de mi vida, además de entregarme grandes momentos vividos y su afecto.

En el plano universitario quiero agradecer a mis compañeras y amigas de carrera (Tete, Dalila, Marce, Ale y Stephy), quienes me brindaron su cariño, su apoyo y esos inolvidables momentos de angustia y felicidad que tuvimos que pasar durante este largo proceso.

Amigos hay pocos y yo tuve la dicha de encontrar una muy linda en mi vida, gracias Pame por tu cariño y apoyo.

Quiero agradecer a mi papá por su ayuda, la vida a veces juega para acercar a quienes no se habían encontrado.

A quien ahora es un ángel guardián, porque desde el principio me dió todo su apoyo y ayuda, porque siempre estaba atenta a cuanto faltaba y si necesitaba algo, a Ud tía Nene con mucho cariño va este trabajo.

Porque iniciaste conmigo en este proceso y has sido parte de mi vida durante muchos años, porque fuiste tú quien me ayudó a decidir que estudiar, porque me ayudaste a tu manera y lo mejor que pudiste, porque siempre has estado conmigo, en las buenas y en las no tan buenas muchas gracias Gonzalo.

Quiero agradecer a mi hermano, que a su manera me ha demostrado cuanto me quiere y que no importa si mañana la distancia nos separa, porque siempre estaremos para ayudarnos el uno al otro.

Finalmente agradezco a lo más importante que una persona puede tener, la familia y la mía es una muy especial. Muchas gracias a mis abuelitos, a mis tíos y mis primos que me han brindado su amor y apoyo toda mi vida.

RESUMEN

Existen variados estudios sobre biocombustibles, como alternativa a los combustibles fósiles, dentro de los cuales encontramos el uso de aceites vegetales y aceites usados para el desarrollo de biodiesel. Si bien existen algunas experiencias a nivel nacional, esta práctica no está masificada ni incorporada en el país.

En este seminario se analizó la utilización de aceite vegetal refinado, como materia prima para biodiesel, y se comparó con el uso de aceites reciclados de fritura (cocinería-comida rápida).

Para ello, se analizó la capacidad técnica y económica para la producción de este combustible, para una posterior incorporación de la técnica utilizada (transesterificación básica) en la instalación de una planta de producción de biodiesel de tamaño medio.

Los resultados muestran que el aceite vegetal refinado presentó el mejor rendimiento (93%), en tanto, para los aceites usados, los máximos rendimientos fueron, 83,26% (N°1) y 80,20% (N°2). Las diferencias en el rendimiento se atribuyen a que el aceite N° 2 tenía mayor cantidad de sólidos, agua, y una coloración más oscura, derivada posiblemente de un mayor uso, lo que implica oxidación, hidrólisis, degradación y aumento de viscosidad en las distintas muestras.

En cuanto a las variables estudiadas en este proyecto, se pudo establecer que:

- Transcurridos 60 minutos, la transesterificación alcanzó la mayor conversión de ésteres y que un mayor tiempo de reacción no modifica esencialmente el rendimiento del biodiesel.
- A temperaturas bajo condiciones normales (25°C), no se desplaza completamente el equilibrio a la formación de productos, lo cual reduce el rendimiento del biodiesel. Considerando que el mejor rendimiento de aceites usados fue de un 83,26%, la temperatura óptima de trabajo fue de 55°C. Esto muestra que el factor temperatura influye directamente en la calidad y cantidad del biodiesel a obtener.

- En cuanto al catalizador usado se determinó el uso de Hidróxido de Potasio, a pesar de tener un mayor costo económico asociado, se optó por valorar más la disminución del impacto ambiental respecto del resto de catalizadores que se puede emplear.
- Si quisiera realizarse a mayor escala el uso de aceite vegetal refinado, tendría que contemplarse la implementación de cultivos, para obtener la materia prima de manera directa considerando el impacto ambiental que esto generaría, (deforestación del área, uso de fertilizantes y pesticidas, etc.).

ABSTRACT

Several studies in different countries, regarding the use of biofuels, among which are the use of vegetable and used oils for the development of biodiesel oils. These would be some alternatives that would allow our country reduce dependence on imported oil and reduce emissions that maintain large areas under constant alerts resulting from environmental pollution.

While there are some national experiences, this practice is not over crowded or built in to the country to determine the economic viability of production.

The present study aims to analyze various alternatives for making biodiesel, for which it developed a first scenario considers the use of refined vegetable oil as raw material, while the second scenario using recycled oils contemplated frying (cooking - fast-food).

Technical and economic capacity for the production of this fuel, for subsequent incorporation of the technique used (basic transesterification) in the installation of a biodiesel production plant of medium size were analyzed.

The results indicate that refined vegetable oil showed the best performance that is 93%, which was expected, based on the literature provides optimal performance as 98% for the production of biodiesel. The problem is the cost associated with its acquisition, since for these analyzes, vegetable oils, were purchased at a supermarket. If this would be done on a larger scale would have seen the implementation of a crop, for the raw material directly, and thus reduce the economic costs, considering the environmental problems that this creates, within which highlights the deforestation in the area, the use of fertilizers and pesticides, besides the loss of biodiversity.

Regarding oils, maximum yields were, used oil N°1 83.26% and used oil N°2 80.20%. The difference in performance of these oils is that the used oil N° 2 had more litter along with a much darker color, so it was inferred that the oil had higher amount of use to oil

used N°1, implying the presence of oxidation, hydrolysis, degradation, increased viscosity and large number of residues in the different samples.

As for the variables used in this project, it was established that:

- After 60min, the conversion reached higher transesterification of esters and a longer reaction time does not substantially modify the performance of biodiesel.
- Obtained results indicate that at low ambient temperatures, is not completely shift the balance to product formation, which reduces the yield of biodiesel. Whereas the best performance of a waste oil was 83.26%, the optimum operating temperature was 55°C. This shows that the temperature factor directly influences the quality and quantity of biodiesel to obtain.
- As for the used catalyst using Potassium Hydroxide is determined, despite having greater economic cost associated, it was decided to evaluate fur there reduce environmental impact from the rest of catalysts that can be used.

INDICE DE CONTENIDOS

I.- INTRODUCCION.....	1
1.1. Antecedentes Generales.....	1
1.1.1. Los combustibles fósiles y el efecto invernadero.....	1
1.1.2. Biodiesel como combustible alternativo.....	2
1.1.2.1. Ventajas comparativas del uso de biodiesel sobre otros combustible.....	3
1.1.2.2. Desventajas	7
1.1.3. Aplicaciones	8
1.1.4. Producción de biodiesel a nivel mundial.....	8
1.2. Marco legal internacional.....	10
1.2.1. Unión Europea	10
1.2.2. Estados Unidos.....	11
1.2.3. Brasil	11
1.2.4. Argentina.....	12
1.2.5. Situación de biodiesel en Chile	12
1.2.5.1 Marco legal Nacional	13
1.3. Producción de biodiesel.....	14
1.3.1. Vía indirecta.....	14
1.3.2. Vía directa	15
1.3.3. Materia Prima: grasas y aceites	17

1.3.4. Reactivos.....	21
1.3.4.1. Alcoholes	21
1.3.4.2. Catalizadores.....	22
1.4. Controversia respecto a la elaboración de biodiesel a partir de aceites vegetales	26
1.5. Proceso producción de biodiesel	28
1.5.1. Pre-tratamiento.....	28
1.5.2. Catálisis básica.....	30
1.5.3. Factores que influyen en la transesterificación	32
1.5.4. Recuperación del metanol	33
1.6. Ingeniería teórica para planta de proceso industrial.....	33
1.6.1. Descripción tecnología.....	34
1.6.1.1. Proceso discontinuo o Batch.....	34
1.6.2. Componentes.....	36
1.6.3. Costos.....	37
1.7. Objetivos.....	38
1.7.1. Objetivo General	38
1.7.2. Objetivos Específicos.....	38
II.- MATERIALES Y MÉTODOS.....	39

2.1. Materiales.....	39
2.2. Recolección de la materia prima	40
2.3. Pre-tratamiento de las muestras	41
2.3.1. Sedimentación muestra	41
2.3.2. Filtrado de la muestra.....	41
2.3.3. Secado de la muestra.....	41
2.3.4. Determinación de la masa	41
2.3.5. Obtención del índice de acidez	42
2.4. Determinación volumen de alcohol.....	43
2.5. Cálculo del rendimiento.....	44
2.6. Transesterificación.....	46
2.6.1. Variables utilizadas.....	47
2.6.2. Recuperación de metanol	48
III.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN	49
3.1. Rendimientos	49
3.1.1. Aceite vegetal refinado.....	51
3.1.2. Aceite reciclado de fritura cocinería (Aceite usado N° 1).....	52
3.1.3. Aceite reciclado de fritura comida rápida (Aceite usado N° 2)	53
3.2. Residuo líquido del proceso.....	54
3.3. Estudio teórico planta productiva	55

3.3.1. Infraestructura	56
3.3.2. Costos.....	57
3.3.3. Estimación del valor de biodiesel obtenido	61
3.4. Discusión general.....	62
3.4.1. Costos y rendimientos.....	62
3.4.2. Residuos y desventajas.....	62
3.4.3. Beneficios de una planta de biodiesel	63
IV.- CONCLUSIONES.....	64
V.- REFERENCIAS.....	67
VI.-ANEXOS.....	69

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades físicas y químicas del biodiesel - diesel	4
Tabla 2. Tipos de aceites, grasas y otras fuentes empleados en la elaboración de biodiesel	18
Tabla 3. Porcentaje de Ácidos grasos saturados, mono-insaturados, poli-insaturados de diversos lípidos.....	18
Tabla 4. Ácidos grasos saturados e insaturados más importantes	25
Tabla 5. Rango Índice de acidez según el aceite o grasa utilizado	29
Tabla 6. Método oficial Ca 5a-40 A.O.C.S.....	42
Tabla 7. Variables modificadas en la transesterificación para observar su comportamiento respecto al rendimiento de biodiesel obtenido.....	48
Tabla 8. Promedio de porcentajes de rendimientos basado en los gramos de esteres metílicos obtenidos al finalizar la transesterificación	49
Tabla 9. Porcentaje rendimiento basado en los moles de estearato de metilo, obtenidos tras la transesterificación.....	50
Tabla 10. Aceite refinado, variables 20°C, 45 minutos, KOH.....	70
Tabla 11. Aceite refinado, variables 55°C, 45 minutos, KOH.....	71
Tabla 12. Aceite refinado, variables 20°C, 60 minutos, KOH.....	72
Tabla 13. Aceite refinado, variables 20°C, 90 minutos, KOH.....	73
Tabla 14. Aceite refinado, variables 55°C, 60 minutos, KOH.....	74
Tabla 15. Aceite refinado, variables 55°C, 90 minutos, KOH.....	75
Tabla 16. Aceite refinado, variables 55°C, 45 minutos, NaOH.....	76
Tabla 17. Aceite usado 1, variables 20°C, 45 minutos, KOH.....	77
Tabla 18. Aceite usado 1, variables 55°C, 45 minutos, KOH.....	78
Tabla 19. Aceite usado 1, variables 20°C, 60 minutos, KOH.....	79
Tabla 20. Aceite usado 1, variables 20°C, 90 minutos, KOH.....	80
Tabla 21. Aceite usado 1, variables 55°C, 60 minutos, KOH.....	81
Tabla 22. Aceite usado 1, variables 55°C, 90 minutos, KOH.....	82
Tabla 23. Aceite usado 1, variables 55°C, 45 minutos, NaOH.....	83
Tabla 24. Aceite usado 2, variables 20°C, 45 minutos, KOH.....	84

Tabla 25. Aceite usado 2, variables 55°C, 45 minutos, KOH.....	85
Tabla 26. Aceite usado 2, variables 20°C, 60 minutos, KOH.....	86
Tabla 27. Aceite usado 2, variables 20°C, 90 minutos, KOH.....	87
Tabla 28. Aceite usado 2, variables 55°C, 90 minutos, KOH.....	88
Tabla 29. Aceite usado 2, variables 55°C, 45 minutos, NaOH	89
Tabla 30. Comparación del rendimiento aceite vegetal refinado, variables temperatura, tiempo, KOH.....	90
Tabla 31. Comparación del rendimiento aceite usado 1, variables temperatura, tiempo, KOH	91
Tabla 32. Comparación del rendimiento aceite usado 2, variables temperatura, tiempo, KOH	92
Tabla 33. Comparación del rendimiento según catalizador	93

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Emisiones de gases a la atmósfera, según la mezcla de biodiesel con diésel....	6
Figura 2. Ciclo del biodiesel.....	9
Figura 3. Porcentajes de producción de biodiesel por continentes	10
Figura 4. Obtención de biodiesel vía directa, transesterificación	15
Figura 5. Química de la transesterificación de aceites vegetales.....	18
Figura 6. Triglicéridos y sus componentes	17
Figura 7. Diferencia entre aceites y grasas.....	19
Figura 8. Molécula de metanol, destacando su grupo OH.....	21
Figura 9. Catalizador utilizado, Hidróxido de potasio	24
Figura 10. Aceite vegetal refinado y aceite reciclado de frituras (aceite usado)	26
Figura 11. Mecanismo de reacción de transesterificación en medio básico	31
Figura 12. Esquema de un proceso Batch	35
Figura 13. Reacción estequiométrica transesterificación.....	44
Figura 14. Etapas del proceso de transesterificación de ácidos grasos para síntesis de biodiesel	47
Figura 15. Diferencia del rendimiento porcentual según cada una de las variables estudiadas para aceite vegetal refinado	51
Figura 16. Diferencia del rendimiento porcentual según cada una de las variables estudiadas para aceite usado 1.....	52
Figura 17. Diferencia del rendimiento porcentual según cada una de las variables estudiadas para aceite usado 2.....	53
Figura 18. Proceso industrial general de transesterificación.....	55
Figura 19. Lay out típico de planta producción 2000 l biodiesel/día.....	56
Figura 20. Rendimientos aceites refinados con variables Temperatura 20°C, tiempo de reacción 45 minutos, catalizador KOH	70
Figura 21. Rendimiento aceites refinados, variables Temperatura 55°C, tiempo de reacción 45 minutos, catalizador KOH	71
Figura 22. Rendimientos aceites refinados, variables Temperatura 20°C, tiempo de reacción 60 minutos, catalizador KOH	72

Figura 23. Rendimiento aceite refinado, variables temperatura 20°C, tiempo de reacción 90 minutos, catalizador KOH.....	73
Figura 24. Aceites refinados, variables Temperatura 55°C, tiempo de reacción 60 minutos, catalizador KOH.....	74
Figura 25. Rendimientos aceites refinados, variables Temperatura 55°C, tiempo de reacción 90 minutos, catalizador KOH	75
Figura 26. Rendimientos aceites refinados, variables temperatura 55°C, tiempo de reacción 45 minutos, catalizador NaOH	76
Figura 27. Rendimientos aceites refinados Variables Temperatura 20°C, tiempo de reacción 45 minutos, catalizador KOH	77
Figura 28. Rendimientos aceites refinados variables Temperatura 55°C, tiempo de reacción 45 minutos, catalizador KOH	78
Figura 29. Rendimiento aceites refinados, variables temperatura 20°C, tiempo de reacción 60 minutos, catalizador KOH	79
Figura 30. Rendimientos aceites usados 1, variables temperatura 20°C, tiempo de reacción 90 minutos, catalizador KOH	80
Figura 31. Rendimientos aceites usados 1, variables temperatura 55°C, tiempo de reacción 60 minutos, catalizador KOH	81
Figura 32. Rendimientos aceites usados 1, variables temperatura 55°C, tiempo de reacción 90 minutos, catalizador KOH	82
Figura 33. Rendimientos aceites usados 1, variables temperatura 55°C, tiempo de reacción 45 minutos, catalizador NaOH	83
Figura 34. Rendimientos aceites usados 2, variables temperatura 20°C, tiempo de reacción 45 minutos, catalizador KOH	84
Figura 35. Rendimientos aceites usados 2, variables temperatura 55°C, tiempo de reacción 45 minutos, catalizador KOH	85
Figura 36. Rendimientos aceites usados 2, variables temperatura 20°C, tiempo de reacción 60 minutos, catalizador KOH	86
Figura 37. Rendimientos aceites usados 2, variables temperatura 20°C, tiempo de reacción 90 minutos, catalizador KOH	87
Figura 38. Rendimientos aceites usados 2, variables temperatura 55°C, tiempo de reacción 90 minutos, catalizador KOH	88

Figura 39. Rendimientos aceites usados 2, variables temperatura 55°C, tiempo de reacción 45 minutos, catalizador NaOH	89
Figura 40: Diferencia porcentual del rendimiento en base a la masa del biodiesel, considerando las variables de tiempo y temperatura (aceite refinado)	90
Figura 41: Diferencia porcentual del rendimiento en base a la masa del biodiesel, considerando las variables de tiempo y temperatura (aceite usado 1)... ..	91
Figura 42: Diferencia porcentual del rendimiento en base a la masa del biodiesel, considerando las variables de tiempo y temperatura (aceite usado 2)	92
Figura 43: Rendimiento según el tipo de catalizador a una temperatura de 55°C y un tiempo de reacción de 45 minutos.....	93

ANEXOS

A.RENDIMIENTOS OBTENIDOS PARA CADA MUESTRA.....	69
A.1 Aceite Vegetal refinado.....	69
A.2 Aceite reciclado de fritura de cocinería (Aceite usado 1).....	77
A.3 Aceite reciclado de fritura comida rápida (Aceite usado 2).....	84
B.COMPARACION DE RENDIMIENTOS OBTENIDOS.....	90
B.1 Aceite refinado.....	90
B.1.1 Tabla comparación del rendimiento, considerando tiempo y temperatura de la transesterificación del aceite refinado usando KOH.....	90
B.1.2 Figura diferencia porcentual del rendimiento en base a la masa del biodiesel, considerando las variables de tiempo y temperatura	90
B.2 Aceite Usado 1.....	91
B.2.1 Tabla comparación del rendimiento respecto a las variables tiempo y temperatura de la transesterificación de aceite usado 1, usando KOH	91
B.2.2 Figura diferencia porcentual del rendimiento en base a la masa de biodiesel, considerando las variables de tiempo y temperatura	91
B.3 Aceite Usado 2	92
B.3.1 Tabla comparación del rendimiento considerando las variables tiempo y temperatura de la transesterificación del aceite usado 2 usando KOH	92
B.3.2 Figura diferencia porcentual del rendimiento en base a la masa de biodiesel, considerando las variables de tiempo y temperatura	92
B.4 Catalizador	93
B.4.1 Tabla comparativa del rendimiento según el tipo de catalizador a partir de las variables 55°C y 45 minutos	93
B.4.2 Figura rendimiento según el tipo de catalizador a una temperatura de 55°C y tiempo de reacción 45 minutos	93

I.-INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes Generales

1.1.1. Los combustibles fósiles y el efecto invernadero

A nivel mundial la principal fuente energética corresponde a los combustibles fósiles, petróleo, carbón y gas natural, compuestos formados hace millones de años a partir de restos orgánicos de plantas y animales. (Robertson, 1979)

Los combustibles derivados del petróleo crudo suministran el 96% de la demanda mundial energética para el transporte. Otros combustibles solo desempeñan un papel significativo a nivel local o en aplicaciones específicas del transporte.

El elevado uso de estos compuestos ha llevado a un decaimiento de las reservas mundiales disponibles de petróleo, ha producido un incremento considerable de los costos asociados a éste y de las emisiones contaminantes a la atmósfera. Estas emisiones tienen una gran trascendencia en la formación de smog fotoquímico e influye en las reacciones de formación y destrucción del ozono, tanto troposférico como estratosférico, así como en el fenómeno de la lluvia ácida. En concentraciones altas produce daños a la salud, a las plantas y corroe tejidos y materiales diversos. (ASTM, 2003).

Es por esta razón, que en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), se estableció un fuerte llamado respecto de la reducción de emisiones de gases que contribuyen al efecto invernadero. Este acuerdo data de 1997, en el Protocolo de Kioto, pero no entró en funcionamiento hasta el 2005. (T. Kasuga, 1998).

El proceso de combustión de los combustibles fósiles produce distintos tipos de gases como: Dióxido de Carbono (CO_2), Monóxido de Carbono (CO), Hidrocarburos, Óxidos de Nitrógeno (NO_x), y aerosoles. Algunos de estos gases son conocidos como gases invernaderos (CO_2 , NO_x , aerosoles, entre otros), los cuales cumplen la función de retener gran parte de la radiación infrarroja que emite el suelo, por haber sido calentado por la radiación solar y luego esta energía (radiación infrarroja) es reenviada de nuevo a

la tierra, acción de equilibrio llamada balance energético de la tierra, el cual permite mantener la temperatura en un estrecho margen que posibilita el desarrollo de la vida. Sin embargo, la quema excesiva de los combustibles fósiles en los últimos años, ha provocado un aumento de los gases invernaderos siendo esta una de las causas del calentamiento global, el cual consiste en el aumento de la temperatura media global de la atmosfera terrestre y océanos (Calentamiento global,2010).

Algunos de los efectos del calentamiento global son la reducción de los glaciares de Groenlandia y la Antártida, acidificación de los océanos, reducción de la circulación del océano que transporta agua caliente al norte del Atlántico, impacto sobre la agricultura, entre otros. (Efectos potenciales, 2010).

Debido a la dependencia excesiva a los combustibles fósiles que existe en la actualidad, la condición de no renovable que estos poseen y lo contaminantes que emiten, hacen que sea esencial que los combustibles alternativos sean derivados de fuentes naturales, como la energía solar, eólica, geotérmica y biomasa, entre otras. Estos requerimientos han enfocado la atención a biocombustibles originados de materias primas alternativas, como sustitutos de combustibles.

1.1.2. Biodiesel como combustible alternativo

La ASTM (American Society for Testing and Materials), Asociación Internacional de Normativa de Calidad, define al Biodiesel como “el éster monoalquílico de cadena larga de ácidos grasos derivados de lípidos renovables, como por ejemplo aceites vegetales o grasas animales, para utilizarlos en motores de ignición de compresión”.

En Chile, este combustible es definido como “Combustible líquido compuesto por una mezcla de ésteres alquílicos obtenidos mediante la reacción química de transesterificación o conversión de ácidos grasos a ésteres metílicos o ésteres etílicos. A partir de aceites vegetales, grasa animal o el aceite comestible usado” (CNE, 2007).

Varios aceites han sido probados para la elaboración de Biodiesel. Generalmente, estos aceites, han sido aquellos que abundan en el país de la investigación. En Estados Unidos,

el aceite de Soja es el que ocupa un primer lugar en su utilización, en Europa lo es el de colza, mientras que en países de clima tropical, se está investigando el aceite de coco, o el de palma.

Se ha llegado a probar grasas animales y aceites de cocina usados, entre otros, pero no todos han tenido resultados satisfactorios, ya que han surgido problemas de incrustaciones y depósitos de sólidos en los conductos, problemas de temperatura, de combustión, etc.

1.1.2.1 Ventajas comparativas del uso de biodiesel sobre otros combustibles

La principal ventaja del biodiesel sobre el aceite sin tratamiento es que presenta características similares al diesel. (Tabla 1). Tiene un menor poder calorífico (15%), debido al contenido de Oxígeno que posee. Esta pequeña pérdida se compensa con ligero aumento en el consumo del motor. (Gómez Herrera, C. 1995)

Tabla 1: Propiedades físicas y químicas del biodiesel – diesel

Propiedad	Biodiesel	Diesel
Carbono (% peso)	77	86,5
Azufre (% peso)	0-0,0024	0,05 máx.
Oxígeno (% peso)	11	0
Hidrógeno (% peso)	12	13
Agua (ppm peso)	0,05	161 máx.
Número Cetano	48-55	40-55
Gravedad específica a 15°C (Kg/L)	0,88	0,85
Temperatura de filtrabilidad (°C)	-15 a -12	≤ -15
LCV (MJ/L)	33,2	36,3
Viscosidad a 20°C	7,2	≤ 9,5
Flash Point (°C)	185	≥ 55

Se observa que las propiedades de ambos combustibles no presentan grandes diferencias; sin embargo, el biodiesel presenta mayores ventajas.

- **Inocuidad y biodegradabilidad.** Es un recurso renovable, no tóxico y biodegradable, esta última es una característica del biodiesel que incentiva su uso, ya que desaparece en menos de 21 días, con una velocidad de degradación mayor que el diesel de petróleo. (85-88% en agua).
- **Baja emisión de óxidos y material particulado.** El biodiesel no posee compuestos de Nitrógeno ni de Azufre. En la combustión del diesel, por ejemplo,

estos elementos forman óxidos que se eliminan a la atmósfera, donde pueden reaccionar con radicales OH formando óxidos de azufre y de nitrógeno, provocando así la lluvia ácida.

El Departamento de Energía de los Estados Unidos (DOE) reportó que el uso del biodiesel reduce las partículas contaminantes hasta un 65%, lo que a su vez reduce el riesgo de cáncer en la población hasta un 94%. La agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) estipula que los hidrocarburos no consumidos, los cuales contribuyen significativamente a la destrucción en la capa de ozono, el smog y el cáncer, son reducidos un 50% en la combustión del biodiesel. La EPA también ha descubierto que otros carcinógenos emitidos por el petrodiesel son reducidos por el biodiesel hasta un 50%.

- Al ser un combustible oxigenado y prácticamente no contener compuestos aromáticos, ni azufre (cantidad inferior a los 15 ppm), posee una combustión más completa que el diesel, por lo que la emisión de SO₂ es muy baja. (Murayama, T.1994).

Posee un balance neutro al CO₂, ya que se consume por fotosíntesis, considerando la producción del combustible a partir de plantaciones. Al usar biodiesel puro, las emisiones netas de Dióxido de Carbono (CO₂) y de Dióxido Sulfuroso (SO₂) se reducen un 100 %. La emisión de hollín se reduce un 40-60% y las de Hidrocarburos (HC) un 10-50%.

Reduce la emisión de compuestos policíclicos aromáticos (PAH) y Aldehídos (-13%), hollín, CO y en particular de los siguientes derivados de comprobada acción cancerígena: Fenantreno (-97%), Benzofluorantreno (-56%) y Benzopirenos (-71%). (www.biodiesel.org), según Test de Ames.

- **Uso de mezclas biodiesel-diesel.** El biodiesel puede ser usado solo o como mezcla, la más usada es 20% de biodiesel y 80% de petróleo diesel o B-20; un test de emisores de una mezcla de este tipo demostró que en relación al diesel común, las emisiones de material particulado se reducen en un 26,8%, las de CO en 72,8% y las de HC en un 73,2%. (Lee, KT; Foglia, T.A.;Chang, K-S. 2002).

En la Figura 1 podemos ver que el uso de biodiesel disminuye de manera significativa las emisiones de material particulado MP, el Monóxido de Carbono CO y los Hidrocarburos no quemados HC. Mientras mayor es la proporción de biodiesel en la mezcla con diésel, más importante es la disminución de los contaminantes tradicionales. La emisión de compuestos nitrosos (NO_x) se reduce o aumenta de acuerdo con el desgaste del motor y la calibración de la bomba inyectora de los vehículos. (www.biodiesel.org).

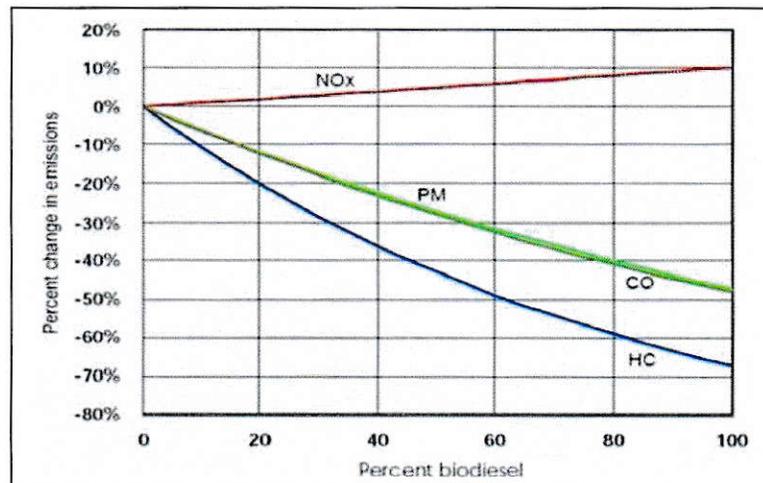


Figura 1: Emisiones de gases a la atmósfera, según la mezcla de biodiesel con diésel (Environmental Protection Agency EEUU).

- **Mejora en combustión y mayor seguridad de almacenaje.** Presenta un número cetano similar al diésel. El número cetano se define como el tiempo transcurrido desde que el carburante alcanza las condiciones críticas de presión y temperatura, hasta que se produce su autoinflamación. Esto ayuda a mejorar la combustión.

El punto de inflamabilidad o flash point del biodiesel es superior al del diesel; este corresponde a la temperatura a la que libera vapores en cantidades suficientes, para que la mezcla de vapor y aire sobre su superficie propague una llama a partir del

contacto con una fuente. Esta característica hace que sea seguro de almacenar, manipular y usar que el combustible diesel convencional (www.biodiesel.org).

1.1.2.2.Desventajas

- **Emisión de NO_x.** En la combustión de biodiesel es cercana al 10%, respecto del diesel convencional. Esto ocurre producto de las altas temperaturas que se generan en la cámara de combustión. Sin embargo; podría llegar a reducirse estas emisiones en un 15%, dependiendo de las características del motor, debido a la recirculación de los gases de escape, además del uso de un catalizador. (EGR V.P. Zakaznova-Herzog, 2007).
- **Oxidación.** Transcurrido un período de 6 meses de guardado del biodiesel, se deben adicionar antioxidantes, debido a la escasa estabilidad oxidativa, es decir, pierde la capacidad de oxidarse en el proceso de combustión al interior de la cámara de combustión.
- **Uso de suelos y agroquímicos.** La producción de biodiesel requiere de extensos terrenos de cultivo, lo cual incrementa el uso de fertilizantes y pesticidas, además de producir una deforestación del área y pérdida de biodiversidad.
- **Incompatibilidad con motores.** Se recomienda comercializar el biodiesel como mezcla en un porcentaje de 20%, ya que de esta forma no hace necesario modificar en nada los vehículos e infraestructura para el diésel existente, (debido a la incompatibilidad con ciertas partes plásticas del vehículo y la producción de corrosión) incluso mejorando la lubricación y disminuyendo las emisiones contaminantes. (ASTM, 2003).
- **Baja fluidez a bajas temperaturas.** Posee problemas de fluidez cuando es sometido a bajas temperaturas, lo que ocasiona un problema en las zonas de climas muy fríos, a pesar de poder incorporar aditivos especiales que mejoren esta condición.

1.1.3. Aplicaciones

La utilización del biodiesel como combustible de automóviles diesel, es posible con adaptaciones técnicas (principio de Elsbett), solo en autos fabricados antes de 1998, debido a que poseen piezas de caucho, el cual es disuelto por el biodiesel, por esta razón se requiere cambiar por teflón. Las características de los ésteres son más parecidas a las del diesel, que las del aceite vegetal sin modificar. La ASTM ha especificado distintas pruebas que se deben realizar a los combustibles para asegurar su correcto funcionamiento. (ASTM, 2010).

Debido al diseño del motor diesel es posible utilizar en él aceites vegetales como combustible, los cuales pueden ser empleados de cuatro formas distintas: (i) uso directo del aceite o mezclado con diesel; (ii) aceites microemulsificados en diesel; (iii) ruptura térmica de los aceites (pirólisis); y (iv) transesterificación de los aceites para la producción de biodiesel. Los primeros dos métodos mencionados arriba no sugieren realizar ningún cambio en la molécula de triglicérido; sin embargo, la combustión directa de aceites vegetales no es recomendable debido a que forma incrustaciones de carbón dentro del motor y altera las propiedades de lubricación, trayendo como consecuencia la disminución de la vida del motor. En el tercer método, el aceite recibe un tratamiento térmico, lo cual puede provocar la oxidación y asimismo la alteración de las cadenas hidrocarbonadas. Por estas razones, la elaboración de biodiesel, mediante transesterificación, parece ser la mejor opción para utilizar aceites vegetales como biocombustible.

Dentro de los usos que se le da al biodiesel, están los motores diésel estacionarios para generación de energía eléctrica o para motobombas, calderas de combustión diésel, etc.

1.1.4. Producción de Biodiesel a nivel Mundial



Figura 2: Ciclo del biodiesel

Según los datos del IDAE (Instituto para la diversificación y Ahorro de la energía), en los últimos 9 años, la producción mundial de biodiesel aumentó en un 65%, hasta alcanzar los 23.400 millones de litros al año, en el 2012. Esto se debe principalmente a las subidas del precio del petróleo y las políticas de subvención públicas adoptadas por los distintos países para cumplir con el Protocolo de Kioto.

Los cinco principales países productores a nivel mundial durante el año 2013 fueron Indonesia, Unión Europea, EE.UU, Brasil y Argentina, que en su conjunto producen el 68,4% del total del biodiesel del mundo. Australia es el mayor productor en la región Asia-Pacífico, seguido de China y la India.

De acuerdo al último estudio publicado por la CEPAL, Argentina, Brasil y Colombia, son los únicos países latinoamericanos que figuran en la producción de bioetanol y biodiesel. Del 100% de biocombustibles, el 82% corresponde a bioetanol y el 18% a biodiesel.

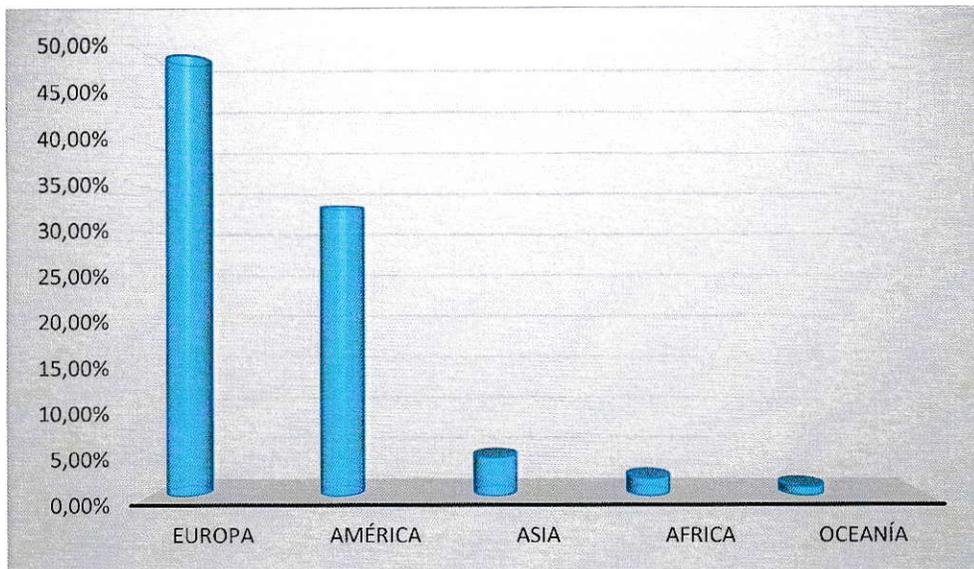


Figura 3: Porcentajes de producción de biodiesel por continentes.

1.2. Marco Legal Internacional

1.2.1. Unión Europea

La Unión Europea como un organismo unificado presenta un marco legal establecido para promover el uso de combustibles alternativos, específicamente en el caso de los biocombustibles existe la directiva 20/2003 del Consejo Europeo el cual establece la obligatoriedad desde 2010 de reemplazar en un mínimo de 5,75% los combustibles convencionales con biocombustibles, esto acompañado con la disminución de las tasas de impuesto para biocombustibles establecidos en la directiva 96/2003 del Consejo Europeo.

También existe dentro de la legislación, una normativa que está referida a la obligación de mezclar biocombustibles con combustibles de origen fósil a una determinada tasa o cuota a través del tiempo, esta cuota está referida en términos de contenido de energía y no de volumen. Esta ley entró en vigencia el año 2007, la cual también afecta a los biocombustibles puros, los cuales deberán pagar el impuesto completo correspondiente a la cuota que posean, términos de volumen, para el determinado período.

1.2.2. Estados Unidos

Los EE.UU. indican que las especificaciones técnicas que debe cumplir el biodiesel en este país para ser comercializado, están referidas a los estándares de calidad de ASTM internacional Norma D 6751. La EERE es el programa de eficiencia energética y energía renovable, dependiente del Energy Department y es la entidad encargada de la investigación y promoción de los combustibles alternativos. Estos estándares son los reconocidos por las entidades gubernamentales y estados del país. Cuando el biodiesel viene como combustible o aditivo, debe ser registrado en la U.S. Environmental Protection Agency (EPA), para ser comercializado legalmente.

El incentivo más importante para el biodiesel en Estados Unidos, es el biodiesel tax credit, decretado en la American Jobs Creation Act of 2004, ley que creó el Volumetric Ethanol Excise Tax Credit (VEETC).

1.2.3. Brasil

En la ley N° 11.097 de 2005 se incluye al biodiesel dentro de la matriz energética del país. En el decreto N°5.457 de 2005 se estipula la disminución de las cuotas tributarias a pagar para los importadores y comercialización de biodiesel. Sin embargo es a partir del reglamento de la ANP (Associação Nacional do petróleo) N° 240 del año 2003 que el biodiesel es regulado en relación a los estándares de calidad que debe tener dicho combustible.

Dentro de la legislación actual se crea el sello de combustible social, el cual entrega facilidades a algunos productores de biodiesel que cumpla con algunos requisitos sociales en la producción de la materia prima para el biocombustible, de esta forma el productor obtiene beneficios como créditos en instituciones financieras y además puede tener excepciones tributarias siempre que el productor garantice un precio de compras de la materia prima para los agricultores.

La legislación también estipula un mínimo de un 5% para mezcla a partir de 2013, lo cual inició el año 2007 con una obligatoriedad del 2%.

1.2.4. Argentina

En este país aplica la Ley 26.093 que establece el régimen de regulación y promoción para la Producción y uso Sustentable de los biocombustibles, junto al Decreto Reglamentario N°109/2007. Los cuales establecen que el biodiesel que sea comercializado dentro del país, deberá ser mezclado como mínimo en un 5%, asimismo otorga incentivos a la inversión mediante la devolución anticipada de IVA y/o amortización acelerada de bienes de uso y la exención en el impuesto de a la ganancia mínima, además de incentivos fiscales, mediante la exención al impuesto a los combustibles.

1.2.5. Situación de biodiesel en Chile

La primera planta piloto de producción de biodiesel y estación experimental de Chile fue instalada por la Universidad de La Frontera (UFRO), orientada a la producción de biodiesel en base a aceite de raps, específicamente para motores y quemadores de caldera. Esta fue presentada en mayo de 2010.

El gobierno de la Presidenta Michelle Bachelet impulsó un ambicioso proyecto denominado Plan de Seguridad Energética (PSE), mediante tres líneas de acción: diversificar la matriz (en términos de insumos y proveedores), lograr una mayor independencia, autonomía y promover el uso eficiente e inteligente de la energía a favor de las Energías Renovables no convencionales (ERCN).

El 9 de mayo de 2008 se publicó, en el diario oficial, la autorización de Chile para usar entre un 2% y 5% de biodiesel para ser mezclado con diesel, quedando ambos combustibles liberados del impuesto específico que afecta a los combustibles convencionales nacionales e importados (CNE, 2008).



1.2.5.1. Marco Legal Nacional

Leyes y decretos que aplican al biodiesel y diesel en Chile.

- Ley 19.613, del 8 de Junio de 1999, conocida como la Ley Orgánica de superintendencia de Electricidad y Combustibles, que fija las atribuciones de este organismo, procedimientos ante ella, entre otras.
- DFL. N°1 del 14 de Febrero de 1979, que establece un registro en el que deberán inscribirse las personas que importen, refinen, distribuyan, transporten o expendan directamente al público petróleo, combustibles derivados del petróleo, gas natural y gas licuado. Este registro será llevado por el Ministerio de Economía, Fomento y Reconstrucción.
- Ley 18.502, del 3 de Abril de 1986, que establece impuestos específicos al petróleo diesel.
- Ley 19.681, del 19 de Julio de 2000, que aumenta el ya establecido (por Ley 19.030) Fondo de Estabilización del Petróleo.
- Ley 9.618, de 19 de Junio de 1950, que fija como propiedad del Estado cualquier yacimiento petrolífero que se encontrara en el territorio nacional.
- Decreto N° 133, del 16 de Octubre de 2000, que establece las especificaciones de calidad de combustibles como el petróleo diésel.
- Decreto Ley N° 2224, del 8 de Junio de 1978, que creó la Comisión Nacional de Energía.

Desde el punto de vista legal se deben analizar dos aspectos en relación con los biocombustibles: por una parte se refiere al aspecto impositivo y en segundo lugar a la regulación de la cantidad de los combustibles.

Bajo el primer aspecto actúa la Ley 19.030 relativa a la “estabilización de precios del petróleo”, por lo que el biodiesel queda exento al impuesto específico, debido a que no se trata de un producto derivado del petróleo, pues es elaborado a partir de aceites y grasas de origen vegetal, siendo además un producto químicamente diferente al petróleo diesel. Sin embargo para que el biodiesel no esté afecto a impuestos debe ser

comercializado por sí solo, es decir, no mezclado con diesel fósil o incorporado como aditivo.

Si se ocupara en proporción de mezcla (B5, B20, B50, etc.) se afectará al impuesto en proporción al diesel fósil de la mezcla.

Tal como se mencionó en un principio el segundo aspecto legal a considerar es en relación a la calidad de los combustibles. El decreto que regula este aspecto es el 132/79 y su modificación mediante el decreto N° 198, en lo que se refiere a normas técnicas de calidad del petróleo crudo.

1.3. Producción de biodiesel

Estructuralmente, el proceso corresponde a ésteres metílicos o etílicos de ácidos grasos. La masa molar de una molécula tipo éster es aproximadamente 1/3 de la molécula de triglicérido. Su síntesis puede darse tanto por vía indirecta como por vía directa.

Esencialmente la reacción consiste en hacer reaccionar el aceite vegetal con metanol, lo que genera un éster y glicerina.

Los ésteres producidos presentan cadenas de hidrocarburos que oscilan entre 13 y 19 átomos de carbono si se emplea metanol y de 14 a 20 átomos en los ésteres cuando se utiliza etanol como reactivo. El producto tiene propiedades muy parecidas al diesel.

El triglicérido de aceites naturales puede estar acompañado de 1 a 3 % de ácidos grasos libres, dependiendo de su origen.

1.3.1. Vía indirecta

Está compuesta por tres etapas, una saponificación de los triglicéridos presentes en aceites y grasas, para formar jabones y glicerina; posterior a esto se realiza una neutralización en medio ácido del jabón para producir un ácido libre, conocido como aceite de inversión; finalmente una esterificación del ácido graso libre con metanol, en presencia de catalizadores generalmente de tipo ácidos. (Hass, M.J. 2002).

1.3.2. Vía Directa

Esta síntesis de biodiesel es mediante una transesterificación. Por razones prácticas y económicas ésta vía ha sido la más estudiada y la que ha tenido un mayor desarrollo. La transesterificación, también llamada alcoholísis, corresponde a la interacción entre el triglicérido de un aceite o grasa con un alcohol, en presencia de un catalizador, para originar un éster y glicerina. (Figura 4).

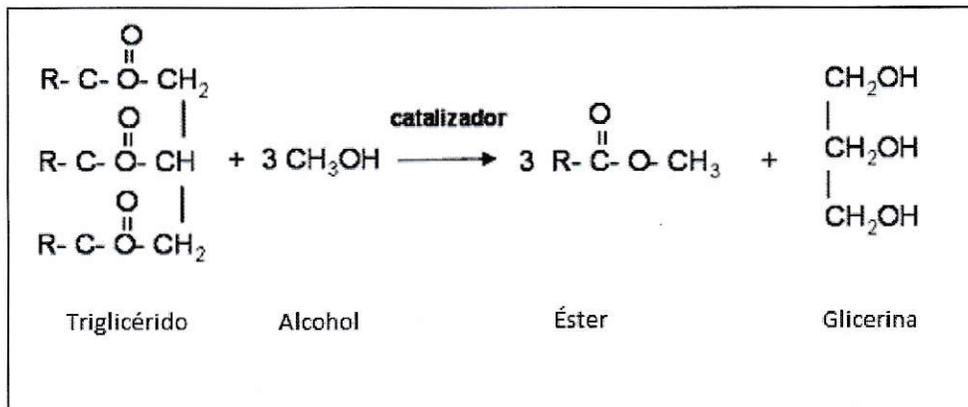


Figura 4: Obtención de biodiesel vía directa, transesterificación

A partir de la Ley de Hess, se establece que la reacción de transesterificación se produce debido a que los alquil ésteres son energéticamente más estables que los triglicéridos. Los alquil ésteres son más estables a medida que disminuye el peso molecular del alcohol utilizado.

Las reacciones de la transesterificación son consecutivas y reversibles (Freedman, 1986). Constituyen un proceso por etapas, en las cuales se encuentran presentes mono, di, y triglicéridos como co-productos al término de la reacción. (Figura 5).

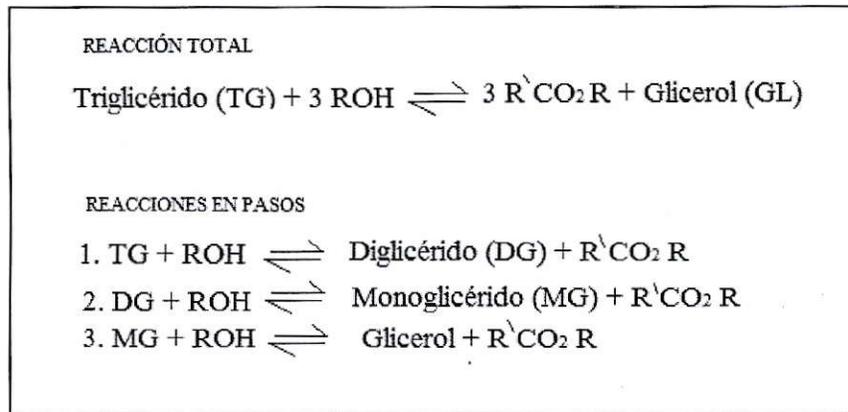


Figura 5: Química de la transesterificación de aceites vegetales

En general las referencias estudiadas para la elaboración de biodiesel, por transesterificación de aceites vegetales en ésteres metílicos de ácidos grasos, indican como procedimiento más apropiado la catálisis básica, bajas temperaturas, presión atmosférica y cortos tiempos de reacción. Además se debe considerar la disponibilidad de materia prima e insumos para realizar de manera óptima cada uno de los métodos.

Dependiendo de las características de la materia prima, el alcohol y el catalizador a emplear, existen variados tipos de transesterificaciones:

- Transesterificación Ácida
- Transesterificación Básica
- Transesterificación Enzimática

El resultado es el intercambio de fragmentos moleculares, donde un fragmento del alcohol termina siendo parte del éster y el fragmento alcóxido del éster termina siendo parte del alcohol en reacción.

Una de las desventajas en la síntesis de biodiesel de forma tradicional es que se necesitan grandes cantidades de agua para remover la base o el ácido usado como catalizador. El agua de estos lavados constituye frecuentemente un problema ambiental muy fuerte. De aquí la importancia de desarrollar un catalizador sólido fuertemente

básico o ácido con el objetivo de sustituir el uso tradicional del Hidróxido de Sodio o de Potasio y así evitar los problemas de lavado, haciendo el proceso más económico y disminuyendo a la vez la contaminación ambiental.

1.3.3. Materia prima: Grasas y aceites

Las principales materias primas utilizadas para la elaboración de biodiesel son:

- Aceites vegetales convencionales (para consumo humano y uso humano)
- Grasa Animal (sebo de vacuno, sebo de cerdo, etc.)
- Aceites usados (frituras)
- Aceites de otras fuentes (algas, microbios)

Aceites vegetales. Están compuestos principalmente de cadenas hidrocarbonadas denominadas triglicéridos (o triacilgliceroles), (figura 6) que son ésteres de tres ácidos grasos unidos a un glicerol. Esta parte del triglicérido, puede contener cadenas carbonadas que varíen en el largo de éstas y pueden estar saturadas o no, en una o más posiciones.

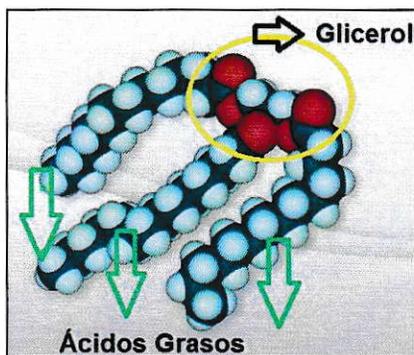


Figura 6: Triglicéridos y sus componentes

La producción de biodiesel proviene principalmente de los aceites extraídos de plantas oleaginosas, sin embargo cualquier materia que contenga triglicéridos puede ser utilizado. (Tabla 2), (Tabla 3).

Tabla 2: Tipos de aceites, grasas y otras fuentes empleados en la elaboración de biodiesel

Aceites vegetales convencionales	Aceites vegetales alternativos	Semillas modificadas genéticamente	Grasas animales	Aceites de segunda generación	Otras fuentes
Girasol	<i>Brassica carinata</i>	Girasol de alto oleico	Sebo de vacuno	Frituras	Producciones microbianas
Colza	<i>Cynara curdunculus</i>		Sebo de búfalo		microalgas
Soja	<i>Camelia sativa</i>		Grasa de pollo		
Coco	<i>Pogianus</i>		Grasa de pescado		
Palma					

Tabla 3: % de Ácidos grasos saturados, mono-insaturados, poli-insaturados de diversos lípidos

Lípido	%Ácidos grasos saturados	%Ácidos grasos monoinsaturados	%Ácidos grasos poliinsaturados
Aceite de oliva	10	85	5
Aceite de girasol	9	25	66
Aceite de soja	14	29	57
Aceite de maíz	15	34	51
Aceite de palma	47	43	10
Manteca de cacao	60	38	2
Manteca de cerdo	43	43	14
Sebo de vacuno	45	49	6
Mantequilla	61	32	7

Sus propiedades físicas y químicas están relacionadas directamente con el número y estructura química de los ácidos grasos unidos al glicerol, así como con el grado de saturación de los ácidos grasos y su longitud de cadena.

Un aceite puede diferenciarse de una grasa debido a que el primero es considerado producto de origen vegetal y tiene una consistencia líquida, mientras que la grasa, es de origen animal y presenta una consistencia sólida o semisólida. (Figura 7).

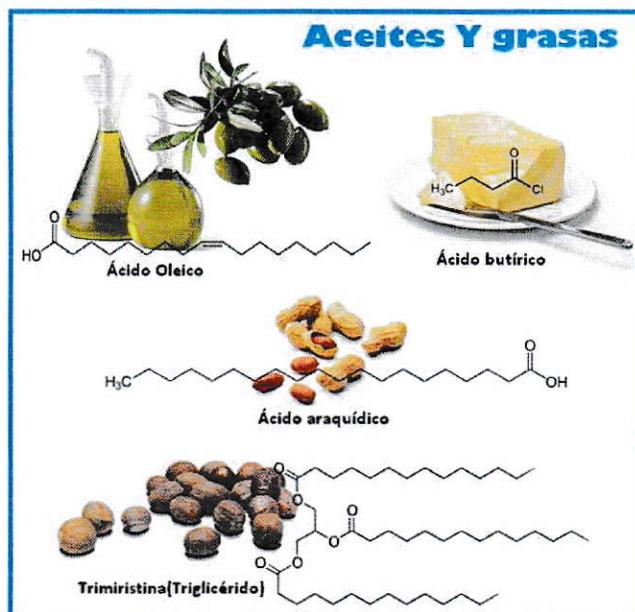


Figura 7: Diferencia entre aceites y grasas

- **Solubilidad.** Las grasas y aceites son generalmente solubles en solventes orgánicos no polares; sin embargo son casi inmiscibles en agua.

A temperaturas superiores a sus puntos de fusión, tanto las grasas como los ácidos grasos son totalmente miscibles con una gran variedad de hidrocarburos, ésteres, éteres, cetonas, entre otros.

- **Tensión superficial e interfacial.** En este aspecto las grasas, aceites y ácidos grasos están separados. Los aceites comerciales tienden a tener más baja tensión superficial e interfacial debido a la presencia de componentes polares de superficie

activa, tales como monoglicéridos, fosfolípidos y jabones. Los monoglicéridos y jabones pueden reducir la tensión interfacial entre agua y aceite.

- **Densidad.** La densidad de los glicéridos aumenta a medida que disminuye su peso molecular y al aumentar su grado de insaturación.
- **Viscosidad.** La viscosidad es una medida de la fricción interna entre moléculas, o de la resistencia a fluir de los líquidos. En general, la viscosidad de los aceites desciende con un incremento en la insaturación y con un decrecimiento del peso molecular de sus ácidos grasos.
- **Índice de acidez.** El índice de acidez (IA) es el número de mg de KOH necesario para neutralizar los ácidos grasos libres (es decir, que no se encuentran unidos a un glicérido) de 1 g de aceite. Se determina mediante la titulación o valoración del aceite disuelto en alcohol con una solución estándar de KOH. Un valor elevado para este índice muestra que el aceite contiene una alta cantidad de ácidos grasos libres, ya que ha sufrido un alto grado de hidrólisis. Puede expresarse también como porcentaje de ácido oleico, palmítico o láurico, según el ácido graso que predomine en la grasa en cuestión.

Este índice es particularmente importante para el proceso de producción de biodiesel (transesterificación), ya que los ácidos grasos libres reaccionan con el catalizador de la transesterificación (NaOH ó KOH) formando jabones (saponificación), lo cual lleva a un menor rendimiento en la producción de biodiésel. La saponificación no sólo consume el catalizador necesario para la transesterificación, sino que además los jabones producidos promueven la formación de emulsiones que dificultan la purificación de biodiesel.

- **Índice de Saponificación.** El valor o índice de saponificación de un aceite es el número de miligramos de hidróxido de potasio (KOH) necesarios para saponificar 1g de aceite completamente. Dado que los aceites están formados por triglicéridos principalmente, y que cada triglicérido necesita 3 moléculas de KOH para saponificarse, el índice de saponificación puede ser usado para estimar aproximadamente el peso molecular promedio del aceite utilizado.

1.3.4. Reactivos

1.3.4.1. Alcoholes

Los alcoholes más utilizados en la transesterificación, corresponden a los alcoholes alifáticos de cadena corta, cuando son saturados, como el metanol, etanol, propanol, isopropanol, n-butanol, iso-butanol. Cabe señalar que estos alcoholes pueden ser usados puros o mezclados con otros. (Wimmer, T. 1995).

Metanol, (Figura 5) es el alcohol más sencillo. A temperatura ambiente se presenta como un líquido ligero, presentando baja densidad, alta polaridad, cadena alifática corta, incolora, inflamable y tóxica, el cual es utilizado como anticongelante, disolvente y combustible.

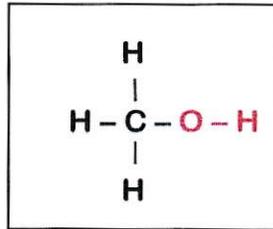


Figura 8: Molécula de Metanol, destacando su grupo OH.

Se ha demostrado que los alcoholes de cadena ramificada reaccionan más lento que sus equivalentes lineales (Nimcevic, 2000), debido al impedimento estérico que presentan y que mientras menor es el número de carbonos del alcohol mayor será el rendimiento.

Esta última característica además del costo del metanol, su posible recuperación, el que requiera menores temperaturas de reacción, que posea mayor eficiencia de conversión de aceites y que necesite menor cantidad de exceso en la reacción, hace que éste sea el alcohol que presenta las mejores propiedades para desarrollar la transesterificación tanto en laboratorio como a nivel industrial.

Un factor muy importante en la eficiencia de la transesterificación, corresponde al efecto de las relaciones molares respecto el rendimiento de la reacción, es decir, la razón molar alcohol/aceite. La estequiometría de la transesterificación necesita tres moles de alcohol

por cada mol de triglicérido para producir tres moles de éster de ácido graso y un mol de glicerina.

1.3.4.2. Catalizadores

Una de las formas más simples de aumentar la velocidad de una reacción consiste en aumentar la temperatura, pero en algunas ocasiones no es aconsejable porque disminuye el rendimiento de la reacción o bien porque los reactivos se descomponen formando otros productos no deseados. Hay otro proceso alternativo para aumentar la velocidad de la reacción sin alterar la temperatura y consiste en introducir en el medio una sustancia, llamada catalizador, que consiga el mismo efecto.

Un catalizador puede definirse como una sustancia capaz de hacer que un sistema químico alcance más rápido su estado de equilibrio, sin alterar las propiedades de dicho equilibrio ni consumirse durante el proceso.

Los catalizadores deben tener las siguientes características:

- No debe ser ni reactivo ni producto, por lo tanto no aparecerá en la ecuación global de la reacción química.
- Son eficaces incluso si existe en muy pequeñas cantidades en el sistema químico.
- Se recupera al final del proceso en el mismo estado en el que se ha introducido, es decir, que podría volver a utilizarse de nuevo.
- No altera las variables termodinámicas del proceso, porque el catalizador ni aporta ni consume energía del sistema; no cambia ni ΔH ni ΔG ni ΔS de la reacción.
- Un proceso que no sea espontáneo no será favorecido por la presencia de un catalizador.
- Acelera por igual la reacción directa e inversa. El catalizador conduce la reacción más rápidamente al estado de equilibrio por ambos sentidos.

- En general, los catalizadores son específicos, es decir, aceleran sólo una reacción concreta y no el resto.

Los catalizadores para la reacción de transesterificación pueden ser:

- Catalizadores Básicos: Hidróxidos, Alcalinos, Alcóxidos de Sodio, Óxidos, Carbonatos, intercambiadores aniónicos.
- Catalizadores ácidos: Ácido Clorhídrico, Ácido Sulfúrico, Ácido Sulfónico, Ácidos Minerales, p-toluensulfónico, Trifluoruro de boro.
- Catalizadores enzimáticos: lipasas
- Catalizadores heterogéneos: catalizadores con propiedades ácidas y básicas.

Los catalizadores comercialmente más utilizados son los hidróxidos alcalinos debido principalmente a su bajo costo, tiempos de reacción cortos y condiciones de reacción suave.

Generalmente en la producción de biodiesel se utiliza Hidróxido de Sodio (NaOH), debido a su bajo costo, pero no se consideran otros factores relevantes que mejoran la calidad del producto. En base a estudios ya realizados se ha indicado que el Hidróxido de Potasio (KOH) es más adecuado que el NaOH, debido a que la fase glicerina es separada en menos tiempo y en mayor cantidad (Nimcevic, 2000).

El Hidróxido de Potasio de fórmula química KOH (figura 4), es un compuesto químico inorgánico y una base fuerte, de uso común. Reacciona violentamente con ácidos y es corrosivo en ambientes húmedos con ciertos metales.

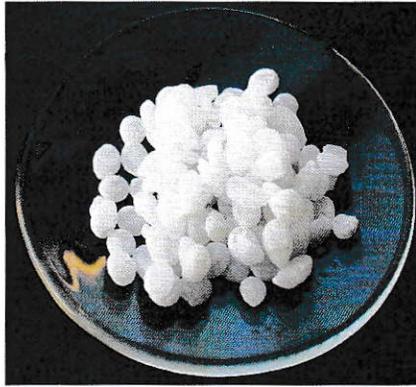


Figura 9: Catalizador utilizado, Hidróxido de Potasio

En aceites vegetales la concentración óptima de KOH es de un 1% (calculado en base al peso del aceite a utilizar) y un aumento en la concentración del catalizador no proporciona mejoras significativas, además la glicerina obtenida es de menor toxicidad, (la cual puede ser utilizada para la formación de fertilizantes artificiales, en la industria cosmética y farmacéutica) se disuelve con mayor rapidez en metanol y el rango de pureza con el que se puede trabajar es bastante amplio (85-96%).

Además, los jabones de Potasio son líquidos, a diferencia de los de Sodio que son sólidos. Esto hace que el glicerol crudo sea más fácil de drenar luego de la separación del biodiesel cuando se trabaja con KOH. Por otra parte, las sales de Potasio obtenidas como subproducto de la purificación de la glicerina pueden ser utilizadas como fertilizante agrícola, lo cual no es el caso con las sales de Sodio. (Nimcevic, 2000)

Bradshaw en el año 1942 (Bradsaw, 1942) informó que al utilizar catalizadores alcalinos, en una relación molar de alcohol/aceite 4,8:1 era posible obtener un 98% de conversión y que en relaciones superiores a 5,25:1 interferían con la separación de fases entre los ésteres metílicos y la glicerina, además de incorporar gastos innecesarios a la separación.

En contraposición a Bradshaw, otras investigaciones (Freedman, 1984) obtuvieron altas conversiones con una razón molar de 6:1.

Por esto, en la práctica, cuando se trabaja con metanol se recomienda una razón molar de 6:1 para asegurar una conversión máxima de los triglicéridos a ésteres (Freedman, B. 1984). En el caso del etanol, algunos estudios indican que una razón molar de 9:1 sería la más apropiada. Si la cantidad de alcohol no es suficiente, el producto contendrá monoglicéridos y diglicéridos (productos intermedios de la transesterificación), los cuales cristalizan muy fácilmente en el biodiesel y pueden causar taponamiento de los filtros y otros problemas en el motor.

Tabla 4: Ácidos grasos saturados e insaturados más importantes

<i>Ácido Graso</i>	Nombre Químico	Composición	Fórmula
<i>Laúrico</i>	Dodecanoico	12:0	C ₁₂ H ₂₄ O ₂
<i>Mirístico</i>	Tetradecanoico	14:0	C ₁₄ H ₂₈ O ₂
<i>Palmítico</i>	Hexadecanoico	16:0	C ₁₆ H ₃₂ O ₂
<i>Estearico</i>	Octadecanoico	18:0	C ₁₈ H ₃₆ O ₂
<i>Aráquico</i>	Eicosanoico	20:0	C ₂₀ H ₄₀ O ₂
<i>Behénico</i>	Docosanoico	22:0	C ₂₂ H ₄₄ O ₂
<i>Licnocérico</i>	Tetracosanoico	24:0	C ₂₄ H ₄₈ O ₂
<i>Oleico</i>	cis-9-octadecenoico	18:1	C ₁₈ H ₃₄ O ₂
<i>Linoléico</i>	cis-9,cis-12-octadecadeinoico	18:2	C ₁₈ H ₃₂ O ₂
<i>Linolénico</i>	cis-9,cis-12,cis-15-octadecatrienico	18:3	C ₁₈ H ₃₀ O ₂
<i>Erúsico</i>	Docosenoico	22:1	C ₃₂ H ₄₂ O ₂

Un antecedente importante a considerar es que ésta mínima cantidad de ácidos grasos libres no interfieren significativamente en la transesterificación catalizada por base. Al contrario si esta cantidad fuese superior, se recomienda el uso de una catálisis ácida, debido a la posible desactivación del catalizador alcalino.

1.4. Controversia respecto a la elaboración de biodiesel

Variadas controversias ha generado la producción de biodiesel en base a aceites refinados, ya que comprometen el consumo de alimentos por parte humana y animal, lo cual impacta en el precio de los alimentos a nivel global y en la seguridad alimentaria, aumenta el uso de fertilizantes y pesticidas e incrementa el impacto respecto a la pérdida de biodiversidad y la deforestación, esto debido a que muchos bosques tropicales y plantaciones agrícolas están perdiendo terreno a favor del cultivo de materias primas dedicadas a su elaboración.(<http://www.energiadiario.com>)

Estas consideraciones han llevado a usar los aceites usados, como una posible fuente de materia prima para la elaboración del biodiesel. Variados son los tipos que existen, como por ejemplo desechos de plantas faenadoras de carne, plantas procesadoras de alimentos, aceites y grasas usados en procesos de fritura.

Uno de los rubros alimenticios mayores, en este último tiempo, corresponde a las denominadas “comidas rápidas”, las cuales utilizan grandes cantidades de aceite en sus preparaciones, lo cual ocasiona la eliminación de elevados desechos de aceite de fritura. Debido a la accesibilidad y bajo costo se considerará la elaboración de biodiesel utilizando aceites de frituras, los cuales serán mencionados como aceites usados.



Figura 10: Aceite vegetal refinado y aceite reciclado de frituras (aceite usado)

Cuando los aceites vegetales refinados son expuestos a altas temperaturas (160°C-180°C), sus propiedades físicas y químicas se ven modificadas:

- **Descomposición térmica.** Las cuales son iniciadas por radicales libres originando compuestos cíclicos y polimerizaciones.
- **Reacciones hidrolíticas.** Los aceites tienen gran cantidad de materia orgánica, la que a su vez posee un gran porcentaje de agua, provocando una hidrólisis de los triglicéridos, lo que ocasiona un aumento en el contenido de ácidos grasos libres. (Lee, KT.2002)
- **Reacciones oxidativas.** Las reacciones con oxígeno pueden ocasionar la formación de radicales peróxidos e hidroperóxidos, la descomposición éste último puede originar aldehídos volátiles y ácidos. Frente a un exceso de oxígeno estos pueden dar paso a compuestos de baja masa molar y polimerizado.
- **Cambios en la tonalidad del aceite.** Aumento de viscosidad y densidad, formación de burbujeo.

Frente a todas estas modificaciones que se producen en el aceite, se hace necesario realizar un tratamiento previo a la transesterificación, el cual consiste en la remoción de los ácidos grasos libres, eliminar la materia orgánica, quitar el posible material particulado presente y secar la muestra para la extracción de humedad.

El contenido de insolubles del aceite debe mantenerse lo más bajo posible (menor a un 0,8% para que el biodiesel cumpla con las especificaciones europeas). Estas sustancias no participan en el proceso de transesterificación, pero permanecen en el éster (el biodiesel), y representan impurezas en el combustible.

1.5. Proceso de producción del biodiesel

1.5.1. Pre-tratamiento

La mayor parte del biodiesel se produce a partir de aceites comestibles semi-refinados con buenas características de acidez y humedad. Sin embargo, existe gran cantidad de aceites y grasas de menor calidad y menor costo que también podrían ser convertidos en biodiesel (por ejemplo, aceites vegetales crudos, grasas animales y aceites usados o residuales). El problema para procesar estas materias primas baratas es que suelen tener grandes cantidades de ácidos grasos libres (Tabla 5), gomas, humedad y otras impurezas que afectan el proceso de transesterificación alcalina.

Tabla 5: Rango Índice de acidez según el aceite o grasa utilizado.

Materia prima	Rango Índice de acidez
Aceites usados	2-7%
Grasas animales	5-30%
Grasas de trampas de grasas	Cerca de 100%

El aceite para producir biodiesel debe ser refinado parcialmente (pre-tratamiento) el cual puede incluir los siguientes procesos:

- Desgomado (en los aceites que tienen gomas, como el de soya y semilla de algodón)
- Neutralización (en los aceites con alta acidez, como el de palma)
- Lavado (para eliminar residuos de la neutralización)
- Secado (para eliminar el contenido de agua).

Si la acidez del aceite es muy alta, la neutralización no es conveniente porque implica la pérdida de los ácidos grasos libres en forma de jabones. Entonces, el proceso de refinación sugerido es: Desgomado, Esterificación ácida y Secado.

- **Desgomado.** El desgomado con agua es la forma más simple de reducir la cantidad de fosfolípidos y fosfátidos en los aceites. El aceite se calienta a aproximadamente 90°C, se agrega pequeñas cantidades de agua para hidratar las gomas y hacerlas insolubles en el aceite. La cantidad de agua a usar debe ser similar al peso seco de las gomas a remover.

Después de unos 5 minutos las gomas hidratadas pueden ser removidas por centrifugación. Las impurezas que se pueden eliminar por este método son fosfátidos hidratables, triglicéridos ocluidos y otros compuestos solubles en agua como azúcares.

- **Neutralización, lavado y secado.** Aceites con un contenido de hasta 5% de ácidos grasos libres pueden ser procesados con catálisis alcalina añadiendo mayor cantidad de catalizador para compensar las pérdidas en el jabón. El jabón que se produce es eliminado en el glicerol y/o durante el proceso de lavado con agua, y la única desventaja de este proceso es la pérdida de materia prima en jabones en lugar de biodiesel. Aceites con más del 5% de AGL no pueden ser transesterificados por catálisis alcalina, porque los jabones inhibirían la separación del biodiesel de la glicerina y además llevarían a la formación de emulsiones durante el lavado.

Para superar este problema existen dos alternativas: la neutralización del aceite o la esterificación ácida de los ácidos grasos libres. La neutralización consiste en hacer reaccionar el aceite con una sustancia alcalina como el hidróxido de sodio para eliminar los ácidos grasos libres, responsables de su acidez. El aceite se calienta a 85°C (en caso de aceites muy ácidos a 65°C) y se aplica hidróxido de potasio diluido en una cantidad tal que neutralice los ácidos en el aceite y con un

exceso que favorezca la separación de los jabones y evite la formación de emulsiones. Este exceso puede variar entre 10% y 30% para aceites de baja acidez (hasta 1%) y entre 30% y 50% para aceites de alta acidez.

- **Filtrado y secado.** Si la materia prima es algún aceite crudo, o aceite usado previamente en frituras, es posible que contenga humedad e impurezas sólidas. Para el caso de la humedad, es necesario secar el aceite mediante evaporación al vacío o mediante el uso de sales absorbentes. Para separar las impurezas sólidas, basta un proceso de filtrado en caliente antes de la transesterificación.

1.5.2. Catálisis básica

Para la preparación de biodiesel se mezcla el aceite o grasa con un exceso de alcohol, el cual debe ser de baja masa molar, monovalente en presencia de un catalizador básico, posteriormente se agita la mezcla, seguida de una decantación, formándose una fase superior constituida por ésteres metílicos de ácidos grasos y una fase inferior compuesta por glicerol y jabones de ácidos grasos. El co-producto formado en esta reacción (glicerina) no es miscible con los ésteres metílicos y se separa. (Mittelback, M.1998). (Wimmer, T. 2005).

Si se quiere utilizar un catalizador alcalino, debe conseguirse una mínima formación de jabón, ya que la calidad en la transesterificación del glicérido depende de la competencia entre la velocidad de intercambio del glicérido y el alcohol y la velocidad de saponificación del glicérido por el álcali libre. La cantidad de jabón dependerá además de la concentración del catalizador alcalino, la temperatura de reacción, el tiempo de reacción y la cantidad de agua presente. (Arrowsmith, 1945) Variados estudios demuestran que la transesterificación catalizada por álcali es exitosa, considerando que el aceite o la grasa presenten un pH aproximadamente neutro y si la mezcla de reacción es esencialmente anhidra. (Nimcevic, 2000). Esto se debe a que la presencia de agua y ácidos grasos libres retardan la reacción. Cantidades mínimas de agua, como un 0,3% pueden reducir drásticamente la formación de glicerol debido al consumo del catalizador.



Por esta razón los catalizadores básicos deben mantenerse en estado anhidro, ya que su contacto con el aire puede disminuir su efectividad. Por lo tanto para el desarrollo de la transesterificación, debe utilizarse una atmósfera de nitrógeno para excluir la humedad presente en el medio y prevenir la oxidación del aceite, factor importantísimo a considerar para la producción de biodiesel a gran escala.

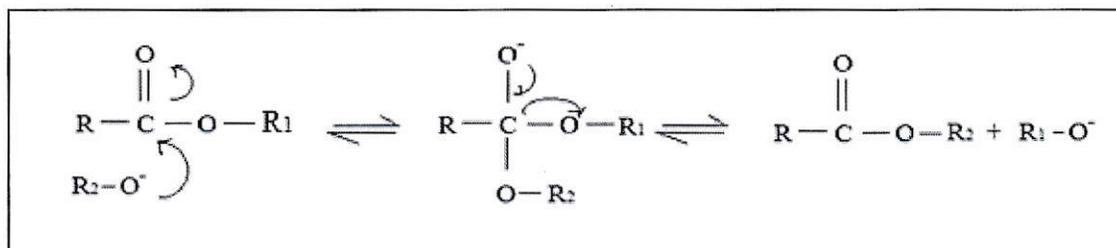


Figura 11: Mecanismo de reacción de transesterificación en medio básico

La reacción catalizada por base es un claro ejemplo de una adición nucleofílica en el carbono carbonílico seguida de una eliminación. (Figura 12). El ión alcóxido es suficientemente nucleofílico para atacar el carbono del grupo carbonilo del éster. La eliminación del ión alcóxido que originalmente se encontraba en el éster, proporciona el producto de transesterificación.

Las reacciones catalizadas por base son considerablemente más rápidas, que aquellas catalizadas por ácidos. Además que el catalizador alcalino es menos corrosivo para un equipamiento químico industrial.

1.5.3. Factores que influyen en la transesterificación

Temperatura. En general la temperatura aumenta la velocidad y cinética de las reacciones químicas, sin embargo cuando en un mismo medio transcurren dos o más reacciones en competencia, según su cinética, la temperatura puede afectar más a un tipo de reacción que a otra. En este caso específico la transesterificación de triglicéridos puede competir con las reacciones de saponificación.

Freedman utilizando aceite de soya refinado como sustrato, en una relación molar metanol:aceite 6:1 y 1% de KOH, después de 1 hora de reacción en experiencias realizadas a 60, 45 y 32 °C, encontró rendimientos de ésteres metílicos de 94%, 87% y 64% respectivamente, demostrando la influencia de la temperatura sobre la conversión del éster. (Freedman, B.1984).

Ácidos grasos libres y grado de refinación. Los aceites vegetales refinados han sido sometidos a un proceso de purificación previo. Los valores de ácidos grasos libres (AGL) están entre 0,5% y 3%, para no interferir con la reacción bajo condiciones básicas. Sin embargo, cuando hablamos de aceites usados en procesos de fritura la cantidad de AGL aumenta considerablemente, debido al alto contenido de agua presente en los alimentos, sumado a las altas temperaturas a las que son sometidos, pudiendo superar valores de hasta un 15%.

Efecto del catalizador (tipo de base y concentración). Debido al tipo de materia prima y las características ya especificadas, se utilizará KOH como catalizador en este método.

Respecto a la concentración. Estudios muestran que una relación entre una baja cantidad de base, y un aumento de la relación molar alcohol/aceite, incrementan el rendimiento del biodiesel.

Efecto del tiempo. Las referencias estudiadas indican que la presencia de mono y diglicéridos aumenta al utilizar cortos tiempos de reacción.

Efecto de la relación molar. Corresponde a una de las variables más importantes, ya que afecta directamente el rendimiento del biodiesel al influir en el desplazamiento de las reacciones. La estequiometría de la transesterificación utilizada fue de 1: 4,42; valor obtenido considerando los 0,112 moles de aceite en 100 mL y 0,4949 moles de alcohol en 20 mL.

1.5.4. Recuperación de metanol

La recuperación del metanol es una de las partes más importantes del proceso de producción, después de la etapa de reacción. Más de la mitad del metanol utilizado en el proceso de reacción se consume, dejando cantidades elevadas de biodiesel y glicerina. Considerando el valor que posee el metanol y el daño ambiental que tiene su eliminación, se hace fundamental su recuperación. Este proceso se realiza por destilación a baja presión.

1.6. Ingeniería teórica para planta de proceso industrial.

La elección de la tecnología será en función de la capacidad deseada de producción, alimentación, calidad y recuperación del alcohol y del catalizador. En general, plantas de menor capacidad y diferente calidad en la alimentación suelen utilizar procesos Batch o discontinuos. Los procesos continuos, sin embargo, son más idóneos para plantas de mayor capacidad que justifique el mayor número de personal y requieran una alimentación más uniforme.

1.6.1. Descripción Tecnología

1.6.1.1. Proceso Discontinuo o Batch

La producción batch se lleva a cabo usualmente en equipos relativamente estandarizados que pueden ser adaptados fácilmente y si es necesario reconfigurados para producir otros productos diferentes. Esto es particularmente útil para productos que se fabrican en pequeñas cantidades como los agroquímicos, farmacéuticos y otros químicos finos para los cuales la demanda anual puede ser satisfecha en unos pocos días o unas pocas cargas en una planta existente.

Debido a la flexibilidad de los arreglos de producción, estos procesos pueden absorber las fluctuaciones o cambios rápidos en la demanda que son características de estos productos. De esta manera se evitan las dificultades asociadas con la dimensión de una planta dedicada innecesariamente pequeña.

Una de las tendencias más claras de la industria química es el creciente interés por los productos químicos finos, de alto valor agregado y alto contenido tecnológico. Los procesos batch ofrecen una facilidad relativa para pasar de datos experimentales de escalas piloto a diseños industriales de manera más rápida y confiable. (Barton P.I. 1996).

Los procesos de la industria química pueden ser clasificados en continuos o batch. En un proceso continuo, los materiales pasan a través de unidades especializadas de procesamiento para terminar convertidos en productos finales. Cada una de estas unidades opera en estado estacionario y realiza una función de procesamiento dedicado. Tanto los ingresos de materiales como la salida de productos son flujos continuos de materiales. Un proceso batch, en cambio, consiste en una secuencia de pasos que deben ser realizados en un orden definido. La culminación de esta secuencia de pasos produce una cantidad finita de producto final. Esta cantidad finita es lo que se denomina batchada. Si la cantidad requerida de producto es mayor que esta cantidad, la secuencia debe ser repetida. (Rippin D.W. 1983).

Los procesos batch son esencialmente discontinuos y los materiales se procesan por lotes. En general cada unidad opera en estado no estacionario. Existen dos tipos básicos de unidades en un proceso de esta naturaleza: Unidades batch - Unidades semicontinuas. Una unidad batch propiamente dicha consiste en un recipiente donde los materiales a procesar son cargados, sometidos a algún tipo de procesamiento y luego descargados. Es decir que básicamente son unidades de contención con alguna capacidad de procesamiento.

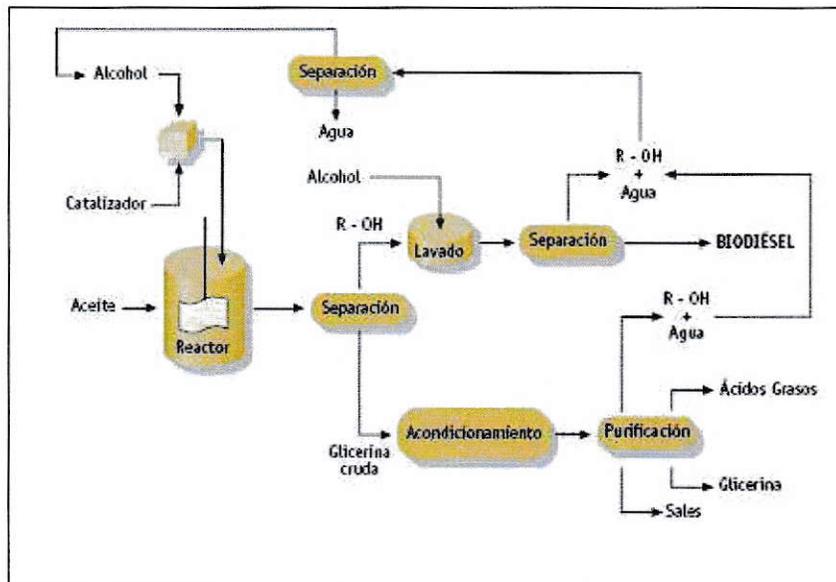


Figura 12: Esquema de un Proceso Batch

1.6.2. Componentes

- Contenedor de calefacción eléctrica. Eleva la temperatura de los aceites y aplicar presión para eliminar materia orgánica, impurezas y humedad.
- Reactor. Los reactores BD4 de 600 L de capacidad y dos decantadores de 600 L cada uno, son presurizados, tienen calefacción eléctrica, y utilizan mezclado por alta velocidad. Es necesario el aislamiento en fibra de vidrio, regulación automática de presión y temperatura de proceso. Son construidos en acero inoxidable. Presentan un sistema de ventilación para la evacuación de vapores tóxicos (del alcohol) que pudieran generarse en el proceso y que interfieren con la calidad de la reacción. El proceso en el reactor no genera ningún tipo de efluentes líquidos ni sólidos.

Además que la construcción cumple con las normas IRAM, DIN y ASTM para seguridad industrial, y ambiental.

- El sistema de llenado está provisto de dos entradas independientes que se conectan a la provisión de alcohol y aceite.
- Un operador controla manualmente el proceso.
- Las salidas se conectan a recipientes para glicerol y biodiesel. Para este último, se incluye un filtro de 5 micrones, al cual se puede cambiar constantemente el cartucho para elevar la eficiencia.
- La temperatura de reacción se regula desde el tablero; mediante un termostato y un termómetro analógico de control.
- La presión de reacción se fija mediante un regulador incorporado en la entrada de aire comprimido.
- Incluye manómetro analógico para control y dos válvulas de seguridad.

1.6.3. Costos

Hacer una ingeniería conceptual de una planta consiste en investigar las tecnologías más adecuadas, diseñar los procesos y calcular los costos de los equipos y los balances de materiales. Una vez recompilada la información técnica, es importante hacer una estimación de la inversión y de los costos de operación de la planta. Esta evaluación económica es generalmente el punto que decide de la factibilidad del proyecto y por lo tanto su construcción.

Dentro de los parámetros a estudiar, para realizar las estimaciones de costos se encuentran:

- Búsqueda, selección y compra del terreno
- Costos de las licencias y permisos
- Obras Civiles
- Costos equipos principales
- Costo equipos menores
- Costos adicionales

Para determinar la inversión inicial de cualquier proyecto deben sumarse los gastos para preparar la construcción, las obras civiles, los equipos, incluyendo el campo de estanques, y los costos adicionales.

Costos fijos. Los costos fijos de la planta representan los costos que no dependen directamente de la cantidad producida. Son costos invariables que se deben pagar cualquier sea el modo de funcionamiento y de operación.

Costos variables. Los costos variables reagrupan todos los costos y consumos que se relacionan directamente con la cantidad de biodiesel a producir. Obviamente, cuanto más grande la planta, más grande el consumo de reactantes y otros compuestos.

Finalmente puede realizarse una estimación del costo unitario de biodiesel producido a partir de los costos fijos y variables, los cuales reúnen el conjunto de gastos realizados en un acotado tiempo de funcionamiento de la planta, esto dividido por la cantidad producida de biodiesel, entrega el precio del biocombustible.

1.7. Objetivos

1.7.1. Objetivo General

Desarrollar una transesterificación básica con metanol, a nivel de laboratorio, utilizando aceites usados (aceites vegetales usados para freír) y aceites vegetales refinados.

Por otra parte se contempla una descripción breve sobre el estudio de ingeniería teórica para una planta productora de biodiesel de tamaño medio.

1.7.2. Objetivos específicos

1. Elaborar biodiesel a nivel de laboratorio a partir de aceites vegetales refinados y usados de cocina para implementar la obtención de un combustible menos contaminante y de menor costo.
2. Modificar las variables experimentales, para determinar las condiciones óptimas de trabajo y así obtener el máximo rendimiento en la elaboración de biodiesel.
3. Analizar los resultados experimentales para la obtención de rendimientos de biodiesel y así estimar la diferencia existente entre ambas materias primas.
4. Describir el diseño de una planta productiva de tamaño medio, donde se produzca este combustible, mencionando los aspectos relevantes para su funcionamiento.
5. Referir los potenciales costos de inversión y valor asociado al combustible, en base a la tendencia internacional del mercado.

II.-MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Materiales

-Reactivos

- Aceite usado (fritura)
- Metanol (Arquimed, p.a)
- Hidróxido de potasio (Merck, p.a)
- Agua destilada
- Alcohol Etilico 95% (Lab-Tec, p.a)
- Fenolftaleína al 1% (Merck, p.a)

-Materiales de vidrio y otros

- Termómetro
- Soporte universal
- Anillo con nuez
- Matraces Erlenmeyer 250 mL, 500 mL (Clase A)
- Embudos de decantación 250 mL, 500 mL
- Vasos de precipitado de 10 mL, 50 mL, 100 mL, 1000 mL (Clase A)
- Bagueta de laboratorio
- Espátulas
- Pizeta
- Guantes (MAPA PROFESSIONNEL-KLEENGUARD)
- Soporte plástico para embudos
- Barra magnética
- Tela Osnaburgo 5 μ m
- Varillas de agitación
- Frascos de plástico de 1 L, 5 L
- Bidones de plástico de 20 L

- Bureta de 25mL graduada de 0,1ml
- Gafas de seguridad (UVEX STEAL TH)

-Equipos

- Agitador magnético con calefactor (DAIHAN LABTECH)
- Estufa de secado (LAB TECH 4001)
- Balanza analítica (METTLER TOLEDO XP204S)
- Rotavapor (HEIDOLPH LABOROTA 4001)

2.2. Recolección de la materia prima

En frascos de 20 L, se procedió a retirar 40 L de la materia prima desde la cocinería perteneciente a un casino de comida y desde una empresa de comida rápida se obtuvieron 40 L de aceite estabilizado (estos aceites son los que se utilizan para freír los alimentos en este tipo de locales y corresponden a aceites que han sufrido una hidrogenación previa, haciéndolos más estables).

Las muestras de aceite vegetal refinado, fueron obtenidas desde un supermercado y se almacenaron utilizando frascos equivalentes al aceite usado.

Las muestras fueron guardadas en un estante, en un ambiente limpio, seco, con tapones herméticos y protegidos de la luz solar, previamente rotuladas.

2.3. Pre-tratamiento de las muestras

2.3.1. Sedimentación muestra

Los envases con las muestras se dejaron reposar durante 5 días para que los residuos sólidos y el agua existente se depositaran en el fondo. Luego son transferidos a frascos nuevos de 5 L, con la finalidad de eliminar impurezas, medir la cantidad de aceite y tener un mejor manejo de las muestras dentro del laboratorio.

Las muestras fueron guardadas y rotuladas.

2.3.2. Filtrado de la muestra

Se dejaron transcurrir 2 días y las muestras se filtraron, utilizando para esto tela Osnaburgo. (5 μ m).

Las muestras se envasan a 1 L, (para una mejor manipulación de las muestras) y son rotuladas.

2.3.3. Secado de la muestra

Utilizando un vaso precipitado de 1 L, la muestra fue calentada, llegando a los 60°C, manteniendo esta temperatura, durante 20 min. Transcurrido este tiempo se transfirió a un recipiente de 1 L, donde se dejó sedimentar la muestra, durante 48 horas.

2.3.4. Determinación de la masa

Lo primero que se hizo fue estandarizar la metodología de la transesterificación, basándose en la literatura, además de considerar la concentración óptima de base es de 1% (cálculo basado en la masa del aceite usado). Por este motivo se decidió tomar 100 g de cada muestra con una aproximación de +/- 5g.

2.3.5. Obtención del Índice de Acidez

En un matraz Erlenmeyer de 250 mL se disolvió Xg de muestra en X₁ mL de alcohol etílico al 95% (considerando la Tabla 6), la solución se mezcló vigorosamente. Luego se agregaron 3 gotas de fenolftaleína al 1% (solución etanólica).

Finalmente se incorporó la solución potásica a la bureta y se tituló la mezcla de aceite y etanol. El cambio de color de la solución, de blanco a rosa indicó el fin de la titulación (considerando que el color debe permanecer por un tiempo mínimo de 30 segundos).

Para determinar el % de Ácido oleico, se aplica la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Ácido oleico} = \frac{V * N * 28,2}{P} \quad \text{Ec. 1}$$

Donde:

V = Volumen del álcali (KOH)

N = Normalidad del KOH

P = Gramos de muestra

28,2 = Constante (peso molecular del ácido oleico)

Tabla 6: Método oficial Ca 5a-40 A.O.C.S

Rango de Ácidos Grasos libres %	Gramos de Muestra	mL de alcohol	Concentración del álcali (N)
0 a 0,2	56,4 +- 0,2	50	0,1
0,2 a 1,0	28,2 +- 0,2	50	0,1
1,0 a 30,0	7,05 +- 0,05	75	0,25
30,0 a 50,0	7,05 +- 0,05	100	0,25
50,0 a 100,0	3,53 +- 0,001	100	1

Para obtener el índice de acidez:

$$IA = \% \text{ Ácido oleico} * 1,99 \quad \text{Ec.2}$$

Donde:

1,99 = Constante

2.4. Determinación del volumen de Alcohol

Los triglicéridos presentes en la transesterificación se tomaron como estearato de glicerilo, cuyo PM= 891,5 g/mol. Considerando que fueron pesados 100 g de muestra, entonces:

$$n_1 = \frac{g_1}{PM} \quad \text{Ec. 3}$$

Donde:

n_1 = número de moles estearato de glicerilo

g_1 = gramos de muestra

PM = masa molar estearato de glicerilo

Según Bradshaw la relación teórica entre alcohol: aceite corresponde a 4,8:1. Por lo tanto debemos tener aproximadamente 4,8 veces más de moles de alcohol respecto a los moles de la muestra.

$$n_2 = n_1 * 4,8 \quad \text{Ec. 4}$$

A partir de la Ec. 4 se determinaron los moles del alcohol, para obtener así los g necesarios de éste.

Utilizando la Ec 3 se despejan los g de metanol obteniéndose la siguiente fórmula:

$$g = PM * n_2 \quad \text{Ec. 5}$$

Donde:

g = gramos de metanol

PM = masa molar del metanol (32 (g/mol))

n_2 = moles de metanol

Por lo tanto para obtener el volumen necesario:

$$V = \frac{g}{d} \quad \text{Ec. 6}$$

Donde:

V = Volumen

g = gramos metanol

d = densidad del metanol (0,7918 (g/mL)).

2.5. Cálculo del Rendimiento

Se requiere tener los moles finales obtenidos del estearato de metilo, para esto se utilizó la figura 13, considerando la estequiometría de la reacción.

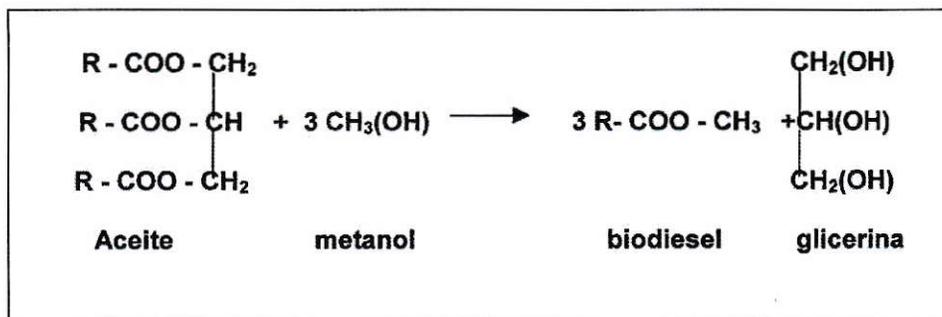


Figura 13: Reacción estequiométrica de transesterificación

Para determinar los n de estearato de metilo

$$n_3 = \frac{g}{PM} \quad \text{Ec.7}$$

Donde:

n_3 = moles de estearato de metilo

g = gramos de estearato de metilo

PM = masa molar estearato de metilo (298,5 (g/mol)).

Por lo tanto se tiene:

$$R_1 \% = \frac{3 n_3 * 100}{n_1} \quad \text{Ec.8}$$

Donde:

R_1 % = Porcentaje rendimiento en moles

n_2 = moles totales esteres de metilo

n_1 = moles de estearato de glicerilo

Finalmente el rendimiento total en peso:

$$R_2 \% = \frac{g_2 * 100}{g_1} \quad \text{Ec.9}$$

Donde:

R_2 % = porcentaje rendimiento en peso

g_2 = gramos biodiesel obtenido

g_1 = gramos de aceite inicial

2.6. Transesterificación

Se masó 100 g del aceite en un matraz Erlenmeyer de 250 mL con tapa. La muestra se calentó a 55 °C sobre una placa calefactora con agitación constante. Una vez alcanzada la temperatura, se le añadió 20 mL de una solución metanólica de KOH (la cantidad de KOH disuelto en el alcohol está dada según el índice de acidez del aceite a tratar, para así neutralizar los ácidos grasos libres presentes en las muestras, además a esta masa se le añadió un exceso de KOH utilizado como catalizador equivalente al 1% del peso del aceite).

La mezcla se mantuvo bajo agitación a 55°C por un tiempo de 60 minutos. Una vez transcurrido este tiempo la solución se transfirió a un embudo de decantación. Luego de 1 hora de reposo dos fases fácilmente visibles se encuentran en el embudo. Donde la fase superior está constituida por los ésteres metílicos más una mínima cantidad de impurezas; mientras que la fase inferior corresponde a la glicerina más impurezas.

Las fases fueron separadas, donde la fase superior fue recibida en un matraz Erlenmeyer de 250 mL con tapa y se combinó con una mezcla de 0,3 g de KOH disueltos en 5 mL de metanol. La muestra se agitó una vez más durante 45 minutos a 55°C y fue transferida a un embudo de decantación. Se dejó transcurrir una hora en reposo, para que las fases pudiesen separarse, la fase de glicerol se mezcló con la extraída en la primera etapa y el biodiesel se mantuvo en el embudo para finalizar lavando la muestra, en 3 porciones de 150 mL de agua destilada, donde se separaron las fases en cada lavado.

Después del tercer y último lavado se debió esperar 24 horas antes de separar las fases, con la finalidad de que gran parte del agua restante quedara en el fondo del embudo.

Para cada una de las muestras tanto de aceite vegetal refinado, aceite usado 1 y aceite usado 2, se realizó el mismo procedimiento y fueron modificadas las mismas variables. (Tabla 7).

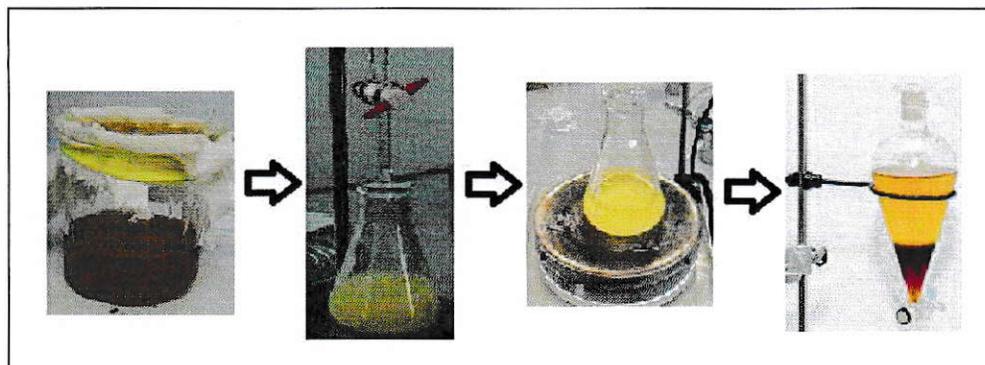


Figura 14: Etapas del proceso de transesterificación de ácidos grasos para síntesis de biodiésel

2.6.1. Variables Utilizadas

Según la literatura la ejecución de una transesterificación de aceites por medio de catálisis básica, a una baja temperatura, con tiempos cortos de reacción y a presión atmosférica es la indicada para obtener resultados positivos en la fabricación de biodiésel. Por esta razón se alternaron algunos factores para determinar, en el laboratorio cuales son las variables que afectan o mejoran los rendimientos de la reacción y de esta manera corroborar la información obtenida en la literatura.

La temperatura es un gran aliado para la cinética de una reacción, pero cuando dos o más reacciones compiten entre sí es importante determinar cuál es la temperatura adecuada para obtener los resultados esperados, la transesterificación compete directamente con la saponificación en cada reacción, por eso, se realizó la experiencia a distintas temperaturas y así determinar la óptima.

El tiempo de reacción fue otro factor de estudio, las referencias indican que en tiempos demasiado cortos la cantidad de mono y di-glicéridos aumenta, quitándole así rendimiento a la transesterificación y algo más importante, la calidad al biodiésel.

Por último la cantidad de acidez existente en los aceites es otro factor de estudio, cuanto afecta si se neutraliza dicha acidez o si solo se utiliza una cantidad mínima como catalizador del álcali. Los aceites refinados pueden promediar un 0,5% de acidez, cantidad que aumenta en los aceites refinados usados en procesos de frituras. Estos

niveles pueden alcanzar cerca del 15% o más, dependiendo de cuanto uso le dan a dicho aceite.

Este procedimiento se replicó a 10 muestras de cada aceite (refinado-usado 1-usado2), variando la temperatura, tiempo de reacción y catalizador, para lo cual se desarrollaron diez experiencias distintas.

Tabla 7: Variables modificadas en la transesterificación para observar su comportamiento respecto al rendimiento de biodiesel obtenido

	<i>Temperatura</i> (°C)	<i>Catalizador</i>	<i>Tiempo de</i> <i>reacción (min)</i>	<i>Índice de</i> <i>Acidez</i>
<i>Experiencia 1</i>	20	KOH	45	Calculado Ec.2
<i>Experiencia 2</i>	55	KOH	45	Calculado Ec.2
<i>Experiencia 3</i>	20	KOH	30	Calculado Ec.2
<i>Experiencia 4</i>	20	KOH	60	Calculado Ec.2
<i>Experiencia 5</i>	55	KOH	30	Calculado Ec.2
<i>Experiencia 6</i>	55	KOH	60	Calculado Ec.2
<i>Experiencia 7</i>	55	NaOH	45	Calculado Ec.2

2.6.2. Recuperación del metanol

Para la recuperación de metanol, en el proceso de lavado del biodiesel, se utilizó la técnica de destilación a presión reducida, utilizando 2000 mL de solución y dejando trabajar durante 2 horas, manteniendo una temperatura entre 50° y 60°C, considerando que el metanol ebulle a 64,7°C, en condiciones normales. Mientras que al utilizar presión reducida, este valor disminuye alcanzando la ebullición a 55°C. (Funcionamiento del rotavapor a 4,44 atm).

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Rendimientos

Como era de esperar el aceite refinado presentó los rendimientos más altos, (Tabla 8 y 9). Al realizar una comparación respecto al óptimo entregado de la literatura, el cual corresponde a un 98%, el valor promedio obtenido para este tipo de aceite se acercó bastante ya que presentó una diferencia de tan solo un 5% (considerado valores de producción industrial).

A partir del rendimiento máximo obtenido se logró establecer cuáles son las variables óptimas para obtener una transesterificación completa y así un biodiesel de mayor pureza. A partir de los valores obtenidos es posible apreciar que no existe mayor diferencia en el resultado al trabajar durante 60 minutos respecto a 90 minutos.

Tabla 8: Promedio de porcentajes de rendimientos basado en los gramos de esteres metílicos obtenidos al finalizar la transesterificación.

Condiciones de Reacción	% Aceite Refinado	% Aceite Usado 1	% Aceite Usado 2
20°C, 45 minutos, KOH	84,46	73,63	70,67
55°C, 45 minutos, KOH	90,69	80,80	78,93
20°C, 60 minutos, KOH	87,62	76,21	73,63
20°C, 90 minutos, KOH	84,89	74,89	72,93
55°C, 60 minutos, KOH	93,00	83,26	80,20
55°C, 90 minutos, KOH	90,94	80,45	78,14
55°C, 45 minutos, NaOH	73,35	58,19	52,38

 = Máximos % rendimientos obtenidos para cada promedio de muestras.

Es posible apreciar que el rendimiento, al utilizar como catalizador, NaOH disminuye abruptamente, llegando a un 73,35%, lo cual implica una diferencia notoria de un 24,65%, respecto al valor teórico y a un 19,65% de nuestro valor óptimo.

El uso de NaOH implica una metodología mucho más compleja, ya que en la separación de fases tiende a emulsionarse.

Por lo tanto se estableció como catalizador el KOH, ya que presentó mayor eficiencia en el proceso de transesterificación.

Se evaluó la reacción a dos temperaturas distintas, 20 y 55°C, estableciéndose que al utilizar una temperatura más alta, ésta influye considerablemente en la cinética de la reacción.

Tabla 9: % rendimiento basado en los moles de estearato de metilo, obtenidos tras la transesterificación

Condiciones de reacción	% Aceite Refinado	% Aceite Usado 1	% Aceite Usado 2
20°C, 45 minutos, KOH	84,06	73,28	70,33
55°C, 45 minutos, KOH	90,26	80,42	78,56
20°C, 60 minutos, KOH	87,20	75,85	73,28
20°C, 90 minutos, KOH	84,48	74,54	72,58
55°C, 60 minutos, KOH	92,56	82,87	79,82
55°C, 90 minutos, KOH	90,51	80,07	77,77
55°C, 45 minutos, NaOH	73,00	57,91	52,13

■ = Máximos % rendimientos obtenidos para cada promedio de muestras.

3.1.1. Aceite Vegetal Refinado

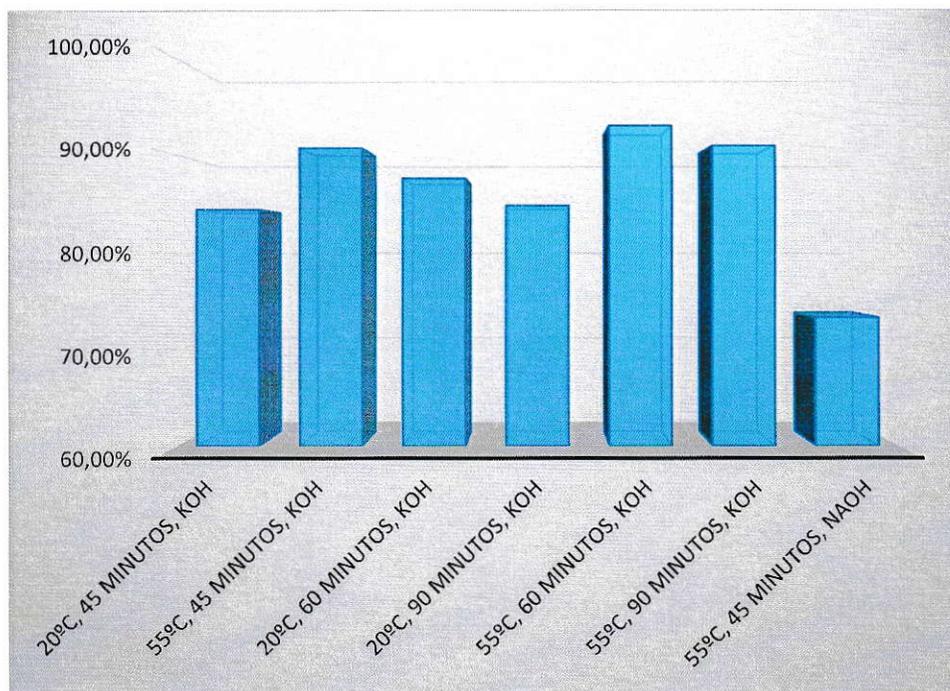


Figura 15: Diferencia del rendimiento porcentual según cada una de las variables estudiadas para aceite vegetal refinado.

Considerando que las muestras de aceite refinado presentan el índice de acidez más bajo, la mínima presencia de humedad, no contiene sólidos en suspensión y tomando en cuenta su proceso previo de purificación, se establecerá como referente su promedio de rendimiento, para la obtención de las variables óptimas.

3.1.2. Aceite reciclado de fritura cocinería (Aceite Usado 1)

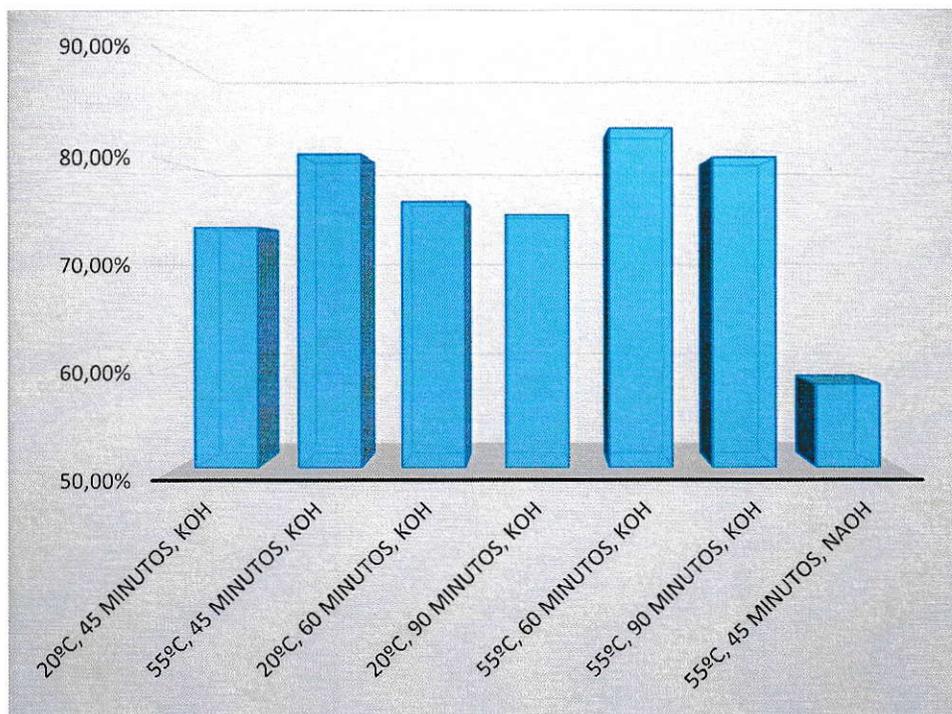


Figura 16: Diferencia del rendimiento porcentual según cada una de las variables estudiadas para aceite usado 1.

Este aceite presentó una mayor cantidad de impurezas sólidas, tenía una coloración más oscura y el secado demoró más. Al ser aceites usados en procesos de fritura, la presencia de ácidos grasos libres aumenta considerablemente producto de que el aceite es sometido a altas temperaturas, además del contacto con los alimentos y la humedad presente en la muestra.

Debido a esto el rendimiento máximo obtenido fue de un 83,26%, respecto a la literatura, la cual señala un rendimiento óptimo de 98%, se alcanza una diferencia del 14,74%, cifra poco significativa, considerando las condiciones ya mencionadas.

3.1.3. Aceite reciclado de fritura comida rápida (Aceite usado 2)

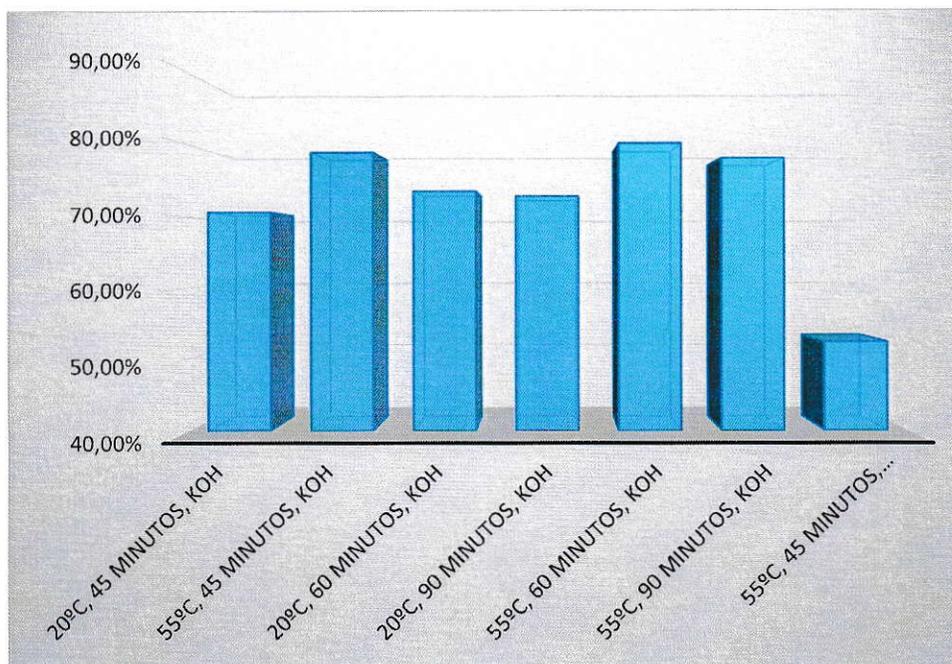


Figura 17: Diferencia del rendimiento porcentual según cada una de las variables estudiadas para aceite usado 2.

Estos aceites fueron los que presentaron la mayor cantidad de residuos sólidos, una coloración de tonalidad café y gran presencia de humedad, lo cual indica una elevada concentración de ácidos grasos libres.

El rendimiento obtenido fue de un 80,20%, el cual se aleja del óptimo en un 12,8%. Por lo cual podemos inferir que este aceite fue sometido a altas temperaturas, por un tiempo prolongado. Por esto se produciría una mayor formación de radicales libres y por lo tanto la oxidación del aceite.

En este caso, debido a una mayor presencia de ácidos grasos libres fue necesario neutralizar aplicando una cantidad adicional de catalizador, determinándose mediante la titulación realizada para el cálculo del índice de acidez.

3.2. Residuos líquidos del proceso

A medida que se desarrollaron los experimentos, se detectó un uso muy elevado de agua destilada, ya que por muestra se realizan tres lavados de 150 mL cada uno, contabilizando las 200 muestras analizadas, se utilizó en total (solo en la parte experimental) 90 L de agua destilada, por lo que se decidió reutilizar una porción de ésta. (Segundo y tercer lavado de la muestra, es decir, 300 mL por cada una).

El primer lavado arrastra la gran mayoría de las impurezas que se encuentran en la solución de ésteres metílicos debido a que poseen mayor afinidad con el agua respecto al biodiesel, por lo tanto, no era conveniente considerar esta porción para reutilizar, debido a la saturación de contaminantes que presenta.

El segundo y tercer lavado llevan pequeñas cantidades de impurezas, ya que por afinidad estas han sido removidas por los lavados anteriores, por este motivo, es posible volver a usarlas para lavados posteriores.

Finalmente el agua de la primera porción es derivada a una planta de tratamiento de RILES, para su correcta eliminación.

Otro aspecto relevante, no incluido en los objetivos, fue la recuperación de metanol, ésta se realizó mediante destilación a presión reducida y para asegurar la obtención de biodiesel de buena calidad su reutilización fue fraccionada en una proporción 70% metanol puro y 30% metanol recuperado, esto considerando que la pureza del metanol puro es de un 99,5%.

3.3. Estudio teórico planta productiva

Luego del análisis de los antecedentes que se proponen en el presente proyecto, se consideró que el factor preponderante en la determinación del tamaño para una planta productora, es la disponibilidad de la materia prima. Por lo tanto se presentó el proceso Batch o discontinuo para la producción del biodiesel. La decisión anterior se sustenta además en los altos costos de las tecnologías, costos que aumentan según se plantea un volumen cada vez mayor de producción. Por lo que si bien la tecnología existe y está relativamente disponible, los costos de una producción mayor hacen prohibitivo la idea de crear una gran industria sin la seguridad en los suministros de las materias primas.

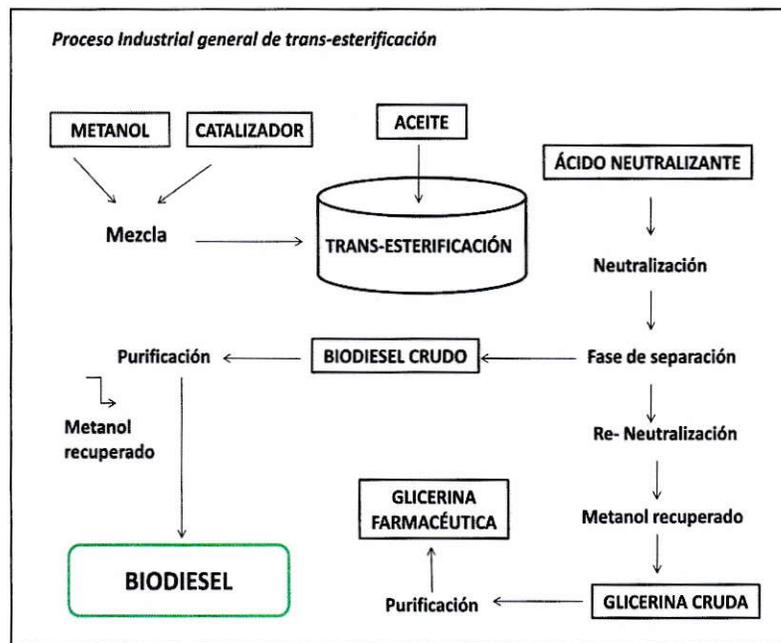


Figura 18: Proceso Industrial general de transesterificación

3.3.1. Infraestructura

La planta debe estar conformada por una línea de producción, instalaciones de servicio, incluye un área de almacenamiento de insumos (metanol - KOH), estanques para el almacenamiento de la materia prima, aceites de fritura. Por otra parte estanques para el almacenamiento del biodiésel terminado y contenedores para residuos y glicerina obtenida. Además se requerirá de instalaciones para el personal y administrativas, estas constan de una oficina administrativa, camarines para cambio de ropa del personal, casilleros, duchas y baños.

Además de los análisis químicos necesarios para el control de calidad del biodiésel.

La opción que mejor se adapta a los requerimientos de la planta proyectada corresponde al módulo M20 el cual contempla un secador de aceites, que es donde se le realiza al pre-tratamiento al aceite (en caso de aceites de fritura), un reactor y 2 decantadores., la producción estimada corresponde a 1200 litros por día (Aprox), por un período de 312 días anuales con trabajo de dos turnos de 7 horas diarias.

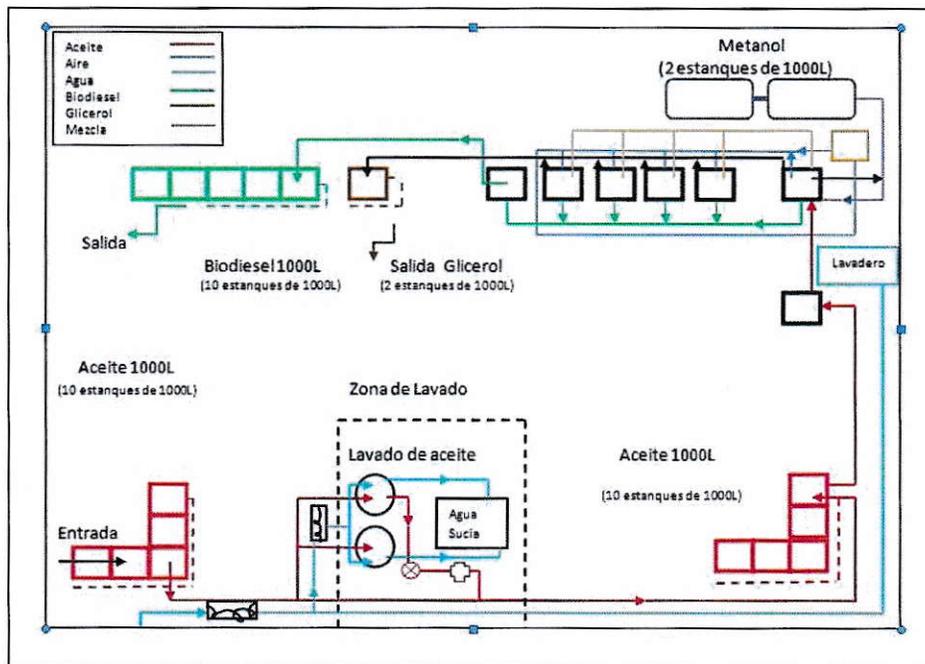


Figura 19: Lay out típico de planta producción 2000 L Biodiesel / día

3.3.2. Costos

En cualquier proyecto de construcción de una planta existe una importante etapa de ingeniería. Una vez estimada la planta, se procede a la interface antes del funcionamiento lineal de ésta.

A continuación se describen las distintas etapas que requieren de un exhaustivo análisis, para la estimación del valor del biodiesel.

a) **Inversión Inicial**

- Estudio de Pre-factibilidad: Deben considerarse los puntos importantes que determinarán la inversión, mantención y producción de la planta.

b) **Iniciación del Proyecto**

- Búsqueda, compra o arriendo del terreno
- Costos de permisos y licencias
- Obras Civiles (Estructura, construcción, cierres, etc)

c) **Equipamiento Necesario**

- Reactor
- Bombas
- Válvulas
- Estanques
- Equipos auxiliares
- Pining
- Automatización
- Instalaciones eléctricas
- Montaje de equipos
- Calderas a vapor
- Red de incendio



- Tratamiento de aguas
- Pesaje de camiones

a) Costos Fijos

- **Personal Necesario.** Una planta de biodiesel es un conjunto de alta automatización donde los procesos no requieren mucha intervención humana. El personal de planta sirve en todas las partes de control de producción, de los equipos y de calidad, mientras se emplean también operarios para la carga de leña en la caldera y para la recepción y entrega de productos a camiones, un jefe de planta, un técnico químico para las pruebas diarias de aceite y biodiesel, un técnico mecánico para la gestión del mantenimiento de equipos, dos operarios de carga de leña en la caldera de vapor y un operario de recepción de camiones.
- **Mantención Planta.** Se realiza un mantenimiento permanente y preventivo durante todo el año. En efecto, la producción se realiza durante 312 días al año, lo que permite utilizar el tiempo remanente para las obras de inspección general y cambio de equipos previstos. En plantas productivas se suele gastar un 5% del precio de equipos instalados y por año para las tareas de mantenimiento.
- **Seguros y Otros.** Son un costo obligatorio que corresponden al seguro de la planta y personal. El valor depende de varios parámetros y se puede estimar generalmente en 0,2% de la inversión total.
El funcionamiento de una planta siempre genera una multitud de pequeños costos (administrativos, entre otros) cuyo costo agregado es un gasto importante. En ocasiones puede llegar hasta el 50% del gasto en personal, mantenimiento y seguros.

b) Costos Variables

Los costos fijos de la planta representan los costos que no dependen directamente de la cantidad producida. Son costos invariables que se deben pagar cualquier sea el modo de funcionamiento y de operación. Al contrario, los costos llamados “variables” dependen directamente de la cantidad a producir y por lo tanto de los consumos que se hacen en la planta.

- **Materia prima.** Aceites usados: Se obtuvo la materia prima desde los casinos de una empresa, por este motivo se analizará la potencial utilización de aceites de fritura reciclado para lo cual se determinará en primer lugar la cantidad existente y si esta representa un suministro continuo que permita hacer funcionar una industria de demanda tan creciente como la energética.

La utilización de aceites usados como materia prima implica necesariamente la elaboración de un sistema para su recolección, ya que es casi imposible obtener los volúmenes necesarios de una sola fuente.

Como todas las empresas, deben eliminar sus desechos, se contratan empresas externas que se encargan del transporte hacia su destino, industrias especializadas en el manejo de residuos y que contemplan la posibilidad de realizar reciclaje del aceite, como Hidronor. El retiro es gratuito o con un importe muy bajo, ya que el negocio de la empresa de retiro consiste en transportar el aceite a las empresas de reciclaje y así venderlo para su posterior recuperación.

Al considerar el utilizar el aceite de fritura como materia prima hay que considerar el competir por obtener el aceite, por lo que es necesario conocer cuáles son las políticas de las empresas en el rubro alimenticio en lo que se refiere al retiro del aceite, en caso de requerir una nueva fuente de materia prima.

Considerando esta falta de materia prima, se consultó al respecto la empresa Tarragona, emblemática en el rubro, la cual indicó que para la eliminación de los residuos se usan procedimientos dentro de la normativa legal, sin embargo como imagen corporativa se busca entregar una visión de empresa amigable con el medio ambiente, por lo que consultado acerca de la elección del destino final de sus residuos, no se pretende el cobro por estos y se optaría por el uso más ambientalmente sustentable que se les da a estos aceites, es decir favorecerían proyectos tendientes a disminuir la contaminación, en este caso al reemplazar combustibles fósiles por una fuente energética renovable.

- **Reactivos y productos químicos.** El costo de productos químicos baja con el volumen a comprar y es difícil de estimar el precio exacto que se pagará, para ello es necesario cotizar precios por paquetes de varias toneladas, lo cual constituye una buena base para evaluar el proyecto.
- **Consumo eléctrico.** La planta consta de muchos equipos eléctricos que consumen de manera constante electricidad. Entran las bombas y los equipos auxiliares como centrifugas y mezcladores en la categoría de equipos eléctricos. Se suma la potencia de cada equipo para obtener una estimación de la potencia total instalada en la planta.

3.3.2.1. Estimación del valor de biodiesel obtenido

Para estimar el costo del biodiesel deben considerarse los costos fijos y variables, con esto tenemos el conjunto de los gastos hechos durante un período de funcionamiento de la planta. Esto debe dividirse por la cantidad producida de biodiesel, encontrando así el valor de producción de éste.

Cabe señalar que en algunas zonas del país, la materia prima (aceite usado), se regala o vende a precios que van entre los \$90 y \$200 por litro. Considerando que el costo de procesamiento industrial del biodiesel puede alcanzar los US\$0,62 el litro (tomando como referencia de valor del dólar \$549,09 Obtenido el 22 de septiembre de 2014), que este biocombustible está exento de IVA e impuesto específico, y que en este momento el precio del diésel de petróleo está en torno de los \$ 447,8 el litro, producir biodiesel a partir de aceite residual es un negocio ventajoso y competitivo

Si a lo anterior se suma el atractivo y bajísimo costo de recolectar aceite usado de cocina como insumo para la producción de biodiesel, el resultado es un negocio en Chile con márgenes de rentabilidad muy interesante.

Las empresas internacionales acopiadoras desarrolladas en el reciclaje de aceite, reciclan anualmente cerca de 1,5 litros de aceite per cápita. En Chile esta cifra no supera los 0,3 litros (20%), el resto que se reúne (80%) es enviado a otros países de Europa, los cuales poseen más tecnología y conocimiento.

3.4. Discusión general

3.4.1. Costos y Rendimientos.

- **Rendimientos.** El mejor rendimiento de aceites usados 1 fue de 83,26%, y de aceites usados 2 de 80,20 % a la temperatura óptima de trabajo (55 °C). Esto muestra que el factor temperatura influye directamente en la calidad y cantidad del biodiesel obtenido.

En la literatura se establece como rendimiento óptimo un 98% para biodiesel proveniente de aceite refinado, es decir la producción de biodiesel con aceites usados se puede lograr a gran escala y su comercialización es factible, considerando el bajo costo de la materia prima utilizada. Cada año se arrojan más de 40 millones de litros de esta materia prima al desagüe, lo cual implica 40.000.000.000 de litros de agua contaminada y un gasto de US\$ 130 millones anuales para el país.

- **Costos** La cantidad de catalizador (KOH) disuelto en el alcohol está dada según el índice de acidez de cada muestra de aceite, además a esta masa se le añadió un exceso de KOH utilizado como catalizador equivalente al 1% del peso del aceite.

El costo asociado a los catalizadores empleados tiene una diferencia de 17,4% (el valor de 5 K de KOH corresponde a \$ 15.500, mientras que el NaOH \$11.200). Aunque es una diferencia amplia en gastos económicos, existe una marcada diferencia en costos ambientales, ya que los subproductos del hidróxido de potasio pueden utilizarse para desarrollar otros compuestos, dentro de los cuales destacan fertilizantes y así se evita su eliminación.

3.4.2. Residuos y Desventajas

- **Agua de lavado.** El lavado de éster requiere alrededor de un litro de agua por litro de éster a lavar. El agua de lavado del éster tiene un alto nivel de BOD ("biochemical oxygen demand") proveniente del aceite residual, del éster y del glicerol. Este representa la concentración de materia orgánica biodegradable presente en el agua final.
- **Ablandamiento del agua.** El sistema de intercambio de iones para el glicerol puede producir grandes cantidades de agua con sales por el proceso de regeneración. El agua se debe ablandar para eliminar las sales de calcio y magnesio, además de ser tratada para remover los iones férricos y de cobre. Además, el ablandamiento del agua, el intercambio iónico y la purga de agua fría contribuyen a tener una carga moderada en sales disueltas. El proceso adicional de tratamiento del agua tiene que cumplir con los requerimientos de la planta municipal de tratamiento de aguas.
- **Agua en biodiesel.** Aunque se considere que el biodiesel es insoluble en agua, este combustible lleva considerablemente más agua que el petróleo diesel clásico, como agua disuelta o como gotitas de agua suspendidas. El biodiesel puede contener hasta 1500ppm de agua disuelta mientras que el diesel tiene generalmente un contenido de 50ppm.

La norma ASTM de biodiesel, posee un límite de 500 mgL^{-1} de agua. Este punto es bastante difícil de conseguir porque muchos estanques de diésel tienen agua en la parte superior por condensación. El agua puede contribuir además al desarrollo de microbios en el combustible. Este problema puede ocurrir en ambos combustibles generando carburantes acidificados y lodos que tapan los filtros de combustible. Los sedimentos pueden ser moho suspendido y partículas

sucias o ser compuestos insolubles generados durante la oxidación del combustible.

3.4.3. Beneficios de una planta de Biodiesel.

La ODEPA estima que el abastecimiento a una planta industrial bordearía las 3.000 toneladas mensuales de aceite usado, lo cual implica una reutilización bastante rentable de este desecho. Considerando los gastos implicados en la elaboración del biodiesel, respecto del rendimiento y las mejoras en la calidad ambiental, se concluye que este trabajo cumple con los objetivos planteados y se deja anexada la información de un diseño para una planta productiva de tamaño medio con proceso industrial Batch.

IV.- CONCLUSIONES

El proceso de transesterificación con catalizador básico se elige por su alto rendimiento de conversión, su bajo consumo de energía y su sencillez de aplicación.

Su desventaja consiste en la producción de sub-productos que se deben tratar y que generan un costo adicional, tanto a la planta como al gasto funcional.

Basándose en los resultados obtenidos en la transesterificación de aceites usados y refinados, se concluye:

- Las condiciones óptimas fueron, Temperatura 55°C; tiempo de reacción 60 min; catalizador hidróxido de potasio
- En este estudio se demostró que el hidróxido de potasio, produce mejores rendimientos y por lo tanto se obtiene biodiesel de mayor pureza.
- Los resultados indican que a temperaturas bajo la ambiental, no se desplaza completamente el equilibrio a la formación de producto, lo cual reduce el rendimiento del biodiesel.
- A partir de los tiempos de reacción utilizados se pudo establecer que transcurridos 60 minutos, la transesterificación alcanzó la mayor conversión de ésteres. Un tiempo mayor de reacción no modifica esencialmente el rendimiento del biodiesel.
- Para aceite usado 1, el rendimiento obtenido fue de 83,26%, para aceite usado 2; 80,20% y para los aceites refinados 93%.
- En cuanto al aspecto ambiental, la reutilización de aceites, disminuye considerablemente su vertido a fuentes erróneas, como se realiza normalmente a nivel doméstico por el desagüe. Además reduce las emisiones

contaminantes, bajando la concentración de partículas en suspensión y el dióxido de carbono liberado al ambiente.

- Al recuperar metanol mediante un tratamiento interno y luego un reciclado del agua permiten ahorrar costos y facilitar el proceso global. Al recuperar el agua de lavado, se reduce la incorporación de glicerina, metanol, KOH e impurezas sólidas a los efluentes naturales.
- A modo de recomendación, es necesario prever sistemas de secado y almacenamiento seco de biodiesel. El agua suspendida es un problema en los sistemas de inyección de combustible porque participa en la corrosión de las piezas más finas y cerradas de los inyectores.
- Para la implementación de una planta de producción deben considerarse múltiples factores, siendo mencionados en este trabajo los más relevantes. Como base se requiere conocer la cantidad de biodiesel que se pretende producir, para de esta manera determinar el tamaño de la planta. Finalmente podemos concluir, que a nivel laboratorio es fiable la elaboración de biodiesel, pero a nivel industrial deben considerarse factores tales como el costo actual del biodiesel, su poder calorífico levemente inferior y la inversión a realizar.



V.- REFERENCIAS

ASTM.<http://www.astm.org>.

ARROWSMITH, C. J. 1945. "Treating fatty materials".U.S., pp 383-580.

BARTON P.I. , R. J. Allgor, M. D. Barrera, and L. B. Evans,1996 "Optimal Batch Process Development", Computers and Chemical Engineering, pp 885- 896

BIODIESEL. <http://www.biodiesel.org/what-is-biodiesel/biodiesel-basics>.

BRADSHAW, G.B., Meuly, W.C. 1942. "Process of making pure soaps". U.S. pp 271-619

CALENTAMIENTO GLOBAL. http://es.wikipedia.org/wiki/calentamiento_global.

CEPAL.<http://www.cepal.org/cgin/getProd.asp?xml=/publicaciones/xml/3/29423/P29423.xml&xsl=/mexico/tpl/p9f.xsl&base=/mexico/tpl/top-bottom.xsl>

CNE, Comisión Nacional de Energía 2008.
<http://www.cne.cl/normativas/energias/biocombustibles>

EFECTOS POTENCIALES,
http://es.wikipedia.org/wiki/Efectos_potenciales_del_calentamiento_global.

EGR V.P. ZAKAZNOVA-HERZOG, W.J. Malfait, F. Herzog, W.E. Halter, J. Non."Cristalline Solids". 2007 pp 4015-4028.

ENERGÍADIARIO. <http://www.energiadiario.com/publicacion/spip.php?article700414>
feb 00:57.

FREEDMAN, B.; Pryde E. H.; Mounts, T.L. 1984. "Variables Affecting the Yields of Fatty Esters from Transesterified Vegetable Oils".J. Am. Oil Chem. pp 1638-1643.

FREEDMAN, B.; Butterfield, R. O.; Pryde E.H. 1986. "Trasesterification kinetics of soybean oil".-J. Am. Oil Chem. pp 1375-1380.

GOMEZ HERRERA, C. 1995. "Ésteres metílicos de ácidos grasos como carburantes. Implicaciones económicas, ecológicas y energéticas"; pp 121-129.

HASS, M.J. 2002. "Process for the production of fatty acid alkyl esters". pp 399,800.

H.J.KIM, B.S.Kang, M.J.Kim, Y.M.Park, D.K.Kim, J.S.Lee, K.Y.Lee, 2004 "Catalysis Today" pp 93-95 , pp 315-320.

IDAE. Instituto para la diversificación y Ahorro de la energía.
<http://www.idae.es/index.php/idpag.17/re/menu.329/mod.pags/mem.detalle>

INFINITA RENOVBABLE. Informe sectorial 2012. <http://www.infinita.eu>

LEE, KT, FOGLIA, T.A., CHANG, K-S.2002. "Production of Alkyl Ester as Biodiesel from Fractionated Lard and Restaurant Grease". - J. Am. Oil Chem. Soc. 79, pp 191-195.

MITTELBACK, M.1998. "Method for the preparation of fatty acid alkyl esters". pp 849-939.)

MURUYAMA, T. 1994. "Evaluating vegetable oils as a diesel fuel". - Inform 5; pp 1138-1145.

NIMCEVIC, D. Puntigam, R.; Wörgetter, M.; Gapes, J.R. 2000. "Preparation of Rapessed Oil Esters of Lower Aliphatic Alcohols". J. Am Oil Chem. Soc. 77, pp 275-280.

RIPPIN D.W.T1983. "Simulation of Single- and Multiproduct Batch Chemical Plants for Optimal Design and Operation", Comput. Chem. Engng., Vol 7, No. 3, pp 137-156

ROBERTSON, E.E. "Biocombustibles: Biosphere, biomasse, bioconversion, Biocombustibles", editions SCM, 1979.

T. KASUGA, M. Hirimatsu, A. Hoson, T. Sekino, K. Niihara, Langmuir, 1998. "Biodiesel fuel production by transesterification of oils" pp 3160-3163.

WIMMER, T. 1995. "Process for preparing fatty acid esters of short-chain monohydric alcohols", U.S. pp 279,434).

WIMMER, T.2005. "Process for the production of fatty acid esters of lower alcohols". pp 399-731

VI. ANEXOS

ANEXO A.

A. Rendimiento obtenidos para cada una de las muestras, aceite refinado, aceite usado 1 y aceite usado 2.

A.1 Aceite Vegetal Refinado

Tabla 10: Aceite refinado, variables 20°C, 45 minutos, KOH

Masa aceite (g)	Masa ester metílico (g)	% en masa	% en moles
100,4	85,44	85,1	84,70
104,8	87,30	83,3	82,91
103,5	87,46	84,5	84,10
103,4	86,65	83,8	83,41
102,4	88,78	86,7	86,30
100,7	83,78	83,2	82,80
100,3	86,05	85,8	85,39
104,1	88,79	85,3	84,89
100,0	84,80	84,8	84,40
101,7	83,49	82,1	81,71

Promedio % rendimiento en masa = 84,46

Promedio % rendimiento en moles de estearato de metilo = 84,06

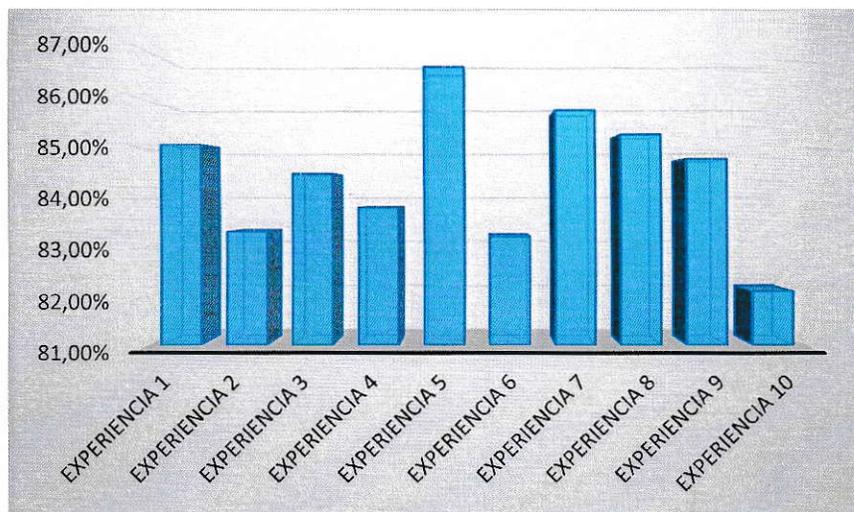


Figura 20: Rendimientos aceites refinados con variables Temperatura 20°C, tiempo de reacción 45 minutos, catalizador KOH.

Tabla 11: Aceite refinado, variables 55°C, 45 minutos, KOH

Masa aceite (g)	Masa ester metílico (g)	% en masa	% en moles
101,2	91,59	90,5	90,07
100,5	91,95	91,5	91,07
100,5	91,05	90,6	90,17
100,8	92,64	91,9	91,47
100,5	92,86	92,4	92,00
103,4	93,26	90,2	89,77
102,2	91,77	89,8	89,37
100,5	90,25	89,8	89,38
101,4	91,26	90,0	89,57
100,6	90,74	90,2	89,77

Promedio % rendimiento en masa = 90.69

Promedio % rendimiento en moles de estearato de metilo = 90.26

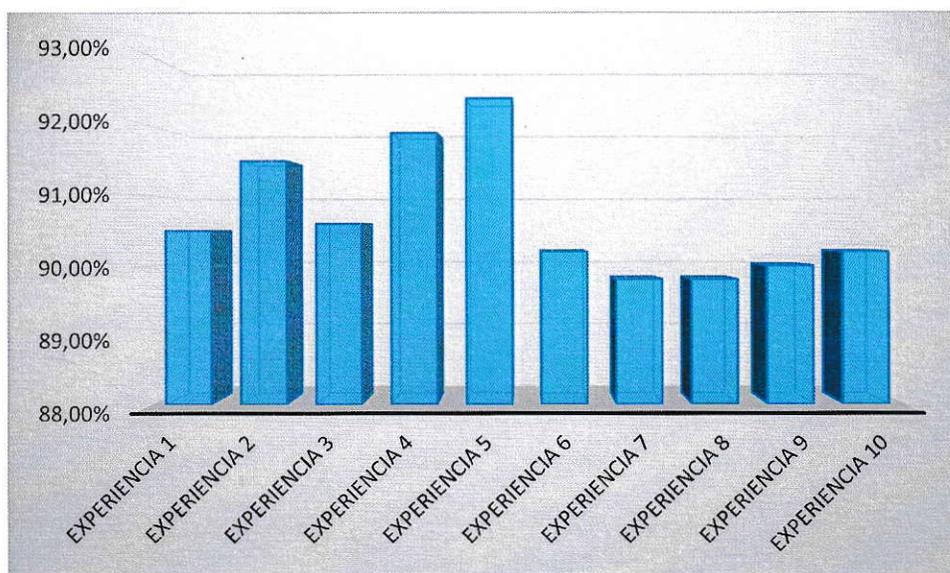


Figura 21: Rendimiento aceites refinados, variables Temperatura 55°C, tiempo de reacción 45 minutos, catalizador KOH.

Tabla 12: Aceite refinado, variables 20°C, 60 minutos, KOH

Masa aceite (g)	Masa ester metílico (g)	% en masa	% en moles
101,3	89,85	88,7	88,28
100,8	87,59	86,9	86,49
100,4	88,15	87,8	87,38
103,2	91,64	88,8	88,38
100,2	88,48	88,3	87,88
100,7	87,51	86,9	86,49
100,5	85,93	85,5	85,09
101,6	89,10	87,7	87,28
100,1	86,98	86,9	86,49
101,3	89,85	88,7	88,28

Promedio % rendimiento en masa = 87,62

Promedio % rendimiento en moles de estearato de metilo = 87,20

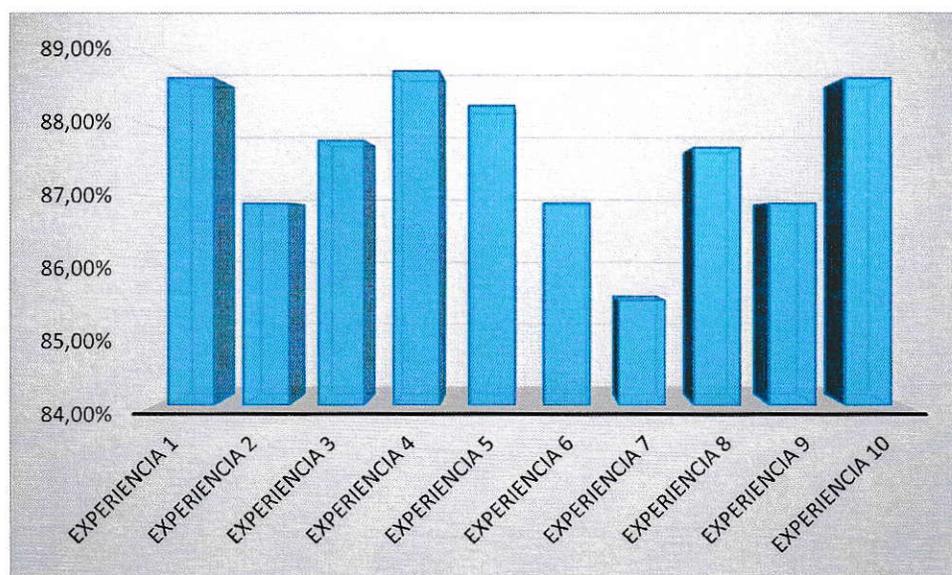


Figura 22: Rendimientos aceites refinados, variables Temperatura 20°C, tiempo de reacción 60 minutos, catalizador KOH.

Tabla 13: Aceite refinado, variables 20°C, 90 minutos, KOH

Masa aceite (g)	Masa ester metílico (g)	% en masa	% en moles
100,9	88,18	87,4	86,99
102,7	86,78	84,5	84,10
101,3	88,03	86,9	86,49
102,1	87,19	85,4	84,99
100,9	83,94	83,2	82,80
101,3	86,51	85,4	84,99
104,2	85,86	82,4	82,01
100,5	84,82	84,4	84,00
100,7	85,79	85,2	84,79
101,6	85,44	84,1	83,70

Promedio % rendimiento en masa = 84,89

Promedio % rendimiento en moles de estearato de metilo = 84,48

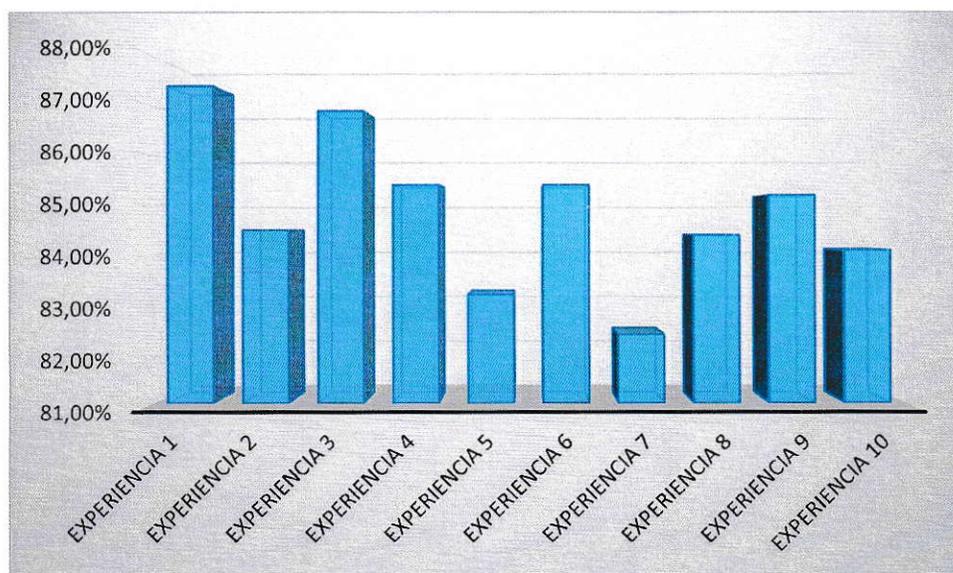


Figura 23: Rendimiento aceite refinado, variables temperatura 20°C, tiempo de reacción 90 minutos, catalizador KOH.

Tabla 14: Aceite refinado, variables 55°C, 60 minutos, KOH

Masa aceite (g)	Masa ester metílico (g)	% en masa	% en moles
101,6	94,89	93,4	92,96
100,6	94,36	93,8	93,36
100,1	92,89	92,8	92,36
101,5	91,86	90,5	90,07
100,7	94,65	94,0	93,55
101,8	94,57	92,9	92,46
100,5	93,16	92,7	92,26
103,7	97,27	93,8	93,36
103,9	96,52	92,9	92,46
100,7	93,85	93,2	92,76

Promedio % rendimiento en masa = 93,00

Promedio % rendimiento en moles de estearato de metilo = 92,56

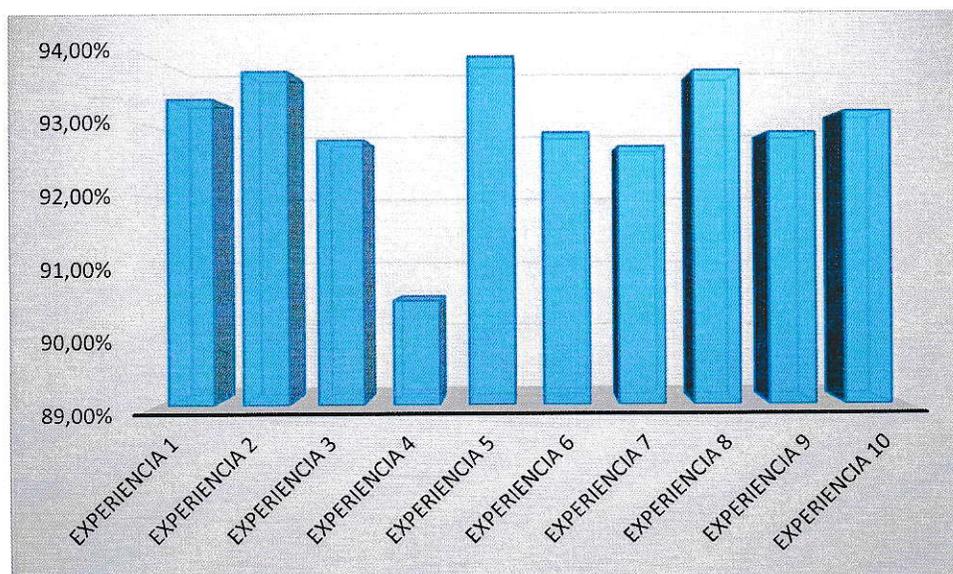


Figura 24: Aceites refinados, variables Temperatura 55°C, tiempo de reacción 60 minutos, catalizador KOH.

Tabla 15: Variables Aceite refinado 55°C, 90 minutos, KOH

Masa aceite (g)	Masa ester metílico (g)	% en masa	% en moles
102,8	96,53	93,9	93,46
100,3	92,67	92,4	91,96
101,1	91,19	90,2	89,77
101,8	92,02	90,4	89,97
100,4	92,06	91,7	91,26
101,2	91,89	90,8	90,37
100,7	89,52	88,9	88,48
100,6	90,14	89,6	89,18
100,3	90,17	89,9	89,47
104,2	95,44	91,6	91,17

Promedio % rendimiento en masa = 90,94

Promedio % rendimiento en moles de estearato de metilo = 90,51

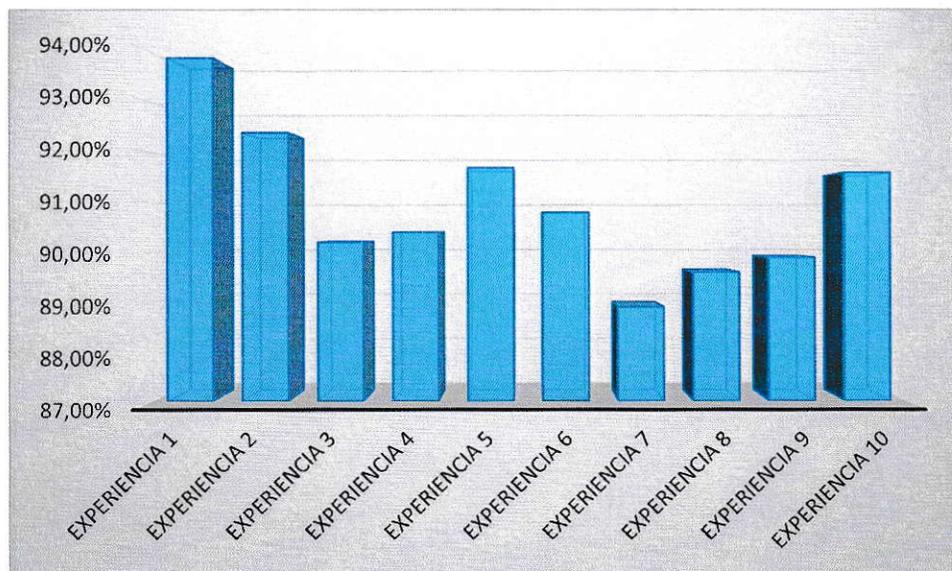


Figura 25: Rendimientos aceites refinados, variables Temperatura 55°C, tiempo de reacción 90 minutos, catalizador KOH.

Tabla 16: Aceite refinado, variables 55°C, 45 minutos, NaOH.

Masa aceite (g)	Masa ester metílico (g)	% en masa	% en moles
100,6	72,63	72,2	71,86
101,1	75,52	74,7	74,34
100,3	74,72	74,5	74,15
100,3	75,32	75,1	74,74
100,5	74,27	73,9	73,55
101,6	72,54	71,4	71,06
103,8	76,60	73,8	73,45
102,3	74,07	72,4	72,06
100,4	72,48	72,2	71,86
100,6	73,74	73,3	72,96

Promedio % rendimiento en masa = 73,35

Promedio % rendimiento en moles de estearato de metilo = 73,00

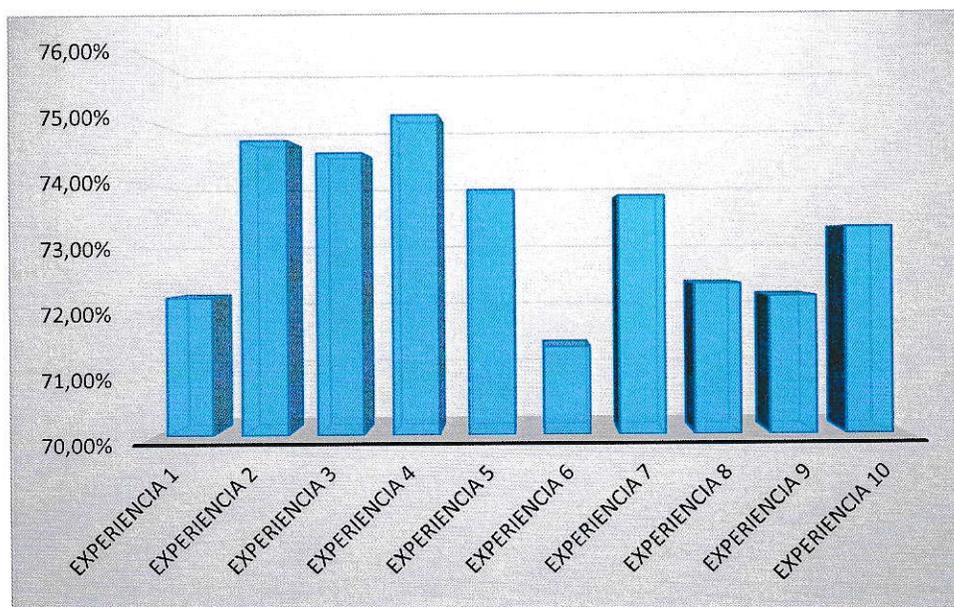


Figura 26: Rendimientos aceites refinados, variables temperatura 55°C, tiempo de reacción 45 minutos, catalizador NaOH

A.2 Aceite reciclado de fritura cocinería (Aceite Usado 1)

Tabla 17: Aceite usado 1, variables 20°C, 45 minutos, KOH.

Masa aceite (g)	Masa ester metílico (g)	% en masa	% en moles
100,9	73,56	72,9	72,56
100,3	74,92	74,7	74,34
100,3	74,12	73,9	73,55
101,4	75,44	74,4	74,05
100,8	73,38	72,8	72,45
104,5	77,22	73,9	73,55
102,2	75,53	73,9	73,55
101,9	74,08	72,7	72,36
100,6	73,54	73,1	72,76
100,4	74,29	74,0	73,65
Promedio % rendimiento en masa			= 73,63
Promedio % rendimiento en moles de estearato de metilo			= 73,28

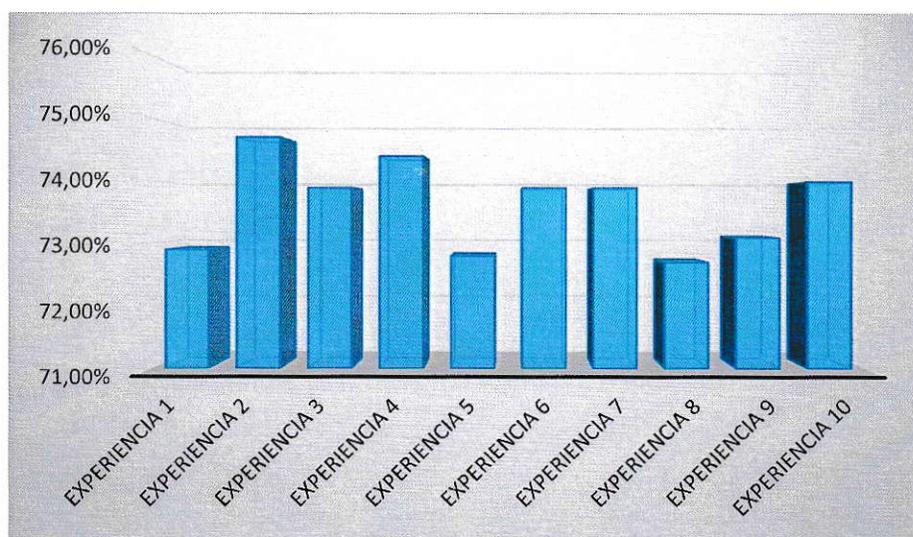


Figura 27: Rendimientos aceite usado 1 Variables Temperatura 20°C, tiempo de reacción 45 minutos, catalizador KOH.

Tabla 18: Aceite usado 1, variables 55°C, 45 minutos, KOH

Masa aceite (g)	Masa ester metílico (g)	% en masa	% en moles
100,4	82,43	82,1	81,71
100,8	84,27	83,6	83,21
100,4	82,42	82,1	81,71
100,4	79,21	78,9	78,53
101,2	84,09	83,1	82,71
100,6	79,57	79,1	78,73
103,2	82,04	79,5	79,12
102,1	81,88	80,2	79,82
101,5	81,91	80,7	80,32
100,9	79,41	78,7	78,33

Promedio % rendimiento en masa = 80,80

Promedio % rendimiento en moles de estearato de metilo = 80,42

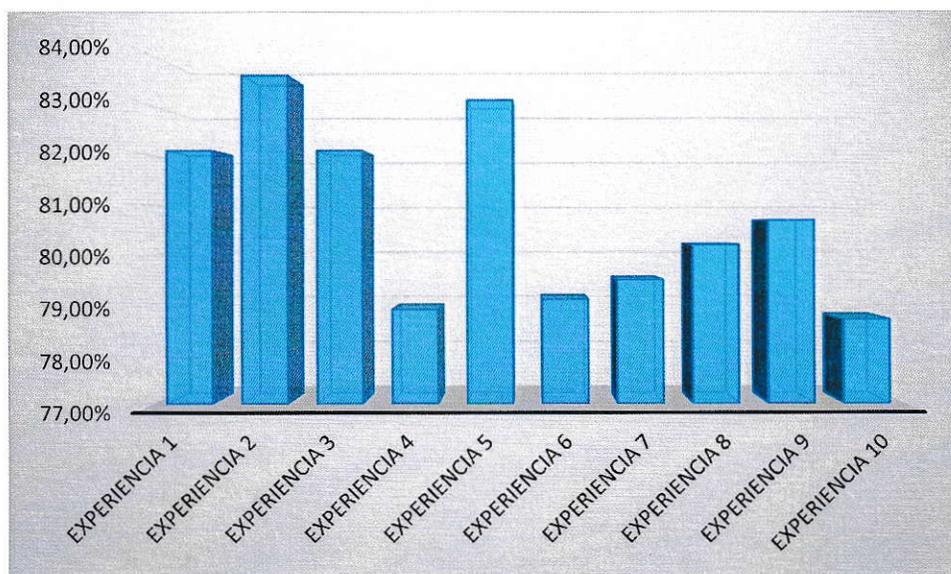


Figura 28: Rendimientos aceite usado 1 variables Temperatura 55°C, tiempo de reacción 45 minutos, catalizador KOH.

Tabla 19: Aceite usado 1, variables 20°C, 60 minutos, KOH

Masa aceite (g)	Masa éster metílico (g)	% en masa	% en moles
101,3	77,29	76,3	75,94
100,4	77,41	77,1	76,74
100,8	77,72	77,1	76,73
101,1	77,34	76,5	76,14
100,5	75,27	74,9	74,55
100,9	74,57	73,9	73,55
101,5	76,84	75,7	75,34
102,9	79,03	76,8	76,44
101,8	78,49	77,1	76,74
100,2	76,85	76,7	76,34

Promedio % rendimiento en masa = 76,21

Promedio % rendimiento en moles de estearato de metilo = 75,85

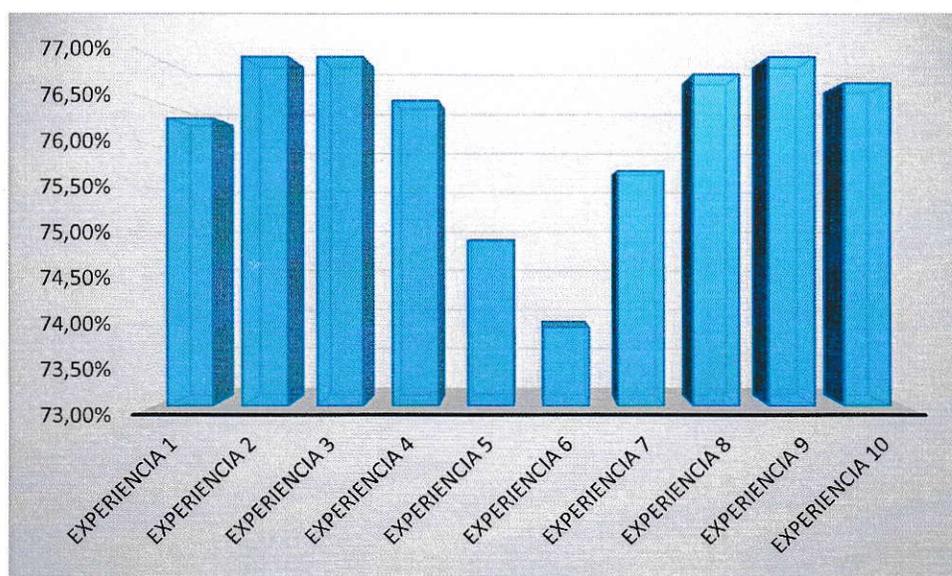


Figura 29: Rendimiento aceites usado 1, variables temperatura 20°C, tiempo de reacción 60 minutos, catalizador KOH.

Tabla 20: Aceite usado 1, variables 20°C, 90 minutos, KOH.

Masa aceite (g)	Masa ester metílico (g)	% en masa	% en moles
100,5	73,46	73,1	72,76
101,6	74,07	72,9	72,56
103,2	76,16	73,8	73,45
100,9	76,58	75,9	75,54
102,3	77,85	76,1	75,74
101,2	77,21	76,3	75,94
101,5	75,72	74,6	74,25
100,9	74,87	74,2	73,85
100,7	76,43	75,9	75,54
101,4	77,16	76,1	75,74

Promedio % rendimiento en masa = 74,89

Promedio % rendimiento en moles de estearato de metilo = 74,54

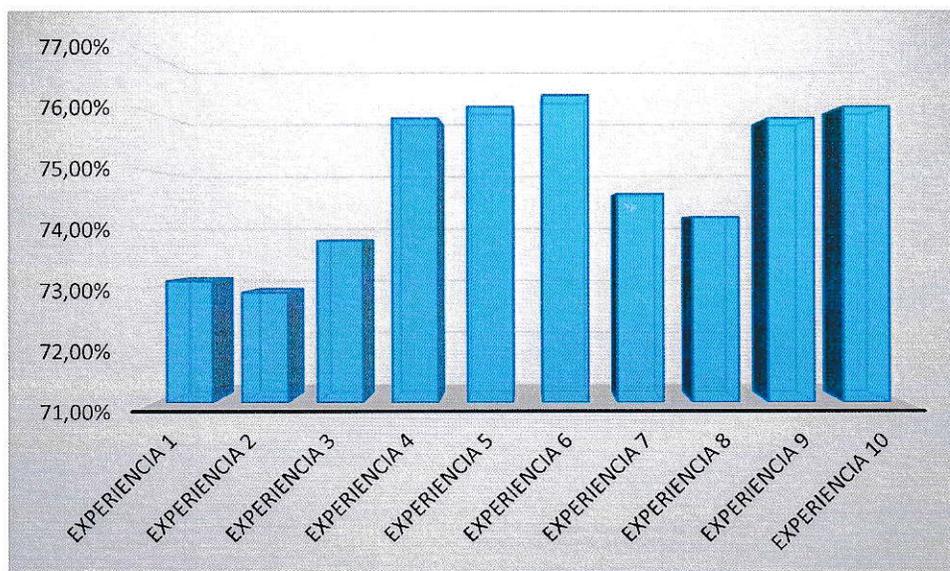


Figura 30: Rendimientos aceites usados 1, variables temperatura 20°C, tiempo de reacción 90 minutos, catalizador KOH.

Tabla 21: Aceite usado 1, variables 55°C, 60 minutos, KOH

Masa aceite (g)	Masa ester metílico (g)	% en masa	% en moles
101,5	84,24	83,0	82,61
101,3	85,50	84,4	84,00
100,8	83,87	83,2	82,81
102,4	83,87	81,9	81,52
101,1	83,61	82,7	82,31
101,6	84,23	82,9	82,51
100,9	84,05	83,3	82,91
100,5	84,52	84,1	83,70
100,6	83,90	83,4	83,01
100,2	83,87	83,7	83,31

Promedio % rendimiento en masa = 83,26

Promedio % rendimiento en moles de estearato de metilo = 82,87

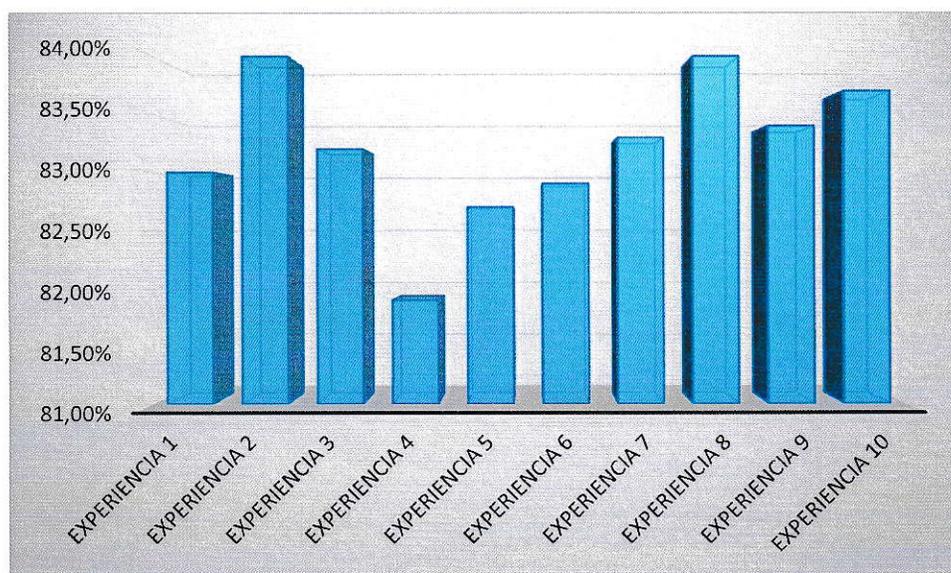


Figura 31: Rendimientos aceites usados 1, variables temperatura 55°C, tiempo de reacción 60 minutos, catalizador KOH.

Tabla 22: Aceite usado 1, variables 55°C, 90 minutos, KOH

Masa aceite (g)	Masa ester metílico (g)	% en masa	% en moles
100,4	82,43	82,1	81,71
100,1	80,98	80,9	80,52
100,5	79,09	78,7	78,33
101,9	79,07	77,6	77,23
102,7	84,01	81,8	81,42
101,6	83,51	82,2	81,81
103,4	83,03	80,3	79,92
102,6	83,21	81,1	80,72
100,2	80,56	80,4	80,02
100,1	79,48	79,4	79,03

Promedio % rendimiento en masa = 80,45

Promedio % rendimiento en moles de estearato de metilo = 80,07

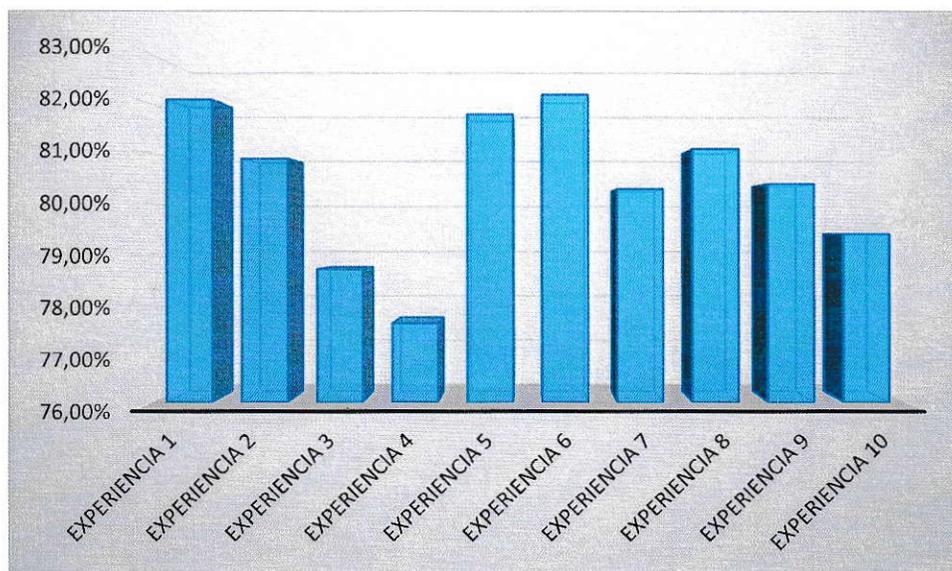


Figura 32: Rendimientos aceites usados 1, variables temperatura 55°C, tiempo de reacción 90 minutos, catalizador KOH.

Tabla 23: Aceite usado 1, variables 55°C, 45 minutos, NaOH

Masa aceite (g)	Masa ester metílico (g)	% en masa	% en moles
100,5	58,29	58,0	57,72
101,4	57,69	56,9	56,63
101,8	58,33	57,3	57,03
100,2	60,22	60,1	59,81
101,6	60,76	59,8	59,52
101,1	58,23	57,6	57,33
100,9	59,83	59,3	59,02
104,9	63,15	60,2	59,92
103,6	59,36	57,3	57,03
100,5	55,68	55,4	55,14

Promedio % rendimiento en masa = 58,19

Promedio % rendimiento en moles de estearato de metilo = 57,91

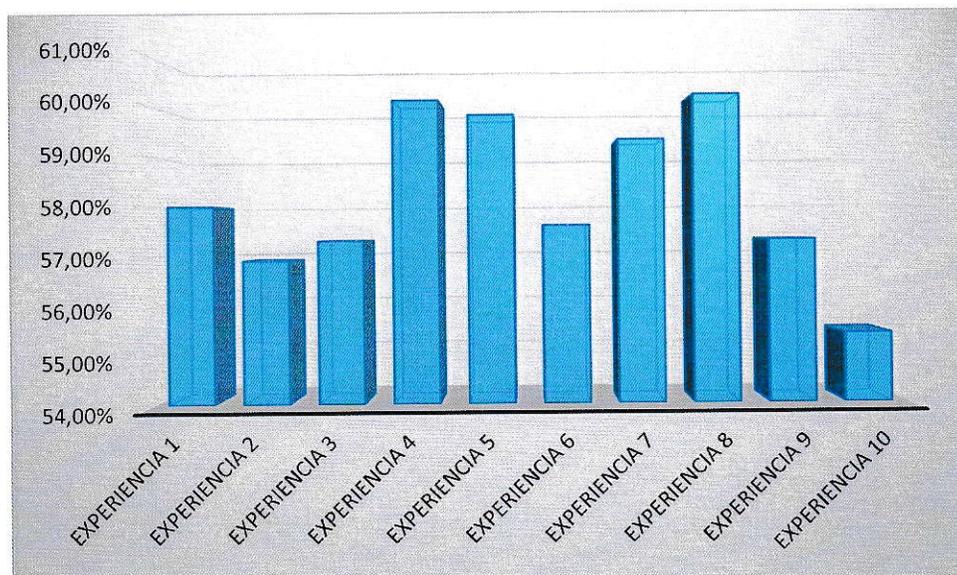


Figura 33: Rendimientos aceites usados 1, variables temperatura 55°C, tiempo de reacción 45 minutos, catalizador NaOH.

A.3 Aceite reciclado de fritura comida rápida (Aceite usado 2)

Tabla 24: Aceite usado 2, variables 20°C, 45 minutos, KOH

Masa aceite (g)	Masa ester metílico (g)	% en masa	% en moles
100,2	71,34	71,2	70,86
101,6	72,74	71,6	71,26
104,6	73,32	70,1	69,77
100,1	70,57	70,5	70,17
103,4	73,31	70,9	70,56
100,8	72,07	71,5	71,16
100,6	70,22	69,8	69,47
102,6	73,97	72,1	71,76
101,3	69,69	68,8	68,47
100,5	70,55	70,2	69,87

Promedio % rendimiento en masa = 70,67

Promedio % rendimiento en moles de estearato de metilo = 70,33

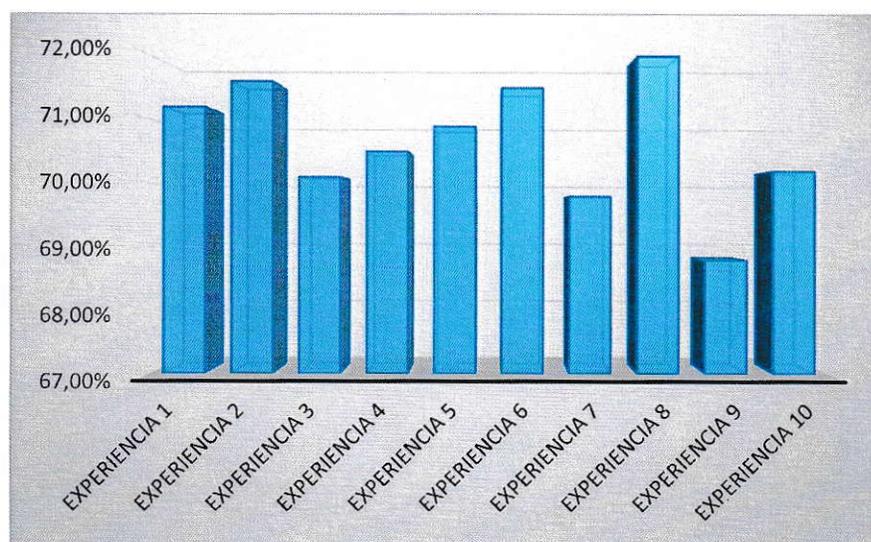


Figura 34: Rendimientos aceites usados 2, variables temperatura 20°C, tiempo de reacción 45 minutos, catalizador KOH.

Tabla 25: Aceite usado 2, variables 55°C, 45 minutos, KOH

Masa aceite (g)	Masa ester metílico (g)	% en masa	% en moles
100,3	78,03	77,8	77,43
101,6	79,96	78,7	78,33
104,8	81,64	77,9	77,53
100,5	80,80	80,4	80,02
100,4	80,02	79,7	79,32
100,5	80,40	80,0	79,62
100,6	78,87	78,4	78,03
102,5	81,08	79,1	78,73
103,4	80,86	78,2	77,83
100,1	79,18	79,1	78,73

Promedio % rendimiento en masa = 78,93

Promedio % rendimiento en moles de estearato de metilo = 78,56

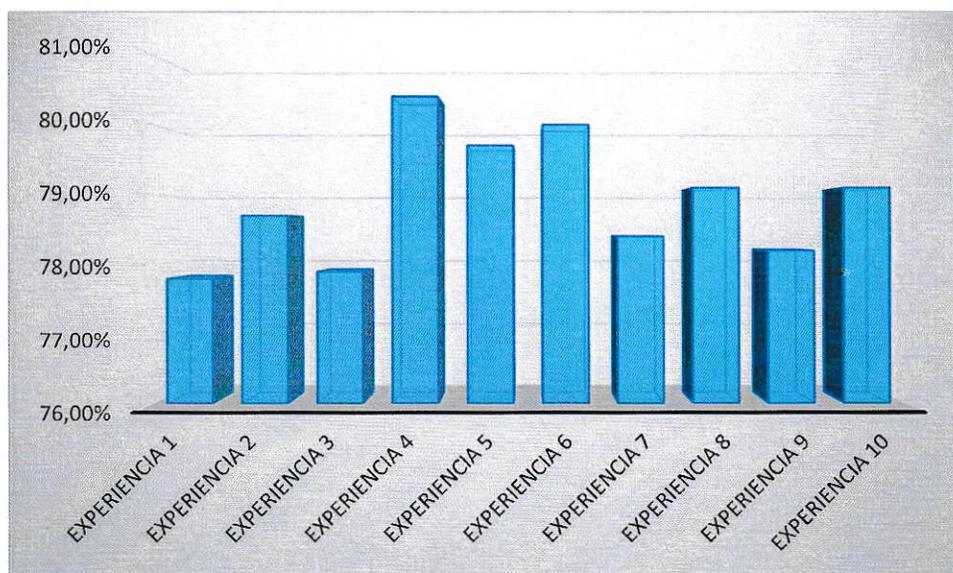


Figura 35: Rendimientos aceites usados 2, variables temperatura 55°C, tiempo de reacción 45 minutos, catalizador KOH.

Tabla 26: Aceite usado 2, variables 20°C, 60 minutos KOH.

Masa aceite (g)	Masa ester metílico (g)	% en masa	% en moles
101,3	76,07	75,1	74,74
100,9	74,46	73,8	73,45
100,4	73,99	73,7	73,35
100,7	75,12	74,6	74,24
100,2	72,75	72,6	72,26
100,9	74,16	73,5	73,15
101,6	75,29	74,1	73,75
104,6	78,35	74,9	74,55
101,3	72,23	71,3	70,96
102,5	74,52	72,7	72,36

Promedio % rendimiento en masa = 73,63

Promedio % rendimiento en moles de estearato de metilo = 73,28

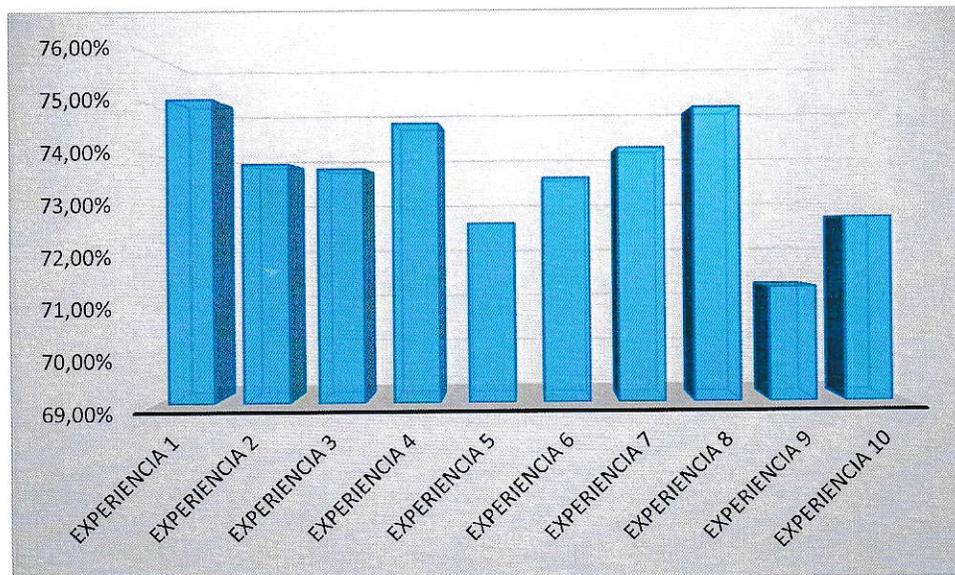


Figura 36: Rendimientos aceites usados 2, variables temperatura 20°C, tiempo de reacción 60 minutos, catalizador KOH.

Tabla 27: Aceite usado 2, variables 20°C, 90 minutos, KOH

Masa aceite (g)	Masa ester metílico (g)	% en masa	% en moles
102,1	74,94	73,4	73,06
100,6	72,33	71,9	71,56
101,6	73,86	72,7	72,36
100,9	74,56	73,9	73,55
100,1	74,07	74,0	73,65
104,9	75,84	72,3	71,96
101,4	71,08	70,1	69,77
100,4	73,89	73,6	73,25
100,4	73,79	73,5	73,15
100,6	74,34	73,9	73,55

Promedio % rendimiento en masa = 72,93

Promedio % rendimiento en moles de estearato de metilo = 72,58

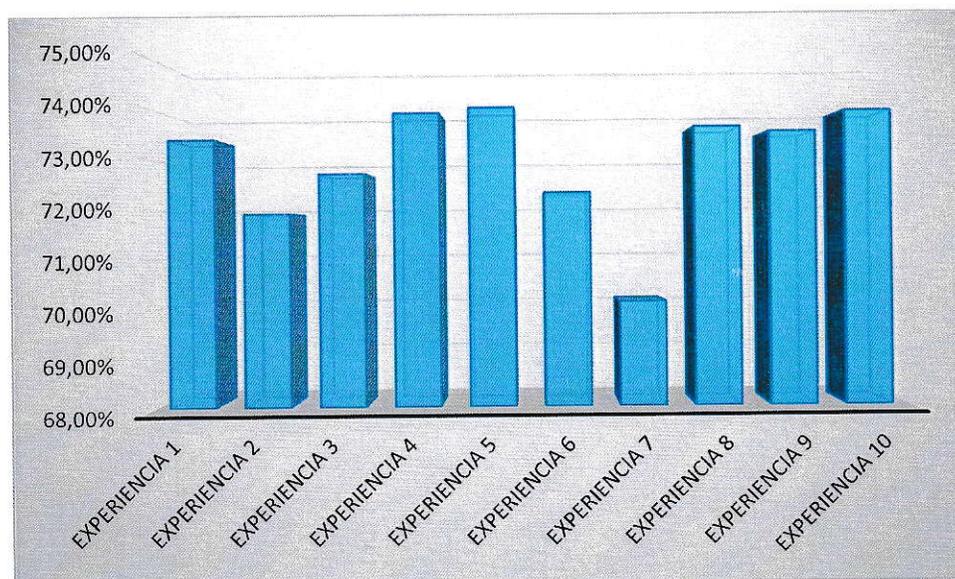


Figura 37: Rendimientos aceites usados 2, variables temperatura 20°C, tiempo de reacción 90 minutos, catalizador KOH.

Tabla 28: Aceite usado 2, variables 55°C, 90 minutos, KOH

Masa aceite (g)	Masa ester metílico g	% en masa	% en moles
100,4	80,32	80,0	79,62
100,7	81,47	80,9	80,52
102,6	83,21	81,1	80,72
101,4	81,83	80,7	80,32
100,6	79,77	79,3	78,93
101,9	80,40	78,9	78,53
104,1	83,73	80,2	79,82
103,6	83,92	81,0	80,62
100,3	79,54	79,3	78,93
101,1	81,49	80,6	80,22

Promedio % rendimiento en masa = 80,20

Promedio % rendimiento en moles de estearato de metilo = 79,82

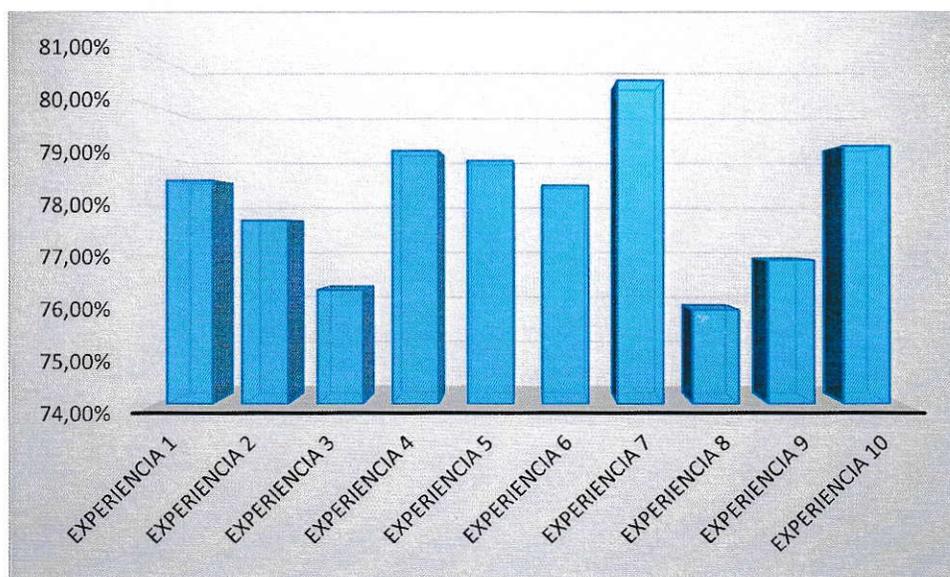


Figura 38: Rendimientos aceites usados 2, variables temperatura 55°C, tiempo de reacción 90 minutos, catalizador KOH.

Tabla 29: Aceite usado 2, variables 55°C, 45 minutos, NaOH

Masa aceite (g)	Masa ester metílico (g)	% en masa	% en moles
103,3	54,64	52,9	52,65
102,4	55,91	54,6	54,34
102,8	55,30	53,8	53,55
103,2	51,39	49,8	49,56
100,6	51,51	51,2	50,96
100,8	53,52	53,1	52,85
100,9	54,18	53,7	53,45
100,1	51,15	51,1	50,86
102,8	52,12	50,7	50,46
101,5	53,69	52,9	52,65

Promedio % rendimiento en masa = 52,38

Promedio % rendimiento en moles de estearato de metilo = 52,13

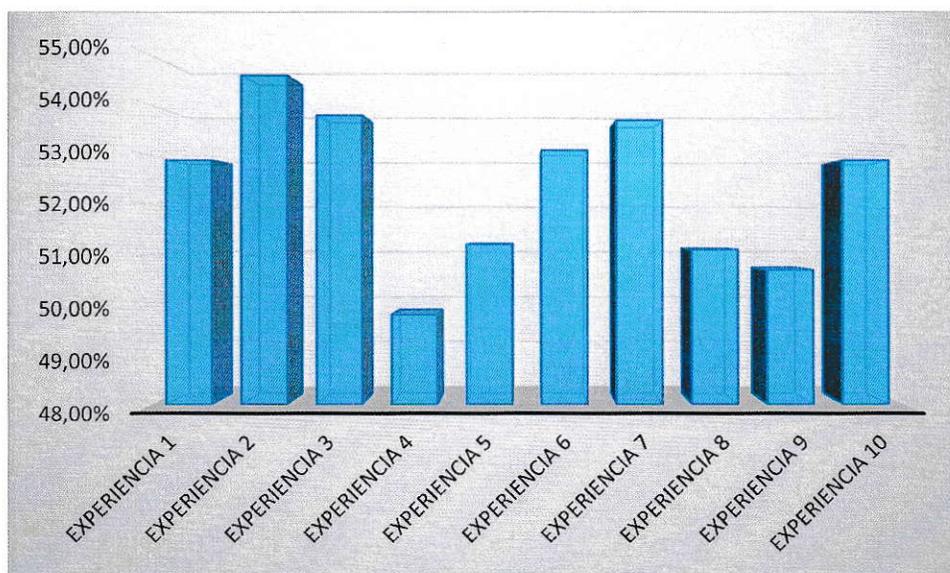


Figura 39: Rendimientos aceites usados 2, variables temperatura 55°C, tiempo de reacción 45 minutos, catalizador NaOH.

ANEXO B.

B. Comparación de rendimientos obtenidos, modificando las variables de tiempo, temperatura, catalizador y tiempo de reacción.

B.1 Aceite refinado

Tabla 30: Comparación del rendimiento, considerando tiempo y temperatura de la transesterificación del Aceite refinado usando KOH como catalizador

	45 minutos	60 minutos	90 minutos
20°C	84,46 %	87,62%	84,89%
55°C	90,69%	93,00%	90,94%

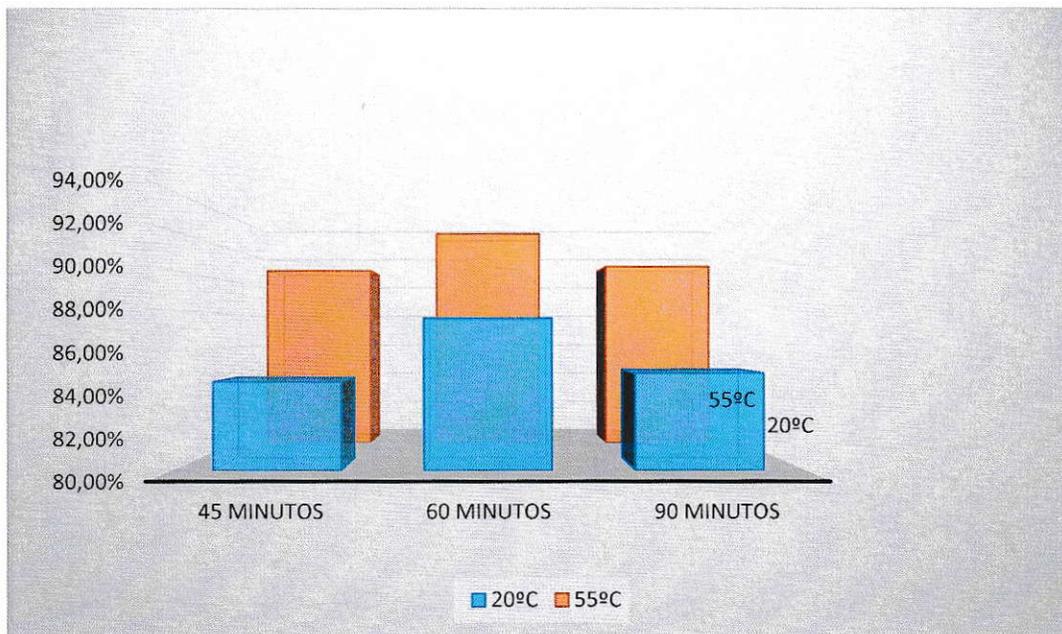


Figura 40: Diferencia porcentual del rendimiento en base a la masa de biodiesel. Considerando las variables de tiempo y temperatura.

B.2 Aceite usado 1

Tabla 31: Comparación del rendimiento respecto a las variables tiempo y temperatura de la transesterificación del Aceite usado 1 usando KOH como catalizador

	45 minutos	60 minutos	90 minutos
20°C	73,63%	76,21%	74,89%
55°C	80,80%	83,26%	80,45%

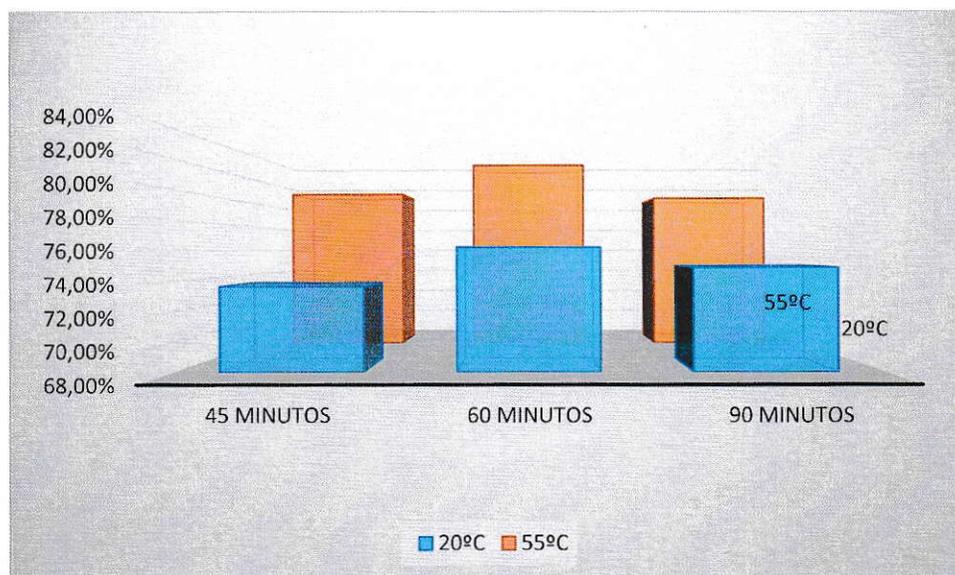


Figura 41: Diferencia porcentual del rendimiento en base a la masa de biodiésel. Considerando las variables de tiempo y temperatura.

B.3. Aceite usado 2

Tabla 32: Comparación del rendimiento considerando las variables tiempo y temperatura de la transesterificación del Aceite usado 2 usando KOH como catalizador

	45 minutos	60 minutos	90 minutos
20°C	70,67%	73,63%	72,93%
55°C	78,93%	80,20%	78,14%

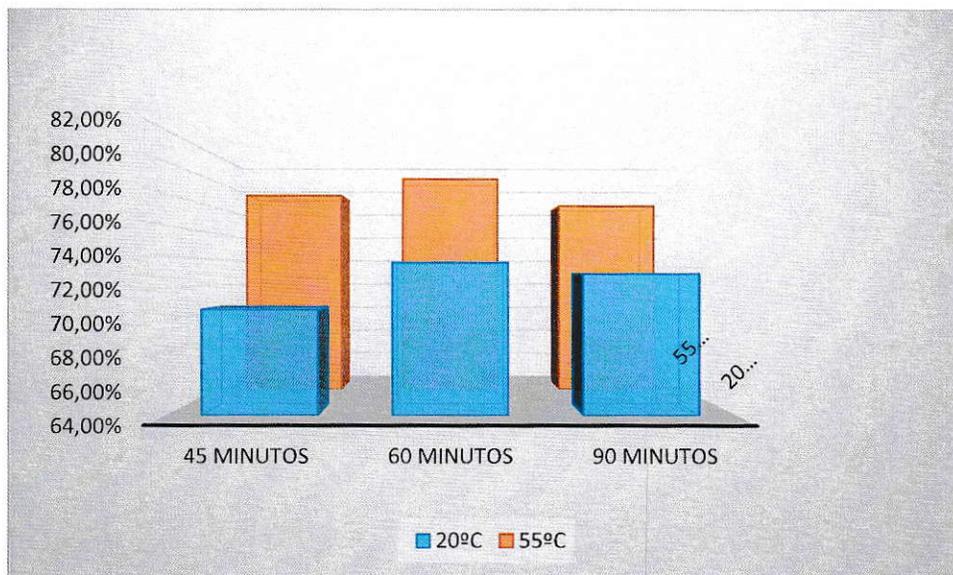


Figura 42: Diferencia porcentual del rendimiento en base a la masa de biodiesel. Considerando las variables de tiempo y temperatura.

B.4 Catalizador

Tabla 33: Comparación del rendimiento según el tipo de catalizador a partir de las variables 55°C y tiempo de reacción de 45 minutos.

	KOH	NaOH
Aceite refinado	90,69%	73,35%
Aceite usado 1	80,80%	58,19%
Aceite usado 2	78,93%	52,38%

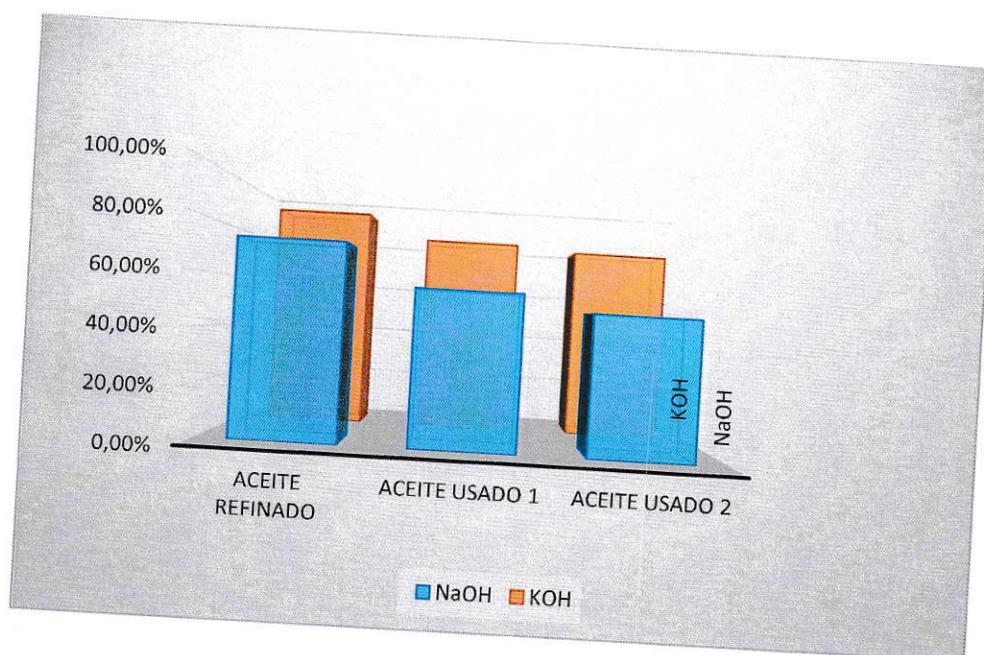


Figura 43: Rendimiento según el tipo de catalizador a una temperatura de 55°C y un tiempo de reacción de 45 minutos