

**UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN**  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental



*Una Institución Adventista*

**Evaluación del rendimiento de obtención de biodiesel mediante el  
proceso de transesterificación de aceite de soja usado por el  
método de Superficie de Respuesta**

Por:

Josué Ivan Rodríguez Bustamante

Asesor:

Mg. Iliana Del Carmen Gutiérrez Rodríguez

**Lima, Setiembre de 2018**

**Área temática:** Ingeniería y Tecnología

**Línea de Investigación – UPeU:** Biodiversidad y Calidad Ambiental

**Ficha Catalográfica:**

Rodríguez Bustamante, Josué Ivan  
Evaluación del rendimiento de obtención de biodiesel mediante el proceso de transesterificación de aceite de soja usado por el método de Superficie de Respuesta /  
Autor: Josué Ivan Rodríguez Bustamante; Asesor: Mg. Iliana Del Carmen Gutiérrez Rodríguez. -- Lima, 2018. 95 páginas: gráficos, tablas

Tesis (Licenciatura), Universidad Peruana Unión. Facultad Ingeniería y Arquitectura. Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, 2018.

Incluye: referencias, resumen y anexos

Campo de Conocimiento: Ingeniería Ambiental

1. Biodiesel 2. Transesterificación 3. Relación Molar 4. Concentración del catalizador 5. Aceite Usado de Soja

## DECLARACIÓN JURADA DE AUTORIA DEL INFORME DE TESIS

Yo Mg. Iliana Del Carmen Gutiérrez Rodríguez, de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, de la Universidad Peruana Unión.

### DECLARO:

Que el presente informe de investigación titulado: "EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DE OBTENCIÓN DE BIODIESEL MEDIANTE EL PROCESO DE TRANSESTERIFICACIÓN DE ACEITE DE SOJA USADO POR EL MÉTODO DE SUPERFICIE DE RESPUESTA" constituye la memoria que presenta el **Bachiller Josué Ivan Rodríguez Bustamante** para aspirar al título de Profesional de Ingeniero Ambiental ha sido realizada en la Universidad Peruana Unión bajo mi dirección.

Las opiniones y declaraciones en este informe son de entera responsabilidad del autor, sin comprometer a la institución.

Y estando de acuerdo, firmo la presente constancia en Lima, a los 24 de setiembre del año 2018

  
Mg. Iliana Del Carmen Gutiérrez Rodríguez

Evaluación del rendimiento de obtención de biodiesel mediante el proceso de transesterificación de aceite de soja usado por el método de Superficie de Respuesta

## TESIS

Presentada para optar el Título Profesional de Ingeniero Ambiental


### JURADO CALIFICADOR



Mg. Milda Amparo Cruz Huaranga  
**Presidenta**



Mg. Joel Hugo Fernández Rojas  
**Secretario**



Mg. Jackson Edgardo Pérez Carpio  
**Vocal**



Dr. Noé Benjamín Pampa Quispe  
**Vocal**



Mg. Iliana Del Carmen Gutiérrez Rodríguez  
**Asesora**

Lima, 17 de setiembre de 2018

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo a Dios, quien es la fuente de la sabiduría.

A mis padres quienes me enseñaron a luchar por mis objetivos.

A mis hermanos compañeros de mis logros y ejemplos de persistencia.

A mis amigos, quienes representan mi crecimiento en cada área de mi vida

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco infinitamente a Dios, por ser el motivo de mi existencia y permitirme alcanzar mis sueños. A mis padres por fomentar en mí el crecer en todos los aspectos de la vida y estar presente con sus oraciones constantes. Y también a mis hermanos por compartir sus experiencias y motivarme en a lograr mis objetivos.

A nuestra querida UPeU por incentivar en el crecimiento de conocimientos e incentivo de valores, la cual permite a una persona crecer hacia el éxito.

A la Mg. Iliana Gutiérrez por su orientación brindada durante el desarrollo de la investigación.

Al Ing. Alejandro Saito, a la Ing. Ketty Arellano y a Katherine Gamarra, por apoyarme en el uso de los equipos y laboratorio, para el desarrollo de los ensayos.

A mis amigos que me incentivaron a lograr este reto

## ÍNDICE

|            |   |    |
|------------|---|----|
| CAPÍTULO 1 | Introducción.....                                   | 14 |
| 1.1        | Identificación del Problema.....                    | 14 |
| 1.2        | Objetivos de la Investigación.....                  | 16 |
| 1.2.1      | Objetivo General .....                              | 16 |
| 1.2.2      | Objetivos parciales .....                           | 17 |
| 1.3        | Justificación de la Investigación.....              | 17 |
| CAPÍTULO 2 | Revisión de la Literatura .....                     | 19 |
| 2.1        | Antecedentes de Investigación .....                 | 19 |
| 2.2        | Marco Teórico .....                                 | 22 |
| 2.2.1      | EL Biodiesel y sus Propiedades .....                | 22 |
| 2.2.1.1    | Viscosidad del Biodiesel .....                      | 22 |
| 2.2.1.2    | Ventajas del Biodiesel .....                        | 23 |
| 2.2.1.3    | Desventajas del Biodiesel .....                     | 24 |
| 2.2.2      | Materia Prima para la producción de biodiesel. .... | 25 |
| 2.2.2.1    | Algas. ....   | 25 |
| 2.2.2.2    | Aceites vegetales .....                             | 26 |
| 2.2.2.3    | Aceite vegetal usado.....                           | 27 |
| 2.2.3      | Métodos de Obtención del Biodiesel .....            | 28 |
| 2.2.3.1    | Mezcla  | 28 |
| 2.2.3.2    | Transesterificación.....                            | 29 |
| 2.2.2.3    | Producción de biodiesel por Microemulsión .....     | 39 |
| 2.2.2.4    | Producción de biodiesel por Pirólisis .....         | 40 |
| 2.3.       | Marco Conceptual .....                              | 41 |

|   |    |
|---|----|
| 2.3.1 Biodiesel .....                                 | 41 |
| 2.3.2 Transesterificación .....                       | 42 |
| 2.3.3 Relación Molar.....                             | 42 |
| 2.3.4 Óxido de Calcio (CaO).....                      | 42 |
| 2.3.5 Etanol  | 42 |
| 2.4 Marco Legal.....                                  | 43 |
| CAPÍTULO 3 Materiales y Método.....                   | 46 |
| 3.1 Materiales.....                                   | 46 |
| 3.2 Equipos.....                                      | 46 |
| 3.3 Metodología.....                                  | 47 |
| 3.3.1 Lugar de Ejecución.....                         | 47 |
| 3.3.2. Procedimiento.....                             | 47 |
| 3.3.2.1 Recolección de la Materia Prima .....         | 47 |
| 3.3.2.2 Pretratamiento y Medición de Viscosidad ..... | 48 |
| 3.3.2.3 Preparación del alcóxido.....                 | 49 |
| 3.3.2.4 Transesterificación .....                     | 50 |
| 3.3.2.5 Separación de Fases.....                      | 51 |
| 3.3.2.6. Biodiesel Producto Final.....                | 51 |
| 3.3.2.7 Evaluación del Rendimiento .....              | 52 |
| 3.4 Flujograma de Obtención de Biodiesel.....         | 54 |
| 3.5 Diseño del Experimento.....                       | 55 |
| CAPÍTULO 4 Resultados y Discusiones .....             | 59 |
| 4.1 Viscosidad del Aceite de Soja Usado .....         | 59 |
| 4.2 Datos estadísticos.....                           | 60 |

|   |   |    |
|---|---|----|
| 4.2.1   | Modelo de Primer Orden .....  | 60 |
| 4.2.1.1   | Análisis de Varianza del Rendimiento del Modelo de Primer Orden ..... | 61 |
| 4.2.2   | Modelo de Segundo Orden .....   | 62 |
| 4.2.2.1.  | Análisis de Varianza de Rendimiento del Modelo de Segundo Orden ..... | 63 |
| 4.3   | Medición de Viscosidad del Biodiesel .....                            | 69 |
| CAPÍTULO 5 Conclusiones y recomendaciones ..... |   | 74 |
| 5.1   | Conclusiones.....   | 74 |
| 5.2.  | Recomendaciones .....   | 75 |
| Referencias .....                               |   | 76 |
| Anexos.....                                     |   | 87 |

## Índice de Tablas

|   |    |
|---|----|
| Tabla 1 Progresión de la Viscosidad Geométrica .....  | 48 |
| Tabla 2 Propiedades del Aceite de Soja Usado adoptado de Hamze et al. (2015)...               | 49 |
| Tabla 3 Condiciones de Operaciones empleadas .....  | 50 |
| Tabla 4 Arreglo y diseño factorial.....   | 55 |
| Tabla 5 Diseño Central Compuesto con 5 puntos centrales .....                                 | 58 |
| Tabla 6 Viscosidad Ascendente .....   | 59 |
| Tabla 7 Resultados de Datos experimentales con 5 puntos centrales .....                       | 61 |
| Tabla 8 Análisis de Varianza del Rendimiento.....   | 62 |
| Tabla 9 Resultados de Diseño Central Compuesto con puntos axiales y puntos<br>centrales ..... | 63 |
| Tabla 10 Análisis de Varianza del rendimiento de biodiesel.....                               | 64 |
| Tabla 11 Viscosidad del Biodiesel a 40°C.....   | 70 |

## Índice de Figuras

|  |    |
|--|----|
| Figura 1. Reacción de transesterificación de un triglicérido. ....   | 29 |
| Figura 2. Evolución de la Normativa sobre el Mercado de Biocombustibles. ....                              | 44 |
| Figura 3. Diagrama de las etapas del procedimiento experimental .....                                      | 54 |
| Figura 4. Puntos del diseño para el experimento .....  | 57 |
| Figura 5. Viscosidad del Aceite de Soja Usado.....   | 60 |
| Figura 6. Valores Predichos y Valores Observados para la variable de Rendimiento (%)...                    | 65 |
| Figura 7. Diagrama de contorno de Rendimiento de Biodiesel (%).....  | 66 |
| Figura 8. Diagrama de superficie de respuesta del rendimiento de biodiesel (%) .....                       | 67 |
| Figura 9. Efecto principal de la Relación Molar etanol:aceite en el rendimiento de biodiesel<br>.....      | 68 |
| Figura 10. Efecto principal de la concentración de catalizador (%) en el rendimiento de<br>biodiesel ..... | 69 |
| Figura 11. Viscosidad del biodiesel con mayor rendimiento .....  | 71 |
| Figura 12. Comportamiento de flujo del biodiesel a 19°C y 40°C .....                                       | 71 |

## Resumen

El objetivo de esta investigación es evaluar el rendimiento de obtención de Biodiesel a partir de Aceite de Soja Usado, con el proceso de transesterificación, proveniente del Comedor de la Universidad Peruana Unión, por la Metodología de Superficie de Respuesta. Se planteó un diseño experimental  $2^2$  con cinco puntos centrales para evaluar el efecto de los parámetros relación molar etanol:aceite y el porcentaje de concentración de Óxido de Calcio en el rendimiento de biodiesel, haciendo un ajuste a un modelo de primer orden. A continuación se realizó un Diseño Central Compuesto con cinco puntos centrales, como modelo de segundo orden y se realizó el análisis del método de superficie de respuesta, con el fin de apreciar la posible optimización del rendimiento. La evaluación mostró que el rendimiento mayor fue de 60.9%, del ensayo con relación molar 15:1 etanol:aceite y concentración de óxido de calcio 6%. Finalmente, la viscosidad del biodiesel con mayor rendimiento, cuyo resultado fue de 8,70 cSt, se le comparó con la viscosidad del Diesel B5 S-50 proveniente de la refinería La Pampilla, comprobándose si cumplían con la norma ASTM D6751-09. Sin embargo el biodiesel no cumplía con los estándares de la normativa. En conclusión las variables de control con relaciones molares mayores a 15:1 y concentraciones de catalizador próximas al 6%, son aplicables para optimizar el rendimiento del biodiesel, por consiguiente, se obtendría una menor viscosidad que llegaría a estar dentro de los estándares normados.

**Palabras Clave:** Biodiesel, transesterificación, relación molar, concentración de catalizador, aceite de soja usado.

## Abstract

The objective of this research is to evaluate the yield of obtaining Biodiesel from Used Soybean Oil, with the transesterification process, from the Dining Room of the Universidad Peruana Unión, by Response Surface Methodology. An experimental design  $2^2$  was proposed with five central points to evaluate the effect of the ethanol: oil molar ratio parameters and the percentage of Calcium Oxide concentration in the biodiesel yield, making an adjustment to a first order model. Next, a Composite Central Design was made with five central points, as a second order model and the response surface method analysis was carried out, in order to appreciate the possible optimization of the yield. The evaluation showed that the highest yield was 60.9%, of the test with molar ratio 15: 1 ethanol: oil and concentration of calcium oxide 6%. Finally, the viscosity of biodiesel with higher yield, whose result was 8.70 cSt, was compared with the viscosity of Diesel B5 S-50 from the La Pampilla refinery, checking if they complied with the ASTM D6751-09 standard. However, biodiesel did not meet the standards of the regulations. In conclusion, the control variables with molar ratios greater than 15: 1 and catalyst concentrations close to 6% are applicable to optimize the biodiesel yield, therefore, a lower viscosity would be obtained that would be within normed standards.

**Keywords:** Biodiesel, transesterification, Catalytic Converter Molar relationship, Calcium Oxide, soybean oil used.

# CAPÍTULO 1

## Introducción

### 1.1 Identificación del Problema

El uso excesivo de combustibles a lo largo del tiempo (Cabello, Rincón, y Zepeda, 2016), está llevando al mundo a un estado crítico (Kadapure et al., 2017). Las escasas reservas de petróleo todavía existente en el mundo anuncian un desastre total de energía a corto plazo (Mansir et al., 2018), afectando la economía de muchos países y el equilibrio ambiental causado por el calentamiento global (Latchubugata, Kondapaneni, Patluri, Virendra, y Vedantam, 2018). Los daños medioambientales provocados, son debido a su desmedida utilización (Leonel et al., 2012).

Sin embargo los combustibles obtenidos a partir de combustibles fósiles son una gran fuente energética con alto poder calorífico, además con grandes reservas a nivel mundial lo que convierte a los hidrocarburos y sus derivados en la principal fuente energética (Choi, Choi, Park, Kang, y Lee, 2015).

Actualmente el combustible fósil diésel es muy utilizado por los vehículos comerciales e inherentemente tiende a aumentar los problemas ambientales (Liu, Lin, y Hsu, 2012). Este combustible al ser usado en los motores, produce emisiones que contienen componentes cancerígenos como compuestos carbonílicos (formaldehído), hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), y nitro-HAP (Lu, Cheung, y Huang, 2013; Man, Cheung, y Ning, 2015).

El deterioro del ambiente causado por el aumento de explotación de los recursos de petróleo crudo, está obligando al mundo a buscar recursos renovables y amigables con el

medio ambiente y que se puedan usar directamente siendo la manera más factible de hacer frente a la creciente demanda de las escasas reservas de petróleo (Ho, Wong, y Chang, 2014; Colombo, Ender, y Barros, 2016; Verma, Dwivedi, y Sharma, 2017).

Kapilan y Birdar (2014) mencionan que debido a la grave preocupación del uso de combustible, busca el modo de limitar el aumento de las importaciones de petróleo, promoviendo el uso de los biocombustibles como alternativa fuente de energía renovable.

Según Can (2014) el aumento de los combustibles alternativos dentro de las investigaciones en el campo de mejora de la economía de combustible y las emisiones de gases de escape en los motores de combustión interna sigue siendo un reto, siendo los biocombustibles enfocados en la energía renovable y sostenible, tal es el caso del biodiesel que proviene de aceites vegetales y grasas.

En la actualidad la producción de biodiesel es realizada con la materia prima predominante de aceites vegetales como soja, colza y girasol, siendo estos de costo elevado debido a su uso como alimento, sin embargo el aceite de cocina usado (ACU), puede ser usado como materia prima; además los costos de obtención serán menores (Kadapure et al., 2017).

No obstante, la mayoría del aceite usado de cocina es desechado en el sistema de alcantarillado y ríos (Medina, Ospino y Tejada, 2015). Deshacerse de estos residuos puede resultar en algunos problemas como la formación de obstrucciones, olores desagradables en los drenajes de agua, elevación de costes en tratamiento de agua y problemas ambientales causados por la contaminación de aguas subterráneas (Kataria, Mohapatra y Kundu, 2018).

Un litro de aceite cuando es vertido en un curso de agua, puede contaminar hasta 500 000 litros de agua (Vidal, Quintero, y Herrera, 2017). En España la recolección de

ACU, tanto en hogares, restaurantes y otros, ha sido exitoso. Sin embargo la falta de cultura de reciclaje de ACU, es incipiente en el Perú, además la falta de legislación no ha sido llevada porque estos residuos no son considerados peligrosos para la salud y el ambiente, teniendo las características para considerarlas como tal, de tal manera que para conservar los recursos y mejorar la calidad ambiental, demanda disminuir el consumo y tener un post consumo responsable e inteligente (Vidal, Quintero, y Herrera, 2017).

Cabe destacar que en la obtención de biodiesel, el insumo que mayormente se utiliza es el metanol (J. J. Torres et al., 2017). Este insumo es derivado de combustibles fósiles por lo cual hace que el biodiesel producido no sea denominado totalmente renovable; además de que tenga un impacto contrario a querer obtener un biodiesel rentable (Verma y Sharma, 2016).

Además en las reacciones de transesterificación de aceite usado, se suele llevar a cabo mediante catalizadores homogéneos que facilitan la miscibilidad del alcohol con el aceite en un tiempo relativamente menor; no obstante, el biodiesel producido debe de ser neutralizado después de la reacción, además se producirá muchos jabones, la cual requiere realizar un lavado con abundante agua (Latchubugata, Kondapaneni, Patluri, Virendra, y Vedantam, 2018).

## **1.2 Objetivos de la Investigación**

### **1.2.1 Objetivo General**

- Evaluar el rendimiento de obtención de biodiesel mediante el proceso de transesterificación de aceite de soja usado por el método de Superficie de Respuesta.

### **1.2.2 Objetivos parciales**

- Determinar la relación molar etanol/aceite con mejor rendimiento en el proceso de transesterificación de aceite de soja usado.
- Establecer el porcentaje de concentración de Óxido de Calcio con mejor rendimiento en el proceso de transesterificación de aceite de soja usado.
- Analizar la viscosidad del ensayo con mayor rendimiento de biodiesel obtenido.

### **1.3 Justificación de la Investigación**

En el proceso de obtención de biodiesel se aplica el método de transesterificación. Para esta reacción generalmente se emplea el metanol. La obtención de biodiesel con etanol en reemplazo del metanol, permite la obtención de un biodiesel más renovable debido a que el etanol es producido a partir de materiales agrícolas tales como maíz, caña de azúcar, etc., evitándose así el uso de metanol que proviene de fósiles.

Así mismo los catalizadores que más se usan en la transesterificación, habitualmente son hidróxidos. El uso de Óxido de Calcio como catalizador como sustituto a algún hidróxido, es ambientalmente más amigable, debido a que estos materiales pueden ser producidos de fuentes de piedra caliza, huesos, etc., además implica la eliminación de varios procesos de lavado evitando así eliminar grandes cantidades de residuos. La viabilidad técnica y económica al usar este catalizador es favorable por su capacidad de llevar a cabo la esterificación y transesterificación al mismo tiempo.

El uso del aceite de cocina usado para la elaboración de biodiesel, presenta una serie de ventajas económicas/ambientales, ya que en primer lugar se reduce el costo de las materias primas en gran medida y se evita ser producido de aceites vegetales vírgenes

chocando así con la problemática de la alimentación. Además, el aceite cocina usado, como residuo, llega a ser de fácil recolección y reciclaje para la producción de energía renovable (biodiesel). Siendo una práctica eficaz para la gestión de residuos, así como un mecanismo de mucho beneficio para la obtención de energía de manera sencilla.

De esta forma, en esta investigación se basó en la manera de aprovechar un residuo como el aceite de soja usado proveniente del Comedor Universitario de la Universidad Peruana Unión, para la producción de energía renovable con insumos como etanol y Óxido de Calcio de grado comercial, a través de la elaboración de biodiesel, estudiando principalmente los rendimientos en la obtención del producto, proporcionando de esta manera beneficios ambientales y técnicas viables y económicas de producción de biodiesel.

## CAPÍTULO 2

### Revisión de la Literatura

#### 2.1 Antecedentes de Investigación

La historia del desarrollo del biodiesel se remonta muy atrás, fue en 1883 cuando Rudolf Diesel, ingeniero alemán, pone en marcha el primer motor de combustión impulsado por aceite de cacahuete (maní), donde se ejecutó en su propio poder por primera vez en Augsburgo, Alemania. (Lin, Cunshan, Vittayapadung, Xiangqian, y Mingdong, 2011)

Este motor que lleva su nombre, fue presentado en la exposición mundial de París, en el año 1900, donde su motor estaba en marcha con un 100% de aceite de cacahuete, a raíz de este invento se le atribuye a Diésel un sitio privilegiado dentro de la historia del biodiesel (Sarmiento, 2014). En evocación a este hecho, el 10 de agosto se declaró como el “día internacional del biodiesel” (Susana, 2012).

El uso del aceite vegetal continuó hasta 1920, antes de que el diésel fósil desplazara casi por completo los aceites vegetales en el mercado, debido a menor precio, mayor disponibilidad y los subsidios del gobierno. El diseño del motor original tuvo que ser modificado para que pudiera operar con diésel fósil, debido a su menor viscosidad. (Lin et al., 2011)

Después de muchos años de investigación de los procesos de transformación de los aceites, para uso de combustible; en el año 1937, aparece la propuesta por primera vez, la idea de lo que se conoce como "biodiesel" hoy en día (Knothe, 2001). además en los años 1930 y 1940 los aceites vegetales se convirtieron en combustibles alternativos prominentes

para motivos diésel y se usaban como combustibles diésel generalmente en casos de emergencia (Kataria et al., 2018).

En 1980 se registraron dos patentes, una brasilera y otra alemana. Estas patentes fueron investigadas respecto a la utilidad de los metilésteres procedentes a partir de aceites vegetales, para ser sustitutos del combustible fósil. Austria llegar a ser el país pionero en la producción de biodiesel y en el desarrollo de estándares de calidad. (Sarmiento, 2014)

La creciente aplicación de subsidios en mercado de petróleo ha impedido cualquier otro avance significativo; sin embargo a fines de la década de los 90, la sostenibilidad del cuidado del ambiente iba generando una creciente preocupación y también la reducción de los mecanismos de costo, ha promovido que la producción comercial de biodiesel aumente. (Lin et al., 2011)

En el 2002 se publicó la norma ASTM D6751 con las especificaciones para biodiesel. En 2005, Estados Unidos, dispuso el uso del 2% de biodiesel en todo el diésel comercializado en el estado Minnesota; en ese mismo año. Filipinas estableció una acción similar, al establecer el 1% de biodiesel proveniente de aceite de coco con mezcla de diésel. (Susana, 2012)

En el Perú la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM), en consorcio con Intermediate Technology Development Group (ITDG), se llevó a cabo desde Junio del 2003 hasta Mayo del 2004, las investigaciones para la producción de biodiesel, con uno de los objetivos, la construcción de un modelos tecnológicos apropiadas para la producción de biodiesel en zonas lejanas y con difícil acceso a los combustibles líquidos. (Achi, Castro, y Cortijo, 2008)

El Servicio Agrícola Extranjero (FAS, por sus siglas en inglés) menciona que en el Perú no se produjo biodiesel desde el 2014 al 2016, pero la estimación de producción de biodiesel en el 2017 era de 60 millones de litros y para el 2018 90 millones de litros, esta recuperación era debido a la disminución de importación en el 2017 y aún más en el 2018 (FAS Lima, 2017).

A pesar de contar con la ley de 28054 “Ley de Promoción del Mercado de Biocombustibles”, que prioriza la producción y adquisición de biodiesel nacional, los distribuidores locales seguirán importando biodiesel argentino en indonesio (incluso europeo hasta cierto punto), más asequible (FAS Lima, 2017).

Las materias primas potenciales para la producción de biodiesel de mayor interés en el Perú, son la palma aceitera y la colza conocida como canola en la sierra (M. Trindade, 2018). La semilla de algodón en la costa, el piñón o tempate en zonas diversas, así como algunas fuentes alternativas como los aceites y grasas usadas, el aceite de pescado y el sebo animal, también llegan a ser otras materias primas secundarias. (Castro, Coello, y Castillo, 2007)

Según declaraciones del gerente general de Heaven Petroleum Operators, Sami Abudayeh, el Perú ya usa en la actualidad el 5% de biodiesel acorde a la legislación peruana (Comercio, 2018).

## **2.2 Marco Teórico**

### **2.2.1 EL Biodiesel y sus Propiedades**

#### ***2.2.1.1 Viscosidad del Biodiesel***

La viscosidad es una de las propiedades más importantes del biodiesel, porque afecta al equipo de inyección del combustible, especialmente en climas fríos (Hamze, Akia, y Yazdani, 2015; Vicente, 2012). La viscosidad del biodiesel suele ser más alta que la del diésel y esto da como resultado tiempos de penetración de líquidos más largos y una mal atomización (Kassem y Çamur, 2017).

Cuanto más fuertes son las fuerzas intermoleculares de atracción, mayor es la viscosidad. Cuando un líquido fluye, una parte del líquido se mueve respecto a las regiones vecinas. Las fuerzas de cohesión dentro del líquido crean una fricción interna que reduce la velocidad del flujo (Petucci et al., 2011).

La viscosidad se puede medir utilizando un viscosímetro calibrado a 40 °C, de acuerdo con el método estándar de American Section of the International Standard (ASTM D445, 2013). El Método de Prueba Estándar para la viscosidad, especifica un procedimiento para la determinación de la viscosidad cinemática, de productos derivados del petróleo o biodiesel, así mismo se usa para líquidos transparentes y opacos, se mide el tiempo que tarda en fluir el volumen de un líquido por gravedad a través de un viscosímetro capilar de vidrio calibrado. (ASTM D445, 2013)

Para medir la viscosidad del Biodiesel con el Reómetro Brookfield, la norma ASTM D2196 – Métodos de prueba estándar para propiedades reológicas de materiales no

newtonianos por viscosímetro rotativo (tipo Brookfield)- especifica el método a seguir para obtener la medición de la viscosidad del Biodiesel.

La viscosidad cinemática ha sido incluida en los estándares de biodiesel (1.9-6 mm<sup>2</sup>/s según ASTM D6751 y 3.5-5.0 según norma EN 14214); tanto las viscosidades del aceite como del biodiesel pueden calcularse usando el viscosímetro Brookfield (Refaat, El Sheltawy, y Sadek, 2008).

Según Bilgin, Gülüm, Koyuncuoglu, Nac y Cakmak (2015) al aumentar el rendimiento de la reacción, la viscosidad del biodiesel tiende a disminuir. Debido a la menor cantidad de concentración de catalizador en medio de las reacciones; además que gran parte de los triglicéridos se pueden convertir en ésteres.

#### ***2.2.1.2 Ventajas del Biodiesel***

El Biodiesel es considerado como uno de los mejores combustibles alternativos. El desarrollo de biocombustibles está siendo impulsado por la necesidad de reducir las emisiones de los motores diésel sin necesidad de modificar los motores y para el ahorro de energía (Liu et al., 2012).

La utilización de los biodiesel tiene grandes ventajas, debido en la gran utilidad de reducción de las emisiones de dióxido de carbono en la atmósfera y las dependencias de las importaciones de combustible (Guarieiro, Pinto, De Aguiar, y Ribeiro, 2008; Tan, Gui, Lee, y Mohamed, 2010). Además, es un combustible biodegradable y cuya manipulación es segura (Ueki, Saiki, Hoshina, y Seko, 2017).

Puesto que el biodiesel tiene muchas similitudes con el combustible diésel, se puede utilizar directamente en motores diésel sin modificación alguna (Man et al., 2015). El

Biodiesel puede ser derivado de aceites vegetales o grasas animales; sin embargo la producción de biodiesel a partir de aceite de cocina usado representa un menor costo y mayor ventaja de reducir los residuos en su disposición respecto al petróleo (Knothe y Steidley, 2009).

El biodiesel produce un interés de adopción por sus propiedades biodegradables y no tóxicas, utilizando el biodiesel se puede reducir significativamente las emisiones de partículas y general de todo el ciclo de vida de las emisiones de CO<sub>2</sub> del motor, esto se debe a la gran combustibilidad interna en el motor combustión. (Lu et al., 2013)

En general, el biodiesel conduce a una reducción del ácido Clorhídrico (HC), Óxidos de Carbono (CO) y concentraciones de masa y número de material particulado (Cheung, Man, Fong, y Tsang, 2015).

El biodiesel como combustible alternativo al diésel tiene gran potencial porque es biodegradable, renovable, no es tóxico y reduce las emisiones de óxido de azufre (SO<sub>x</sub>), de esta manera contribuye a la protección del medio ambiente. (Peiter et al., 2018)

### ***2.2.1.3 Desventajas del Biodiesel***

El biodiesel emite más NO (óxido de Nitrógeno), respecto al diésel (Liu et al., 2012). Su densidad es ligeramente más alta que la del combustible diésel. Esta circunstancia, unida a que la viscosidad también es ligeramente superior, plantea problemas de utilización en climas muy fríos (Vicente, 2012).

## **2.2.2 Materia Prima para la producción de biodiesel.**

El biodiesel se puede producir a partir de diversas materias primas como subproductos de la refinación del petróleo, aceite de algas, grasas animales, aceites vegetales y aceite usado de cocina (Haigh, Vladisavljević, Reynolds, Nagy, y Saha, 2014). La selección de la materia prima para la producción de biodiesel, afecta diversos factores como el costo, el rendimiento, la composición, y la pureza del biodiesel producido (Ambat, Srivastava, y Sillanpää, 2018).

Las materias primas se pueden clasificar se pueden clasificar según su disponibilidad y tipo de fuente. El primer tipo se deriva de los cultivos alimentarios, como las semillas, cereales y cultivos de azúcar. El segundo tipo proviene de cultivos no alimentarios o de desecho y el tercer tipo implica el uso de algas. La selección de materias primas también depende de la región. (Ho et al., 2014)

### **2.2.1.1 Algas.**

Las algas son organismos acuáticos muy complejos, que van desde formas unicelulares a multicelulares. Se encuentran en muchos entornos, desde los océanos tropicales hasta los ecosistemas fríos. Estos organismos tienen varios tipos de lípidos en su constitución como fitoesteroles, carotenoides y ácidos grasos (M. Trindade, 2018). Estos factores hace que las algas sean una fuente de producción de biodiesel (Gebremariam y Marchetti, 2018).

Sin embargo a pesar de ser una materia prima prometedora para producir biodiesel, debido a su alto contenido de aceite y fácil cultivo, los conocimientos técnicos de cultivo y extracción de biodiesel son inadecuados (Mansir et al., 2018). Además la síntesis de

biodiesel presenta un costo elevado en comparación con otras fuentes, considerando también que en su síntesis extrae contaminantes como los ácidos grasos, que pueden afectar el rendimiento, pureza y propiedades fisicoquímicas (M. Trindade, 2018).

### ***2.2.1.2 Aceites vegetales***

Según Roy, Chingkheihunba, y Pakshirajam (2016) en la producción de biodiesel con cultivos alimentarios, se evalúa el rendimiento de los aceites vegetales por unidad de superficie cultivada, por ejemplo la palma aceitera produce la mayor cantidad de aceite por hectárea cultivada, produciendo 5000 kg por hectárea, seguido del coco con 2260 kg por hectárea, la jatropha produce 1590 kg por hectárea.

Además de la productividad de biodiesel por hectárea, se debe evaluar en la productividad general, tomando en cuenta los insumos agrícolas usados en el cultivo como el agua, fertilizantes, mano de obra, energía, particularmente para la cosecha y el procesamiento. En la práctica la semilla de soja y colza, dominan la producción mundial de semillas oleaginosas, con un contenido de aceite de 21 y 35 % respectivamente. (Roy et al., 2016)

El biodiesel puede ser producido a partir de aceites y grasas vegetales (Daud, Rozaimah, Sheikh, y Yaakob, 2014). En cuanto al biodiesel, se le obtiene a partir de una gran variedad de aceites vegetales, destacando de entre todos ellos el de soja, y en menor medida, el de maíz (Kapilan y Birdar, 2014).

Los aceites vegetales comestibles, como el aceite de palma, aceite de soja, aceite de girasol y aceite de colza, se constituyeron como materias primas tradicionales para producir biodiesel (Font de Mora, Torres, y Valero, 2015). Sin embargo el alto costo de la materia

prima que representa el 80% del costo total de la producción de biodiesel, la amenaza de la posible subida de precios de los aceites comestibles junto a la amenaza de hambre y la degradación del suelo asociada con la agricultura a gran escala para la producción de biodiesel (Diya'Uddeen, Abdul Aziz, Daud, y Chakrabarti, 2012), forzó a muchas agencias, particularmente a las organizaciones de alimentos y agrícolas a considerar como no fiable esta opción. (Mansir et al., 2018)

Los aceites vegetales no comestibles como el aceite de *Jatropha*, el aceite de ricino, etc., se podrían considerar materias primas confiables para la producción de biodiesel a escala comercial; pero estos cultivos podrían ser causa de deforestación innecesaria, que podría afectar la condición climática en un futuro cercano, y llegaría a ser un proceso no económico y lento. (Mansir et al., 2018)

### ***2.2.1.3 Aceite vegetal usado***

La atención de producción de biodiesel se ha centrado recientemente en los aceites no comestibles (vegetal crudo), en especial en los aceites residuales (aceite de cocina usado), con el fin de disminuir el precio del biodiesel, además éstos son renovables y de fácil acceso (López, Bocanegra, y Malagón, 2015; Wang, Jiang, Si, y Liang, 2013). Además, al usar esta materia prima, se reducirá más aún la contaminación del agua, por no haber sido vertidos en los cuerpos del agua; siendo ideales para enfrentar los desafíos energéticos futuros, porque no suman a los cambios climáticos globales (Suranani, Maralla, Gaikwad, y Sonawane, 2018; Ueki, Saiki, Hoshina, Seko, et al., 2017).

Además de ser una alternativa de bajo costo, el aceite de cocina usado como materia prima, es una excelente alternativa por ser recurrente para la producción de biodiesel y

evitar los altos costos en su tratamiento, mediante la reacción química de transesterificación (Claudia, Jiménez, Nayibe, y Nelly, 2014; Kumar, Dharma Patria, y Ki Lin, 2015).

El aceite usado de cocina (ACU) es sometido a la transesterificación para disminuir la viscosidad y aumentar la volatilidad del biodiesel (Issariyakul, Kulkarni, Dalai, y Bakhshi, 2007). Además en cuanto a las reacciones secundarias indeseables e hidrólisis (saponificación) o pretratamiento inicial para eliminar la presencia de ácidos grasos libres (AGL). (Colombo et al., 2016)

Por lo tanto, el uso de estos residuos como materia prima para la síntesis de biodiesel, ayuda no solamente ayuda en la eliminación o disminución de disposición, sino también reduce los costos de producción de biodiesel (Kataria et al., 2018).

### **2.2.3 Métodos de Obtención del Biodiesel**

Numerosos métodos se han desarrollado para la producción de producción de biodiesel, como la mezcla directa, transesterificación, microemulsiones y pirolisis (Ambat et al., 2018; Mojtaba y Ahmad, 2012) . El método más común de producción de biodiesel es la transesterificación de aceites vegetales y grasas animales en presencia de un catalizador como ácido, álcali o enzima (Verma y Sharma, 2016).

#### **2.2.3.1 Mezcla**

Es a través del uso directo como combustible diésel o mezclando con el gasóleo (Vicente, 2012). Las ventajas de esta mezcla son renovables, además es transportable y tiene alto contenido de calor. Sin embargo como desventaja que presenta es la demasiada viscosidad, baja volatilidad, genera depósitos de carbono en el motor (Daud et al., 2014).

### 2.2.3.2 Transesterificación

Este proceso químico de transesterificación, es realizado con la finalidad de eliminar la glicerina, un subproducto de producción de biodiesel (Kapilan y Birdar, 2014). El producto puede ser mezclado con diésel proveniente del petróleo, o bien, ser utilizado sin mezclar, es decir 100% puro; sin embargo se debe realizar una caracterización previa del biodiesel (Álvarez, 2009).

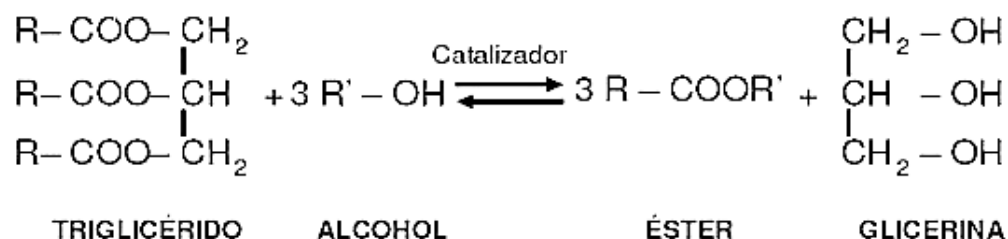


Figura 1. Reacción de transesterificación de un triglicérido (L. A. Torres, Ben, Alcocer, y De La Rosa, 2017)

Los aceites vegetales puestos directamente al motor, a largo plazo pueden causar serios problemas de depósitos en el motor, adherencia en el anillo de pistón, asfixia del inyector debido a una alta viscosidad y baja volatilidad (Daud et al., 2014). La transesterificación del aceite vegetal en su éster de metilo/etilo puede acercar a las propiedades del diésel y también puede reducir los efectos nocivos mencionados anteriormente. (Kataria et al., 2018)

Según Zambrano, Rossi, Hernández y Chico (2015) para la determinación de la reacción de transesterificación sea catalizada por una base o catalizada por un ácido, depende del número ácido resultante en el aceite. Si es mayor al 5%, se debería utilizar

catálisis ácida como tratamiento previo a los ácidos libres y así evitar la formación de jabones, ya que en la separación de las fases de glicerina y biodiesel, pueden presentar dificultades y formar emulsiones al momento del lavado con el agua (Zambrano et al., 2015).

Cabello, Rincón, y Zepeda, 2016, mencionan que en el proceso de transesterificación hay factores primordiales a considerar en la reacción: el adecuado desempeño del catalizador y el control de las condiciones óptimas de reacción. Para realizar una adición correcta de etanol y catalizador para la reacción de transesterificación, es necesario realizar un análisis de control de la calidad al aceite usado (Caballero, Vidal, Morgan, Espinosa, y Roblero, 2012).

En el proceso de transesterificación abarca varios aspectos: la transesterificación con catalizadores homogéneos bases o ácidos, transesterificación con catalizadores heterogéneos bases o ácidos, transesterificación con catalizadores enzimáticos y transesterificación en condiciones supercríticas. (Rivas et al., 2017)

#### *2.2.2.2.1 Relación Molar en el proceso de transesterificación*

Para la producción de biodiesel la reacción química con alcohol es uno de los principales procedimientos para la producción de biodiesel; siendo más ampliamente utilizados el metanol y en cierta medida el etanol. Otros alcoholes de cadena corta utilizados en la producción de biodiesel son el propanol, butanol, isopropanol, alcoholes ramificados y el octanol; sin embargo estos tienen un costo elevado. (Musa, 2016)

Claudia et al. (2014) menciona que una de las variables que más afecta en la conversión del biodiesel es la relación molar alcohol:aceite. Así mismo Musa (2016)

plantea que la relación molar es la más crítica en la dinámica de la de producción de biodiesel. Estequiométricamente, en la transesterificación se necesitan tres moles de alcohol y una de triglicérido para producir tres ésteres alquílicos y una de glicerina; sin embargo es necesario un exceso de alcohol debido a que la alcoholólisis es una reacción reversible (Zabeti, Wan Daud, y Aroua, 2009).

La relación molar alcohol:aceite no afecta el índice de acidez y de yodo del biodiesel. Pero la elevada relación molar alcohol: aceite, puede interferir en la separación de la glicerina, debido a que la solubilidad tiende a aumentar (Claudia et al., 2014). La permanencia de la glicerina en la solución, disminuye la conversión de ésteres y es de difícil separación. (Vicente, 2012)

Ullah, Bustam, y Man (2015) obtuvieron un mayor rendimiento de biodiesel en relaciones molares altas, trabajaron en el rango de 3:1 a 18:1 y concluyeron que el mayor rendimiento obtuvieron en la proporción 15:1 y a partir de la proporción 18:1, la relación molar tuvo poco efecto, probablemente como resultado de la solubilidad de la glicerina en los ésteres.

Por otro lado Claudia et al. (2014) observaron que los mejores resultados se presentaron en relaciones molares entre 9:1 y 12:1. Cuando se realizaron relaciones molares menores a 6:1 las reacciones no fueron completas, mientras en las relaciones molares mayores a 15:1, la separación de la glicerina fue difícil, disminuyendo la producción de biodiesel debido a que la presencia de glicerina en la fase de biodiesel.

#### – **Metanol**

En la elaboración de biodiesel por transesterificación, el alcohol más usado es el metanol debido a su alta polaridad, condiciones de reacciones suaves, fácil de separación de fases y su costo accesible. Sin embargo la aplicación de metanol presenta desventajas como, bajo punto de ebullición y una mayor toxicidad (Chen, Wang, Ding, Shi, y Yang, 2017).

En los subprocesos, el metanol es uno de los principales factores de mayor impacto en el ambiente, incidiendo en las categorías de oxidación fotoquímica, acidificación y principalmente no es renovables (Vidal et al., 2017).

#### – **Etanol**

El etanol como disolvente tiene mayor solubilidad y menor toxicidad y los ésteres etílicos resultantes (EE) tienen mejores propiedades a bajas temperaturas en comparación con los ésteres metílicos (EM), lo que hace que el combustible sea más útil en las regiones con clima frío, sin embargo el proceso de separación de la glicerina es más difícil en comparación con el metanol. (Verma et al., 2017)

Mediante la reacción de transesterificación con etanol, se obtiene el biodiesel (J. J. Torres et al., 2017). El etanol proviene de productos agrícolas, tales como el maíz, caña de azúcar, etc., lo cual sería de mejor uso para la producción de biodiesel, respecto al metanol que es derivado de combustibles fósiles (Chen et al., 2017). Al ser obtenido de estos materiales le hace renovable, no tóxico y su producción no depende de los recursos petroquímicos (Refaat, Attia, Sibak, Sheltawy, y ElDiwani, 2008). Los ésteres de etilo han llegado a producirse de diferentes maneras en muchos países como principal alcohol para la

producción de biodiesel, especialmente en España y Brasil (Barbosa, Serra, Meneghetti, y Meneghetti, 2010).

#### *2.2.2.2.2 Catalizadores*

Según Kataria et al., 2018, los catalizadores desempeñan un papel importante en la conversión de la reacción, por lo que la selección de un tipo de catalizador adecuado y la concentración de catalizador es muy crucial para obtener la condición de reacción óptima.

##### a. Catalizadores homogéneos

Actualmente, en los procesos de producción de Biodiesel, se utilizan catalizadores homogéneos, debido a su fácil solubilidad en la solución de reacción, por sus altas capacidades catalíticas y bajos costos (Mansir et al., 2018). Para la remoción de los triglicéridos y obtención de biodiesel, se hace uso de un catalizador homogéneo de tipo alcalino tal como NaOH o KOH. (Ueki, Saiki, Hoshina, y Seko, 2017)

Al usar catalizadores homogéneos presentan algunos inconvenientes importantes, tales como, después de la transesterificación, el catalizador se disuelve completamente en la capa del glicerol y parcialmente con el biodiesel, esto dificulta la separación del producto, produciendo más costos de producción (Zabeti et al., 2009). Esto resulta, implementar un proceso de lavado lento con agua del biodiesel, con un proceso tedioso y ambientalmente hostil para la eliminación del exceso de catalizador (Fajriutami, Chan Seo, y Hwan Chu, 2013). La glicerina contaminada con catalizador tiene poco valor en el mercado actual y su eliminación es otro problema. (Kataria et al., 2018)

##### – Reacción con catalizadores básicos

Los catalizadores sólidos básicos tipo óxidos de metales alcalinotérreos han demostrado ser eficientes en la transesterificación de aceites vegetales, tienen una fuerte capacidad básica y son económicos (Grey C., Edgardo R., y Beatriz M., 2014).

Según Sarmiento (2014) la reacción obtenida mediante catálisis básica, es más rápida que la ácida. Los catalizadores bases son muy sensibles con el agua y los Ácidos Grasos Libres (AGL), tendiendo a hidrolizar algunos ésteres produciéndose jabón (Islam y Ravindra, 2017).

Fangrui y Hanna (1999) afirman: “El jabón disminuye el rendimiento de los ésteres representando la separación de éster y el glicerol y el lavado con agua, el cual compite con la reacción de transesterificación”.

La producción de biodiesel por transesterificación de triglicéridos con metanol o etanol en presencia de catalizadores básicos homogéneos proporcionan valores de reacción mayores que los catalizadores heterogéneos (Cabello et al., 2016). Sin embargo, presenta varios inconvenientes considerablemente costosos debido a la formación de emulsiones asociada a la producción de jabones, especialmente si se usa etanol, y la gran cantidad de producción de aguas residuales (Kadapure et al., 2017).

El hidróxido de sodio funciona como catalizador homogéneo que aumenta la velocidad de reacción de transesterificación de aceite para la producción de biodiesel (Refaat, Attia, et al., 2008). Cuando se produce la reacción del hidróxido de sodio con el alcohol, se produce el alcóxido (alcohol desprotonado); produciéndose de esta forma en una base más fuerte que el alcohol para reaccionar con el aceite, permitiendo que la reacción sea más rápida. (Zambrano et al., 2015)

Según Acosta et al. (2008), el hidróxido de potasio (KOH) como catalizador presenta más ventajas respecto al hidróxido de sodio (NaOH), al momento de disolver en el alcohol (metanol o etanol), debido que se puede obtener un producto fertilizante (fosfato de potasio) al momento de purificar la glicerina, e incluso es más fácil la separación del biodiesel por decantación en el reactor.

– Reacción con catalizadores ácidos

Los catalizadores ácidos a diferencia de los bases, se pueden aplicar a la materia prima con un alto contenido de agua y AGL; sin embargo es necesario la aplicación de altas temperaturas y altas concentraciones de catalizador para poder obtener un rendimiento razonable de ésteres de ácidos grasos. (Islam y Ravindra, 2017)

Los catalizadores sólidos ácidos tipo zeolitas o heteropoliácidos, pueden ser empleados en reacciones de esterificación y transesterificación de manera simultánea, son tolerantes a los AGL y agua; sin embargo su morfología limita su estabilidad presentando problemas de lixiviación de los sitios activos, además que las reacciones son más lentas que las catalizadas en medio básico (Grey C. et al., 2014)

b. Catalizadores heterogéneos

El uso de catalizadores heterogéneos en una reacción de transesterificación de triglicéridos, implicará la eliminación de varios procesos de lavado del biodiesel, de esta forma se garantiza una mayor eficiencia y rentabilidad en el proceso de producción de biodiesel. (Islam y Ravindra, 2017)

La cinética de reacción de transesterificación se da mediante la conversión de triglicéridos a ésteres monoalquílicos usando alcohol en presencia de catalizador. La reacción ocurre en tres pasos: 1. la conversión de triglicéridos en diglicéridos. 2.

Conversión de diglicéridos a monoglicéridos. 3. Los monoglicéridos se convierten a ésteres monoalquílicos y glicerol. (Verma et al., 2017)

La viabilidad técnica y económica para la producción de biodiesel a través de la transesterificación heterogénea es favorable. Los catalizadores heterogéneos ayudan a llevar a cabo la esterificación y transesterificación al mismo tiempo. Estos catalizadores ayudan a optimizar el proceso de obtención de biodiesel. (Cabello et al., 2016); (M. Trindade, 2018)

En la búsqueda de un biodiesel ecológico, el uso de un catalizador heterogéneo en reemplazo de un homogéneo como reactivo en la transesterificación, permitirá reducir los impactos generados en la producción de biodiesel, como son la cantidad de agua usada y la generación de residuos. (Latchubugata et al., 2018)

Los catalizadores heterogéneos son fáciles de separar de la mezcla de reacción y pueden recuperarse y reciclarse, lo que hace que el proceso sea económico y respetuoso con el medio ambiente. Además es menos corrosivo en comparación con los catalizadores homogéneos. A pesar de convertir los triglicéridos en biodiesel lentamente, la producción de biodiesel es muy factible y económica. (Kataria et al., 2018)

Los catalizadores heterogéneos están compuestos generalmente por óxidos de metales alcalinotérreos, metóxidos, resinas de intercambio iónico y compuestos metálicos soportados sobre alúmina o sílice (Cabello et al., 2016).

El óxido de calcio (CaO) ha llamado la atención para la reacción de transesterificación ya que posee una resistencia básica relativamente alta y debido a su solubilidad con el alcohol, produce menos impactos ambientales y puede sintetizarse a

partir de caliza e hidróxido de calcio las cuales son fuentes baratas. (Zabeti, Wan Daud, y Aroua, 2009)

Como catalizador, el CaO, suele ser muy usado por su abundante disponibilidad en la naturaleza; así como su bajo costo y alta actividad. El CaO puede prepararse a partir de distintas fuentes de material. Por ejemplo se puede derivar de las piedras de cal y sus derivados, cáscaras de huevo, cáscaras de ostra y cáscaras de vieira. Si se usan adecuadamente para un desarrollo regional, será la forma más rentable y buena para la sociedad local el uso del catalizador CaO en la preparación de biodiesel. (Sirisomboonchai et al., 2015)

El CaO también se usa como catalizador con la impregnación a otro reactivo, tal como el óxido de calcio impregnado con nitrato de potasio que puede ser usado como catalizador en la reacción de transesterificación. En este sentido, se ha constatado que la impregnación del óxido de calcio con nitrato de potasio potencia la basicidad del óxido como catalizador. (Knothe y Steidley, 2009)

#### *2.2.2.2.3 Temperatura de la Reacción*

Cuando la temperatura se aumenta en la reacción, la velocidad y el rendimiento de conversión de Triglicéridos en ésteres alquilos también aumenta. Sin embargo a una elevada temperatura, el alcohol puede evaporarse y crear serios problemas en la reacción, a menos que se tenga un material seguro frente a la hermeticidad y presión. (Bulla Pereira, 2014)

Pereira, Sierra, y Guerrero (2015) mencionan que la reacción con catalizadores homogéneos produce una cantidad mayor de ésteres alquilos de ácidos grasos, en

condiciones bajas de temperaturas. Asimismo cuando en la transesterificación se utilizan catalizadores básicos, se debe de tener control en las condiciones de reacción, primordialmente en la temperatura y cantidad de catalizador. Los catalizadores básicos se utilizan a temperaturas que suelen estar entre 40 y 75 °C. En la reacción con catalizadores heterogéneos, las temperaturas pueden variar entre 20 y 200 °C. (Cabello et al., 2016)

#### *2.2.2.2.4 Velocidad de la agitación*

El aceite tiene una baja solubilidad con el alcohol, se puede interpretar que en ninguna proporción es capaz de formar una fase homogénea con el alcohol. Por lo tanto para que se presente una transferencia de masa, la velocidad de agitación, permitirá aumentar la transferencia de masa y aumentar el rendimiento de producción de biodiesel. (Bulla Pereira, 2014)

El tipo y variedad de triglicéridos presentes en el aceite, es muy influyente en la velocidad de transesterificación, haciendo que no solo dependa de las condiciones de operación o del tipo de catalizador, es por eso muy importante saber el tipo de triglicérido a ser sometido a la reacción. (Grey C. et al., 2014)

Maneerung, Kawi, Dai, y Wang (2016) observaron que la velocidad de agitación juega un rol muy importante en la obtención de biodiesel. Realizaron diferentes velocidades de mezclado entre 800 y 1500 rpm. Cuando se aumentó de 800 rpm a 1200 rpm, la conversión de ésteres aumentó, a partir de 1200 rpm, no hubo un efecto significativo en el aumento de ésteres.

#### *2.2.2.2.5 Tiempo de Reacción*

Al realizar la transesterificación, el tiempo de reacción varía al usar los distintos tipos de catalizadores. Por ejemplo al usar catalizadores homogéneos bases, el tiempo de reacción tiende a ser menor: sin embargo los catalizadores homogéneos ácidos, tienen un tiempo de reacción prolongado para esterificar la materia prima al biodiesel. La transesterificación con catalizadores heterogéneos suele ser lenta, por lo tanto conlleva a un mayor tiempo de reacción (Mansir et al., 2018)

Fajriutami, Chan Seo, y Hwan Chu (2013) utilizaron tiempos de 2 horas a 4 horas de reacción para la producción de biodiesel, evaluaron cuál era el tiempo óptimo para un rendimiento mayor. Determinaron que un tiempo de 3 horas, es el óptimo para esta reacción, en este procedimiento hicieron el uso de Óxido de Calcio, considerado un catalizador básico heterogéneo.

#### *2.2.2.3 Producción de biodiesel por Microemulsión*

Según Lin et al. (2011) es un método físico, al igual que la mezcla no necesita de algún proceso químico y puede reducir la viscosidad del aceite vegetal; sin embargo no puede evitar los depósitos de carbón y la contaminación por el lubricante. Otra desventaja es la baja volatilidad y estabilidad. (Ambat et al., 2018)

Para la microemulsión se pueden emplear alcoholes tales como metanol, etanol o butanol, siendo llamados combustibles híbridos. En este proceso las microemulsiones son claras, fluidos isotrópicos estables con tres componentes: fase de aceite, fase acuosa y un surfactante. (Antonio Carmona, 2018)

#### ***2.2.2.4 Producción de biodiesel por Pirólisis***

En este proceso, los materiales orgánicos se convierten en combustible en ausencia de oxígeno, mediante la aplicación de calor o con ayuda de un catalizador. El material pirolizado puede ser aceite vegetal, grasa animal, ácidos grasos naturales o ésteres de ácidos grasos. Este método da que el combustible obtenido tenga menor retraso de ignición (por el índice de cetano) y menor contenido de viscosidad. (Ambat et al., 2018; Antonio Carmona, 2018)

Las desventajas en el uso de pirolisis con métodos convencionales, requieren un largo tiempo de proceso mientras producen un rendimiento bajo de biodiesel (40% en peso), probablemente a la ineficiente transferencia de calor, dando como resultado un mayor uso de energía, pérdidas de calor y costos de producción, ya que se requiere más tiempo y energía para calentar el material a la temperatura objetivo para que se produzca la conversión de la pirólisis. (Lam et al., 2017)

##### ***2.2.2.4.1 Pirólisis por Irradiación por microondas***

La aplicación de la irradiación de microondas junto con el uso de catalizadores o mineral de reactivos permite reacciones orgánicas que se producen rápidamente a la presión ambiente, así como los procesos químicos con atributos especiales como, por ejemplo, una mayor velocidad de reacción, mayor rendimiento, y la facilidad de manipulación. Hay dos mecanismos por los cuales energía de microondas puede interactuar con una muestra. Si una molécula posee un momento dipolar, entonces, cuando es expuesta a radiación microondas, el dipolo intenta alinear con la aplicación de un campo eléctrico e.

El calentamiento por microondas se compara muy favorablemente con métodos convencionales, donde calefacción puede ser relativamente lento e ineficaz porque transferir energía de una muestra depende de las corrientes de convección y la conductividad térmica de la mezcla de reacción (Refaat et al., 2008).

Pirólisis por microondas es una alternativa que mejora el mecanismo de calentamiento y craqueo en el proceso de producción de biodiesel. Las ventajas respecto a la pirolisis convencional como el uso de un horno se ve reflejado en el calentamiento rápido, distribución de calor uniforme y mejor control de proceso de calentamiento. (Lam et al., 2017)

## **2.3. Marco Conceptual**

### **2.3.1 Biodiesel**

El Biodiesel se refiere a la mezcla de monoalquil ésteres de ácidos grasos que se deriva de los triglicéridos fuentes tales como los aceites vegetales (Hamze et al., 2015), el cual se produce químicamente haciendo reaccionar cualquier aceite (de colza, girasol, maní, soja, palma, lino, cártamo, nabo, aceites usados, etc.) o grasa natural metanol o etanol, en presencia de un catalizador. (Tan, Gui, Lee, y Mohamed, 2010; Suranani, Maralla, Gaikwad, y Sonawane, 2018)

La ASTM (American Standards for Testing and Materials) define al biodiesel como “Ésteres monoalquílicos de ácidos grasos de cadena larga derivados de lípidos renovables tales como aceites vegetales y que se emplean en los motores de ignición de compresión o en calderas de calefacción”.

### **2.3.2 Transesterificación**

Es un método que se basa en la transformación de triglicéridos a ésteres de ácidos grasos y glicerina, mediante la reacción de un triglicérido con un alcohol de bajo peso molecular, como metanol o etanol, en presencia de un catalizador homogéneo o heterogéneo (Peiter et al., 2018). La reacción es sensible a las variaciones con el tipo de alcohol, la proporción molar de alcohol/aceite, el catalizador, la agitación, la temperatura y el tiempo de reacción (Ueki, Saiki, Hoshina, Seko, et al., 2017).

### **2.3.3 Relación Molar**

La relación molar es la relación de cantidad de moles que se requiere para obtener el biodiesel (Musa, 2016). En la relación estequiométrica de alcohol a aceite es de 3:1; sin embargo, se requieren relaciones molares más altas para aumentar la miscibilidad y mejorar el contacto entre la molécula de alcohol y el triglicérido (Sauciuc, Dumitrescu, Manciulea, y Zaha, 2011).

### **2.3.4 Óxido de Calcio (CaO)**

El CaO es un compuesto que es derivado de la piedra caliza, huesos, etc., que puede utilizarse como catalizador alcalino heterogéneo en una reacción de transesterificación de aceites vegetales o grasas animales (Malins, Kampars, y Rusakova, 2012).

### **2.3.5 Etanol**

Según Choi et al. (2015) el etanol es un combustible altamente oxigenado que es derivado del maíz, el trigo, la mandioca, la caña de azúcar, etc. En comparación con el

combustible diésel, el número de cetano, el punto de inflamación, y el poder calorífico del etanol es bajo, para aplicarlo directamente a los motores diésel (An, Yang, y Li, 2015). Sin embargo se puede usar para la producción de biodiesel, obteniendo así un combustible apropiado para los motores diésel.

## **2.4 Marco Legal**

Las normas aplicadas al Proyecto de Investigación se muestran a continuación:

– **CONSTITUCIÓN POLÍTICA DEL PERÚ**

Artículo 2º: Toda persona tiene derecho:..

Inciso 22. A la paz, a la tranquilidad, al disfrute del tiempo libre y al descanso, así como a gozar de un ambiente equilibrado y adecuado al desarrollo de su vida

– **LEY N° 28611: Ley General del Ambiente.**

Artículo 77.- De la promoción de la producción limpia.

Inciso 77.2 Las medidas de producción limpia que puede adoptar el titular de operaciones incluyen, según sean aplicables, control de inventarios y del flujo de materias primas e insumos, así como la sustitución de éstos; la revisión, mantenimiento y sustitución de equipos y la tecnología aplicada; el control o sustitución de combustibles y otras fuentes energéticas; la reingeniería de procesos, métodos y prácticas de producción; y la reestructuración o rediseño de los bienes y servicios que brinda, entre otras.

– **D.S. N° 014-2017-MINAM: Reglamento del Decreto Legislativo N° 1278, Decreto Legislativo que aprueba la Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos**

Artículo 65.- Disposiciones generales

La valorización constituye la alternativa de gestión y manejo que debe priorizarse frente a la disposición final de los residuos sólidos. Son consideradas operaciones de valorización: reciclaje, compostaje, reutilización, recuperación de aceites, bioconversión, coprocesamiento, coincineración, generación de energía en base a procesos de biodegradación, biochar, entre otras alternativas posibles y de acuerdo a la disponibilidad tecnológica del país. Los generadores del ámbito de la gestión no municipal pueden ejecutar operaciones de valorización respecto de sus residuos sólidos.

- LEY N° 28054: Ley de Promoción del Mercado de Biocombustibles.

Se creó con el propósito de promover el desarrollo del mercado de biocombustibles sobre la base de la libre competencia y el libre acceso a la actividad económica.

(Vásquez, de la Cruz Sandoval, y Coello, 2016)

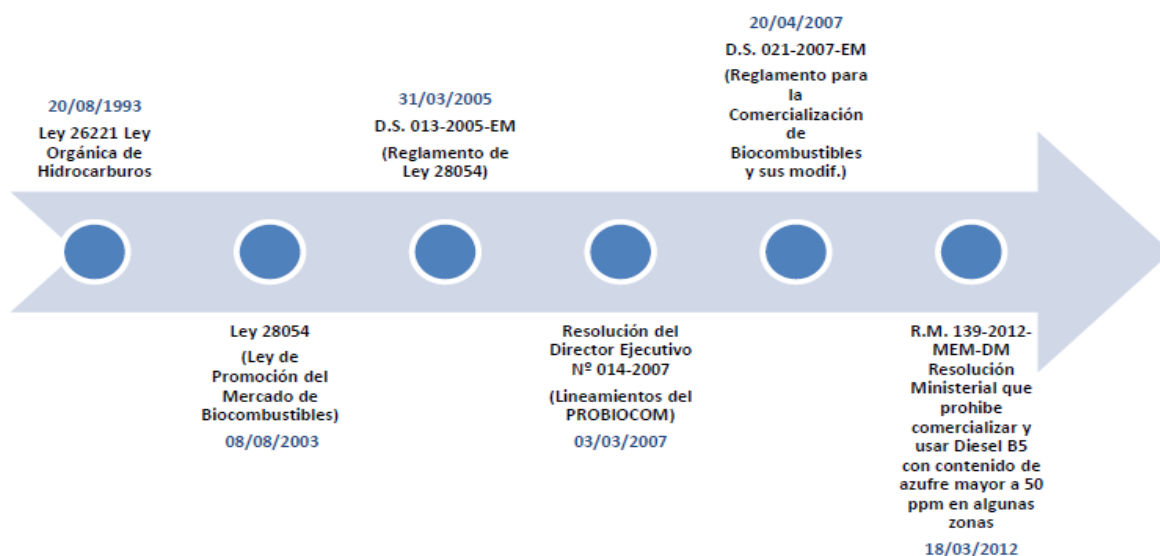


Figura 2. Evolución de la Normativa sobre el Mercado de Biocombustibles. Copyright s.f. por DSR-Osinergmin



## **CAPÍTULO 3**

### **Materiales y Método**

#### **3.1 Materiales**

- Como materia prima se obtuvo Aceite de Soja Usado (ASU), procedente del Comedor Universitario de la Universidad Peruana Unión.
- Etanol de 96° (Grado Comercial, JENFARMA)
- Óxido de Calcio al 50 % (Cal Nieve, grado comercial, marcaWORSAL)
- Matraz Erlenmeyer de 500 ml
- Soporte Universal
- Embudo de decantación
- Vaso de precipitado de 50ml, 250 ml y 500 ml.
- Termómetro de vidrio
- Pipeta de 25 ml
- Pipeteador
- Filtro

#### **3.2 Equipos**

- Agitador Magnético Nuova, modelo SP 18420-26
- Reómetro Brookfield, Modelo DV-III
- Balanza Electrónica OHAUS (Adventurer Pro AV264C)

### **3.3 Metodología**

#### **3.3.1 Lugar de Ejecución**

La investigación se efectuó en los laboratorios de Ingeniería Ambiental – Laboratorio de Monitoreo Ambiental –, en donde se hace el proceso de reacción y el Centro de Investigación de Ciencias Alimentarias (CICAL), en donde se determinó la viscosidad del aceite de soja usado y la viscosidad del biodiesel, estos laboratorios son de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión (Km. 19.5 Carretera Central, Ñaña-Lima)

#### **3.3.2 Procedimiento**

##### ***3.3.2.1 Recolección de la Materia Prima***

La materia prima fue recolectada del Comedor Universitario de la Universidad Peruana Unión, con previa autorización del encargado del lugar se recolectó el aceite de soja usado. Se utilizó un balde plástico de 8 litros para contener el aceite, trasladándose al laboratorio de Monitoreo Ambiental, en donde se realizó los siguientes procedimientos de obtención de biodiesel.

##### ***3.3.3.2.1 Filtrado***

El procedimiento consistió en filtrar el aceite usado de soja proveniente del comedor universitario, aumentando la temperatura a 40 °C, para obtener una mayor fluidez en el filtrado. El procedimiento llevado a cabo retirándose los restos de comida presentes en el

aceite para que no interfieran en el proceso de transesterificación. (Lafont, Páez, y Torres, 2011)

### ***3.3.2.2 Pretratamiento y Medición de Viscosidad***

#### *3.2.3.2.2 Secado*

Al aceite se le aplicó energía calórica (aumento de temperatura) a 60 °C para evaporar el contenido de agua en el mismo, con la finalidad de disminuir la saponificación al momento de realizar la reacción de transesterificación (Medina et al., 2015). El tiempo de permanencia en la etapa fue de 15 minutos.

#### *3.2.3.2.3 Medición de Viscosidad del Aceite*

La determinación de la viscosidad se realizó con el Reómetro Brookfield a 40 °C. Se determinó la viscosidad mediante la Progresión de la Velocidad Geométrica descrita en la Tabla 1. Estos datos se programaron externamente a través del Software Rheocalc V2.3. Se usó el Spindle RV1.

Tabla 1

*Progresión de la Viscosidad Geométrica*

| <b>Comando</b> | <b>Parámetro</b> | <b>Descripción</b>                     |
|----------------|------------------|--|
| <b>SSN</b>     | 10               | Ajuste de velocidad a 10 rpm           |
| <b>LSC</b>     | 5                | Iniciar bucle; ejecutar cada 5 tiempos |
| <b>WTI</b>     | 00:30            | Espere 30 segundos                     |
| <b>DSP</b>     |                  | Toma un punto de datos                 |
| <b>SSI</b>     | 10               | Aumento de velocidad en 5 rpm          |
| <b>LEC</b>     |                  | Regreso al comando LSC correspondiente |

Se adaptó de Hamze et al. (2015) la densidad del aceite de soja usado igual a 0.96 g/ml y la masa molar igual a 866.31 g/mol sus propiedades se muestran en la Tabla 2.

La selección del número de Spin y las Velocidad RPM se muestran en el Anexo 4, en donde se describe la metodología del uso del reómetro Brookfield. Para la medición de la viscosidad cinemática se multiplicará el factor de corrección del Spin N°1 con la viscosidad dinámica obtenida a 60 rpm a esto se le dividirá entre la densidad para obtener de esta manera el resultado esperado

Tabla 2

*Propiedades del Aceite de Soja Usado adoptado de Hamze et al. (2015)*

| PARÁMETRO  | UNIDAD | RESULTADO   |
|------------|--------|-------------|
| Densidad   | g/ml   | 866.31 g/ml |
| Masa Molar | g/mol  | 282 g/mol   |

### ***3.3.2.3 Preparación del alcóxido***

Para la preparación del alcóxido se utilizó alcohol anhídrido (Etanol de 96°) y Óxido de Calcio (CaO) al 50% (grado comercial). La cantidad de CaO usado fue de 2% y 6% en relación con la masa del aceite. Las relaciones molares de alcohol, aplicado en la obtención de biodiesel fueron de 9:1 y 15:1. (Beatriz Lobo, Da Costa, Klimeck Gouvêa, Andreazza, y Al-Rubaie, 2017). Se empleó 200 ml de aceite para todos los experimentos realizados.

### 3.3.2.4 Transesterificación

El alcóxido obtenido, fue vertido en el aceite, que previamente fue calentado para que no afecte la temperatura de reacción, esta reacción fue realizada para producir la separación de ésteres y glicerol. (Pisarello, 2010). En este procedimiento se hizo uso del equipo agitador magnético. Las condiciones de Operación estudiadas se muestran en la tabla 3.

Tabla 3

*Condiciones de Operaciones estudiadas*

| Operaciones | Variable                                  | Datos de Estudio |
|-------------|---|------------------|
| 1           | Relación molar etanol/aceite<br>(mol/mol) | 9:1              |
|             |   | 15:1             |
| 20          | Óxido de Calcio (%)                       | 2                |
|             |   | 6                |

La reacción estequiométrica requiere 1 mol de triglicérido y 3 mol de alcohol (etanol). Sin embargo, “un exceso del alcohol se utilizó para aumentar los rendimientos de los ésteres de alquilo y para permitir su separación de fases desde el glicerol que se forme” (Refaat, Attia, Sibak, Sheltawy, y ElDiwani, 2008), siendo la relación molar de 9:1 y 15:1 usados en la reacción. Los parámetros son fijos, tales como tiempo de reacción 3 horas, 70°C la temperatura de reacción, y 1000 rpm la velocidad de reacción. (Primata, Chan Seo, y Hwan Chu, 2013)

### ***3.3.2.5 Separación de Fases***

Después del proceso de transesterificación, el producto se dejó en reposo por unas 24 horas en un embudo de decantación y/o Erlenmeyer, para la separación del subproducto glicerol del biodiesel (Bilgin et al., 2015). La capa superior estuvo compuesta por ésteres etílicos (biodiesel) mientras que la inferior por glicerol, etanol en exceso y el catalizador restante junto con jabón (Zou, Zhao, Shi, Huang, y Luo, 2013).

### ***3.3.2.6 Biodiesel Producto Final***

Al obtener el la separación de fases, se realizó la separación del glicerol con el éster obtenido (biodiesel), filtrando el biodiesel en un matraz, para evitar la presencia de algunos jabones en el producto final y se determinó el rendimiento obtenido de biodiesel (%), con la ecuación 1.

Estos datos se obtiene pesando el biodiesel obtenido entre el peso del aceite usado (200 ml) en gramos previamente realizado en la transesterificación y se multiplicó por 100 para obtener el rendimiento en porcentaje (Bateni y Karimi, 2016). Así mismo se evaluó la viscosidad del biodiesel a Temperatura ambiente y a 40°C, en el Laboratorio de CICAL con el Reómetro Brookfield, del mayor rendimiento obtenido en los ensayos. Además se determinó el tipo de fluido siguiendo la metodología de P. Mitschka (Anexo 5). La medición de viscosidad descrita sigue el mismo procedimiento aplicando la temperatura solamente de 40°C al aceite de soja usado.

Además de la viscosidad obtenida, se comparó con la viscosidad del Diesel B5 S-50, la cual es una mezcla del Diésel 2 con 5% de Biodiesel, para ver si lo obtenido del ensayo analizado puede tener la propiedad de viscosidad adecuada. El reporte de análisis de

Diesel B5 S-50, fue obtenido de La Estación de Servicios con Gasocentro de GLP, “Multiservicios ECOGAS S.A.C.”, ubicada en la Av. Carapongo y Calle Los Robles, Mz. D, Lote 1 – Urb. Popular Nuevo Horizonte Carapongo, la cual comercializa este producto (Anexo 6).

### **3.3.2.7 Evaluación del Rendimiento**

#### *3.3.2.7.1 Variables de Estudio*

La variable dependiente de estudio fue el rendimiento de biodiesel en porcentaje (%). El rendimiento del experimento se calculó por la ecuación (1) (Bateni y Karimi, 2016).

$$\text{Rendimiento de biodiesel (\%)} = \frac{\text{Biodiesel producido (g)}}{\text{Aceite de Soja Usado (g)}} \times 100 \quad (1)$$

Para la realización del experimento, se trabajó con variables de reacción constantes como velocidad de agitación de 1000 rpm, tiempo de reacción de 3 horas, temperatura de 70 °C y las variables independientes de estudio serán: Concentración de Óxido de Calcio de 2 % y 6 % y relación molar etanol/aceite de 9:1 y 15:1.

Para la evaluación del rendimiento se hace uso del método estadístico Superficie de Respuesta.

Muchos factores pueden afectar en la producción de biodiesel, por lo que evaluando las variables que dan un mayor rendimiento de biodiesel se obtendrá el producto a menos costo con mejores rendimientos. El método de diseño experimental se empleó para guiar a los procesos de evaluación del rendimiento (Peiter et al., 2018). Para esta evaluación de

rendimiento se usaron las variables independientes de relación molar etanol:aceite y concentración de Óxido de Calcio (%).

### 3.4 Flujo de Obtención de Biodiesel

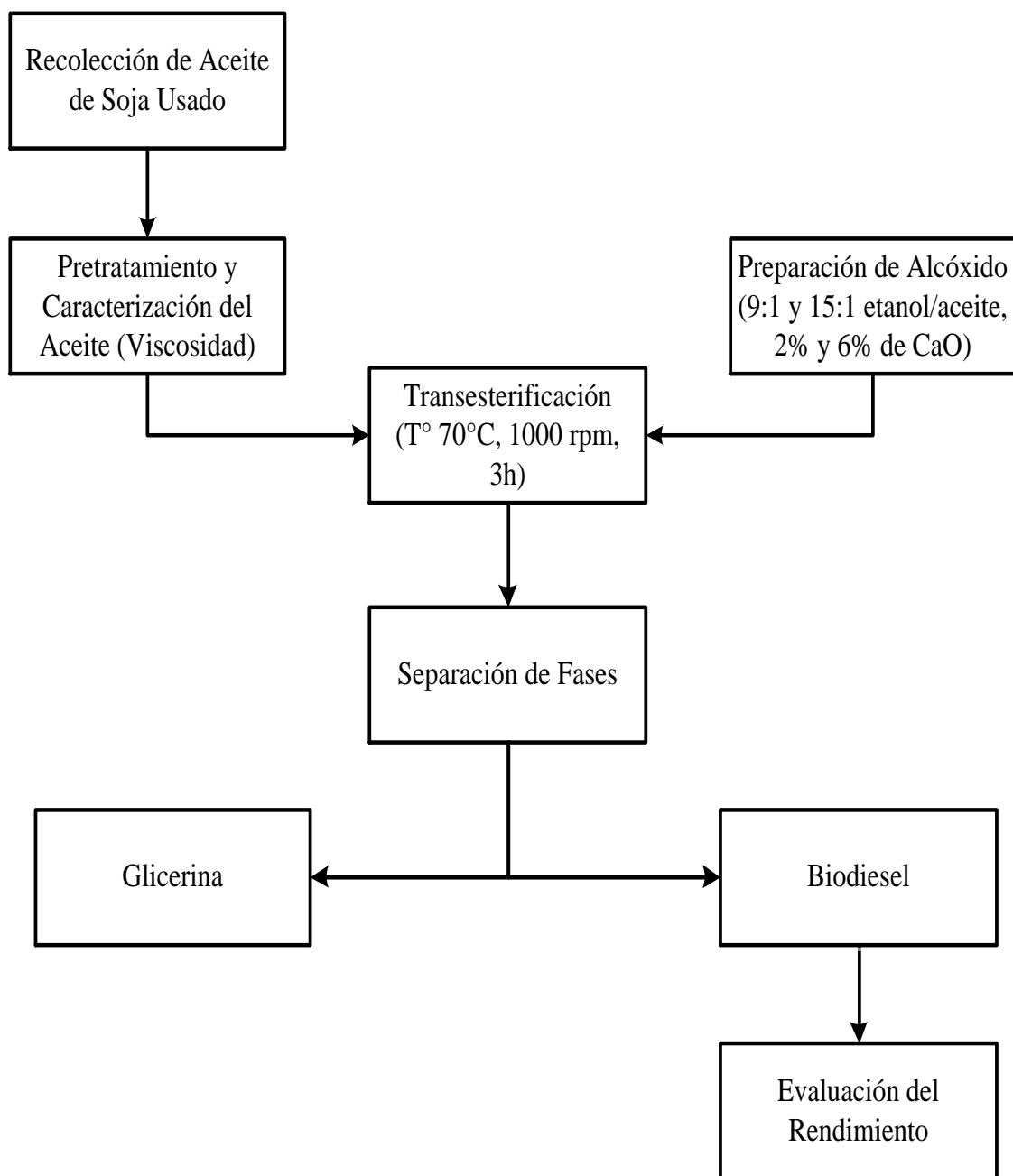


Figura 3. Diagrama de las etapas del procedimiento experimental

### 3.5 Diseño del Experimento

La evaluación del rendimiento de biodiesel se llevó a cabo a través de un diseño experimental  $2^2$  con cinco puntos centrales, en la cual se evaluó los efectos que tienen los parámetros de relación molar etanol:aceite y el porcentaje de concentración de Óxido de Calcio (CC). Se ajustó un modelo de primer orden y se aplicó el método de ascenso rápido. En el modelo de primero orden se evaluó si el porcentaje de catalizador y relación molar son significativos, si no hay un efecto de interacción mostrándose la curvatura, entonces se siguió al modelo de segundo orden construyendo un diseño compuesto central rotacional (DCCR).

El arreglo y los datos experimentales se muestran en la Tabla 3.

Tabla 4

*Arreglo y diseño factorial*

| Corrida | Variables de Proceso |       | Variables Codificadas |       |
|---------|----------------------|-------|-----------------------|-------|
|         | $E_1$                | $E_2$ | $X_1$                 | $X_2$ |
| 1       | 9:1                  | 2     | -1                    | -1    |
| 2       | 9:1                  | 6     | -1                    | 1     |
| 3       | 15:1                 | 2     | 1                     | -1    |
| 4       | 15:1                 | 6     | 1                     | 1     |
| 5       | 12:1                 | 4     | 0                     | 0     |
| 6       | 12:1                 | 4     | 0                     | 0     |
| 7       | 12:1                 | 4     | 0                     | 0     |
| 8       | 12:1                 | 4     | 0                     | 0     |
| 9       | 12:1                 | 4     | 0                     | 0     |

Para simplificar los Cálculos, las variables independientes se codificaron (-1,1). Por lo tanto, si  $E_1$  representa la variable natural Relación Molar de Etanol/Aceite, y  $E_2$  la variable natural Concentración de Catalizador (%), entonces las variables codificadas son  $X_1$  y  $X_2$  mediante las siguientes ecuaciones:

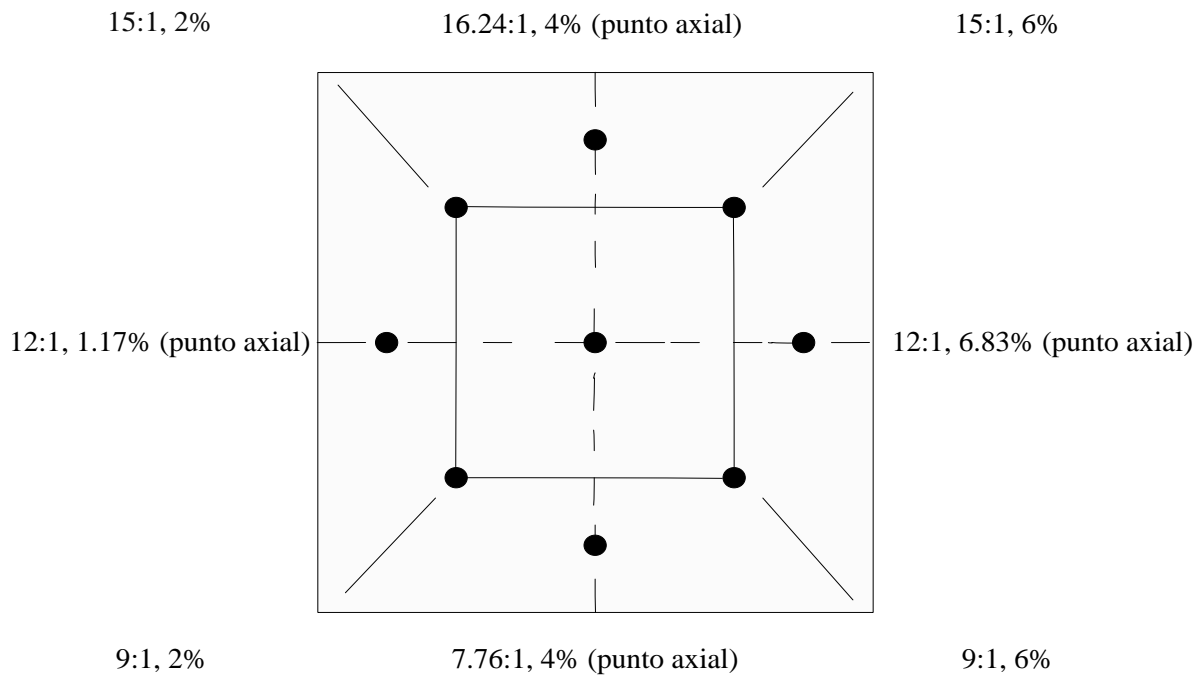
$$x_1 = \frac{E_1 - 9.1}{3} \quad \text{y} \quad x_2 = \frac{E_2 - 6}{2} \quad (2 \text{ y } 3)$$

Las observaciones repetidas en el centro se utilizan para estimar el error experimental y permitir una prueba de adecuación del modelo de primer orden. Asimismo, el modelo está centrado alrededor de las condiciones actuales de operación del proceso.

Pero, antes de explorar la trayectoria de máximo ascenso, son necesarios los siguientes pasos:

- 1.- Realizar un análisis de varianza para ver la significancia de los factores (aquí podemos ver si hay o no curvatura).
- 2.- Encontrar el modelo de regresión de primer orden.
- 3.- Investigar la idoneidad del modelo de primer orden mediante el ANOVA.

Para el Diseño de Superficie de Respuesta, se usó el Diseño Central Compuesto Rotacional (DCCR), especialmente útil en los experimentos secuenciales, porque permitió ampliar experimentos factoriales anteriores al agregar puntos axiales y centrales (ver figura4). De esta forma se pudo obtener el modelo de segundo orden.



*Figura 4.* Puntos del diseño para el experimento

El DCCR constó de 13 experimentos, que incluyen a 4 puntos factoriales, 4 puntos axiales ( $\alpha$  de rotabilidad = 1.4142) y 5 puntos centrales. La distribución de este modelo se muestra en la Tabla 4. Los resultados del DCCR fueron analizados en el programa TIBCO Statistica 13.4.0.14 (TIBCO Software Inc.).

Tabla 5

*Diseño Central Compuesto con 5 puntos centrales*

| <b>Corrida</b> | <b>X<sub>1</sub></b> | <b>X<sub>2</sub></b> |
|----------------|----------------------|----------------------|
| 1              | -1.00000             | -1.00000             |
| 2              | -1.00000             | 1.00000              |
| 3              | 1.00000              | -1.00000             |
| 4              | 1.00000              | 1.00000              |
| 5              | -1.41421             | 0.00000              |
| 6              | 1.41421              | 0.00000              |
| 7              | 0.00000              | -1.41421             |
| 8              | 0.00000              | 1.41421              |
| 9              | 0.00000              | 0.00000              |
| 10             | 0.00000              | 0.00000              |
| 11             | 0.00000              | 0.00000              |
| 12             | 0.00000              | 0.00000              |
| 13             | 0.00000              | 0.00000              |

Se determinó el Análisis de Varianza (ANOVA) para ver si los factores estudiados son significativos, actuando sobre la variable dependiente, obteniendo los valores de los grados de libertad, suma de cuadrados y  $\rho$ , utilizando una significancia de 0.05. Se generó gráficos de Superficie de Respuesta y diagramas de contorno para evaluar la posible optimización de la variable dependiente.

## CAPÍTULO 4

### Resultados y Discusiones

#### 4.1 Viscosidad del Aceite de Soja Usado

Se halló empleando el Viscosímetro Rotatorio Brookfield DV-III, en donde se usó el Spindle RV1. La tabla 6 muestra la velocidad dinámica del aceite de soja usado.

Tabla 6

*Viscosidad Ascendente*

| Viscosidad (mPa.s) | Velocidad (rpm) | % Torque (%) | Spindle |
|--------------------|-----------------|--------------|---------|
| <b>0.00</b>        | 10.00           | -0.54        | RV1     |
| <b>15.50</b>       | 20.00           | 3.11         | RV1     |
| <b>24.67</b>       | 30.00           | 7.36         | RV1     |
| <b>30.50</b>       | 40.00           | 12.21        | RV1     |
| <b>35.80</b>       | 50.00           | 17.90        | RV1     |
| <b>40.67</b>       | 60.00           | 24.35        | RV1     |
| <b>44.71</b>       | 70.00           | 31.26        | RV1     |
| <b>48.38</b>       | 80.00           | 38.71        | RV1     |
| <b>51.78</b>       | 90.00           | 46.57        | RV1     |
| <b>54.80</b>       | 100.00          | 54.80        | RV1     |

La Figura 5 muestra que el Aceite de Soja Usado, es un fluido No Newtoniano, debido a que al aumentar las velocidades del Spindle 1, la viscosidad se ve afectada.

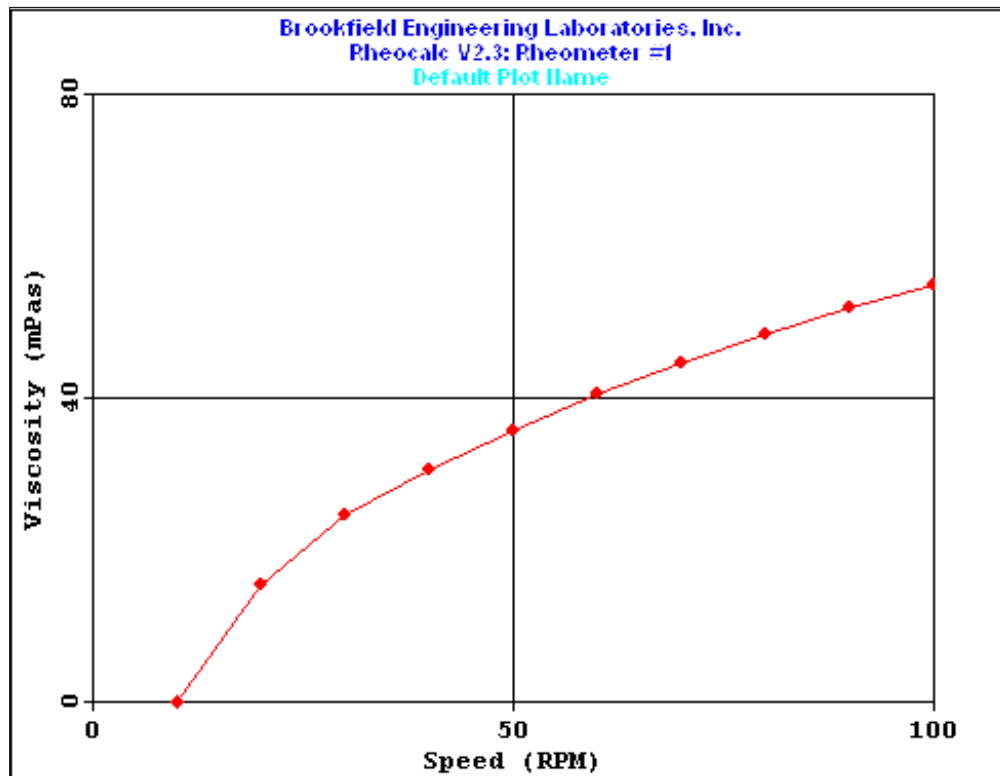


Figura 5. Viscosidad dinámica del Aceite de Soja Usado

## 4.2 Datos estadísticos

### 4.2.1 Modelo de Primer Orden

Para analizar los datos, se hizo uso del Software TIBCO Statistica 13.4.0.14, en donde se usa el diseño factorial  $2^2$ , con cinco puntos centrales para la verificación del modelo de primer orden (con Error Puro). La Tabla 7 muestra los resultados del diseño planteado.

Tabla 7

*Resultados de Datos experimentales con 5 puntos centrales*

| Corrida | Variables de Proceso |       | Variables Codificadas |       | Rendimiento |
|---------|----------------------|-------|-----------------------|-------|-------------|
|         | $E_1$                | $E_2$ | $X_1$                 | $X_2$ | Y           |
| 1       | 9:1                  | 2     | -1                    | -1    | 10.5        |
| 2       | 9:1                  | 6     | -1                    | 1     | 13.7        |
| 3       | 15:1                 | 2     | 1                     | -1    | 55.2        |
| 4       | 15:1                 | 6     | 1                     | 1     | 60.9        |
| 5       | 12:1                 | 4     | 0                     | 0     | 38.7        |
| 6       | 12:1                 | 4     | 0                     | 0     | 38.4        |
| 7       | 12:1                 | 4     | 0                     | 0     | 39.1        |
| 8       | 12:1                 | 4     | 0                     | 0     | 39.9        |
| 9       | 12:1                 | 4     | 0                     | 0     | 38.3        |

#### ***4.2.1.1. Análisis de Varianza del Rendimiento del Modelo de Primer Orden***

El ANOVA observado en la Tabla 8, se encuentra que la variable de estudio Relación etanol:aceite (REA) su valor p es de  $0.000 < 0.05$  por lo tanto es significativo; así mismo la otra variable de estudio su valor p es  $0.002821 < 0.05$  arrojando un valor de significancia. Se observa que la REA genera mayores diferencias que la Concentración del Catalizador (CC), porque tiene mayor suma de cuadrados.

Tabla 8

*Análisis de Varianza del Rendimiento*

| <b>Análisis de Varianza del Rendimiento</b> |           |           |          |           |
|---|-----------|-----------|----------|-----------|
| <b>FACTOR</b>                               | <b>SS</b> | <b>GL</b> | <b>F</b> | <b>P</b>  |
| Curvatura                                   | 30.505    | 1         | 72.286   | 0.001050* |
| REA mol/mol (X <sub>1</sub> )               | 2129.822  | 1         | 5046.973 | 0.000000* |
| CC % (X <sub>2</sub> )                      | 18.062    | 1         | 42.802   | 0.002821* |
| X <sub>1</sub> por X <sub>2</sub>           | 1.102     | 1         | 2.613    | 0.181326  |
| Error Puro                                  | 1.688     | 4         |          |           |
| Total SS                                    | 2181.180  | 8         |          |           |

\* Términos significativos ( $p \leq 0.05$ ), 95% nivel de significancia

Además de del nivel de significancia de las variables de estudio, la curvatura fue significativa, no hay interrelación entre las variables de estudio esto significó la aplicación del modelo central compuesto que se muestra en la Tabla 9, para obtener un modelo de segundo orden.

#### **4.2.2 Modelo de Segundo Orden**

Se formó el diseño central compuesto (Superficie de Respuesta), mediante el diseño 2/1/10, la cual se añadió tres puntos centrales y se obtuvo 13 corridas, con 5 puntos centrales, y se obtuvo los siguientes resultados presentado en la tabla 9 analizándolos con Superficie de Respuesta.

Los experimentos a realizar por medio del DCCR tomando el nuevo punto (0,0) en (85, 175) y agregando puntos axiales en +- 1.414 queda como:

Tabla 9

*Resultados de Diseño Central Compuesto con puntos axiales y puntos centrales*

| Corrida | Variables de Proceso     |       | Variables Codificadas |                | Rendimiento |
|---------|--------------------------|-------|-----------------------|----------------|-------------|
|         | Relación Molar (mol/mol) | CC(%) | X <sub>1</sub>        | X <sub>2</sub> | Y           |
| 1       | 9:1                      | 2     | -1                    | -1             | 10.5        |
| 2       | 9:1                      | 6     | -1                    | 1              | 13.7        |
| 3       | 15:1                     | 2     | 1                     | -1             | 55.6        |
| 4       | 15:1                     | 6     | 1                     | 1              | 60.9        |
| 5       | 12:1                     | 4     | 0                     | 0              | 38.7        |
| 6       | 12:1                     | 4     | 0                     | 0              | 38.4        |
| 7       | 12:1                     | 4     | 0                     | 0              | 39.1        |
| 8       | 12:1                     | 4     | 0                     | 0              | 39.9        |
| 9       | 12:1                     | 4     | 0                     | 0              | 38.3        |
| 10      | 16.24:1                  | 4     | 1.414                 | 0              | 65.7        |
| 11      | 7.76:1                   | 4     | -1.414                | 0              | 11.2        |
| 12      | 12:1                     | 1.17  | 0                     | -1.414         | 36.1        |
| 13      | 12:1                     | 6.83  | 0                     | 1.414          | 43.2        |

#### ***4.2.2.1. Análisis de Varianza de Rendimiento del Modelo de Segundo Orden***

La tabla 10 muestra que el análisis de varianza para el rendimiento. Se observa que el componente lineal de la relación molar etanol:aceite (REA) es significativo (0.00000), así mismo el componente cuadrático de REA es significativo (0.0086). El componente lineal de la concentración del catalizador (CC) es significativo (0.000543) en cambio el

componente cuadrático no es significativo (0.0768), tampoco se encuentra una interrelación entre las variables estudiadas.

Tabla 10

*Análisis de Varianza del rendimiento de biodiesel*

| Factor                  | ANOVA; R-sqr=.98352 |    |          |          |          |
|-------------------------|---------------------|----|----------|----------|----------|
|                         | SS                  | df | MS       | F        | p        |
| (1)REA mol/mol(Lineal)  | 3585.971            | 1  | 3585.971 | 8497.562 | 0.000000 |
| REA mol/mol(Cuadrático) | 9.748               | 1  | 9.748    | 23.099   | 0.008609 |
| (2)CC %(Lineal)         | 42.971              | 1  | 42.971   | 101.826  | 0.000543 |
| CC %(Cuadrático)        | 2.371               | 1  | 2.371    | 5.617    | 0.076813 |
| 1L by 2L                | 1.102               | 1  | 1.102    | 2.613    | 0.181326 |
| Pure Error              | 1.688               | 4  | 0.422    |          |          |
| Total SS                | 3702.089            | 12 |          |          |          |

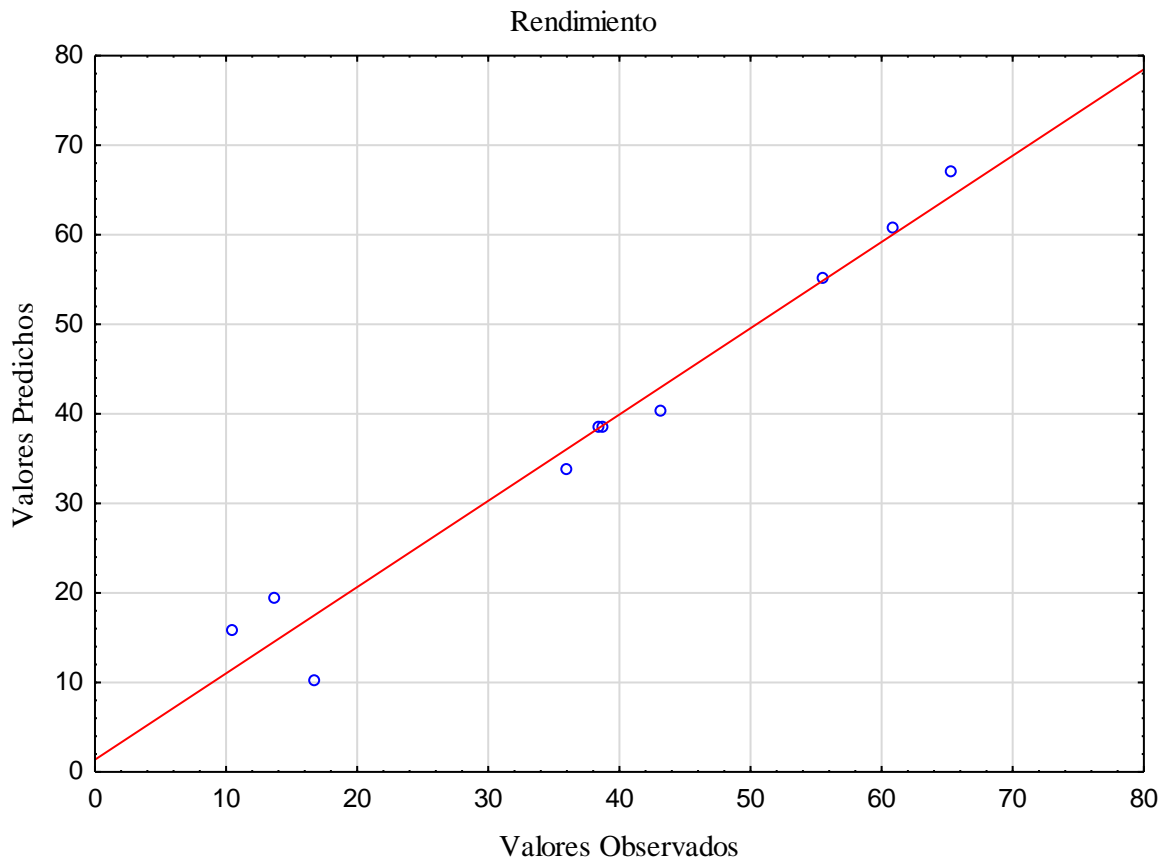
Nota:  $X_1$ : Relación Molar etanol:aceite y  $X_2$

\*Términos significativos ( $p \leq 0.05$ )

El modelo estudiado presenta la siguiente ecuación:

$$\text{Rendimiento} = -67.5 + 9.86X_1 + 1.28X_2 - 0.132X_1 * X_1 - 0.146X_2 * X_2 + 0.087X_1 * X_2 \quad (4)$$

En la figura 6 se muestra los valores observados y predichos para la variable de rendimiento. Se observa que los puntos están cerca de la línea de referencia, esto da a entender que los datos son similares a los datos obtenidos por los modelos de regresión, por lo tanto son adecuados.



*Figura 6.* Valores Predichos y Valores Observados para la variable de Rendimiento (%)

Las condiciones óptimas para obtener un mejor rendimiento están a partir de valores mayores a 15:1 de relación molar etanol:aceite y una concentración de 6% de óxido de calcio que es el catalizador, estas condiciones se muestran en las figuras 7 y 8.

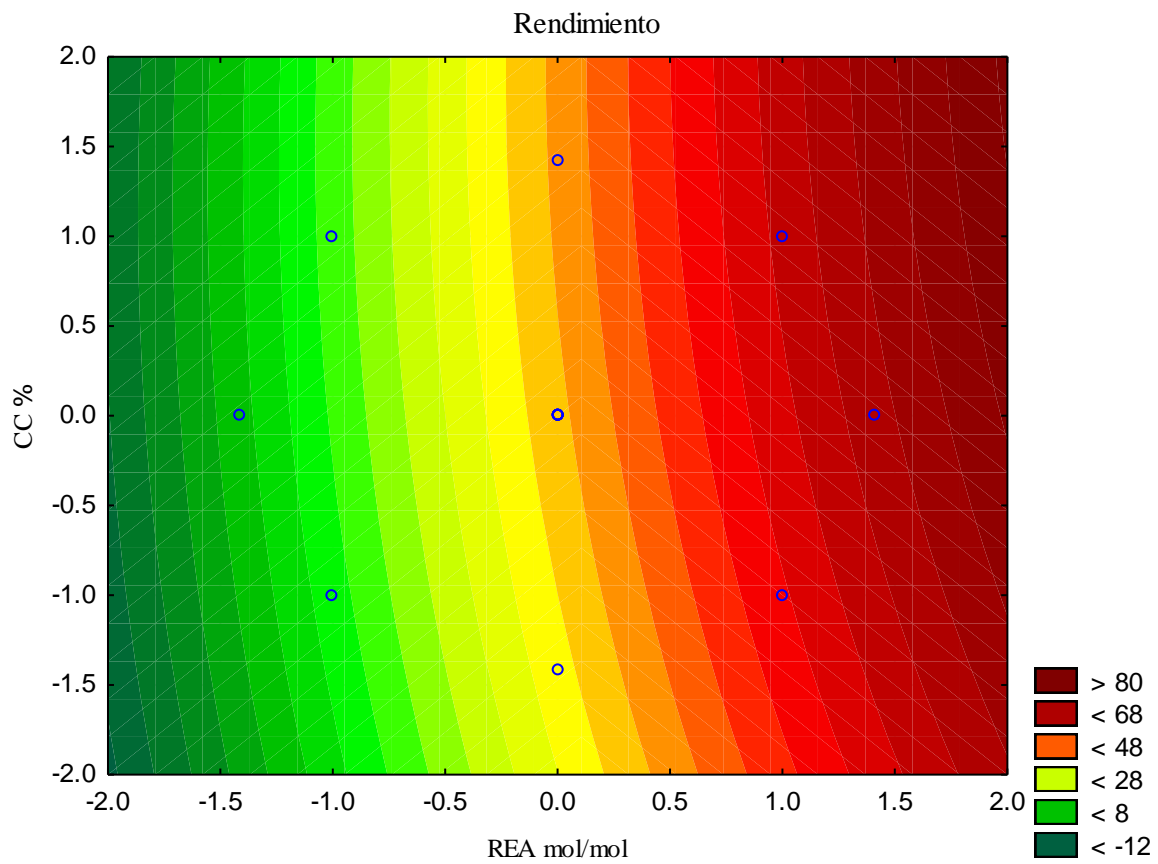


Figura 7. Diagrama de contorno de Rendimiento de Biodiesel (%)

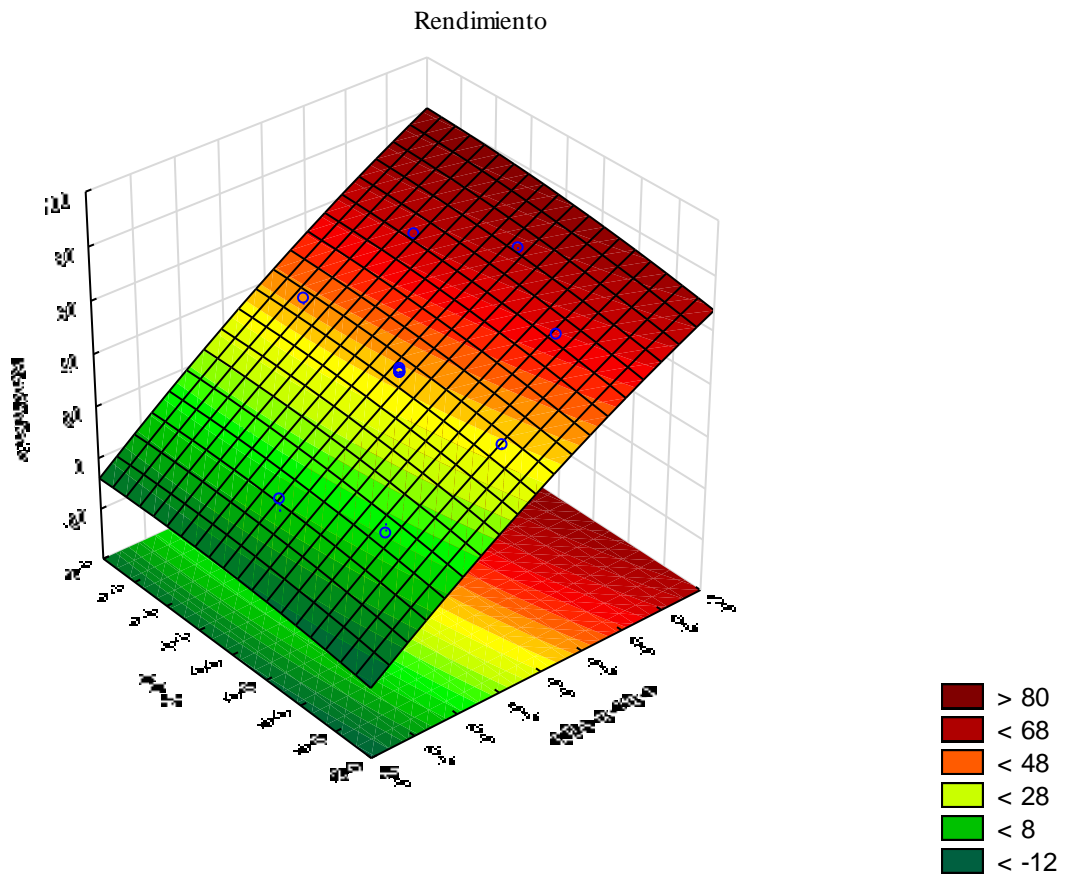
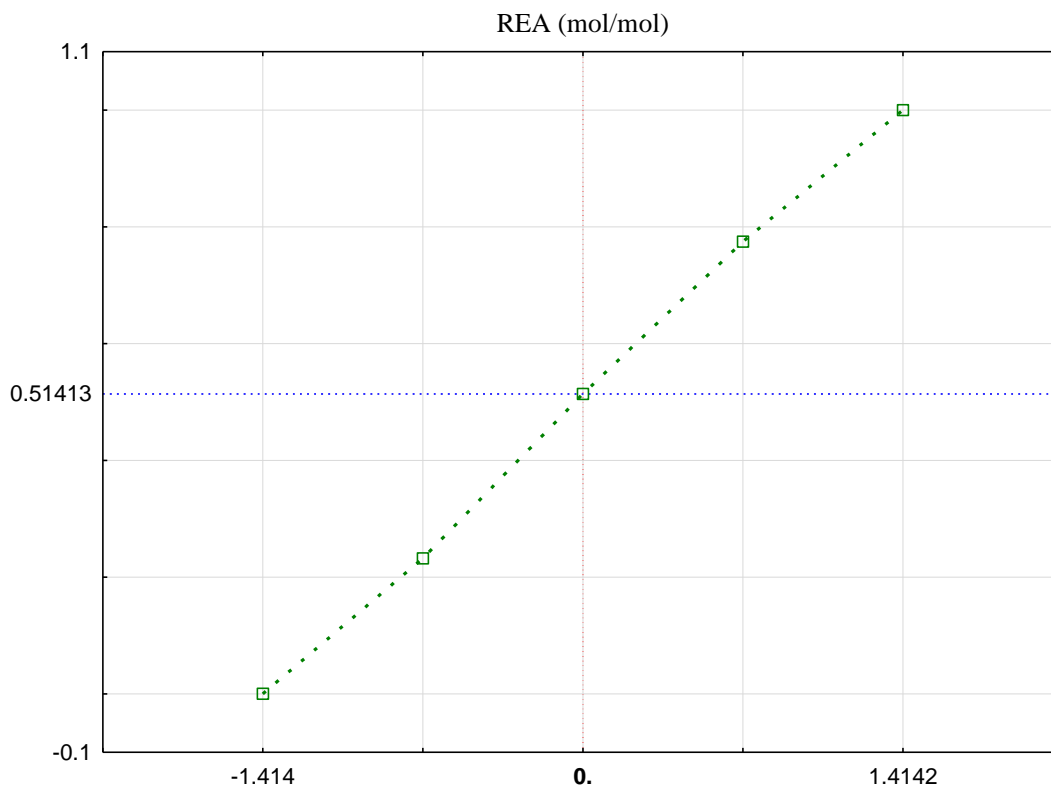


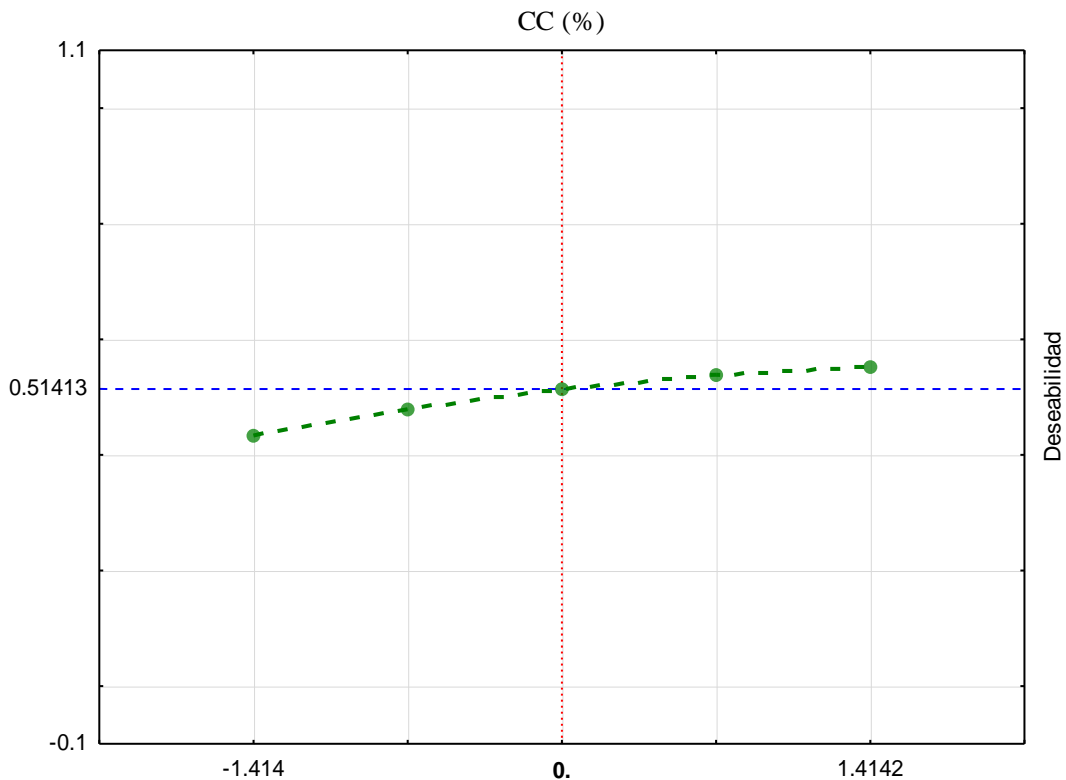
Figura 8. Diagrama de superficie de respuesta del rendimiento de biodiesel (%)

Claudia et al. (2014) mencionan que una de las variables que más afecta en la conversión del biodiesel es la relación molar alcohol:aceite (Alenezi, Santos, Raymahasay, y Leeke, 2013). Esto también es confirmado por Musa (2016), al indicar sobre la dinámica de la relación molar en el rendimiento del biodiesel. Las pruebas obtenidas de los ensayos realizados, confirman que la relación molar etanol:aceite fue la que más influyó en el rendimiento de biodiesel, tal como se muestra en la figura 9, que hay un crecimiento exponencial en el rendimiento a partir de tener una mayor relación molar.



*Figura 9.* Efecto principal de la Relación Molar etanol:aceite en el rendimiento de biodiesel

La figura 10 nos muestra el efecto del óxido de calcio (concentración de catalizador en %), sobre el rendimiento de biodiesel, se observa un ligero aumento de rendimiento de biodiesel y a partir de concentraciones mayores al 6%, el rendimiento tiende a casi estabilizarse, no mostrándose ese ligero aumento de rendimiento del biodiesel.



*Figura 10.* Efecto principal de la concentración de catalizador (%) en el rendimiento de biodiesel

### 4.3 Medición de Viscosidad del Biodiesel

La muestra que obtuvo mayor rendimiento, fue sometido a la prueba de viscosidad con los mismos parámetros que se sometió el aceite de soja usado mostrado en la tabla 1, los resultados obtenidos del Software se muestran a continuación en la tabla 11, en este caso se sometió al biodiesel obtenido a partir de 15:1 de relación molar etanol:aceite y 6% de Concentración de Óxido de Calcio, cuyo rendimiento fue de 60.9%

Lo que se observa es una disminución importante de la viscosidad respecto al aceite de soja usado.

Tabla 11

*Viscosidad del Biodiesel a 19°C (Temperatura ambiente) y 40°C*

| Viscosidad (mPa.s) |       | Velocidad (rpm) |        | % Torque (%) |       | Spindle     |
|--------------------|-------|-----------------|--------|--------------|-------|-------------|
| 19°C               | 40°C  | 19 °C           | 40°C   | 19°C         | 40°C  | 19°C y 40°C |
| 0.00               | 0.00  | 010             | 10.00  | 000          | -0.09 | RV1         |
| 5.00               | 3.00  | 020             | 20.00  | 001          | 0.62  | RV1         |
| 7.67               | 4.67  | 030             | 30.00  | 002          | 1.41  | RV1         |
| 8.75               | 6.00  | 040             | 40.00  | 004          | 2.38  | RV1         |
| 10.00              | 7.00  | 050             | 50.00  | 005          | 3.47  | RV1         |
| 11.17              | 7.83  | 060             | 60.00  | 007          | 4.66  | RV1         |
| 12.29              | 8.57  | 070             | 70.00  | 008          | 5.98  | RV1         |
| 13.13              | 9.13  | 080             | 80.00  | 010          | 7.35  | RV1         |
| 13.78              | 10.11 | 090             | 90.00  | 012          | 9.14  | RV1         |
| 15.30              | 10.90 | 100             | 100.00 | 014          | 10.92 | RV1         |

La viscosidad dinámica a 40°C se muestra en la figura 12, donde se puede apreciar cuál es la influencia de las rpm en la viscosidad dinámica del biodiesel, de estos valores obtenidos, se trabajó con la viscosidad 7.83 Pa.s, siendo este valor tomado de la velocidad de ensayo a 60 rpm multiplicado con el factor 1 (Anexo 4). Con este valor se procedió a hallar la viscosidad cinemática, para ser cotejada con el Diesel B5 S-50, comparándose si estos dos fluidos están dentro del parámetro de viscosidad dada por la normativa ASTM D6751-09.

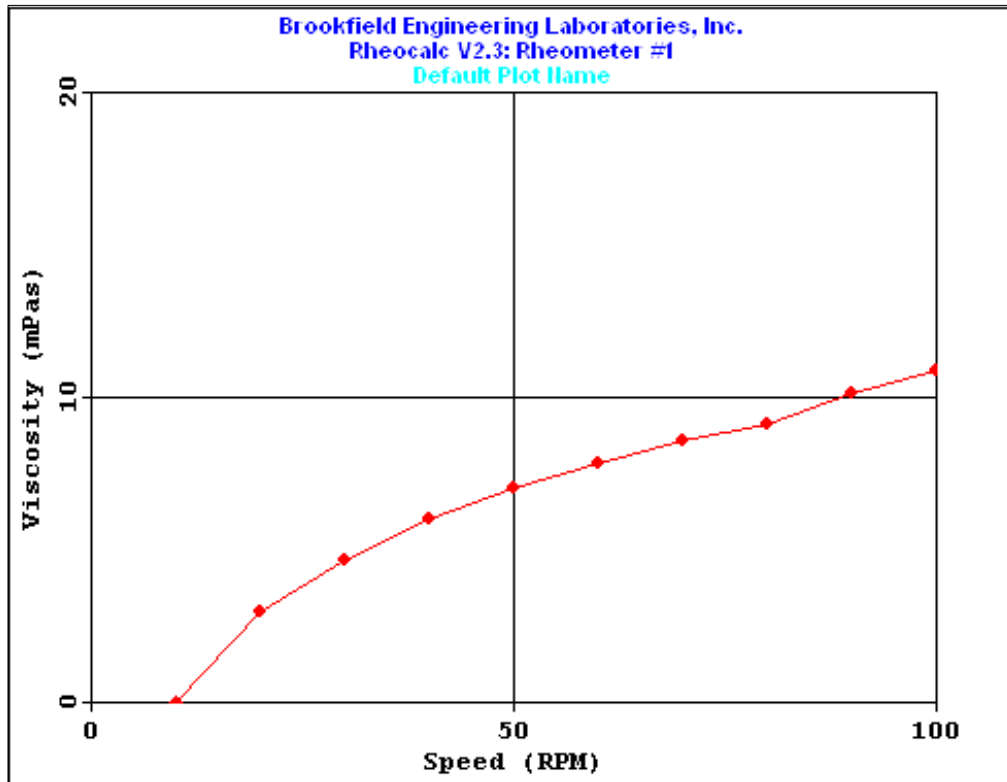


Figura 11. Viscosidad dinámica del biodiesel con mayor rendimiento a 40°C

Los valores obtenidos reométricamente del biodiesel, se interpretó en Excel, tanto a temperatura ambiente como a 40°C, siendo su comportamiento dilatante, es decir como fluido No Newtoniano, tal como se aprecia en la figura 12, además su índice de comportamiento ( $n$ ) da mayor a 1 ( $n > 1$ ). A 19 °C el  $n=1.574$  y a 40°C el  $n=1.750$ , de esta manera se pudo ver que a mayor temperatura el biodiesel tiene a comportarse como un fluido dilatante.

Amado y Mora (2006) mencionan que el biodiesel tiene a comportarse como un fluido No Newtoniano dilatante cuando su temperatura aumenta, y que a temperatura ambiente, tiende a comportarse como un Fluido Newtoniano, posiblemente debido a la presencia de algunos glicerolés presentes el biodiesel.

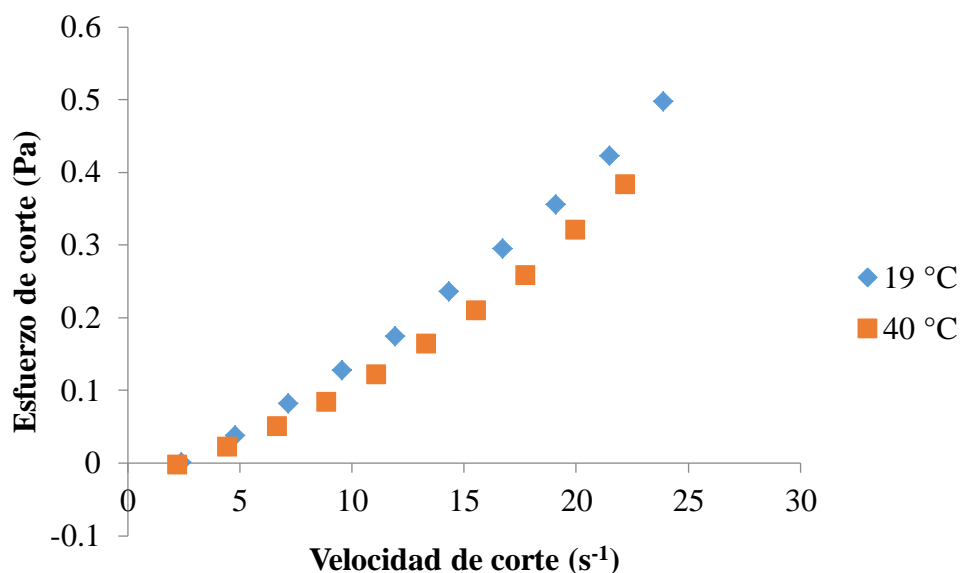


Figura 12. Comportamiento de flujo del biodiesel a 19°C y 40°C

Para la medición de la viscosidad cinemática, se trabajó con la densidad del biodiesel cuyo resultado fue 0.91 gr/cm<sup>3</sup>, y se trabajó con el factor de viscosidad dinámica a 60 rpm cuya viscosidad fue de 7.83 mPas.

Luego de obtenido estos datos, se procedió a obtener la viscosidad cinemática y se comparó con la norma ASTM para biodiesel D6751-09, cuyo rango establecido para el uso de motores de automóviles es desde 1.9 a 6.0 Centistokes (cSt).

Con esta medición de viscosidad del ensayo con mayor rendimiento, se comparó con el reporte de análisis de Diesel B5 S-50, proveniente de la Refinería La Pampilla (Anexo 7), de la cual su viscosidad cinemática a 40 °C fue de 3.1 cSt, la cual está dentro de los parámetros de la norma ASTM. La viscosidad cinemática del ensayo trabajado (Biodiesel 100%) con 15:1 de relación etanol:aceite y 6% de catalizador a 40 °C, nos dio

8.60 mm<sup>2</sup>/s, esto convertido en Centistokes (cSt) es igual a 8.60 cSt., como se mencionó anteriormente, no está dentro de la normativa ASTM.

El resultado de viscosidad cinemática a 40 °C del Biodiesel al 100% del ensayo con mayor rendimiento obtenido en laboratorio, no cumple con la norma ASTM. Sin embargo Bilgin et al., (2015) mencionan que al aumentar el rendimiento de la reacción, la viscosidad del biodiesel tiende a disminuir. Es decir con un mejor rendimiento se podrá tener referencias de la disminución de la viscosidad.

## CAPÍTULO 5

### Conclusiones y recomendaciones

#### 5.1 Conclusiones

Para la obtención de biodiesel, se puede emplear un catalizador de bajo costo que evita el lavado del biodiesel, en este caso el uso del Óxido de Calcio, permitió obtener buenos resultados con un catalizador de bajo costo y de rápido alcance.

El uso de alcohol de 96° es comercial y puede ser usado como un insumo para la obtención de biodiesel, incluso aumentado su presencia en la reacción, aumentaría el rendimiento del biodiesel

Se observó que la relación molar etanol:aceite, tiene mayor efecto en el rendimiento, aumentando su relación molar mayores a 15:1, se podría obtener un mayor rendimiento, según lo observado en la región óptima a trabajar por la metodología superficie de respuesta.

La concentración de óxido de calcio, no tiene un efecto significativo en el rendimiento, sin embargo, hay un ligero aumento no pronunciado al hacer uso más de 6% de concentración.

La viscosidad del biodiesel no está dentro de los límites para su uso en motores de automóviles; sin embargo al obtener mayores rendimientos de biodiesel, la viscosidad será menor y será apropiado para el parque automotor.

## 5.2 Recomendaciones

Se recomienda:

- Realizar ensayos con mayores concentraciones de alcohol, mayores a 15:1 de relación molar etanol:aceite y el porcentaje de óxido de calcio cercano al 6% y ver cuál es el óptimo para un mejor rendimiento, comparando sus propiedades con la norma ASTM aplicable al biodiesel.
- Trabajar con ensayos con las variables de temperatura, velocidad de agitación y tiempo de reacción, usando los insumos usados en esta investigación, evaluando su efecto en el rendimiento de biodiesel.
- Observar los efectos en el rendimiento de biodiesel del óxido de calcio en grados mayores al 50% de pureza.
- Realizar estudios de obtención de etanol a partir de residuos orgánicos para la obtención de un biodiesel más ecológico y así estudiar si esto reduce los impactos ambientales negativos.
- Evaluar en motores la combustibilidad del biodiesel obtenido a partir de las materias primas descritas en el presente proyecto.

## Referencias

- Achi, C. G., Castro, P., y Cortijo, E. (2008). Manual de construcción y uso de Reactor para producción de biodiésel a pequeña escala. *Soluciones Prácticas-ITDG*.
- Alenezi, R., Santos, R. C. D., Raymahasay, S., y Leeke, G. A. (2013). Improved biodiesel manufacture at low temperature and short reaction time. *Renewable Energy*, 53, 242–248. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.11.019>
- Álvarez, C. (2009). Biocombustibles: desarrollo histórico-tecnológico, mercados actuales y comercio internacional. *Economía Informa*, (359), 63–89.
- Amado, E., y Mora, L. (2006). Análisis de la variación de la viscosidad cinemática de un aceite vegetal en función de la temperatura. *Bistua: Revista de La Facultad de Ciencias Básicas (Universidad de Pamplona)*, 4(2), 54–56. Retrieved from [http://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portallIG/home\\_10/recursos/general/pag\\_contenido/publicaciones/bistua\\_revista\\_ciencias\\_basica/2006/12082010/rev\\_bistua\\_vol4\\_num2\\_art7.pdf](http://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portallIG/home_10/recursos/general/pag_contenido/publicaciones/bistua_revista_ciencias_basica/2006/12082010/rev_bistua_vol4_num2_art7.pdf)
- Ambat, I., Srivastava, V., y Sillanpää, M. (2018). Recent advancement in biodiesel production methodologies using various feedstock: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90(February 2017), 356–369. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.069>
- An, H., Yang, W. M., y Li, J. (2015). Effects of ethanol addition on biodiesel combustion: A modeling study. *Applied Energy*, 143(x), 176–188. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.033>
- Antonio Carmona, I. D. (2018). Producción de biodiesel a partir de grasa animal proveniente del Rastro TIF 377, 1–5.
- ASTM (American Section of the International Standard D445). (2013). Método de prueba estándar para la viscosidad cinemática de líquidos transparentes y opacos (y cálculo de la viscosidad dinámica) D445-12. West Conshohocken: ASTM International.
- Barbosa, D. D. C., Serra, T. M., Meneghetti, S. M. P., y Meneghetti, M. R. (2010).

- Biodiesel production by ethanolsis of mixed castor and soybean oils. *Fuel*, 89(12), 3791–3794. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.07.016>
- Batani, H., y Karimi, K. (2016). Biodiesel production from castor plant integrating ethanol production via a biorefinery approach. *Chemical Engineering Research and Design*, 107, 4–12. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2015.08.014>
- Beatriz Lobo, B., Da Costa, A. E., Klimeck Gouvêa, C. A., Andrezza, J. K., y Al-Rubaie, K. S. (2017). Optimization for producing biodiesel from ethanol and waste frying oil with a high concentration of ester. *Revista Tecnica de La Facultad de Ingenieria Universidad Del Zulia*, 40(3), 193–199. <https://doi.org/10.17533/udea.redin.n79a17>
- Bilgin, A., Gülüm, M., Koyuncuoglu, İ., Nac, E., y Cakmak, A. (2015). Determination of Transesterification Reaction Parameters Giving the Lowest Viscosity Waste Cooking Oil Biodiesel. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 195, 2492–2500. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.06.318>
- Bulla Pereira, E. A. (2014). *Diseño del proceso de producción del biodiesel a partir de aceites de fritura*. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Caballero, E., Vidal, C., Morgan, M., Espinosa, M., y Roblero, I. (2012). Aceites reciclados de cocina como materia prima de próxima generacion para la obtención de biodiésel en Chiapas. *Ide@s CONCYTEG*, 7(85), 895–910.
- Cabello, C., Rincón, S., y Zepeda, A. (2016). Catalizadores heterogéneos utilizados para la obtención de biodiesel. *Afinidad*, 74(March), 51–59. Retrieved from <http://www.raco.cat/index.php/afinidad/article/view/320756>
- Can, Ö. (2014). Combustion characteristics, performance and exhaust emissions of a diesel engine fueled with a waste cooking oil biodiesel mixture. *Energy Conversion and Management*, 87, 676–686. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.07.066>
- Castro, P., Coello, J., y Castillo, L. (2007). *Opciones para la producción y uso del Biodiesel en el Perú* (1st ed.). Lima: Soluciones Prácticas-ITDG.
- Chen, W., Wang, Y., Ding, M., Shi, S., y Yang, Z. (2017). Crystallization behaviors and rheological properties of biodiesel derived from methanol and ethanol. *Fuel*, 207, 503–

509. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.06.121>

Cheung, C. S., Man, X. J., Fong, K. W., y Tsang, O. K. (2015). Effect of Waste Cooking Oil Biodiesel on the Emissions of a Diesel Engine. *Energy Procedia*, 66, 93–96. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.02.050>

Choi, Y., Choi, J., Park, T., Kang, S., y Lee, T. (2015). Characterization of Particulate Emissions from Biodiesel using High Resolution Time of Flight Aerosol Mass Spectrometer. *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 9(1), 78–85. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.5572/ajae.2015.9.1.078>

Claudia, B. R., Jiménez, R., Nayibe, L., y Nelly, M. P. (2014). Obtención de Biodiesel (etil-éster) Mediante Catálisis Básica a Nivel Planta Piloto Derivado de Aceites Usados de la Industria Alimenticia. *Revista Especializada En Ingeniería*, 8.

Colombo, K., Ender, L., y Barros, A. A. C. (2016). The study of biodiesel production using CaO as a heterogeneous catalytic reaction. *Egyptian Journal of Petroleum*, 26(2), 341–349. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2016.05.006>

Comercio, E. (2018, January 19). Perú ya utiliza un 5% de biodiésel como combustible. *El Comercio*. Retrieved from <https://elcomercio.pe/economia/lec/peru-utiliza-5-biodiesel-combustible-noticia-490303>

Daud, N. M., Rozaimah, S., Sheikh, S., y Yaakob, Z. (2014). IChemE Production of biodiesel and its wastewater treatment technologies: A review. *Process Safety and Environmental Protection*, 4(October), 487–508. Retrieved from [www.elsevier.com/locate/jsep](http://www.elsevier.com/locate/jsep)

Diya'Uddeen, B. H., Abdul Aziz, a. R., Daud, W. M. a W., y Chakrabarti, M. H. (2012). Performance evaluation of biodiesel from used domestic waste oils: A review. *Process Safety and Environmental Protection*, 90(3), 164–179. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2012.02.005>

Fajriutami, T., Chan Seo, Y., y Hwan Chu, Y. (2013). Optimization of two-step catalyzed biodiesel production from soybean waste. *Journal of Material Cycles y Waste Management*, (15), 179–186. <https://doi.org/10.1007/s10163-012-0106-5>

- FAS Lima. (2017). *Peru's biodiesel production expected to resume amidst a CVD investigation of U.S. ethanol*. USDA Foreign Agricultural Service. Lima. Retrieved from [https://gain.fas.usda.gov/Recent GAIN Publications/Biofuels Annual\\_Lima\\_Peru\\_9-20-2017.pdf](https://gain.fas.usda.gov/Recent%20GAIN%20Publications/Biofuels%20Annual_Lima_Peru_9-20-2017.pdf)
- Font de Mora, E., Torres, C., y Valero, A. (2015). Thermo-economic Analysis of Biodiesel Production from Used Cooking Oils. *Sustainability*, 7(5), 6321–6335. <https://doi.org/10.3390/su7056321>
- Gebremariam, S. N., y Marchetti, J. M. (2018). Economics of biodiesel production: Review. *Energy Conversion and Management*, 168(May), 74–84. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.05.002>
- Grey C., C. O., Edgardo R., A. M., y Beatriz M., C. A. (2014). Transesterificación de aceites vegetales empleando catalizadores heterogéneos. *Prospect.*, 12(2), 90–104.
- Guarieiro, L. L. N., Pinto, A. C., De Aguiar, P. F., y Ribeiro, N. M. (2008). Metodologia analítica para quantificar o teor de biodiesel na mistura biodiesel:diesel utilizando espectroscopia na região do infravermelho. *Química Nova*, 31(2), 421–426. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422008000200041>
- Haigh, K. F., Vladisavljević, G. T., Reynolds, J. C., Nagy, Z., y Saha, B. (2014). Kinetics of the pre-treatment of used cooking oil using Novozyme 435 for biodiesel production. *Chemical Engineering Research and Design*, 92(4), 713–719. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2014.01.006>
- Hamze, H., Akia, M., y Yazdani, F. (2015). Optimization of biodiesel production from the waste cooking oil using response surface methodology. *Process Safety and Environmental Protection*, 94, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2014.12.005>
- Ho, S.-H., Wong, Y.-D., y Chang, V. W.-C. (2014). Evaluating the potential of biodiesel (via recycled cooking oil) use in Singapore, an urban city. *Resources, Conservation and Recycling*, 91, 117–124. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.08.003>
- Islam, A., y Ravindra, P. (2017). *Biodiesel Production with Green Technologies* (1st ed.). Switzerland: Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319->

- Issariyakul, T., Kulkarni, M. G., Dalai, A. K., y Bakhshi, N. N. (2007). Production of biodiesel from waste fryer grease using mixed methanol/ethanol system. *Fuel Processing Technology*, 88(5), 429–436. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2006.04.007>
- Kadapure, S. A., Kirti, P., Singh, S., Kokatnur, S., Hiremath, N., Variar, A., ... Chittaragi, R. (2017). Studies on process optimization of biodiesel production from waste cooking and palm oil. *International Journal of Sustainable Engineering*, 7038(January), 1–6. <https://doi.org/10.1080/19397038.2017.1420107>
- Kapilan, N., y Birdar, C. S. (2014). Improving the Oxidation Stability of Karanja Oil Biodiesel. *Energy y Environment*, 25(8), 1481–1488. <https://doi.org/10.1260/0958-305X.25.8.1481>
- Kassem, Y., y Çamur, H. (2017). A Laboratory Study of the Effects of Wide Range Temperature on the Properties of Biodiesel Produced from Various Waste Vegetable Oils. *Waste and Biomass Valorization*, 8(6), 1995–2007. <https://doi.org/10.1007/s12649-016-9753-4>
- Kataria, J., Mohapatra, S. K., y Kundu, K. (2018). Biodiesel production from waste cooking oil using heterogeneous catalysts and its operational characteristics on variable compression ratio CI engine. *Journal of the Energy Institute*, (January), 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2018.01.008>
- Knothe, G. (2001). Historical perspectives on vegetable oil based diesel fuels. *U.S. Department of Agricultural Utilization Research in Peoria*, 12(November), 1103–1107.
- Knothe, G., y Steidley, K. R. (2009). A comparison of used cooking oils: A very heterogeneous feedstock for biodiesel. *Bioresource Technology*, 100(23), 5796–5801. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.11.064>
- Kumar, S., Dharma Patria, R., y Ki Lin, C. S. (2015). Techno-Economic Evaluation of Biodiesel Production from Waste Cooking Oil—A Case Study of Hong Kong. *International Journal of Molecular Sciences*, 16(3), 4362–4371.

<https://doi.org/10.3390/ijms16034362>

- Lafont, J. J., Páez, M. S., y Torres, Y. C. (2011). Análisis químico de mezclas biodiesel de aceite de cocina usado y diesel por espectroscopia infrarroja. *Informacion Tecnologica*, 22(4), 35–42. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642011000400005>
- Lam, S. S., Wan Mahari, W. A., Jusoh, A., Chong, C. T., Lee, C. L., y Chase, H. A. (2017). Pyrolysis using microwave absorbents as reaction bed: An improved approach to transform used frying oil into biofuel product with desirable properties. *Journal of Cleaner Production*, 147, 263–272. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.085>
- Latchubugata, C. S., Kondapaneni, R. V., Patluri, K. K., Virendra, U., y Vedantam, S. (2018). Kinetics and Optimization Studies using Response Surface Methodology in Biodiesel Production using Heterogeneous Catalyst. *Chemical Engineering Research and Design*. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2018.05.022>
- Leonel, E. C., Faria, E. H. de, Pimentel, R. C., Nassar, E. J., Ciuffi, K. J., Reis, M. J. dos, y Calefi, P. S. (2012). Aproveitamento da glicerina proveniente da produção de biodiesel na obtenção de híbrido de caulinita para adsorção de Cr<sup>3+</sup>. *Química Nova*, 35(7), 1407–1411. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422012000700022>
- Lin, L., Cunshan, Z., Vittayapadung, S., Xiangqian, S., y Mingdong, D. (2011). Opportunities and challenges for biodiesel fuel. *Applied Energy*, 88(4), 1020–1031. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.09.029>
- Liu, S. H., Lin, Y. C., y Hsu, K. H. (2012). Emissions of regulated pollutants and PAHs from waste-cooking-oil biodieselfuelled heavy-duty diesel engine with catalyzer. *Aerosol and Air Quality Research*, 12(2), 218–227. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2011.09.0144>
- López, L., Bocanegra, J., y Malagón, D. (2015). Obtención de biodiesel por transesterificación de aceite. *Ing. Univ.*, 19(1), 155–172. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.iyu19-1.sprq>
- Lu, T., Cheung, C. S., y Huang, Z. (2013). Influence of Waste Cooking Oil Biodiesel on the Particulate Emissions and Particle Volatility of a DI Diesel Engine. *Aerosol and*

*Air Quality Research*, 13, 243–254. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2012.04.0091>

Ma, F., y Hanna, M. A. (1999). Biodiesel production: a review. *Bioresource Technology*, 70(1), 1–15. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(99\)00025-5](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(99)00025-5)

Malins, K., Kampars, V., y Rusakova, T. (2012). Biodiesel Preparation Using CaO as Catalyst. In *Riga Technical University 53rd International Scientific Conference dedicated to the 150th anniversary and The 1st Congress of World Engineers and Riga Polytechnical Institute / RTU Alumni Biodiesel* (pp. 66–66). Latvija, Riga: Riga: RTU Publishing House.

Man, X. J., Cheung, C. S., y Ning, Z. (2015). Effect of Diesel Engine Operating Conditions on the Particulate Size, Nanostructure and Oxidation Properties when Using Wasting Cooking Oil Biodiesel. *Energy Procedia*, 66, 37–40. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.02.020>

Maneerung, T., Kawi, S., Dai, Y., y Wang, C. H. (2016). Sustainable biodiesel production via transesterification of waste cooking oil by using CaO catalysts prepared from chicken manure. *Energy Conversion and Management*, 123, 487–497. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.06.071>

Mansir, N., Teo, S. H., Rashid, U., Saiman, M. I., Tan, Y. P., Alsultan, G. A., y Taufiq-Yap, Y. H. (2018). Modified waste egg shell derived bifunctional catalyst for biodiesel production from high FFA waste cooking oil. A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82(May), 3645–3655. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.098>

Medina, M., Ospino, Y., y Tejada, L. (2015). Esterificación y Transesterificación de Aceites Residuales para obtener Biodiesel. *Luna Azul*, (40), 25–34. <https://doi.org/10.17151/luaz.2015.40.3>

Mojtaba, M., y Ahmad, S. (2012). Effect of mixture of alcohols on biodiesel properties which produced from waste cooking oils and compare combustion performance and emissions of biodiesels with petrodiesel. *AES Bioflux*, 4(3), 153–164.

Musa, I. A. (2016). The effects of alcohol to oil molar ratios and the type of alcohol on biodiesel production using transesterification process. *Egyptian Journal of Petroleum*,

25(1), 21–31. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2015.06.007>

- Peiter, A. S., Lins, P. V. S., Meili, L., Soletti, J. I., Carvalho, S. H. V., Pimentel, W. R. O., y Meneghetti, S. M. P. (2018). Stirring and mixing in ethylic biodiesel production. *Journal of King Saud University - Science*. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2018.01.010>
- Pereira, E. a. B., Sierra, F. E., y Guerrero, C. a. (2015). Producción de biodiésel usando aceites residuales de fritura y etanol por catálisis alcalina. *Ingeniería Solidaria*, 10(17), 61–69. <https://doi.org/dx.doi.org/10.16925/in.v9i17.806>
- Pisarello, M. L. (2010). Producción de biodiesel: equilibrio fisicoquímico y cinética de esterificación y transesterificación con diferentes catalizadores y alcoholes, 247. Retrieved from <http://bibliotecavirtual.unl.edu.ar:8080/tesis/bitstream/handle/11185/291/tesis.pdf?sequence=1>
- Primata, M., Chan Seo, Y., y Hwan Chu, Y. (2013). Effect of alkali catalyst on biodiesel production in South Korea from mixtures of fresh soybean oil and waste cooking oil. <https://doi.org/10.1007/s10163-012-0111-8>
- Refaat, A. A., Attia, N. K., Sibak, H. A., Sheltawy, S. T., y ElDiwani, G. I. (2008). Production optimization and quality assessment of biodiesel from waste vegetable oil. *International Journal of Environmental Science y Technology*, 5(1), 75–82. <https://doi.org/10.1007/BF03325999>
- Refaat, A. A., El Sheltawy, S. T., y Sadek, K. U. (2008). Optimum reaction time, performance and exhaust emissions of biodiesel produced by microwave irradiation. *International Journal of Environment Science and Technology*, 5(3), 325–322. Retrieved from <http://www.bioline.org.br/request?st08036>
- Rivas, C., Rondón, J., Meléndez, H., Lugo, C., Belandría, L., Uzcátegui, Á., ... Gonzales-Cortes, S. (2017). Transesterificación de aceite de palma en biodiesel utilizando como catalizador un oxido mixto proveniente de hidrotalcita ( Mg / Al ). *Revista Ciencia e Ingeniería*, 38(3), 215–222.
- Roy, A. S., Chingkheihunba, A., y Pakshirajam, K. (2016). An Overview of Production,

- Properties, and Uses of Biodiesel from Vegetable Oil. In *Green Fuels Technology*. India: Springer, Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-30205-8>
- Sarmiento, A. B. (2014). El aceite de palma africana *elae guineensis*: Alternativa de recurso energético para la producción de biodiesel en Colombia y su impacto ambiental. *Prospectiva*, *12*(1), 90–98.
- Sauciuc, A., Dumitrescu, L., Manciulea, I., y Zaha, C. (2011). Studies on recycling of waste cooking oils for biodiesel production. *Environmental Engineering and Management Journal*, *10*(2), 205–211. Retrieved from <http://omicron.ch.tuiasi.ro/EEMJ/>
- Sirisomboonchai, S., Abuduwayiti, M., Guan, G., Samart, C., Abliz, S., Hao, X., ... Abudula, A. (2015). Biodiesel production from waste cooking oil using calcined scallop shell as catalyst. *Energy Conversion and Management*, *95*, 242–247. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.02.044>
- Suranani, S., Maralla, Y., Gaikwad, S. M., y Sonawane, S. H. (2018). Process intensification using corning® advanced-flow™ reactor for continuous flow synthesis of biodiesel from fresh oil and used cooking oil. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, *126*, 62–73. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2018.02.013>
- Susana, S. (2012). Aprovechamiento de Residuos Agroindustriales: Pasado, Presente y Futuro. *BioTecnología*, *16*(2), 14–46.
- Tan, K. T., Gui, M. M., Lee, K. T., y Mohamed, A. R. (2010). An optimized study of methanol and ethanol in supercritical alcohol technology for biodiesel production. *Journal of Supercritical Fluids*, *53*(1–3), 82–87. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2009.12.017>
- Torres, J. J., Rodriguez, N. E., Arana, J. T., Ochoa, N. A., Marchese, J., y Pagliero, C. (2017). Ultrafiltration polymeric membranes for the purification of biodiesel from ethanol. *Journal of Cleaner Production*, *141*, 641–647. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.130>
- Torres, L. A., Ben, C., Alcocer, B. L., y De La Rosa, D. (2017). Efecto de la temperatura y

- del tiempo de reacción sobre la esterificación y la transesterificación de aceites comestibles usados. *Revista de Ciencias Naturales y Agropecuarias*, 4(13), 19–35.
- Trindade, M. (2018). *Increased Biodiesel Efficiency*. (M. (Ed. . Trindade, Ed.) (1st ed.). Brazil: Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-73552-8>
- Ueki, Y., Saiki, S., Hoshina, H., y Seko, N. (2017). Biodiesel fuel production from waste cooking oil using radiation-grafted fibrous catalyts. *Radiation Physics and Chemistry*, 143, 41–46. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2017.09.010>
- Ueki, Y., Saiki, S., Hoshina, H., Seko, N., Laplante, B., Pereira, E. a. B., ... Kundu, K. (2017). Biodiesel fuel production from waste cooking oil using radiation-grafted fibrous catalyts. *Radiation Physics and Chemistry*, 143(3), 41–46. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2017.09.010>
- Ullah, Z., Bustam, M. A., y Man, Z. (2015). Biodiesel production from waste cooking oil by acidic ionic liquid as a catalyst. *Renewable Energy*, 77, 521–526. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.12.040>
- Vásquez, A., de la Cruz Sandoval, R., y Coello, F. (2016). *Los Biocombustibles: Desarrollos recientes y tendencias internacionales* (Documento de trabajo N°36). *Gerencia de Políticas y Análisis Económico-Osinerning*. Perú.
- Verma, P., Dwivedi, G., y Sharma, M. P. (2017). Comprehensive analysis on potential factors of ethanol in Karanja biodiesel production and its kinetic studies. *Fuel*, 188, 586–594. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.10.062>
- Verma, P., y Sharma, M. P. (2016). Comparative analysis of effect of methanol and ethanol on Karanja biodiesel production and its optimisation. *Fuel*, 180, 164–174. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.04.035>
- Vicente, A. C. (2012). *Obtención de biodiesel por transesterificación de aceites vegetales: nuevos métodos de síntesis*. Universidad de Extremadura, Badajoz. Retrieved from [http://dehesa.unex.es:8080/xmlui/bitstream/handle/10662/326/TDUEX\\_2012\\_Pardal.pdf?sequence=1](http://dehesa.unex.es:8080/xmlui/bitstream/handle/10662/326/TDUEX_2012_Pardal.pdf?sequence=1)
- Vidal, A. I., Quintero, J. C., y Herrera, I. (2017). Análisis de ciclo de vida de la producción

- de biodiesel a partir de aceite vegetal usado. *Dyna*, 84(201), 155–162.  
<https://doi.org/10.15446/dyna.v84n201.54469>
- Wang, K., Jiang, J., Si, Z., y Liang, X. (2013). Biodiesel production from waste cooking oil catalyzed by solid acid SO42-/T...: EBSCOhost. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*. Retrieved from <http://web.a.ebscohost.com/ehost/pdfviewer/pdfviewer?sid=0f8f7e44-ee52-4abc-942a-d05d63958647%40sessionmgr4004yvid=1yhid=4207>
- Zabeti, M., Wan Daud, W. M. A., y Aroua, M. K. (2009). Activity of solid catalysts for biodiesel production: A review. *Fuel Processing Technology*, 90(6), 770–777.  
<https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2009.03.010>
- Zambrano, G., Rossi, C., Hernández, J. A., y Chico, L. G. (2015). Evaluación de la producción de biodiésel utilizando ultrasonido. *Revista de La Universidad Del Valle de Guatemala*, (31), 72–78.
- Zou, C., Zhao, P., Shi, L., Huang, S., y Luo, P. (2013). Biodiesel fuel production from waste cooking oil by the inclusion complex of heteropoly acid with bridged bis-cyclodextrin. *Bioresource Technology*, 146, 785–788.  
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.07.149>

## Anexos

### Anexo 1 – Ficha de recolección de aceite usado de soja

TG-R-001

#### FICHA DE RECOLECCIÓN DE MATERIA PRIMA

##### Recolección de Aceite Cocina Usado

|                                |                                   |
|--------------------------------|-----------------------------------|
| Encargado de recolección       | Josué Ivan Rodríguez Bustamante   |
| Lugar de recolección:          | Comedor Universitario- UPEU       |
| Nombre del Encargado de lugar: | Giovana Portugal Espinoza         |
| Cargo del Encargado:           | Jefe del Servicio de Alimentación |

| Tipo de Aceite Recolectado | Fecha    | Cantidad |
|----------------------------|----------|----------|
| Aceite de Soja Usado       | 25-07-18 | 5 litros |
| Aceite de Soja Usado       | 18-05-18 | 8 litros |
|                            |          |          |

##### Observaciones:

---

---

---

  
  
Encargado del Lugar de recolección

## Anexo 2. Equipos de Laboratorio

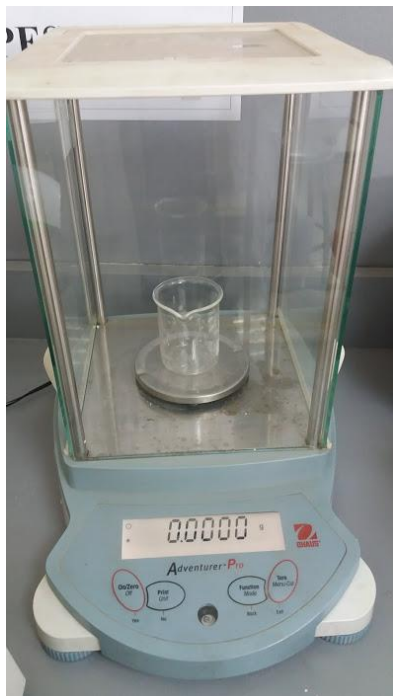


Figura 1 Balanza Analítica (OHAUS)



Figura 2. Reómetro Brookfield VIII



Ilustración 3. Agitador Magnético (NUOVA STIR PLATE)

### Anexo 3. Obtención de Biodiesel



Figura 1. Aceite Recolectado



Figura 2. Medición de Viscosidad del Aceite de Soja Usado

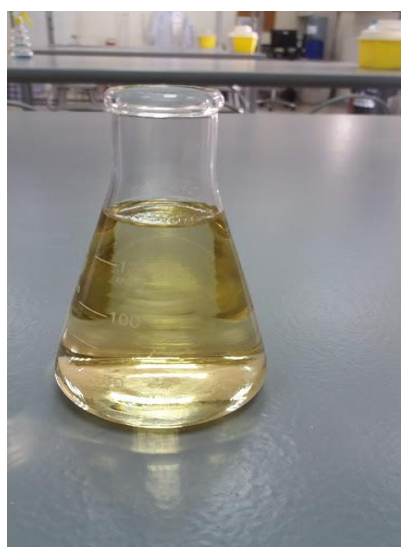


Figura 3. Biodiesel obtenido



Ilustración 1. Pesaje del biodiesel obtenido

## Anexo 4. Método de Brookfield



**Summary:** The viscosity, or resistance to flow, of a material can be determined by a rotational viscometer. The viscometer can also be used to approximate other flow characteristics by relating viscosity and flow for a known composition.

Because the specific rotational speed and the spindle used as well as the temperature of the test sample can have a significant impact on the value determined, it is best to use the same conditions throughout a test series. To ensure that this is possible, the viscosity should be measured with all usable spindles.

The viscosity of long-term retardant products is normally measured using a #2 spindle for products having a viscosity between 1 and 500 centipoise (cP) and a #4 spindle for products having a viscosity greater than 500 cP; although the #3 spindle may also be used when the upper values are expected to be less than 2,000 cP

### Equipment:

Brookfield model LVF viscometer and spindle set  
Stopwatch  
Thermometer  
Sample in a straight-sided container with an inside diameter of 2 inches or more.

### Method:

1. Level the viscometer by adjusting the feet and/or rotate the viscometer on the mounting shaft until the bubble is centered before each use.
2. Set the speed control to 60 rpm; 60 should be on the upper surface of the knob found on the left side of the housing.
3. Place the sample and container under viscometer.
4. Measure and record the temperature of the sample.
5. Select a spindle appropriate for the viscosity to be measured. The number of the spindle is engraved at the top of each spindle
6. Screw spindle onto the viscometer.
  - a. **This is a left-handed thread.**
  - b. **Spindle should be finger tightened only, holding onto the shaft to prevent movement of the gauge needle, and gently lifting upward.**
  - c. **NEVER pull down on the spindle!**

7. Using the adjustment knob on the viscometer stand, carefully lower the spindle into the sample to the immersion mark etched into the spindle shaft.
8. With one hand depress and hold the brake, found on the back of the viscometer head, firmly down while turning on the viscometer.
9. Release the brake once the viscometer is rotating smoothly and time for 60 seconds.
10. Depress the brake firmly and turn the viscometer off while continuing to hold the brake down.
  - a. This keeps the dial indicator in place until the value can be read.
  - b. If the dial indicator cannot be seen in the gauge window, turn the viscometer on and off quickly until the needle comes into view, maintaining firm pressure on the brake.
11. Read and record the value on the viscometer gauge. Also record the number of the spindle used.
12. Release the brake.
13. Refer to the table below to obtain the correct multiplier for the spindle used.
14. Calculate the viscosity in centipoises by multiplying the meter reading by the multiplier corresponding to the particular spindle used.

| Spindle #   | Multiplier for Readings at 60 rpm | Viscosity Range    |
|---|-----------------------------------|--------------------|
| 1   | 1                                 | 1 to 100 cP        |
| 2   | 5                                 | 50 to 500 cP       |
| 3   | 20                                | 400 to 2,00 cP     |
| 4   | 100                               | 1,000 to 10,000 cP |
| Long-term retardants have typically been measured using a #2 spindle for viscosities up to 500 cP and a #4 spindle for viscosities greater than 500 cP. |                                   |                    |

15. Have the viscometers cleaned and calibrated by the manufacturer or other approved service company at least once a year.

References:

American Society for Testing and Materials. Standard Test Methods for Rheological Properties of Non-Newtonian Materials by Rotational (Brookfield type) Viscometer; D2196-05.

National Wildfire Coordinating Group and USDA Forest Service. Lot Acceptance, Quality Assurance, and Field Quality Control for Fire Retardant Chemicals, Sixth Edition. 2000.

### Simple conversion of Brookfield R.V.T. readings into viscosity functions

P. Mitschka

Institute of Chemical Process Fundamentals, Czechoslovak Academy of Sciences, Prague

*Key words:* Viscosity function, conversion procedure, Brookfield R.V.T. viscometer

In the introduction to his book on industrial applications of rheometry, Walters [1] states, that “the Brookfield device is very easy to use, but the interpretation of the experimental results in terms of  $(\eta, \dot{\gamma})$  data (viscosity functions) is far from straightforward”. Despite recent research in this field the conversion procedure remains difficult as the treatment of the primary torque-speed data to obtain viscometric shear stress – shear rate relations, requires sophisticated computations [2, 3]. The approximate approach, mentioned in [3], suffers from the absence of concrete numerical values for use in the conversion of the primary readings into their viscometric counterparts.

The aim of this note is to draw attention to our results in this field, which have led to a relatively simple procedure enabling one to realize the above mentioned conversion with an accuracy sufficient for engineering applications of the viscosity functions. This procedure is based on theoretical studies of rotational flow of rheologically complex materials around bodies with simple geometry in basic viscometric configurations [4–8]. The rheometrical applications of these studies rely on a few empirical rules [9], which make it possible to obtain concrete results [9–11] for realistic axisymmetrical systems of the “rotating spindle – sample container” type, such as the configurations of the measuring sections used in the immersional Brookfield R.V.T. viscometer.

Our treatment of the primary readings from Brookfield viscometers is as follows:

- 1) As many pairs of values as possible of the scale deflection  $\alpha_i$  on the torque dial (in scale units of the 0–100 scale) are taken with one, or preferably several, spindles for fixed values of the rotational speed  $N_i$  (in rpm).
- 2) Values of  $\alpha_i$  are converted to the (average) shear stresses  $\tau_i$  (in Pa) on each of the spindles used by

$$\tau_i = k_{\alpha} \alpha_i. \quad (1)$$

- 3) Pairs of  $\tau_i - N_i$  valid for each particular spindle are plotted in the log-log form.
- 4a) When this dependence is sufficiently close to a linear one, the fluid under test is of the power-law type. The slope of the  $\log \tau_i - \log N_i$  dependence in this case is simply equal to the flow index of the fluid,  $n$ .

Using values of  $k_{N\dot{\gamma}}(n)$  for this flow index and the particular spindle, the corresponding (average) values of the shear rates  $\dot{\gamma}_i$  (in  $s^{-1}$ ) are then calculated as

$$\dot{\gamma}_i = k_{N\dot{\gamma}}(n) N_i. \quad (2a)$$

- 4b) When it is not possible to approximate the  $\log \tau_i - \log N_i$  dependence with sufficient accuracy by a straight line, a smooth curve is drawn through the individual points. From the slopes of this curve at the points, corresponding to the rotational speeds used for the particular spindle, the local values of the apparent flow index  $n_i^* = n_i^*(N_i)$  are determined by

$$n_i^* = d(\log \tau) / d(\log N) |_{N=N_i}. \quad (3)$$

The rotational speeds used in the measurements are then converted to the shear rates using

$$\dot{\gamma}_i = k_{N\dot{\gamma}}(n_i^*) N_i. \quad (2b)$$

- 5) The relevant pairs  $\tau_i - \dot{\gamma}_i$  are now assumed to be the points of the viscosity function of the fluid sample tested.
- 6) It is advisable to check that the experiments were carried out within the creeping flow regime, where the relations given above hold and where secondary (elastic or time-dependent) effects on the measured torque are usually negligible. For measurements with several spindles, a simple check of the model adequacy is also recommended. Details of both these tests can be found in [7, 11].

The conversion factors  $k_{\alpha\tau}$  and  $k_{N\dot{\gamma}}$  occurring in eqs. (1), (2a) and (2b) are summarized in table 1, for spindles of the Brookfield R.V.T. model. The methods used to obtain these numerical values are described elsewhere; namely in the monograph [8] and the manual [12].

A verification of the proposed conversion procedure has been undertaken in this Laboratory by comparing the viscosity functions evaluated from measurements on viscometers of the Brookfield type with results, determined on a commercial Couette-type viscometer (Rheotest II, Prüfgerätekwerk Medingen, GDR). Comparison of results of such

Table 1. Conversion factors for the spindles of the Brookfield R.V.T. viscometer (under standard measuring conditions)

| Spindle number | 1         | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     |       |
|----------------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $k_{at}$       | 0.035     | 0.119 | 0.279 | 0.539 | 1.05  | 2.35  | 8.4   |       |
| $k_{Ny}$       | $n = 0.1$ | 1.728 | 1.431 | 1.457 | 1.492 | 1.544 | 1.366 | 1.936 |
|                | 0.2       | 0.967 | 0.875 | 0.882 | 0.892 | 0.907 | 0.851 | 1.007 |
|                | 0.3       | 0.705 | 0.656 | 0.656 | 0.658 | 0.663 | 0.629 | 0.681 |
|                | 0.4       | 0.576 | 0.535 | 0.530 | 0.529 | 0.528 | 0.503 | 0.515 |
|                | 0.5       | 0.499 | 0.458 | 0.449 | 0.445 | 0.442 | 0.421 | 0.413 |
|                | 0.6       | 0.449 | 0.404 | 0.392 | 0.387 | 0.382 | 0.363 | 0.346 |
|                | 0.7       | 0.414 | 0.365 | 0.350 | 0.343 | 0.338 | 0.320 | 0.297 |
|                | 0.8       | 0.387 | 0.334 | 0.317 | 0.310 | 0.304 | 0.286 | 0.261 |
|                | 0.9       | 0.367 | 0.310 | 0.291 | 0.283 | 0.276 | 0.260 | 0.232 |
|                | 1.0       | 0.351 | 0.291 | 0.270 | 0.262 | 0.254 | 0.238 | 0.209 |

measurements made with CMC solutions of different concentration, with some intermediates from styrene polymerization and with synthetic rubber latices has proved [10] that the accuracy of the proposed procedure for converting data from immersional viscometers of the Brookfield type into viscosity functions is comparable with usual viscometric techniques. The same conclusion has also been reached on the basis of experiments with an extremely pseudoplastic 24% aqueous kaoline suspension and with a concentrated 3% aqueous solution of Polyox, known to be a strongly elastic liquid [11].

The applicability of this method can further be demonstrated by the results of the evaluation of two recently published data sets of other authors, obtained on a Brookfield R.V.T. viscometer. The first set are the data from the Warren Spring Laboratory (WSL) research report [13], the author of which was not able to arrange the data into the form of a viscosity function, primarily because of the lack of a suitable conversion procedure. The comparison of the Brookfield data [13] with those obtained by the use of other classical viscometers tested has remained open. As can be

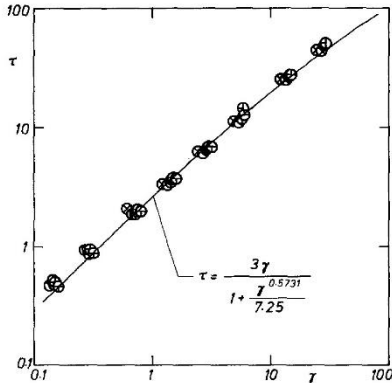


Fig. 1. Comparison of the WSL data [13] evaluated by the procedure proposed in this work (circles, with different centres for each spindle) with the flow curve (bold line) given by Cheng

seen from figure 1, Cheng's data [13], evaluated using our procedure, agree reasonable well with his viscosity function of the model fluid used.

In figure 2 some results of the complex computations made by Williams [2] are compared with the results of our considerably simpler conversion method. Satisfactory agreement of the results from both these methods can also be observed here.

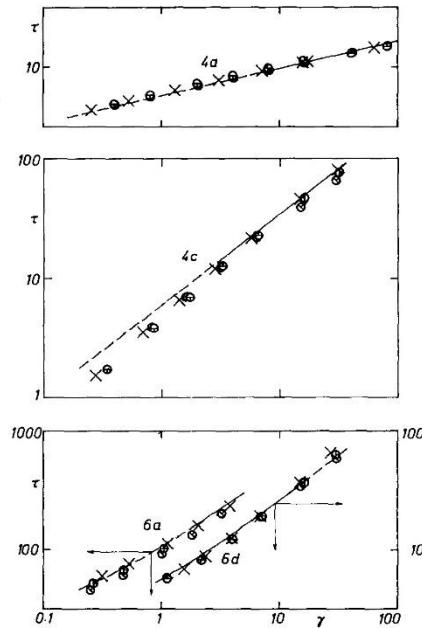


Fig. 2. Comparison of some data sets from [2] evaluated by the proposed conversion procedure (circles) with Williams' computer results (crosses) and with his flow curves (bold lines). The numbering of the liquids is identical with that in figure 4 and 6 in [2]

## Anexo 6 – Ficha de Registro de Estación de Servicio



N° DE REGISTRO

**105599-056-310117**

### FICHA DE REGISTRO

#### ESTACIÓN DE SERVICIOS CON GASOCENTRO DE GLP

(D.S. N° 030-98-EM, D.S. N° 054-93-EM, D.S. N° 019-97-EM, RCD N° 191-2011-OS/CD y D.S. 045-2012-PCM)

Expediente N° 201700013822

Se otorga la presente Ficha de Registro como constancia de Inscripción en el Registro de Hidrocarburos a favor de:

#### MULTISERVICIOS ECOGAS S.A.C.

|                                     |   |
|-------------------------------------|---|
| PROPIETARIO Y/O REPRESENTANTE LEGAL | : LUIS EDUARDO CISNEROS OLANO   |
| RUC DE LA EMPRESA                   | : 20525166415   |
| DOMICILIO LEGAL                     | : AV. CARAPONGO Y CALLE LOS ROBLES, MZ. D, LOTE 1 – URB. POPULAR NUEVO HORIZONTE CARAPONGO - LURIGANCHO / LIMA / LIMA |
| UBICACIÓN DEL ESTABLECIMIENTO       | : AV. CARAPONGO Y CALLE LOS ROBLES, MZ. D, LOTE 1 – URB. POPULAR NUEVO HORIZONTE CARAPONGO                            |
| DISTRITO                            | : LURIGANCHO  |
| PROVINCIA                           | : LIMA  |
| DEPARTAMENTO                        | : LIMA  |



#### DATOS TÉCNICOS

Informe Técnico N° 239201-MOD-056-2014

Fecha del Informe Técnico N°: 27 de Enero de 2014

07 FEB. 2017

#### COMBUSTIBLES LIQUIDOS:

| N° Tanque       | N° Compartimiento | Producto        | Capacidad (Galones) |
|-----------------|-------------------|-----------------|---------------------|
| 1               | 1                 | DIESEL B5 S-50  | 6600                |
| 2               | 1                 | DIESEL B5 S-50  | 1650                |
|                 | 2                 | GASOHOL 90 PLUS | 4950                |
| 3               | 1                 | GASOHOL 95 PLUS | 3300                |
|                 | 2                 | GASOHOL 97 PLUS | 3300                |
| CAPACIDAD TOTAL |                   |                 | 19800 GALONES       |

#### GAS LICUADO DE PETRÓLEO – GLP AUTOMOTOR

| N° Tanque       | N° de Serie / Año de Fabricación | Capacidad (Galones) |
|-----------------|----------------------------------|---------------------|
| 1               | TK-3200G-001-1 / 2011            | 3200                |
| CAPACIDAD TOTAL |                                  | 3200                |

#### GAS LICUADO DE PETRÓLEO - GLP ENVASADO EN CILINDROS DE 10 KG.

| Cantidad de cilindros de GLP envasado  | Cantidad de GLP en kg. |
|--|------------------------|
| 48   | 480                    |
| GLP almacenado en cilindros de 10 Kg. con un máximo de hasta 3 racks con 24 unidades cada uno. |                        |

## Anexo 7 – Reporte de Análisis de Diesel B5 S-50

REPORTE DE ANÁLISIS DE DIESEL B5 S-50

LOTE No. DB5 S50-032-01-2018

| REFINERÍA LA PAMPILLA                                    |                         | RECEPCIÓN DE LA MUESTRA                     |                                       | FECHA DE CERTIFICACIÓN                           |            |
|--|-------------------------|---|---------------------------------------|--|------------|
| Carretera a Ventanilla km 25 S/N Ventanilla, Lima – Perú |                         | 30/01/2018 21:03:18                         |                                       | 31/01/2018 01:23:46                              |            |
| PRODUCTO<br>Diesel B5 (S-50)                             |                         | TANQUE<br>307D                              |                                       | DESTINO DEL PRODUCTO<br>Operaciones de Despacho  |            |
| PROCEDECENCIA<br>Almacenamiento                          |                         | VOLÚMEN CERTIFICADO, m <sup>3</sup><br>8000 |                                       | BUQUE TANQUE                                     |            |
| PROPIEDADES  | MÉTODOS                 | RESULTADOS                                  | PROPIEDADES                           | MÉTODOS  | RESULTADOS |
|  | ASTM                    |   |                                       | ASTM   |            |
| <b>APARIENCIA</b>  |                         |   | <b>CONTAMINANTES</b>                  |  |            |
| Color ASTM   | D 1500                  | 1.0   | Agua y Sedimentos, % Vol              | D 2709   | 0.01       |
|  |                         |   | Cenizas, %masa                        | D 482  | 0.001      |
|  |                         |   | Material Particulado, mg/L            | D 7321   | 3.3        |
| <b>VOLATILIDAD</b>                                       |                         |   | <b>LUBRICIDAD</b>                     |  |            |
| Gravedad API a 15.6°C, °API                              | D 1298                  | 35.1  | Lubricidad, HFRR a 60°C, micron       | D 6079   | < 520      |
| Densidad a 15°C, kg/m <sup>3</sup>                       | D 1298                  | 849.0                                       |                                       |  |            |
| Punto de Inflamación °C                                  | D 93                    | 56.0  |                                       |  |            |
| Destilación (a 760 mm Hg)                                | D 86                    |   |                                       |  |            |
| Punto Inicial, °C  |                         | 156.5                                       | <b>REQUERIMIENTOS DE OPERATIVIDAD</b> |  |            |
| 05% vol. recuperado, °C                                  |                         | 190.5                                       | CFPP (POFF), °C                       | D 6371 / EN 116                                  | -8         |
| 10% vol. recuperado, °C                                  |                         | 206.5                                       |                                       |  |            |
| 20% vol. recuperado, °C                                  |                         | 232.0                                       | <b>CONDUCTIVIDAD</b>                  |  |            |
| 50% vol. recuperado, °C                                  |                         | 280.0                                       | Conductividad, pS/m                   | D 2624   | 29         |
| 90% vol. recuperado, °C                                  |                         | 340.5                                       |                                       |  |            |
| 95% vol. recuperado, °C                                  |                         | 360.0                                       | <b>BIODIESEL 100 (B100)</b>           |  |            |
| Punto Final, °C  |                         | 371.0                                       | Contenido de B100, % Vol              | D 7371   | 5          |
| Recuperado, % Vol  |                         | 98.0  |                                       |  |            |
| Residuo, % Vol   |                         | 1.4   |                                       |  |            |
| Pérdida, % Vol   |                         | 0.6   |                                       |  |            |
| <b>FLUIDEZ</b>   |                         |   |                                       |  |            |
| Punto de fluidez, °C                                     | D 97                    | -18   |                                       |  |            |
| Viscosidad cinemática a 40°C, cSt                        | D 445                   | 3.1   |                                       |  |            |
| <b>CORROSIVIDAD</b>                                      |                         |   |                                       |  |            |
| Corrosión lámina de cobre 3 h a 50°C                     | D 130                   | 1a  |                                       |  |            |
| <b>COMBUSTION</b>  |                         |   |                                       |  |            |
| Residuo de carbón ransbottom 10%<br>fondos, %masa        | D 524                   | 0.06  |                                       |  |            |
| Índice de Cetano   | D 4737                  | 45.7  |                                       |  |            |
| <b>COMPOSICIÓN</b>                                       |                         |   |                                       |  |            |
| Azufre, ppm  | D 5453                  | 30  |                                       |  |            |
| <b>OBSERVACIONES:</b>                                    |                         |   |                                       |  |            |
| PRODUCTO CUMPLE CON EL DS-092-2009-EM                    |                         |   |                                       |  |            |
| <b>DISTRIBUCIÓN :</b>                                    |                         | <b>FECHA DE EMISIÓN</b>                     |                                       | <b>LABORATORIO</b>                               |            |
| Original :   | Operaciones de despacho | 31/01/2018                                  |                                       | <br>Cecilia Posadas Jhong<br>Jefe de Laboratorio |            |
| Copia 1:   | Movimiento de Productos |   |                                       |  |            |
| Copia 2:   | Laboratorio             |   |                                       |  |            |

PROHIBIDA SU REPRODUCCION PARCIAL