

Obtención de una base biolubricante a partir de la transesterificación inversa de aceite de ricino

Cristian Jhaidiver Infante Díaz, Diego Alejandro Cristancho Martínez

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Químico

Director

Fredy Augusto Avellaneda Vargas

PhD en Ingeniería Química

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2024

### **Dedicatoria**

*Primeramente, a Dios, sin él nada de lo que he logrado hasta el momento habría sido posible.*

*A mis padres, Martha Diaz y Clemente Infante, por su apoyo incondicional y a pesar de las múltiples dificultades siempre estar para mí.*

*A mi hermana, Danna Infante, por siempre creer en mí y jamás dejar de confiar.*

*A cada una de las personas que fueron un apoyo, motivación y alivio para continuar, tienen un lugar especial en mi vida. Familiares y amigos, como Adriana Vargas, Nicolás Villarreal, Jersson Bonilla, Valentina Aguilera y mi compañero en esta investigación, Diego Cristancho.*

**Cristian Jhaidiver Infante Diaz.**

### **Dedicatoria**

*Primero, a Dios, por darme la fortaleza en los momentos en que más lo necesité, por las bendiciones que me ha concedido, por todas las personas que ha puesto en mi vida y por permitirme culminar esta etapa de mi formación profesional.*

*A la persona más importante en mi vida, mi madre, Mary Cristancho, por todo el sacrificio que ha hecho por mí, por su motivación, cariño y guía en los momentos difíciles, por ser el motor para poder cumplir mis sueños.*

*A mi hermano Juan David y a mi padrastro Ismael, por los consejos dados y la confianza depositada, motivándome a superarme cada día.*

*A mi trabajo de grado, por ser un dolor de cabeza y por darme más problemas que soluciones, pero que al final, fue un dolor de cabeza que valió la pena.*

*A cada una de las personas que ha contribuido a mi formación, a mis amigos en especial Ferney, Wilson y Yely por escuchar, entender, aconsejar y sacar risas en los momentos amargos, a Juan Sebastián por los ánimos y la ayuda ofrecida. Y por último a mi compañero en esta investigación Cristian por su gran trabajo durante este proceso.*

**Diego Alejandro Cristancho Martínez.**

### **Agradecimientos**

A la Universidad Industrial de Santander, a la escuela de Ingeniería Química y a los docentes que contribuyeron a nuestra formación como personas y profesionales.

Al Ph.D Fredy Augusto Avellaneda Vargas por darnos la confianza para desarrollar este proyecto, brindándonos su apoyo y conocimiento.

Al grupo de investigación INTERFASE de la escuela de ingeniería química y al grupo GIT adscrito a la escuela de petróleos, por brindarnos su apoyo y facilitarnos el uso de equipos, implementos de laboratorio y reactivos necesarios para el desarrollo de este proyecto.

Al ingeniero químico Guillermo Acero y al químico Joaquín Orozco por la ayuda y colaboración brindada en el laboratorio cuando fue requerida.

A los técnicos de laboratorio de la escuela de ingeniería química, Eduardo y Wilson y al ingeniero de la escuela de ingeniería de petróleos Félix Arenas por la disponibilidad y colaboración ofrecida durante el desarrollo del proyecto.

**Tabla de Contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	14
1. Objetivos.....	16
1.1 Objetivo General.....	16
1.2 Objetivos Específicos.....	16
2. Marco teórico y estado del arte.....	17
3. Metodología.....	23
3.1. Desarrollo del objetivo 1: Obtención de biodiésel a partir de la transesterificación de aceite de ricino .....	24
3.1.1. Adquisición y acondicionamiento de la materia prima.....	24
3.1.2. Obtención del biodiésel mediante transesterificación.....	25
3.1.3. Análisis de las propiedades del biodiésel.....	27
3.2.1 Realización del diseño experimental central compuesto (DCC) .....	27
3.2.2. Síntesis y análisis de las muestras biolubricantes mediante transesterificación inversa ....	28
3.3. Comparación de propiedades fisicoquímicas de la base biolubricante con un lubricante comercial.....	29
3.3.1 Análisis de propiedades fisicoquímicas de las bases biolubricantes seleccionadas del DCC .....	29
3.3.2 Comparación de las propiedades de la base biolubricante final con un lubricante comercial a base de petróleo.....	30
4. Resultados y análisis.....	30
4.1. Producción y análisis del biodiésel .....	30

4.1.1. Acondicionamiento de la materia prima .....	30
4.1.2. Análisis del biodiésel .....	31
4.2. Desarrollo del objetivo 2: Producción y análisis de las bases biolubricantes.....	35
4.2.1. Análisis del diseño experimental central compuesto.....	35
4.2.2. Análisis de las bases biolubricantes sólidas.....	38
4.2.3. Análisis de las bases biolubricantes líquidas.....	40
4.2.4. Análisis Termogravimétrico TGA .....	42
4.3. Desarrollo del objetivo 3: Comparación de la base biolubricante seleccionada.....	44
5. Conclusiones.....	48
6. Recomendaciones .....	49
Referencias Bibliográficas .....	50

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1 <i>Composición del aceite de ricino</i> .....	18
Tabla 2 <i>Normativas empleadas para el cálculo de propiedades de las bases biolubricantes</i> . ...	29
Tabla 3 <i>Propiedades del aceite de ricino usado como materia prima</i> .....	30
Tabla 4 <i>Experimentos realizados para la obtención del biodiésel</i> .....	32
Tabla 5 <i>Comparación del biodiésel cambiando la razón molar</i> .....	32
Tabla 6 <i>Comparación de las propiedades del biodiésel obtenido y las reportadas por la norma</i> . .....	34
Tabla 7 <i>Resultados del diseño experimental</i> .....	36
Tabla 8 <i>Bases biolubricantes gelificadas</i> . .....	38
Tabla 9 <i>Bases biolubricantes líquidas</i> . .....	40
Tabla 10 <i>Clasificación ISO VG para aceites de lubricación</i> .....	41
Tabla 11 <i>Comparación de la base lubricante seleccionada con lubricantes comerciales</i> .....	45
Tabla 12 <i>Comparación de la base biolubricante seleccionada con algunas obtenidas en otras investigaciones a partir de aceite de ricino</i> . .....	46

**Lista de Figuras**

	<b>Pág.</b>
Figura 1 <i>Estructura del ácido ricinoleico</i> .....	19
Figura 2 <i>Ricinoleína, triglicérido del ácido ricinoleico</i> .....	19
Figura 3 <i>Esquema general de la reacción de transesterificación</i> .....	20
Figura 4 <i>Trimetilolpropano (TMP), ejemplo de alcohol polihídrico o polirol</i> . ....	21
Figura 5 <i>Transesterificación inversa del ricinoleato de metilo con TMP</i> . ....	22
Figura 6 <i>Esquema metodológico</i> .....	23
Figura 7 <i>Diagrama de bloques de las etapas para la síntesis de las bases biolubricantes</i> .....	24
Figura 8 <i>Montaje experimental para la reacción de transesterificación</i> .....	26
Figura 9 <i>Montaje del rotaevaporador para la síntesis de las bases biolubricantes</i> .....	28
Figura 10 <i>Efectos principales de las variables propuestas en el DCC sobre el rendimiento</i> . ....	36
Figura 11 <i>TGA del aceite, biodiésel y base biolubricante de ricino</i> .....	43

**Lista de Apéndices**

	<b>Pág.</b>
Apéndice A. Cálculos para determinar la cantidad de materia prima en la producción de biodiésel .....	61
Apéndice B. Diseño central compuesto (DCC) .....	61
Apéndice C. Cálculos para determinar la cantidad de materia prima en la producción de las bases biolubricantes.....	65
Apéndice D. Viscosímetro de Ostwald.....	66
Apéndice E. Cálculo del índice de viscosidad (IV) .....	69
Apéndice F. Cálculo de rendimientos del biodiésel y de la base biolubricante.....	70
Apéndice G. Procedimiento para la determinación del índice de acidez y acidez .....	71
Apéndice H. Procedimiento para la determinación de FAME's por cromatografía de gases .....	73
Apéndice I. Condiciones del cromatógrafo de gases .....	75
Apéndice J. Cromatogramas del biodiésel de ricino.....	76
Apéndice K. Procedimiento para la determinación del punto de fluidez. ....	78
Apéndice L. Condiciones del TGA.....	79
Apéndice M. Efecto de la longitud de cadena, ramificación y grado de insaturación sobre el IV, propiedades a bajas temperaturas y la estabilidad oxidativa. ....	80
Apéndice N. Clasificación ISO VG para bases lubricantes .....	82
Apéndice O. Reacción de transesterificación por etapas.....	85
Apéndice P. Reacción de transesterificación inversa por etapas .....	86
Apéndice Q. Reacciones Secundarias.....	87
Apéndice R. Ficha técnica aceite de ricino adquirido de Laboratorios León S.A. ....	89

Apéndice S. Evidencias fotográficas .....	90
Apéndice T. Autooxidación Biodiésel y Base Biolubricante. ....	96
Apéndice U. Análisis de Varianza del DCC .....	99
Apéndice V. Propiedades lubricantes comerciales a base de petróleo. ....	102

### Glosario

**AGL:** ácidos grasos libres.

**DCC:** diseño central compuesto

**FAME's:** metil ésteres de ácidos grasos (Fatty Acids Methyl Ester)

**IS:** índice de saponificación

**ISO VG:** International Standards Organization Viscosity Grade

**IV:** índice de Viscosidad

**NLGI:** Instituto Nacional de Grasas Lubricantes.

**RM:** razón molar

**TGA:** análisis termogravimétrico

**TMP:** trimetilolpropano

## Resumen

**Título:** Obtención de una base biolubricante a partir de la transesterificación inversa de aceite de ricino

**Autores:** Cristian Jhaidiver Infante Díaz, Diego Alejandro Cristancho Martínez

**Palabras Clave:** Aceite de ricino, biodiésel, biolubricante, transesterificación.

**Descripción:** Una sustancia crucial para el buen funcionamiento de casi cualquier maquinaria industrial son los lubricantes, estos ayudan a evitar el desgaste de las piezas internas debido al rozamiento entre las mismas generando una especie de película. A pesar de disponer de múltiples tipos de lubricantes, la forma de sintetizarlos se hace a partir de la misma materia prima; el petróleo, con consecuencias no favorables sobre algunos ecosistemas. Por esta razón, se ha generado la necesidad de explorar nuevos métodos de obtención más sostenibles; la síntesis de biolubricantes empleando sustancias oleaginosas ha despertado un creciente interés en los estudios recientes, en muchas ocasiones han demostrado tener mejores propiedades como aceites de lubricación. Esta investigación se basó en obtener una base biolubricante a partir de aceite de ricino como materia prima para producir ésteres metílicos (biodiésel) de la misma sustancia y posteriormente, emplear el método de transesterificación inversa usando trimetilolpropano (TMP) como reactivo límite para obtener los ésteres de polioliol (biolubricante).

Para ello, se propuso un diseño experimental central compuesto variando la razón molar, el tiempo de reacción y la temperatura con el fin de determinar unas condiciones adecuadas para la obtención de la base biolubricante, analizando el rendimiento y algunas propiedades fisicoquímicas como la viscosidad, el índice de viscosidad y la densidad. Una vez identificadas se realizó una comparación con un lubricante comercial a base de petróleo, evidenciando el potencial que tiene para convertirse en una sustancia de lubricación y, por lo tanto, brindar una alternativa más amigable con el medio ambiente. Algunos de los experimentos en esta investigación presentaron una gelificación, para estas muestras se realizó un análisis por separado a las demás. Para la comparación, se seleccionaron unas condiciones que permitieron obtener una base biolubricante en estado líquido, los mejores resultados en este trabajo fueron empleando una temperatura de 120 °C, tiempo de reacción de 120 minutos y razón molar (moles biodiésel/ moles de TMP) de 3,84; presentado características similares a los lubricantes con los que se comparó, de igual materia prima y de una base de petróleo comercial.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Fredy Augusto Avellaneda Vargas. PhD en Ingeniería Química.

### Abstract

**Title:** Obtaining a biolubricant base from the reverse transesterification of castor oil.

**Author(s):** Cristian Jhaidiver Infante Díaz, Diego Alejandro Cristancho Martínez

**Key Words:** Castor oil, biodiesel, biolubricant, transesterification.

**Description:** Lubricants are a crucial substance for the proper functioning of almost any industrial machinery. These help to avoid the wear of internal parts due to the friction between them by generating a kind of film. Despite the availability of multiple types of lubricants, the way to synthesize them is made from the same raw material, petroleum, with unfavorable consequences on some ecosystems. For this reason, the need has arisen to explore new, more sustainable methods of obtaining them; the synthesis of biolubricants using oleaginous substances has aroused growing interest in recent studies, in many cases they have shown to have better properties as lubricating oils. This research was based on obtaining a biolubricant base from castor oil as a raw material to produce methyl esters (biodiesel) from the same substance and then using the reverse transesterification method using trimethylolpropane (TMP) as a limiting reagent to obtain polyol esters (biolubricant).

For this purpose, a central experimental design was proposed, varying the molar ratio, reaction time and temperature in order to determine adequate conditions for obtaining the biolubricant base, analyzing the performance and some physicochemical properties such as viscosity, viscosity index and density. Once identified, a comparison was made with a commercial petroleum-based lubricant, showing its potential to become a lubricating substance and therefore provide a more environmentally friendly alternative. Some of the experiments in this research presented a gelation, for these samples an analysis was performed separately from the others. The best results in this work were obtained using a temperature of 120 °C, a reaction time of 120 minutes and a molar ratio (moles of biodiesel/moles of TMP) of 3.84; presenting similar characteristics to the lubricants with which it was compared, of the same raw material and a commercial petroleum base.

---

\* Degree Work.

\*\* Faculty of Physicochemical Engineering. School of Chemical Engineering. Director: Fredy Augusto Avellaneda Vargas. PhD in Chemical Engineering.

## Introducción

La demanda de lubricantes a escala global ha venido aumentando en los últimos años (Hamdan et al., 2018), el crecimiento industrial ha generado la necesidad de producir una mayor cantidad de estas sustancias o buscar fuentes alternativas para su obtención. Actualmente, la síntesis de lubricantes se hace principalmente por medio de materias primas derivadas del petróleo, sin embargo, debido al crecimiento de la población y al desarrollo de las industrias, el agotamiento de las reservas de petróleo se hace cada vez más evidente, los requerimientos y exigencias ambientales son cada vez más rigurosos y aumenta la contaminación ocasionada (Monteiro et al., 2023). Por estas razones, el uso de sustancias de base biológica, como es el caso de los biolubricantes es una alternativa muy atractiva.

Los ésteres de polioles (base principal de los biolubricantes) derivados de recursos vegetales han demostrado en muchas ocasiones tener mejores propiedades para su uso como bases de lubricación, en comparación a los de origen mineral (Aziz et al., 2020). En la actualidad, se sintetizan biolubricantes a partir del aceite de múltiples plantas oleaginosas (Khan et al., 2022), su método de obtención consiste en transesterificar un poliol seleccionado con biodiésel.

Para responder a las problemáticas que ha experimentado el mundo en los últimos años, se ve la necesidad de preferir procesos más amigables con el medio ambiente, evitando la dependencia que se tiene a los hidrocarburos. Debido a esto, en la presente investigación, se busca obtener una base biolubricante empleando aceite proveniente de la especie *Ricinus communis*, ya que sus propiedades lo hacen llamativo para ser utilizado como materia prima en la síntesis de sustancias de lubricación, su composición química, su elevada viscosidad y el hecho de no ser un aceite de tipo comestible, lo hacen atractivo para la obtención de estas sustancias.

Lo anteriormente mencionado se hace con el fin de brindar una alternativa más ecológica e identificar ¿Qué condiciones de operación permiten obtener una base biolubricante con buenas características a partir de aceite de ricino empleando el método de transesterificación inversa?

## 1. Objetivos

### 1.1 Objetivo General

Obtener una base biolubricante a partir de la transesterificación inversa de aceite proveniente de la especie *Ricinus communis* (Higuerilla).

### 1.2 Objetivos Específicos

Obtener biodiésel por medio de la transesterificación de aceite de ricino para posteriormente utilizarlo como materia prima en la síntesis del biolubricante.

Obtener una base biolubricante a partir del biodiésel empleando el método de transesterificación inversa.

Caracterizar la base biolubricante obtenida para compararla con un lubricante comercial a base de petróleo.

## 2. Marco teórico y estado del arte

Los lubricantes son sustancias que permiten el buen funcionamiento de cualquier tipo de maquinaria industrial, minimizan la fricción y el desgaste entre piezas, disipan el calor y eliminan los residuos del área de contacto (Naveed et al., 2020), básicamente generan una película entre las partes impidiendo que ocurra de forma drástica algún tipo de daño debido al accionar de las mismas. El 95% de la producción de lubricantes se basa en petróleo, su composición es una mezcla compleja de hidrocarburos (Cecilia et al., 2020), lo que los hace no renovables y tóxicos para el ser humano. A esta mezcla de derivados del petróleo, se le conoce como base, por lo general, se introduce una determinada cantidad de aditivos, con el fin de mejorar sus propiedades térmicas y antioxidantes (Singh et al., 2021), dando un valor agregado más alto y un tiempo de vida útil más prolongado a la base de lubricación, sin embargo, representaría un problema ambiental debido a su poca degradabilidad.

Para que un aceite sea catalogado como lubricante debe tener ciertas características fisicoquímicas que permitan su adecuado uso; índice de viscosidad (IV), punto de inflamabilidad y estabilidad oxidativa altos, buena resistencia a la corrosión y bajo punto de fluidez (Zainal et al., 2018). Siendo el IV y la viscosidad propiedades cruciales para identificar el potencial que tiene una sustancia como base de lubricación. El IV es un coeficiente adimensional que compara las viscosidades cinemáticas de un aceite a 100 °C y 40 °C respectivamente (Stanciu, 2023), un aceite con alto IV no cambia drásticamente su viscosidad con el aumento de la temperatura, por el contrario, bajos IV indican cambios significativos en la viscosidad lo que hacen a una sustancia no apta para ser usada como lubricante.

Por otro lado, los biolubricantes se han tornado como una alternativa para reemplazar a los lubricantes de base mineral, la fuente para su obtención es de tipo biológica, lo que los hace

presentar una biodegradabilidad más rápida y sencilla, disminuyendo los efectos adversos hacia el medio ambiente y en muchas ocasiones demostrando mejores propiedades fisicoquímicas en comparación a los derivados del petróleo (Cecilia et al., 2020). La materia prima para obtener dichas sustancias puede variar desde grasas sólidas hasta aceites vegetales o animales (Annisa & Widayat, 2018). Sin embargo, las sustancias provenientes de origen biológico al presentar una degradación mucho más rápida generan una dificultad para su almacenamiento por tiempos prolongados, provocando una pérdida considerable en las propiedades de lubricación.

El aceite de ricino se considera una sustancia no comestible y su cultivo es catalogado como invasor, causando un fuerte interés en usarlo como una fuente de energía alternativa, ya que no compite con la producción de alimentos, además de crecer en casi cualquier ambiente árido (Luna et al., 2019). Su composición se basa en una mezcla de ácidos grasos, predominando principalmente el ácido ricinoleico.

**Tabla 1** *Composición del aceite de ricino*

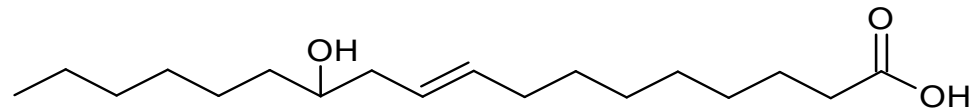
Ácido graso	Composición [%m/m]
Palmítico	0,8 – 1,1
Esteárico	0,7 – 1,0
Oleico	2,2 – 3,3
Linoleico	4,1 – 4,7
Linolénico	0,5 – 0,7
Ricinoleico	87,7 – 90,4

Nota: adaptado de Zeng, 2021.

El ácido ricinoleico brinda en el aceite propiedades únicas, el grupo carboxílico, el grupo hidroxilo y la insaturación presente en esta molécula generan una estructura química exclusiva del aceite de ricino (Yeboah et al., 2021), al unirse con dos ácidos grasos más y una molécula de glicerol, forman lo que se conoce como triglicérido, que para el caso del ácido ricinoleico es la

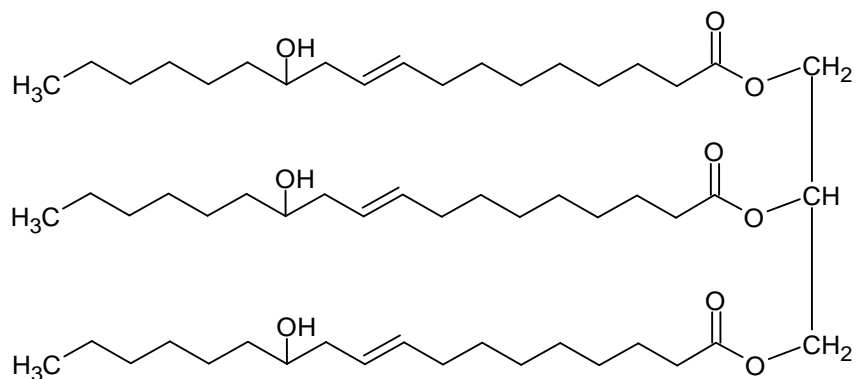
ricinoleína (Teresa et al., 2022). Los aceites vegetales en su mayoría están compuestos por triglicéridos, estos compuestos son el punto de partida para la obtención de biolubricantes.

**Figura 1** Estructura del ácido ricinoleico



Nota: Tomado de Yeboah et al., 2021.

**Figura 2** Ricinoleína, triglicérido del ácido ricinoleico

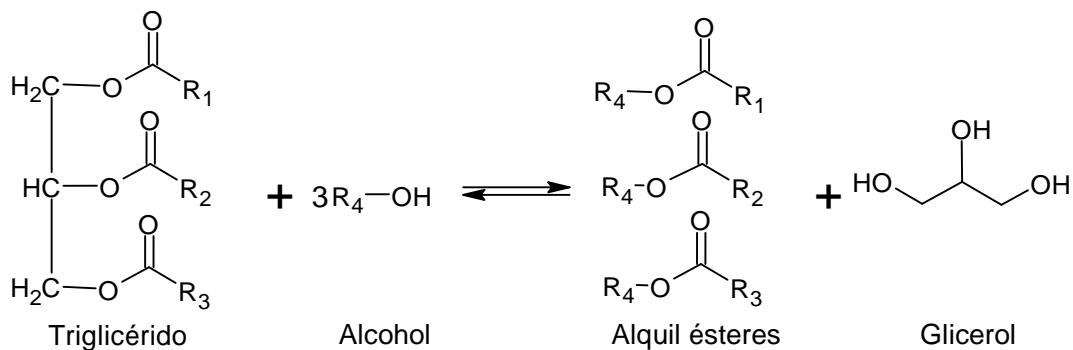


Nota: Tomado de Zeng, 2021.

Ahora bien, para la síntesis de biolubricantes, se debe producir inicialmente biodiésel, un biocombustible compuesto por ésteres metílicos de ácidos grasos (FAME), obtenidos mediante una reacción denominada transesterificación, en la que los triglicéridos contenidos en los aceites y grasas reaccionan con un ácido carboxílico (acidólisis) o un alcohol (alcoholisis). Por lo general, en la literatura el término transesterificación se usa para describir un proceso de alcoholisis (González et al., 2020). Para la producción de biodiésel mediante transesterificación, es posible emplear diferentes alcoholes, sin embargo, se prefiere utilizar metanol debido a su practicidad y mejor reactividad con los triglicéridos (Keera et al., 2018). Además, es necesario el uso de un catalizador; en la mayoría de los casos se opta por utilizar hidróxido de potasio o de sodio, ya que

son solubles con el metanol, presentan una facilidad de uso y se obtienen rendimientos altos empleando condiciones relativamente suaves de operación, además de mostrar una reducción en el tiempo en el que se produce la reacción en comparación con otro tipo de catalizadores (Mandari & Devarai, 2021).

**Figura 3** Esquema general de la reacción de transesterificación



Nota: tomado de Rezki et al., 2024.

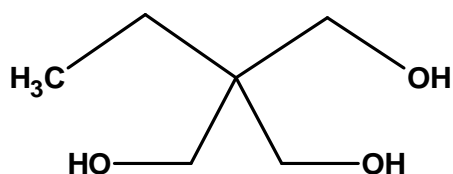
En muchas ocasiones, la transesterificación tiene una etapa de tratamiento previo denominada esterificación. En dicho proceso reaccionan el alcohol con los ácidos grasos libres (AGL) presentes en el aceite que son los causantes de producir la denominada acidez, y en presencia de un catalizador ácido se producen ésteres metílicos y agua (Mandari & Devarai, 2021). Un alto contenido de AGL y en presencia de humedad causará saponificación durante la reacción de transesterificación provocando una disminución en el rendimiento de ésteres (Ahmed & Huddersman, 2022). En este caso, el pretratamiento mediante esterificación se hace indispensable, la medición del índice de acidez y de saponificación en el aceite o grasa permiten identificar cuándo se debe emplear este proceso para evitar la formación de jabones.

Los parámetros que más afectan la reacción de transesterificación son la razón molar alcohol-aceite, la temperatura y el tiempo de residencia (G. C. R. Silva & de Andrade, 2020). Es

importante establecer unas condiciones óptimas para garantizar una buena conversión de los reactivos.

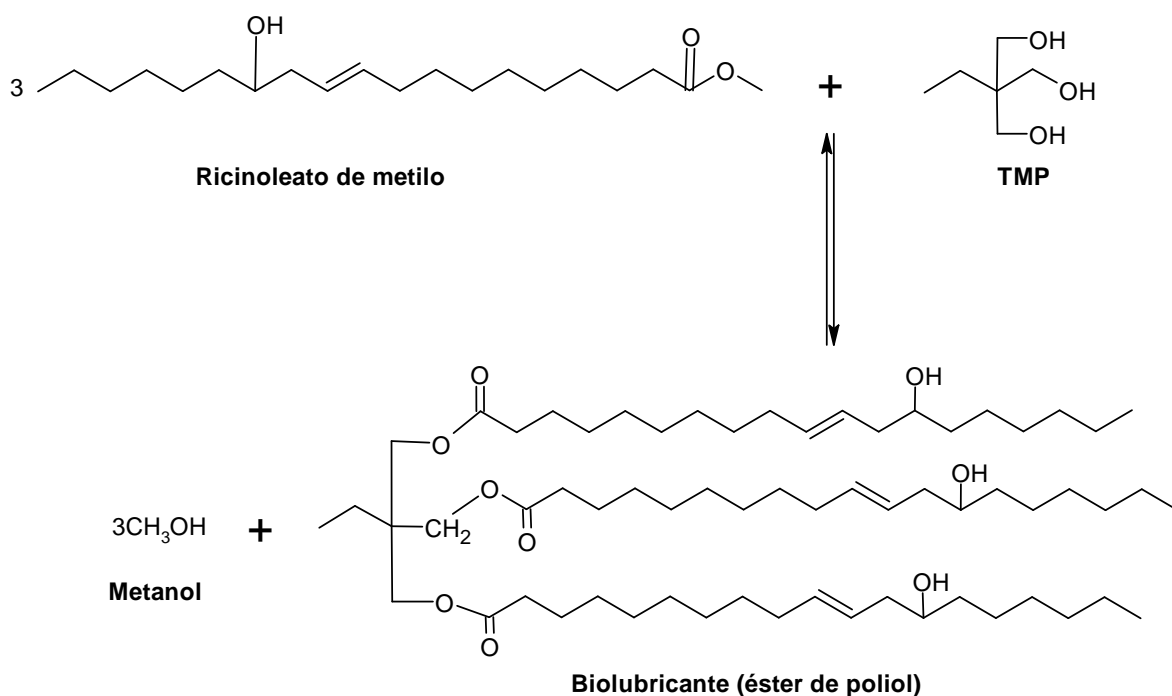
La síntesis de biolubricantes tiene dos etapas de transesterificación, en la primera se obtienen los metil ésteres (biodiésel) del aceite seleccionado, una vez terminada esta primera reacción se procede a configurar las condiciones para que se dé la segunda transesterificación denominada en algunos casos como transesterificación inversa. Para ello, es necesario el uso de un alcohol polihídrico, también llamado polioliol (Ver figura 4), siendo el trimetilolpropano (TMP) el alcohol más popular para la obtención de los denominados ésteres de polioliol, componente principal de un biolubricante, ya que brinda en el producto final propiedades lubricantes muy superiores al uso de cualquier otro alcohol como reactivo, además de tener un elevado punto de fusión y una estructura ramificada, características indispensables para la producción de biolubricantes (Musa et al., 2015).

**Figura 4** Trimetilolpropano (TMP), ejemplo de alcohol polihídrico o polioliol.



Nota: Tomado de Corporación Centro de Investigación en Palma de Aceite et al., 2022.

La reacción que ocurre es de igual forma que la anterior una transesterificación (ver figura 5), en esta etapa el polioliol, que para la mayoría de los casos es el TMP, reacciona con los ésteres de alquil, generalmente ésteres metílicos, que para este caso es el ricinoleato de metilo obtenido en la transesterificación del aceite de ricino, produciendo metanol y ésteres de polioliol (biolubricante).

**Figura 5** Transesterificación inversa del ricinoleato de metilo con TMP.

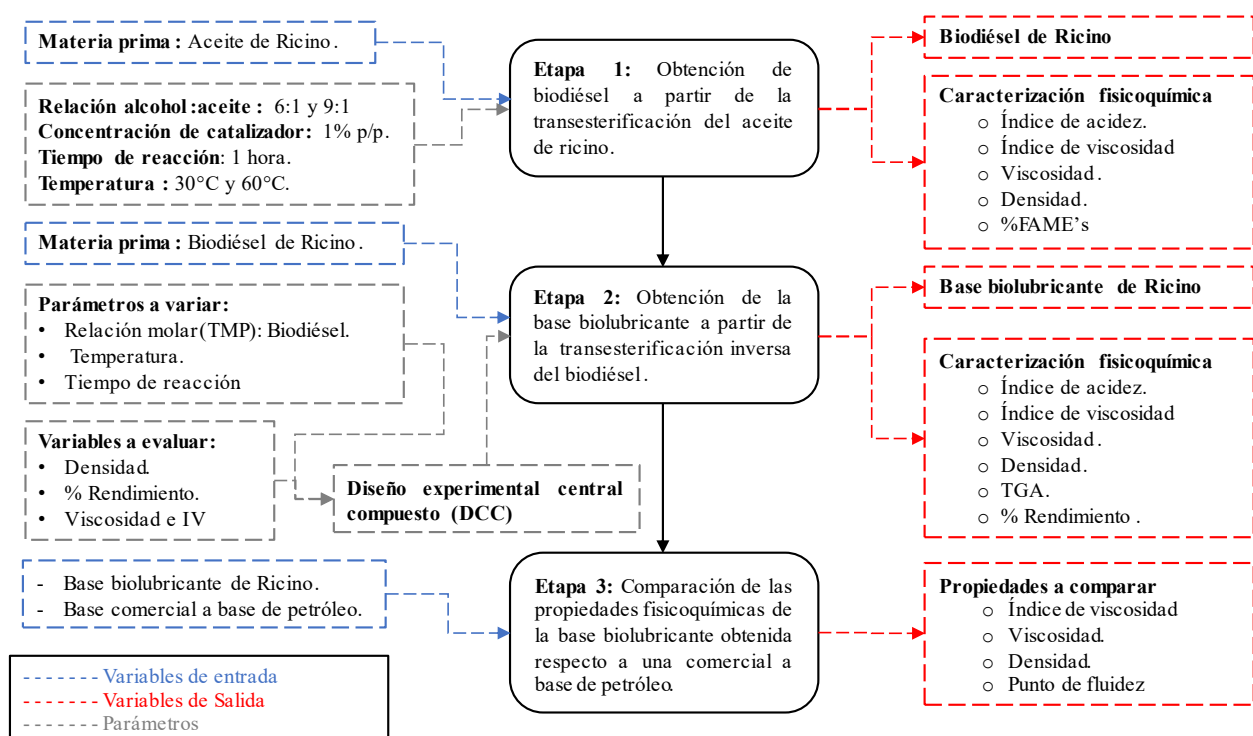
Nota: Adaptado de J. A. C. Da Silva et al., 2015.

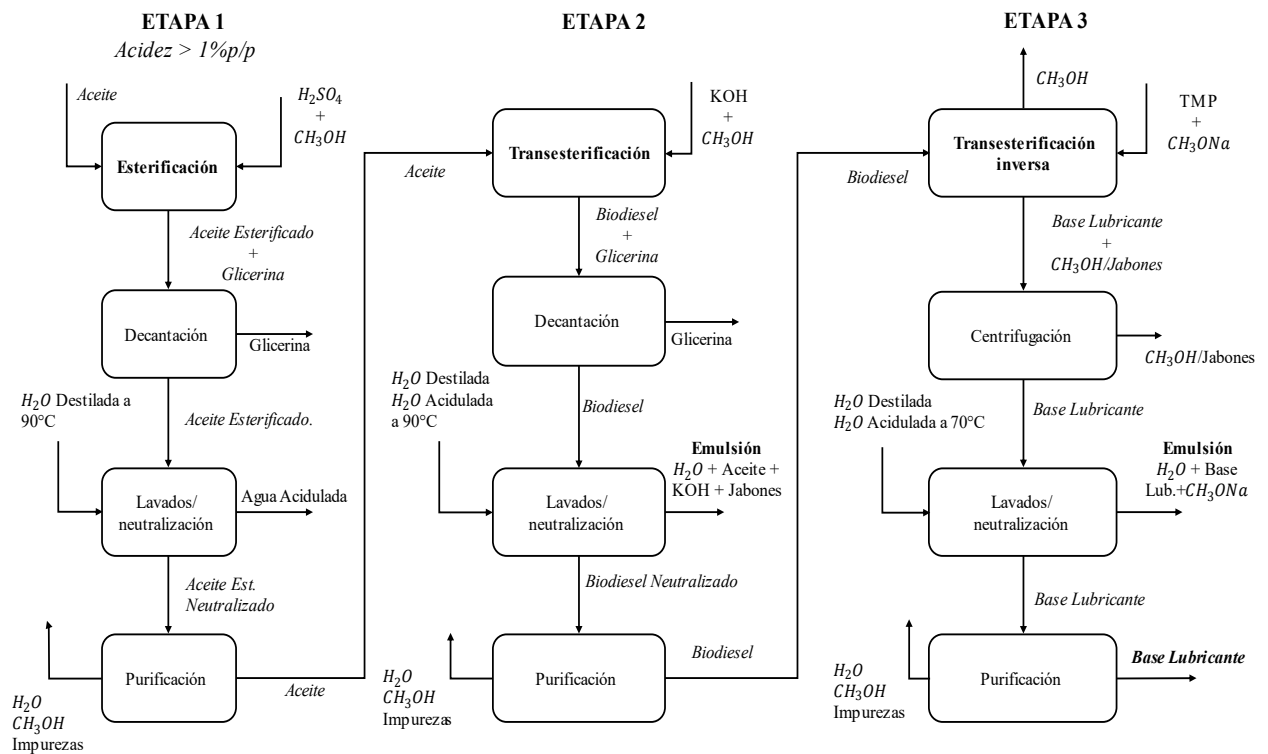
Las condiciones para su obtención requieren del uso de vacío con el fin de desplazar el equilibrio, razones molares ésteres/TMP entre 3:1 y 4:1, además del uso de catalizadores (Angulo, 2018). Generalmente se emplean bases fuertes como el metóxido de sodio o de potasio y tiempos de reacción más prolongados en comparación a la primera transesterificación.

### 3. Metodología

Para la realización de esta investigación se emplearon tres etapas de forma secuencial: la obtención de biodiésel, la producción de la base biolubricante y para finalizar la comparación del producto final obtenido con un lubricante comercial a base de petróleo. Se desarrollaron un total de 7 actividades distribuidas en cada una de las etapas.

**Figura 6** Esquema metodológico



**Figura 7** Diagrama de bloques de las etapas para la síntesis de las bases biolubricantes

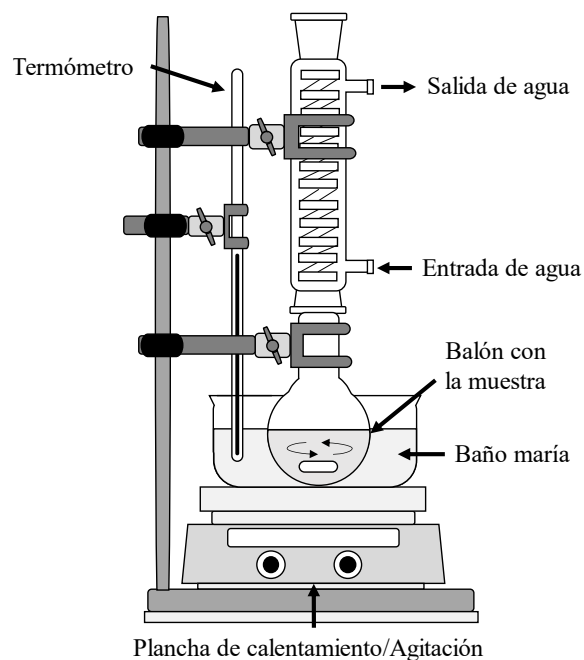
### 3.1. Desarrollo del objetivo 1: Obtención de biodiésel a partir de la transesterificación de aceite de ricino

#### 3.1.1. Adquisición y acondicionamiento de la materia prima

Inicialmente se adquirió la materia prima (aceite de ricino) de la empresa **Laboratorios León S.A.** Se realizó una medición del índice de acidez empleando la normativa UNE – EN ISO 660 del 2021 y el índice de saponificación según la norma UNE – EN ISO 3657 del 2020, con el fin de identificar si era necesario un proceso de esterificación previo a la transesterificación. Adicionalmente, se realizó un análisis termogravimétrico (TGA) para observar la estabilidad térmica de acuerdo con la norma ASTM D97-17b del 2022 y se midió la viscosidad cinemática a 40°C y 100°C según la norma ASTM D455 del 2021, con el fin de determinar el índice de viscosidad conforme a la norma ASTM D2270-10 del 2016.

### ***3.1.2. Obtención del biodiésel mediante transesterificación***

Para la producción de biodiésel a partir de aceite de ricino se usaron unas condiciones de referencia reportadas en la literatura, razón molar metanol/aceite de 6:1 a 9:1, tiempo de reacción de 1 hora, 1 % masa/masa de catalizador (KOH) y una temperatura de 60 °C (Keera et al., 2018). Se plantearon dos pruebas cambiando la razón molar de 6:1 a 9:1 y se mantuvieron igual las demás variables, según el rendimiento (gramos finales de biodiésel/gramos de aceite inicial) y lo observado durante los experimentos se seleccionaron unas condiciones para producir más biodiésel, necesario para la síntesis de las bases biolubricantes. En la figura 8 se puede apreciar el montaje experimental empleado para realizar esta reacción. Inicialmente se pesaba la masa de aceite y se realizaban los cálculos para determinar la cantidad requerida de metanol y de catalizador (ver Apéndice A), se agrega el aceite en un balón de 250 ml que se encontraba en un baño maría sobre una plancha de calentamiento y se agitaba empleando un agitador magnético hasta alcanzar la temperatura de reacción, lentamente se adiciona metanol con el catalizador y finalmente se ajustaba un condensador de reflujo para evitar pérdidas de alcohol.

**Figura 8** *Montaje experimental para la reacción de transesterificación*

Se acopló un termómetro con el fin de ir regulando manualmente la temperatura del baño de agua y lograr mantenerla en el valor deseado. Una vez terminada la reacción se dejó decantar la mezcla producida en un embudo de decantación por aproximadamente 10 horas, se separó la fase pesada (glicerol) de la fase liviana (biodiésel). Después, se procedió a retirar el metanol y el catalizador remanente en el biodiésel, para ello, se realizaron dos lavados con agua acidulada a una concentración de 1% m/m y tres con agua destilada hasta neutralizar completamente las trazas de KOH, posterior a esto, se llevó el biodiésel a una centrífuga de referencia HERAEUS MEGAFUGE 16 THERMO SCIENTIFIC por 10 minutos a 4500 rpm, con el fin de retirar partículas sólidas y el glicerol remanente, terminado este proceso se pasó el biodiésel a un horno a 105 °C por 2 horas para finalmente disponerlo en el análisis de las propiedades del mismo y la síntesis de las bases biolubricantes.

### ***3.1.3. Análisis de las propiedades del biodiésel***

Una vez producido el biodiésel, se procedió a realizar el análisis de las propiedades fisicoquímicas obtenidas. Para empezar, se determinó el contenido de ésteres metílicos (%FAME's) a partir de la norma UNE-EN 14103 empleando el cromatógrafo de referencia AGILENT 7890A del laboratorio de INTERFASE ubicado en el parque tecnológico de Guatiguará y se determinó la densidad según el método descrito por la norma ASTM D4052-22. Posterior a esto, se usó el instrumento TGA 5500 DISCOVERY TA INSTRUMENTS y el viscosímetro de referencia ANTON PAAR MC72 dispuesto por el laboratorio de biotecnología de la escuela de ingeniería química de la UIS, con el fin de realizar un análisis termogravimétrico (TGA) para observar la estabilidad térmica de acuerdo con la norma ASTM D97-17b del 2022 y calcular las viscosidades del biodiésel a 40 y 100 °C respectivamente para después estimar el IV del biodiésel según la normativa ASTM D2270-10.

## **3.2. Obtención de la base biolubricante a partir de la transesterificación inversa del biodiésel**

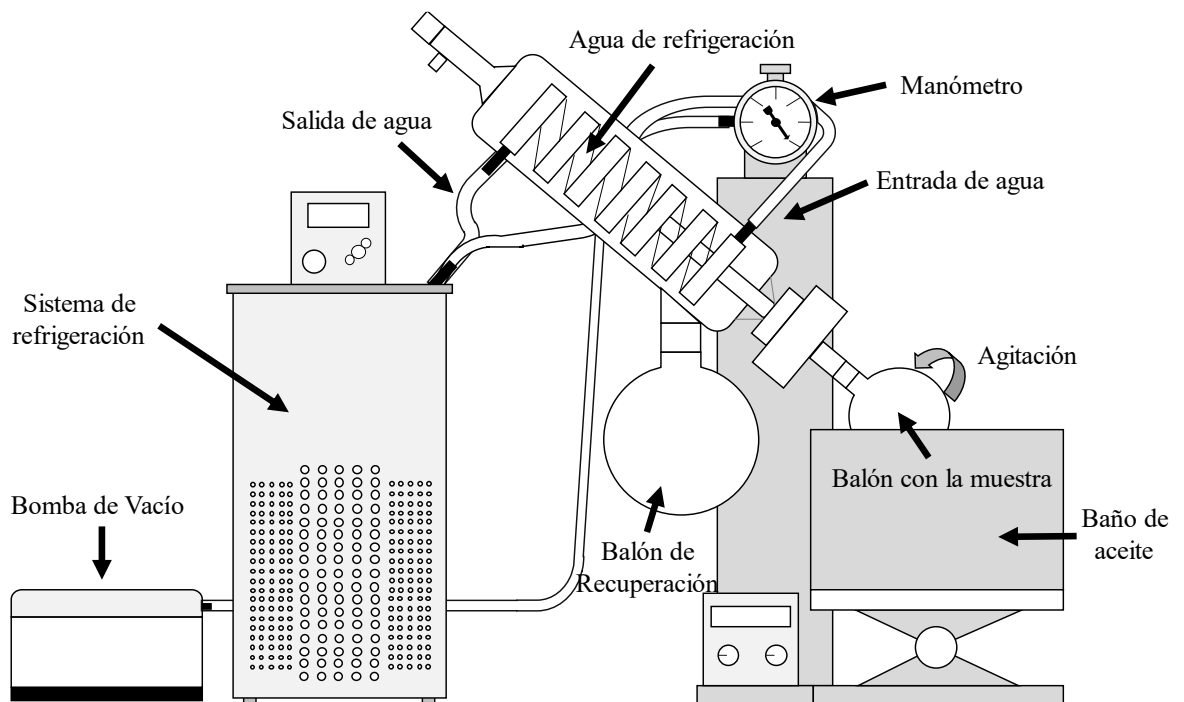
### ***3.2.1 Realización del diseño experimental central compuesto (DCC)***

Se establecieron como variables de salida el rendimiento (gramos de biolubricante/[gramos de biodiésel + gramos de TMP]) y la densidad de la base biolubricante, los parámetros a variar fueron la razón molar (biodiésel/TMP), la temperatura y el tiempo de reacción. Como punto central del diseño de experimentos se estableció una razón molar biodiésel/TMP de 3:1, tiempo de 120 minutos y temperatura de 120 °C. Se planteó el diseño según lo descrito en el libro análisis y diseño de experimentos (Gutiérrez & De la vara, 2012), obteniendo un total de 17 experimentos (ver Apéndice B). Para la realización de los análisis del diseño se empleó el programa MINITAB.

### 3.2.2. Síntesis y análisis de las muestras biolubricantes mediante transesterificación inversa

Para la obtención de cada una de las muestras descritas en el DCC se empleó como montaje principal un rotaevaporador de referencia HEIDOLPH, HEI-VAP VALUE ML/G1 dispuesto por el laboratorio de INTERFASE ubicado en el parque tecnológico de Guatiguará (ver figura 9), se pesaban 50 gramos del biodiésel obtenido en la actividad 3.1.2. y se realizaban los cálculos para determinar la cantidad necesaria de TMP (ver Apéndice C). Se fundía el TMP usando una plancha de calentamiento y se le adicionaron el biodiésel y el catalizador, se empleó metóxido de sodio al 30% de pureza en una proporción 1% masa/masa (gramos de metóxido/gramos de muestra). Esta mezcla se llevaba al balón de muestra del rotaevaporador en donde entraba en contacto con el recipiente que contenía aceite térmico, con el fin de alcanzar la temperatura de reacción.

**Figura 9** Montaje del rotaevaporador para la síntesis de las bases biolubricantes.



Al sistema descrito en la figura 9, se le acopló una bomba de vacío para generar la presión necesaria con el fin de desplazar el equilibrio, en este caso se empleó una presión de vacío correspondiente a 150 mbar.

Una vez terminada la reacción se procedía a centrifugar el producto obtenido, se empleó una centrífuga de referencia HERAEUS MEGAFUGE 16 THERMO SCIENTIFIC empleando unas condiciones 5000 rpm por un tiempo de 10 minutos, luego, se realizaron 2 lavados con agua acidulada y cinco con agua destilada hasta neutralizar completamente las trazas de  $\text{CH}_3\text{ONa}$  y posteriormente se volvían a centrifugar. Al finalizar, se disponía cada una de las bases para la determinación de las variables descritas en el DCC.

El método descrito anteriormente se basó en la metodología propuesta por Constante et al. (2017) y Camargo & Avellaneda (2021).

### **3.3. Comparación de propiedades fisicoquímicas de la base biolubricante con un lubricante comercial**

#### **3.3.1 Análisis de propiedades fisicoquímicas de las bases biolubricantes seleccionadas del DCC**

Las normas y métodos empleados para determinar cada una de las propiedades de las bases biolubricantes descritas en la metodología se describen en la tabla 2.

**Tabla 2** Normativas empleadas para el cálculo de propiedades de las bases biolubricantes.

<b>PROPIEDAD</b>	<b>NORMATIVA</b>
<b>Densidad</b>	ASTM D4052-22 del 2022
<b>Viscosidades a 40 y 100 °C</b>	ASTM D455 del 2021
<b>Índice de viscosidad (IV)</b>	ASTM D2270-10 del 2016
<b>TGA (análisis termogravimétrico)</b>	ASTM E2105-00 del 2016
<b>Punto de Fluidez</b>	ASTM D97-17b del 2022

Para el cálculo de las viscosidades a 100 °C se empleó un viscosímetro de Ostwald disponible en la escuela de ingeniería de petróleos de la UIS (ver Apéndice D), para las viscosidades a 40 °C un viscosímetro Brookfield DV2T (ver Apéndice S) y una aguja SC4-18 del grupo GIT adscrito a la escuela de ingeniería de petróleos, el TGA y el punto de fluidez únicamente se realizó para la base que presentó mejores propiedades.

### ***3.3.2 Comparación de las propiedades de la base biolubricante final con un lubricante comercial a base de petróleo***

Para esta actividad se realizó la búsqueda de la ficha técnica de algunos lubricantes comerciales, las propiedades a comparar fueron las descritas en la actividad 3.3.1. en total se compararon tres diferentes aceites lubricantes de diferente referencia con la base biolubricante obtenida en esta experimentación.

## **4. Resultados y análisis**

### **4.1. Producción y análisis del biodiésel**

#### ***4.1.1. Acondicionamiento de la materia prima***

En la tabla 3, se presentan las propiedades obtenidas para el aceite de ricino empleando los métodos descritos en la metodología.

**Tabla 3** *Propiedades del aceite de ricino usado como materia prima*

<b>Índice de acidez</b>	0,93	<i>mg KOH/g Aceite</i>
<b>Acidez</b>	0,47	<i>%m/m</i>
<b>Densidad a 25°C</b>	955,4	<i>kg/m<sup>3</sup></i>
<b>Índice de saponificación</b>	183	<i>mg KOH/g Aceite</i>
<b>Viscosidad Cinemática 40°C</b>	253	<i>mm<sup>2</sup>/s</i>
<b>Viscosidad Cinemática 100°C</b>	22	<i>mm<sup>2</sup>/s</i>
<b>Índice de viscosidad</b>	104	

Los AGL se saponifican en presencia de catalizadores alcalinos, lo que reduce el rendimiento general de la reacción y aumenta los costos debido a la necesidad de emplear una mayor cantidad de catalizador. Por esta razón, diferentes investigadores sugieren un valor límite de AGL del 1% m/m para realizar la transesterificación de un aceite de manera eficiente (Grosman et al., 2022). Para el caso del aceite de ricino utilizado, estos valores cumplen con las indicaciones, por lo tanto, no fue necesario implementar este pretratamiento ya que se trataba de una materia prima de excelente calidad.

#### ***4.1.2. Análisis del biodiésel***

Inicialmente según la metodología indicada, se realizaron los dos experimentos planteados. Sin embargo, en ambos casos no se presenció una separación de las fases una vez terminada la reacción y dejando decantar el producto.

La no separación de las fases indica que se requiere indispensablemente el uso de un método alternativo con el fin de separar el glicerol que se encuentra en solución con el biodiésel, estos compuestos no se separan debido al grupo hidroxilo presente en los ésteres metílicos del aceite de ricino ya que generan puentes de hidrógeno con el glicerol ocasionando la miscibilidad de los mismos, por esta razón, una forma de retirar el glicerol en la transesterificación es la adición de glicerina (Del et al., 2009); purificando así el biodiésel y realizando posteriormente las demás etapas nombradas en la metodología experimental utilizada en este proyecto.

Por otro lado, en diferentes investigaciones se ha optado por realizar la reacción a una temperatura entre los 30 y 40 °C (Deep & Singh Sandhu, 2017), donde se evidencia la separación de fases de los dos productos formados.

Por los motivos anteriormente mencionados, se decidió plantear dos experimentos más cambiando la temperatura a 30 °C con el fin de determinar el mejor camino a seguir para la

producción de biodiésel sin la necesidad de emplear algún otro tipo de sustancia para purificarlo. Disminuir la temperatura provoca menos pérdida de metanol por evaporación, por ende, el uso de un condensador de reflujo no sería necesario ya que el punto de ebullición del metanol es aproximadamente 60 °C.

**Tabla 4** Experimentos realizados para la obtención del biodiésel

Temperatura [°C]	RM Alcohol-Aceite	Tiempo [h]	Observaciones
60	9: 1	1	No se identificó separación de fases
60	6: 1	1	No se identificó separación de fases
30	6: 1	1	Se identificó separación de fases
30	9: 1	1	Se identificó separación de fases

Como se evidencia en la tabla 4, se descartaron las muestras a una temperatura de 60 °C ya que no se presentó una separación de fases. Además, al trabajar a una menor temperatura, en este caso 30 °C y con una acidez de la materia prima (aceite de ricino) considerablemente baja, se reduce drásticamente el riesgo de que ocurra la saponificación de los AGL con el KOH disminuyendo así la formación de jabones en la mezcla.

Para el caso de las 2 muestras a 30 °C donde se evidenció una separación de las fases, se identificó el %FAME's y el rendimiento obtenido para cada uno de los experimentos (ver tabla 5).

**Tabla 5** Comparación del biodiésel cambiando la razón molar.

Rm metanol:Ac	%FAME'S	Rendimiento
6:1	84,69	93,41%
9:1	85,26	92,23%

En la tabla 5 no se nota un cambio significativo empleando las diferentes razones molares, por esta razón, se decidió emplear una RM 6:1 para la producción de más biodiésel, ya que esto implica un menor consumo de metanol y se obtiene un biodiésel con características parecidas a

emplear una RM de 9:1. Los resultados obtenidos presentan una similitud cercana a las pruebas realizadas en previas investigaciones por el grupo INTERFASE UIS, Constante et al. (2017) sintetizaron biodiésel de ricino empleando condiciones similares a esta experimentación, obteniendo un %FAME's de éster metílico de ácidos grasos entre 83% y 88% (Constante et al., 2017).

Por otro lado, Elango et al. (2019), Asmare & Nigus (2014) y Nakarmi & Joshi (2015) sintetizaron biodiésel de ricino con especies originarias de la India, Etiopía y Nepal respectivamente, reportando un %FAME's entre el 90% y 94% con una temperatura entre los 60°C y 65°C. Sin embargo, Elango et al. (2019) no observó decantación del glicerol después de la transesterificación obteniendo una fase homogénea, contrario a la investigación de Asmare & Nigus (2014) y Nakarmi & Joshi (2015) donde después del tiempo de reacción se realizó la separación de la fase liviana de la pesada por medio de un embudo de decantación. De igual manera, Dias et al. (2013) realizaron un diseño experimental variando condiciones de tiempo entre 2 a 8 horas y temperatura en un intervalo de 55 a 65°C con aceite de ricino originario de Brasil y de igual forma no se observó separación de fases, reportando un %FAME's entre el 48,7 de 83,8%, porcentajes similares obtenidos en este estudio. Existe la posibilidad que el lugar de procedencia del aceite de ricino permita que la reacción se pueda llevar a cabo a 60°C retirando el glicerol del biodiésel por medio de decantación.

Un aumento de la razón molar mayor a 9:1 no tienen un efecto significativo en el %FAME's y afectaría la separación de la fase liviana y pesada, debido a la alta miscibilidad del metanol tanto en el biodiésel como en el glicerol (Alagha et al., 2024). A su vez, un aumento de la cantidad de catalizador disminuiría la selectividad de la reacción incrementado la saponificación del aceite (Elango et al., 2019). Se podría aumentar el %FAME's con el incremento de la

temperatura, sin embargo, para este estudio se presenta la dificultad de la separación del glicerol y, por ende, la purificación del biodiésel, dificultando así la siguiente etapa de reacción para la síntesis de las bases biolubricantes.

Las propiedades del biodiésel seleccionado para la síntesis de las bases biolubricantes se encuentran en la tabla 6.

**Tabla 6** Comparación de las propiedades del biodiésel obtenido y las reportadas por la norma.

Propiedad	Unidades	Experimental	Norma UNE-EN 14214	
			Mínimo	Máximo
<b>Índice de acidez</b>	mg KOH/ g biodiésel	0,27		0,5
<b>Acidez</b>	%m/m	0,13		
<b>Densidad a 25°C</b>	kg/m <sup>3</sup>	921,7		
<b>Viscosidad Cinemática 40°C</b>	mm <sup>2</sup> /s	8,24	3,5	5
<b>Viscosidad Cinemática 100°C</b>	mm <sup>2</sup> /s	2,39		
<b>Índice de viscosidad</b>		110		
<b>%FAME's</b>	%m/m	84,69	96,5	
<b>Ácido heptadecanoico</b>	%m/m	0,85		
<b>Ácido palmítico</b>	%m/m	0,96		
<b>Ácido linolénico</b>	%m/m	1,51		
<b>Ácido esteárico</b>	%m/m	2,44		
<b>Ácido linoleico</b>	%m/m	2,91		
<b>Ácido oleico</b>	%m/m	3,34		
<b>Ácido ricinoleico</b>	%m/m	72,68		

Según lo establecido por la norma UNE-EN 14214 el biodiésel obtenido no cumple con algunos de los requisitos para ser empleado como biocombustible, es importante resaltar que, el contenido de éster metílico (FAME's) no cumple con el mínimo exigido, sin embargo, al ser empleado como materia prima para la síntesis de otra sustancia, la implicación sería un gasto menor en el uso del reactivo límite (TMP) en la segunda transesterificación. Por lo tanto, es posible

usar el biodiésel con estas características, pero teniendo en cuenta el consumo de una menor cantidad de TMP.

Por otro lado, el índice de acidez obtenido implica que se tienen pocos AGL en el biodiésel, condición fundamental estipulada por la norma para catalogarse como un buen producto. Al compararse con el aceite de ricino, se evidencia una disminución leve en este parámetro, lo que indica que los AGL reaccionaron en una proporción pequeña para producir jabones, que fueron retirados en el proceso de purificación. A su vez se identificó una disminución de la viscosidad debido a la reducción de la longitud y ramificación de la cadena (Basto Florez et al., 2021) (García Muentes et al., 2018).

## **4.2. Desarrollo del objetivo 2: Producción y análisis de las bases biolubricantes.**

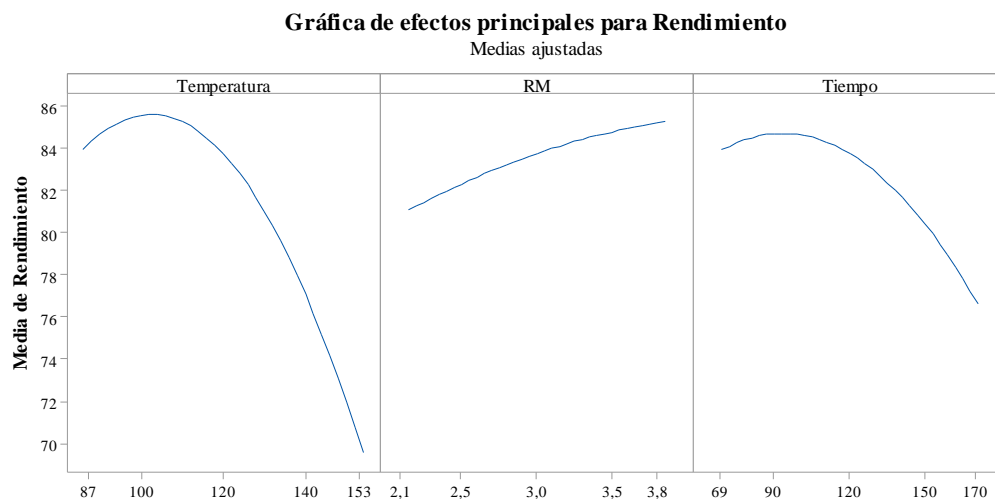
### ***4.2.1. Análisis del diseño experimental central compuesto.***

Inicialmente se tenían como variables de salida del DCC el IV y el rendimiento obtenido, sin embargo, debido a que algunas bases biolubricantes presentaron una gelificación se decidió tener como variable de salida solo el rendimiento, debido a que el equipo empleado para medir la viscosidad a 100 °C consistía en un capilar y dichos geles podrían haber causado una obstrucción en el equipo. Adicionalmente, se decidió realizar un análisis por separado de las muestras que se gelificaron y las que no. En la tabla 7 se presentan los resultados del DCC.

**Tabla 7** Resultados del diseño experimental.

Experimento	RM	t [min]	T [°C]	Rendimiento	Observaciones
1	2,5	90	100	82,05%	No se gelificó
2	3,5	90	100	87,55%	No se gelificó
3	2,5	150	100	77,70%	No se gelificó
4	3,5	150	100	82,15%	No se gelificó
5	2,5	90	140	76,58%	Se gelificó
6	3,5	90	140	78,15%	Se gelificó
7	2,5	150	140	77,15%	Se gelificó
8	3,5	150	140	76,47%	Se gelificó
9	2,16	120	120	81,75%	No se gelificó
10	3,84	120	120	85,32%	No se gelificó
11	3,0	69,55	120	86,21%	No se gelificó
12	3,0	170,45	120	85,50%	No se gelificó
13	3,0	120	86,36	88,20%	No se gelificó
14	3,0	120	153,63	66,32%	Se gelificó
15	3,0	120	120	82,54%	No se gelificó
16	3,0	120	120	84,28%	No se gelificó
17	3,0	120	120	84,44%	No se gelificó

Nota: Para la medición de la densidad en las muestras gelificadas se realizaba la fundición de estas.

**Figura 10** Efectos principales de las variables propuestas en el DCC sobre el rendimiento.

En la figura 10 se muestran los efectos principales de las variables de entrada propuestas en el DCC sobre el rendimiento. Al aumentar la temperatura se evidencia una reducción considerable del rendimiento después de los 110°C, es posible que esto se deba a la pérdida de masa debido a la autooxidación y volatilización del biodiésel, sin embargo, se le atribuye más a la saponificación de las muestras con el aumento de la temperatura. Lo mismo ocurre con el rendimiento en función del tiempo, a medida que el tiempo de reacción es mayor, la conversión de los FAME's en tri, di y monoésteres de TMP aumenta, pero también se incrementa la saponificación de la materia prima. Chang et al. (2012) evalúa la formación de jabones y triésteres de TMP a partir de aceite de palma variando la temperatura, tiempo, presión de vacío, RM y carga de catalizador, obteniendo que al aumentar el tiempo y la temperatura se aumenta la formación de triésteres de TMP, pero también la formación de jabones, afectando el rendimiento global resultados similares a esta investigación.

Por otro lado, el TMP que no reaccionó, se separó junto a los jabones durante la purificación de la base biolubricante, por tal motivo, un aumento de la RM incrementa el rendimiento, ocasionando que se prefiera un mayor exceso de biodiésel respecto al TMP. Camargo & Avellaneda (2021) observan que la variable de mayor incidencia respecto al rendimiento de la base biolubricante de sebo de bovino es la RM, teniendo un comportamiento análogo a esta investigación, siendo el rendimiento directamente proporcional a la RM. Prasca Cuello et al. (2018) también reporta la misma tendencia del rendimiento respecto a la RM, sin embargo, el aumento de la RM tiene como consecuencia la disminución en la viscosidad. Como se evidencia en el Apéndice U las variables de mayor impacto son la temperatura y el tiempo.

#### 4.2.2. Análisis de las bases biolubricantes sólidas.

Se decidió calcular el índice de acidez y de saponificación de cada una de las muestras gelificadas como se presenta en la tabla 8, con el fin de realizar un análisis adecuado a las sustancias que se solidificaron.

**Tabla 8** Bases biolubricantes gelificadas.

Experimento	Rm	t [min]	T [°C]	Índice de acidez	Acidez %m/m	Índice de saponificación
5	2,5	90	140	0,44	0,22	157,9
6	3,5	90	140	0,32	0,16	127,8
7	2,5	150	140	0,75	0,37	152,0
8	3,5	150	140	0,63	0,32	124,5
14	3,0	120	153,63	0,43	0,22	114,6

Inicialmente se planteó que la causa de la gelificación de las muestras, se debía a la autooxidación del biodiésel y la base biolubricante (ver Apéndice T) como consecuencia de la alta temperatura de operación en su síntesis ( $T > 120^{\circ}\text{C}$ ), estos compuestos pueden presentar un deterioro parcial desde el primer instante de reacción hasta su enfriamiento a temperatura ambiente, y a su vez, los excedentes o trazas de catalizador que no se pueden retirar durante el proceso de purificación pueden desencadenar procesos de autooxidación durante el almacenamiento del producto (Syahir et al., 2017). Sin embargo, el aumento del índice de acidez y la acidez respecto a la acidez del biodiésel es insignificante teniendo una acidez  $< 0,4\% \text{m/m}$ .

Respecto al índice de saponificación (IS), con el aumento de la temperatura de operación se incrementa la formación de triésteres (Yunus et al., 2004) , por lo tanto, el IS de la base biolubricante también aumenta, ya que es la medida del álcali necesaria para saponificar todos los grupos éster de la muestra (Xie et al., 2022). Sin embargo, el experimento 14 tiene un IS menor que los experimentos realizados a  $140^{\circ}\text{C}$ , esto puede deberse al aumento de la formación de

jabones durante la síntesis de la base biolubricante debido a la alta temperatura haciendo que los triésteres obtenidos reaccionen con el catalizador (Eze et al., 2015). También los experimentos 5 y 7 tienen un mayor IS respecto a los experimentos 6 y 8, esto se debe a que entre mayor sea el exceso de TMP la conversión de FAME's aumenta (Xie et al., 2022). La posible presencia de agua puede producir hidróxido de sodio a partir del catalizador metóxido de sodio, aumentando la actividad de saponificación (Xie et al., 2022) que en comparación con otros catalizadores como el metóxido de calcio tiene mayor actividad de saponificación (Chang et al., 2012) ocasionando así que el metóxido de sodio no sea un catalizador adecuado para la síntesis de biolubricantes a base de aceite de ricino.

Por otro lado, investigaciones anteriores sobre la síntesis de triésteres de trimetilolpropano como base biolubricante, utilizaron catalizadores alcalinos fuertes, provocando la saponificación de la materia prima FAME's reduciendo así el rendimiento de la reacción (Eze et al., 2015), siendo el experimento 14 el de mayor temperatura y con el menor rendimiento, presentando así la posible explicación de que los rendimientos de las muestras gelificadas sean menores en comparación a las líquidas (Xie et al., 2022).

En la fabricación de grasas lubricantes, se tiende a utilizar un agente espesante, por lo general, jabones de litio, calcio, sodio y aluminio, el cual, forma una red tridimensional entrecruzada, en donde, el agente espesante se encuentra disperso en una matriz líquida en este caso la base biolubricante (Núñez Carballar et al., 2016). Las muestras gelificadas presentan un comportamiento de un gel físico siendo una sustancia termorreversible, teniendo un autoensamblaje de la red cristalina durante el enfriamiento y una ruptura estructural durante el calentamiento (Wagner & Davidovich-Pinhas, 2023).

Cabrera Blanco et al. (2023) sintetizó una grasa lubricante a partir de la saponificación de aceite de cocina usado con NaOH, obteniendo una bio-grasa lubricante compuesta de 89% de aceite, 9% de jabones de sodio y un 2% de antiespumante, siendo clasificada como una grasa tipo II según la clasificación NLGI. Las muestras gelificadas pueden tener el potencial para ser utilizadas como biograsas lubricantes, aprovechando la saponificación del catalizador con la materia prima, sin embargo, se debe estudiar a mayor profundidad si la gelificación de las bases biolubricantes, cumple con los parámetros estipulados en la norma ASTM D128-98(2019).

#### 4.2.3. Análisis de las bases biolubricantes líquidas.

El parámetro más importante para el análisis de las muestras biolubricantes líquidas es el índice de viscosidad (IV). Los resultados de las mediciones realizadas se presentan en la tabla 9.

**Tabla 9** Bases biolubricantes líquidas.

Experimento	RM	t [min]	T [°C]	Viscosidad	Viscosidad	IV
				cinemática a 100°C [mm <sup>2</sup> /s]	cinemática a 40°C [mm <sup>2</sup> /s]	
1	2,5	90	100	6,00	84,03	13
2	3,5	90	100	6,24	53,83	78
3	2,5	150	100	11,80	147,50	55
4	3,5	150	100	7,86	126,61	77
9	2,16	120	120	13,67	141,62	91
10	3,84	120	120	5,69	32,36	116
11	3,0	69,55	120	5,00	47,46	45
12	3,0	170,45	120	10,94	130,03	54
13	3,0	120	86,36	5,22	31,90	97
15	3,0	120	120	7,68	79,85	35
16	3,0	120	120	7,71	80,10	36
17	3,0	120	120	7,86	79,06	47

Los IV obtenidos de las bases biolubricantes en su mayoría fueron menores al IV calculado tanto para el aceite como para el biodiésel de ricino, un posible causante del bajo IV de las muestras es la ramificación de las cadenas, propiedad que tiene un impacto positivo en la viscosidad

cinemática, punto de fluidez y estabilidad hidrolítica, sin embargo, tiene un efecto negativo en el IV (Zainal et al., 2018). La ramificación de las cadenas se puede producir por la formación de dímeros de ácido ricinoleico presentes en el biodiésel (ver Apéndice Q), en donde en una investigación realizada por J. A. C. Da Silva et al. (2013)., obtuvo rendimientos molares del 70% del cual 17% es de éster biolubricante y 52,2% dimero de ricinoleato de etilo.

Según la clasificación ISO VG una sustancia puede ser utilizada como aceite de lubricación si cumple con los requisitos mencionados en la tabla 10.

**Tabla 10** *Clasificación ISO VG para aceites de lubricación.*

<b>Viscosidad Cinemática a 40 °C [mm<sup>2</sup>/s]</b>			
<b>ISO VG</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>	<b>IV</b>
<b>32</b>	28,8	35,2	>95
<b>46</b>	41,4	50,6	>95
<b>100</b>	90	110	>95
<b>150</b>	135	165	>95

Al analizar los valores de IV obtenidos en las muestras líquidas, solamente uno de estos cumple con los requisitos para ser usado como base lubricante, el experimento número 10, con un IV de 116 y una ISO VG de 32. Dicho índice de viscosidad podría representar una excelente base de lubricación que al agregar otras sustancias se podría alcanzar un valor agregado más alto.

Sin embargo, se debe tener en cuenta que dichos biolubricantes obtenidos representan únicamente la base de la sustancia, como ya se mencionó anteriormente, una vez mezcladas con otros aditivos dicha propiedad podría presentar una mejora. Aquellos con IV considerablemente bajo deben descartarse inmediatamente para ser usados como aceites de lubricación, ya que un cambio en la temperatura modificaría drásticamente sus propiedades y el uso de otras sustancias no representaría una mejora considerable para soportar los cambios de viscosidad debido a los cambios abruptos de temperatura.

Lo más común en el mercado son aquellos con IV entre 95 y 150, las bases obtenidas en los experimentos 9 y 13 con índices de viscosidad de 91 y 97 respectivamente también se podrían considerar como sustancias potenciales para modificar sus propiedades de lubricación empleando aditivos.

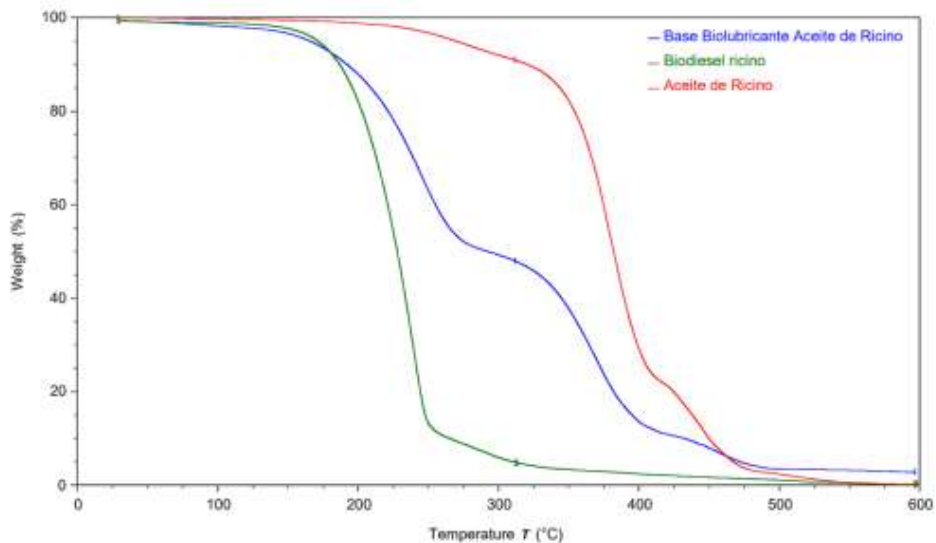
Al analizar el IV del biodiésel de ricino se observa que es mayor que el de su predecesor (aceite de ricino), y a que a su vez no cumple con el %FAME's estipulado por la norma UNE-EN 14214 para ser utilizado como biocombustible, se podría adicionar aditivos de tal forma que mejore sus propiedades y pueda ser catalogado como una base biolubricante. Ahmad et al. (2022), obtuvo una base biolubricante a partir de biodiésel de ricino con nanopartículas de óxido de hierro como aditivos, mejorando propiedades como punto de fluidez, punto de inflamación e IV.

Otra alternativa, para utilizar el biodiésel de ricino como una base biolubricante es realizar la transesterificación del aceite de ricino con alcoholes de cadena más larga como el propanol y butanol, aumentando así la longitud de la cadena lipídica obteniendo un mejor IV (Zainal et al., 2018) (Pradhan et al., 2021).

La sustancia con un mayor potencial para ser usada como base de lubricación fue la que se obtuvo empleando las condiciones de operación del experimento número 10, correspondientes a una razón molar de 3,84, un tiempo de 120 minutos y una temperatura de reacción de 120 °C.

#### ***4.2.4. Análisis Termogravimétrico TGA***

A continuación, en la figura 11 se presentan los resultados del análisis TGA que se realizó a las muestras que se obtuvieron durante el desarrollo de la experimentación con el fin de comparar la estabilidad térmica de cada una.

**Figura 11** TGA del aceite, biodiésel y base biolubricante de ricino.

Para la base biolubricante se observa 3 etapas de pérdida de masa: En la primera etapa con el mayor porcentaje de pérdida correspondiente al 46,91% comenzó alrededor de los 180°C, con una temperatura máxima de 270°C, que puede ser ocasionada por la oxidación y combustión de los metil ésteres y dímeros del ácido ricinoleico. En la segunda etapa, el rango de temperatura de pérdida de masa es aproximadamente 275°C a 400°C con un porcentaje del 39,55%, relacionada con la combustión y volatilización de ésteres de mayor cadena como los mono, di y triésteres de trimetilolpropano; y una tercera etapa en que inicia en una temperatura de 405°C con un porcentaje de 8,96%, dejando un residuo a los 600°C de aproximadamente 3,487%.

Al comparar la base biolubricante con el aceite de ricino de igual forma presenta 3 etapas, teniendo una etapa inicial alrededor de los 280°C hasta los 330°C con un porcentaje de 7,6%. Una segunda etapa con una temperatura máxima 415°C con el mayor porcentaje correspondiente al 69,747% y por último una tercera etapa con un porcentaje de 21,243% hasta los 550°C, con un residuo a los 600°C de 0,079%, teniendo la base biolubricante un mayor residuo a los 600°C. Presentando así, una menor estabilidad térmica la base biolubricante debido a que entre mayor sea

la ramificación de la cadena menor es la estabilidad térmica (Zainal et al., 2018) donde en estudios anteriores se utilizaron trioles y obtuvieron de igual forma que la base biolubricante presenta una menor estabilidad que el aceite (Nogales-Delgado & Encinar Martín, 2021).

La descomposición de la base biolubricante presenta una menor degradación que las bases obtenidas a partir de aceite de cocina residual, la cual comienza su descomposición a los 200°C (Hussein et al., 2021), cabe aclarar que el biolubricante de aceite de cocina fue sintetizado con un diol, el cual hace que la ramificación de la cadena sea menor que la base lubricante sintetizada a partir de biodiésel de ricino y TMP. Sin embargo, ambas temperaturas iniciales de degradación se encuentran dentro del rango de 150°C - 350°C aprobado por Tripathi et al. (2015) y Hussein et al. (2021).

Por otro lado, en lo que respecta al biodiésel, la base biolubricante presenta una mayor estabilidad térmica, donde el biodiésel presenta 2 etapas de pérdida de masa: la primera etapa con una temperatura inicial 140°C hasta 250°C con un porcentaje del 84,377% siendo esta la etapa de volatilización y descomposición de los metil ésteres. Y una segunda etapa con una temperatura máxima de 310°C correspondiente al 11,486% con un residuo de 0,374% a los 600°C. La etapa inicial del biodiésel y la base biolubricante de ricino tienen temperaturas cercanas de degradación, debido a la presencia de metil ésteres y dímeros de ácido ricinoleico en la base biolubricante que no reaccionaron y no se retiraron en el proceso de purificación.

#### **4.3. Desarrollo del objetivo 3: Comparación de la base biolubricante seleccionada.**

La base biolubricante obtenida en esta investigación representa un potencial sustituto de algunos aceites lubricantes comerciales empleados actualmente, al comparar dicha sustancia con dos lubricantes comerciales como se evidencia en la tabla 11, se puede apreciar cómo a pesar de no tener ningún tipo de aditivo, sus propiedades se asemejan mucho a dos aceites que presentan

en su producto final una considerable mezcla de sustancias que mejoran sus comportamientos en lubricación.

**Tabla 11** *Comparación de la base lubricante seleccionada con lubricantes comerciales.*

<b>Biolubricante</b>	<b>Viscosidad 40 °C [mm<sup>2</sup>/s]</b>	<b>Viscosidad 100 °C [mm<sup>2</sup>/s]</b>	<b>IV</b>	<b>Punto de fluidez [°C]</b>	<b>Clasificación ISO VG</b>
<b>Esta investigación</b>	<b>32,36</b>	<b>5,69</b>	<b>116</b>	<b>&lt;-6</b>	<b>32</b>
<b>Mobil Hidraulic AW</b> (ver Apéndice V)	30,2	5,2	103	-18	32
<b>Krönen Hidrafluid HC</b> (ver Apéndice V)	46	7,03	110	-24	46

Por otro lado, al comparar las propiedades del biolubricante seleccionado con otras investigaciones que emplearon las mismas materias primas: aceite de ricino y TMP, se evidencia como tiene una similitud con algunas de estas. En la tabla 12 se presentan las propiedades principales obtenidas en esta investigación y algunas en otras experimentaciones.

**Tabla 12** Comparación de la base biolubricante seleccionada con algunas obtenidas en otras investigaciones a partir de aceite de ricino.

Biolubricante	Referencia	Viscosidad 40 °C [mm <sup>2</sup> /s]	Viscosidad 100 °C [mm <sup>2</sup> /s]	IV	Punto de fluidez [°C]	Observaciones
<b>1</b>	<b>Esta investigación</b>	<b>32,36</b>	<b>5,69</b>	<b>116</b>	<b>&lt; -6</b>	
<b>2</b>	(Greco-Duarte et al., 2017)	278,1	24,49	112	-39	
<b>3</b>	(Perera et al., 2022)	11,28	3,10	141	-	
<b>4</b>	(J. A. C. Da Silva et al., 2013)	19,52	4,37	137	-	
<b>5</b>	(Tulashie & Kotoka, 2020)	208,39	16,47	79	-	
<b>6</b>	(Khan et al., 2022)	45,30	9,20	191	-8	Triéster de ricino TMP
<b>7</b>	(J. A. C. Da Silva et al., 2013)	287,2	26,13	119	-27	Reacción con exceso de TMP
<b>8</b>	(J. A. C. Da Silva et al., 2013)	57,26	8,617	125	-	Reacción con exceso de Biodiésel
<b>9</b>	(Ballesteros et al., 2018)	221,91	17,68	84,2	-	Catalizador KOH
<b>10</b>	(Lagos et al., 2018)	35	-	149,16	-	Catalizador Heterogéneo AMB
<b>11</b>	(Lagos et al., 2018)	37	-	118,98	-	Catalizador Heterogéneo MOR

Es importante resaltar, como se evidencian en los biolubricantes 7 y 8 una mejora en el índice de viscosidad al producir la reacción con un exceso de biodiésel en vez de emplear el TMP como reactivo en exceso, condiciones similares a esta investigación. Por otro lado, al cambiar el tipo de catalizador (biolubricantes 10 y 11) se puede notar como se ve favorecido el IV, se esperaría que, al sustituir el metóxido de sodio empleado en esta investigación, se presente una mejora significativa en la base biolubricante obtenida. Sin embargo, emplear algún tipo de catalizador heterogéneo implicaría un mayor gasto económico. Es posible realizar una optimización en la

síntesis tanto del biodiésel como del biolubricante con el fin de obtener mejores propiedades de lubricación para el caso del segundo y un mayor porcentaje de FAME's para el caso del primero, obteniendo así mejores IV como se evidencian en los biolubricantes 3,4 y 6.

Finalmente, El potencial que demostró el aceite de ricino para ser empleado como materia prima, fue más que evidente, obteniendo dos tipos de sustancias de lubricacion: un gel y un líquido. Dos sustancias con propiedades diferentes y que abren la posibilidad para buscar una mejora en su síntesis, como por ejemplo empleando aditivos, y estudiar más a fondo sus propiedades y sus aplicaciones. Lo anterior, permite abrir la posibilidad para futuras investigaciones con el fin de encontrar una mejora significativa del producto y plantear estudios de viabilidad y factibilidad.

## 5. Conclusiones

Se logró obtener biodiésel de ricino a temperaturas cercanas al ambiente, separando la fase liviana de la fase pesada. El aumento de la razón molar no tuvo un cambio significativo en el %FAME's. Se obtuvo un %FAME's menor a lo estipulado por la norma UNE-EN 14214, sin embargo, fue posible realizar la síntesis de los biolubricantes.

Se determinó que las variables más significativas en el rendimiento de las bases biolubricantes son la temperatura y el tiempo. Donde, a mayores temperaturas y tiempos favorecen la formación de poliésteres (biolubricante) pero aumentan las reacciones de saponificación obteniendo subproductos no deseados y disminuyendo el rendimiento del producto final una vez terminada la reacción. Las mejores condiciones se dieron empleando una razón molar de 3,84:1 biodiésel:TMP, 1% p/p de catalizador, tiempo de reacción de 120 minutos y una temperatura de 120°C, dando como resultado una base biolubricante líquida.

La base biolubricante final cumple con los requerimientos de viscosidad e índice de viscosidad de la norma de clasificación ISO VG 32 para lubricantes comerciales, al compararla con lubricantes a base de petróleo se evidencian valores similares y, por lo tanto, un potencial sustituto de dichos aceites. Se podría llegar a buscar una mejora implementando algún tipo de aditivo o modificando el tipo de catalizador. Lo anterior, permite identificar el potencial que tiene para ser usado como aceite lubricante.

## 6. Recomendaciones

Realizar pruebas con condiciones moderadas de temperatura y tiempo, con el fin de aumentar la selectividad de la reacción en la síntesis de bases biolubricantes de ricino. A su vez, modificar la presión de vacío del sistema con el fin de evaluar la influencia de esta variable y estipular valores óptimos en la obtención de poliésteres.

Evaluar la influencia de catalizadores de naturaleza básica como el metóxido de calcio o potasio para comparar el impacto de estos en la formación de jabones en la transesterificación inversa del biodiésel con el TMP, obteniendo un catalizador que aumente la selectividad y conversión del proceso.

Aplicar pruebas de cromatografía de gases acoplada a masas para identificar la composición de la base biolubricante con el fin de cuantificar la conversión de los metil ésteres hacia los mono, di y triésteres de trimetilolpropano de ricino.

Realizar un análisis económico de los costos de producción de bases biolubricantes, teniendo en cuenta los procesos de esterificación y transesterificación previos a la transesterificación inversa.

**Referencias Bibliográficas**

- Ahmad, U., Raza Naqvi, S., Ali, I., Saleem, F., Taqi Mehran, M., Sikandar, U., & Juchelková, D. (2022). Biolubricant production from castor oil using iron oxide nanoparticles as an additive: Experimental, modelling and tribological assessment. *Fuel*, 324. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124565>
- Ahmed, R., & Huddersman, K. (2022). Review of biodiesel production by the esterification of wastewater containing fats oils and grease (FOGs). *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 110, 1–14. <https://doi.org/10.1016/J.JIEC.2022.02.045>
- Alagha, S. M., Rushdi, S., Al-Sharify, Z. T., & Onyeaka, H. (2024). Production of Biodiesel from Caster Oil: Experimental and Optimization Study. *Tikrit Journal of Engineering Sciences*, 31(1), 251–261. <https://doi.org/10.25130/tjes.31.1.21>
- Angelovič, M., Jablonický, J., Tkáč, Z., & Angelovič, M. (2015). Oxidative stability of fatty acid alkyl esters: A review. *Potravinárstvo*, 9(1), 417–426. <https://doi.org/10.5219/500>
- Angulo, B. (2018). *Transformación de derivados de ácidos grasos para la obtención de compuestos de interés industrial*. <https://digital.csic.es/handle/10261/187707>
- Annisa, A. N., & Widayat, W. (2018). *A Review of Bio-lubricant Production from Vegetable Oils Using Esterification Transesterification Process*. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201815606007>
- Appiah, G., Tulashie, S. K., Akpari, E. E. A., Rene, E. R., & Doodoo, D. (2022). Biolubricant production via esterification and transesterification processes: Current updates and perspectives. *International Journal of Energy Research*, 46(4), 3860–3890. <https://doi.org/10.1002/ER.7453>

- Asmare, M., & Nigus, G. (2014). Synthesis and Characterization of Biodiesel from Castor Bean as Alternative Fuel for Diesel Engine. *American Journal of Energy Engineering*, 2(1), 1. <https://doi.org/10.11648/j.ajee.20140201.11>
- Aziz, N. A. M., Hamid, H. A., Yunus, R., Abbas, Z., Omar, R., Rashid, U., & Syam, A. M. (2020). Kinetics and thermodynamics of synthesis of palm oil-based trimethylolpropane triester using microwave irradiation. *Journal of Saudi Chemical Society*, 24(8), 552–566. <https://doi.org/10.1016/J.JSCS.2020.05.006>
- Ballesteros, M., Escandón, D., Ramirez, G., & Quintero, H. (2018). *Síntesis y caracterización de una base biolubricante a partir de aceite de ricino y trimetilolpropano*.
- Basto Florez, L. E., Millán Alvarado, S. A., Medina Caballero, L. F., Mora Vergara, L. Z., & Caballero Hernández, Y. T. (2021). Study of biodiesel from Sacha inchi oil (*Plukenetia volubilis* Linneo). *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 20(1), 165–178. <https://doi.org/10.18684/rbsaa.v20.n1.2022.1585>
- Bohórquez M., W. F., Cadavid E., J. G., Díaz V., M. A., García N., J. A., Narváez R., P. C., & Orjuela, Á. (2022). *Poliolios grasos: producción, retos y oportunidades para el sector del aceite de palma*. Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite - FEDEPALMA. <https://doi.org/10.56866/9789588360935>
- Cabrera Blanco, O., Olgún Jiménez, V. A., Montañó Roldan, V. L., & Cuello Pérez, M. (2023). Obtaining lubricant bio-grease from vegetal oil used in cooking. *Tecnología Química*, 43.
- Camargo, C. A., & Avellaneda, F. A. (2021). *Obtención de una base biolubricante a partir de aceites transesterificados de las grasas animales (sebos) provenientes de la industria bovina*.
- Cecilia, J. A., Plata, D. B., Saboya, R. M. A., de Luna, F. M. T., Cavalcante, C. L., & Rodríguez-Castellón, E. (2020). An Overview of the Biolubricant Production Process: Challenges and

- Future Perspectives. *Processes* 2020, Vol. 8, Page 257, 8(3), 257.  
<https://doi.org/10.3390/PR8030257>
- Chang, T. S., Masood, H., Yunus, R., Rashid, U., Choong, T. S. Y., & Biak, D. R. A. (2012). Activity of Calcium Methoxide Catalyst for Synthesis of High Oleic Palm Oil Based Trimethylolpropane Triesters as Lubricant Base Stock. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 51(15), 5438–5442. <https://doi.org/10.1021/IE2028365>
- Constante, M., Paez, K., Ariza, E., & Avellaneda, F. (2017). *Estudio de factibilidad técnica del uso de aceite transesterificado de ricino (Ricinus Communis) como fase continua en lodos de perforación de emulsión inversa.*
- Corporación Centro de Investigación en Palma de Aceite, C., Orjuela, Á., Bohórquez M., W. F., Díaz V., M. A., Narváez R., P. C., Cadavid E., J. G., & García N., J. A. (2022). Polioles grasos: producción, retos y oportunidades para el sector del aceite de palma. *Polioles grasos: producción, retos y oportunidades para el sector del aceite de palma.*  
<https://doi.org/10.56866/9789588360935>
- Da Silva, J. A. C., Habert, A. C., & Freire, D. M. G. (2013). A potential biodegradable lubricant from castor biodiesel esters. *Lubrication Science*, 25(1), 53–61.  
<https://doi.org/10.1002/LS.1205>
- Da Silva, J. A. C., Soares, V. F., Fernandez- Lafuente, R., Habert, A. C., & Freire, D. M. G. (2015). Enzymatic production and characterization of potential biolubricants from castor bean biodiesel. *Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic*, 122, 323–329.  
<https://doi.org/10.1016/J.MOLCATB.2015.09.017>
- Deep, A., & Singh Sandhu, S. (2017). *Optimization of Reaction Parameters of Transesterification for Castor Oil.*

[https://www.researchgate.net/publication/316738317\\_Optimization\\_of\\_Reaction\\_Parameters\\_of\\_Transesterification\\_for\\_Castor\\_Oil](https://www.researchgate.net/publication/316738317_Optimization_of_Reaction_Parameters_of_Transesterification_for_Castor_Oil)

Del, T., García-Cota, N. J., De La Cruz-Gonzalez, V. M., Nájera-Martínez, I., Sanchez-Daza, O., & Reyes-Ortega, Y. (2009). *Purificación de biodiesel obtenido de aceite de ricinus*.

Dias, J. M., Araújo, J. M., Costa, J. F., Alvim-Ferraz, M. C. M., & Almeida, M. F. (2013). Biodiesel production from raw castor oil. *Energy*, 53, 58–66.  
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.02.018>

Durango-Giraldo, G., Zapata-Hernandez, C., Santa, J. F., & Buitrago-Sierra, R. (2022). Palm oil as a biolubricant: Literature review of processing parameters and tribological performance. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 107, 31–44.  
<https://doi.org/10.1016/J.JIEC.2021.12.018>

Elango, R. K., Kiruthika, S., Chandrasekaran, M., Viruthagiri, T., Mathur, R., & Krishnamurthi, T. (2019). Transesterification of castor oil for biodiesel production: Process optimization and characterization. *Microchemical Journal*, 145, 1162–1168.  
<https://doi.org/10.1016/j.microc.2018.12.039>

Eze, V. C., Harvey, A. P., & Phan, A. N. (2015). Determination of the kinetics of biodiesel saponification in alcoholic hydroxide solutions. *Fuel*, 140, 724–730.  
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.10.001>

Fang, Y. R., Yeh, Y., & Liu, H. S. (2018). A novel strategy of biodiesel production from wet microalgae by direct saponification–esterification conversion (DSEC). *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 83, 23–31. <https://doi.org/10.1016/J.JTICE.2017.12.001>

Foroutan, R., Peighambardoust, S. J., Mohammadi, R., Peighambardoust, S. H., & Ramavandi, B. (2024). The potential of biochar derived from banana peel/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/ZIF-67@K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> as

- magnetic nanocatalyst for biodiesel production from waste cooking oils. *Results in Engineering*, 22, 102005. <https://doi.org/10.1016/J.RINENG.2024.102005>
- García Muentes, A., Lafargue Pérez, F., Labrada Vázquez, B., Díaz Velázquez, M., & Sánchez del Campo Lafita, A. E. (2018). Physicochemical properties of oil and biodiesel produced from *jatropha curcas* L. in the province of Manabí, Ecuador. *Rev. Cubana Quím*, 30(2224–5421), 142–158.
- González, J. P. C., Gutiérrez, P. E. Á., Medina, M. A., Zapata, B. Y. L., Guerrero, G. V. R., & Valdés, L. G. V. (2020). Effects on Biodiesel Production Caused by Feed Oil Changes in a Continuous Stirred-Tank Reactor. *Applied Sciences* 2020, Vol. 10, Page 992, 10(3), 992. <https://doi.org/10.3390/APP10030992>
- Greco-Duarte, J., Cavalcanti-Oliveira, E. D., Da Silva, J. A. C., Fernandez-Lafuente, R., & Freire, D. M. G. (2017). Two-step enzymatic production of environmentally friendly biolubricants using castor oil: Enzyme selection and product characterization. *Fuel*, 202, 196–205. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2017.04.036>
- Grosmann, M. T., Andrade, T. A., Bitonto, L. di, Pastore, C., Corazza, M. L., Tronci, S., & Errico, M. (2022). Hydrated metal salt pretreatment and alkali catalyzed reactive distillation: A two-step production of waste cooking oil biodiesel. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 176, 108980. <https://doi.org/10.1016/J.CEP.2022.108980>
- Gutiérrez, H., & De la vara, R. (2012). *Análisis y Diseño de Experimentos*. [https://www.researchgate.net/publication/44401609\\_Analisis\\_y\\_Disenio\\_de\\_Experimentos](https://www.researchgate.net/publication/44401609_Analisis_y_Disenio_de_Experimentos)
- Hamdan, S. H., Chong, W. W. F., Ng, J. H., Chong, C. T., & Zhang, H. (2018). Nano-tribological characterisation of palm oil-based trimethylolpropane ester for application as boundary

- lubricant. *Tribology International*, 127, 1–9.  
<https://doi.org/10.1016/J.TRIBOINT.2018.05.036>
- Hussein, R. Z. K., Attia, N. K., Fouad, M. K., & ElSheltawy, S. T. (2021). Experimental investigation and process simulation of biolubricant production from waste cooking oil. *Biomass and Bioenergy*, 144, 105850. <https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2020.105850>
- Jemima Romola, C. V., Meganaharshini, M., Rigby, S. P., Ganesh Moorthy, I., Shyam Kumar, R., & Karthikumar, S. (2021). A comprehensive review of the selection of natural and synthetic antioxidants to enhance the oxidative stability of biodiesel. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 145, 111109. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2021.111109>
- Keera, S. T., El Sabagh, S. M., & Taman, A. R. (2018). Castor oil biodiesel production and optimization. *Egyptian Journal of Petroleum*, 27(4), 979–984.  
<https://doi.org/10.1016/J.EJPE.2018.02.007>
- Khan, S., Das, P., Quadir, M. A., Thafer, M., Annamalai, S. N., Mahata, C., Hawari, A. H., & Al Jabri, H. (2022a). A comparative physicochemical property assessment and techno-economic analysis of biolubricants produced using chemical modification and additive-based routes. *Science of the Total Environment*, 847. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157648>
- Lagos, L., Rojas, G., Ramirez, G., & Ballesteros, L. (2018). *Obtención de un biolubricante por catálisis heterogénea mediante la transesterificación del aceite de higuera con trimetilolpropano.*
- Luna, F. M. T., Salmin, D. C., Santiago, V. S., Maia, F. J. N., Silva, F. O. N., Mazzetto, S. E., & Cavalcante, C. L. (2019). Oxidative Stability of Acylated and Hydrogenated Ricinoleates Using Synthetic and Natural Antioxidants. *Journal of Chemistry*, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/3973657>

- Mandari, V., & Devarai, S. K. (2021). Biodiesel Production Using Homogeneous, Heterogeneous, and Enzyme Catalysts via Transesterification and Esterification Reactions: a Critical Review. *BioEnergy Research* 2021 15:2, 15(2), 935–961. <https://doi.org/10.1007/S12155-021-10333-W>
- Monteiro, R. R. C., Berenguer-Murcia, Á., Rocha-Martin, J., Vieira, R. S., & Fernandez-Lafuente, R. (2023). Biocatalytic production of biolubricants: Strategies, problems and future trends. *Biotechnology Advances*, 68, 108215. <https://doi.org/10.1016/J.BIOTECHADV.2023.108215>
- Musa, U., Mohammed, I. A., Sadiq, M. M., Aberuaga, F., Olurinde, A. O., & Obamina, R. (2015). *Synthesis and characterization of trimethylolpropane-based biolubricants from castor oil*. [https://www.researchgate.net/publication/283719311\\_SYNTHESIS\\_AND\\_CHARACTERIZATION\\_OF\\_TRIMETHYLOLPROPANE\\_BASED\\_BIOLUBRICANTS\\_FROM\\_CASTOR\\_OIL](https://www.researchgate.net/publication/283719311_SYNTHESIS_AND_CHARACTERIZATION_OF_TRIMETHYLOLPROPANE_BASED_BIOLUBRICANTS_FROM_CASTOR_OIL)
- Nakarmi, A., & Joshi, S. (2015). A Study on Castor Oil and Its Conversion into Biodiesel by Transesterification Method. *Nepal Journal of Science and Technology*, 15(1), 45–52. <https://doi.org/10.3126/njst.v15i1.12009>
- Naveed, T., Zahid, R., Mufti, R. A., Waqas, M., & Hanif, M. T. (2020). A review on tribological performance of ionic liquids as additives to bio lubricants., 235(9), 1782–1806. <https://doi.org/10.1177/1350650120973805>
- Nogales-Delgado, S., & Encinar Martín, J. M. (2021). Cardoon biolubricant through double transesterification: Assessment of its oxidative, thermal and storage stability. *Materials Letters*, 302, 130454. <https://doi.org/10.1016/J.MATLET.2021.130454>

- Núñez Carballar, N., Franco Gómez, J. M., & Valencia Barragán, C. (2016). Desarrollo de formulaciones de grasas lubricantes biodegradables basadas en aceites vegetales y derivados celulósicos. *Departamento de Ingeniería Química, Química Física y Ciencias de los Materiales*.
- Perera, M., Yan, J., Xu, L., Yang, M., & Yan, Y. (2022). Bioprocess development for biolubricant production using non-edible oils, agro-industrial byproducts and wastes. *Journal of Cleaner Production*, 357, 131956. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2022.131956>
- Pradhan, S., Saha, C., Kumar, M., & Naik, S. N. (2021). Transesterification and Reactive Extraction of Castor Oil for synthesis of Biodiesel/Biolubricant. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 785(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/785/1/012005>
- Prasca Cuello, Y. C., Ortega Díaz, D. D., & Avellaneda Vargas, F. A. (2018). *Estudio exploratorio de la obtención de biolubricantes a partir de biodiesel del sebo bovino*.
- Rezki, B., Essamlali, Y., Amadine, O., Sair, S., Aadil, M., Len, C., & Zahouily, M. (2024). A comprehensive review on apatite-derived catalysts for sustainable biodiesel production: Classification, features and challenges. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12(1), 111913. <https://doi.org/10.1016/J.JECE.2024.111913>
- Samadhi, T. W., Hirotsu, T., & Goto, S. (2017). Measurement of antioxidant effects on the auto-oxidation kinetics of methyl oleate-methyl laurate blend as a surrogate biodiesel system. *Bulletin of Chemical Reaction Engineering and Catalysis*, 12(2), 157–166. <https://doi.org/10.9767/BCREC.12.2.861.157-166>
- Silva, G. C. R., & de Andrade, M. H. C. (2020). Simulation and optimization of CSTR reactor of a biodiesel plant by various plant sources using Aspen plus. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, 18(8). <https://doi.org/10.1515/IJCRE-2020-0085>

- Singh, A., Verma, N., Mamatha, T. G., Kumar, A., Singh, S., & Kumar, K. (2021). Properties, functions and applications of commonly used lubricant additives: A review. *Materials Today: Proceedings*, *44*, 5018–5022. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2021.01.029>
- Stanciu, I. (2023). Some Methods for Determining the Viscosity Index of Hydraulic Oil INDIAN JOURNAL OF SCIENCE AND TECHNOLOGY Some Methods for Determining the Viscosity Index of Hydraulic Oil. *Indian Journal of Science and Technology*, *16*(4), 254. <https://doi.org/10.17485/IJST/v16i4.1461>
- Suraj, C. K., Sudarshan, G., Anand, K., & Sundararajan, T. (2021). Effects of autooxidation on the fuel spray characteristics of Karanja biodiesel. *Biomass and Bioenergy*, *149*, 106084. <https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2021.106084>
- Syahir, A. Z., Zulkifli, N. W. M., Masjuki, H. H., Kalam, M. A., Alabdulkarem, A., Gulzar, M., Khuong, L. S., & Harith, M. H. (2017a). A review on bio-based lubricants and their applications. *Journal of Cleaner Production*, *168*, 997–1016. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2017.09.106>
- Takase, M., Kipkoech, R., Miller, D. L., & Buami, E. K. (2023). Optimisation of the reaction conditions for biodiesel from *Parkia biglobosa* oil via transesterification with heterogeneous clay base catalyst. *Fuel Communications*, *15*, 100089. <https://doi.org/10.1016/J.JFUECO.2023.100089>
- Teresa, M., Sierra, H., Judith, K., Bello, M., & Báez García, J. E. (2022). Efecto de la naturaleza química de los aceites vegetales como lubricantes y el rol principal del aceite de ricino (effect of the chemical nature of vegetable oils as lubricants and the major role of castor oil). *Pistas Educativas*, *44*(143). <https://pistaseducativas.celaya.tecnm.mx/index.php/pistas/article/view/2851>

- Tripathi, A. K., Ojha, D. K., & Vinu, R. (2015). Selective production of valuable hydrocarbons from waste motorbike engine oils via catalytic fast pyrolysis using zeolites. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, *114*, 281–292. <https://doi.org/10.1016/J.JAAP.2015.06.009>
- Tulashie, S. K., & Kotoka, F. (2020). The potential of castor, palm kernel, and coconut oils as biolubricant base oil via chemical modification and formulation. *Thermal Science and Engineering Progress*, *16*, 100480. <https://doi.org/10.1016/J.TSEP.2020.100480>
- Wagner, K., & Davidovich-Pinhas, M. (2023). *Di-acylglycerides as oil structuring agents*. <https://doi.org/10.1016/j.foostr.2023.100320>
- Wang, X., Ho, C.-T., & Shahidi, F. (2020). Flavor Components of Fats and Oils. *Bailey's Industrial Oil and Fat Products*, 1–25. <https://doi.org/10.1002/047167849X.BIO009.PUB2>
- Xie, Q., Zhu, H., Xu, P., Xing, K., Yu, S., Liang, X., Ji, W., Nie, Y., & Ji, J. (2022). Transesterification of methyl oleate for sustainable production of biolubricant: Process optimization and kinetic study. *Industrial Crops and Products*, *182*, 114879. <https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2022.114879>
- Yeboah, A., Ying, S., Lu, J., Xie, Y., Amoanimaa-Dede, H., Boateng, K. G. A., Chen, M., & Yin, X. (2021). Castor oil (*Ricinus communis*): A review on the chemical composition and physicochemical properties. *Food Science and Technology (Brazil)*, *41*, 399–413. <https://doi.org/10.1590/FST.19620>
- Yunus, R., Fakhru'l-Razi, A., Ooi, T. L., Biak, D. R. A., & Iyuke, S. E. (2004). Kinetics of Transesterification of Palm-Based Methyl Esters with Trimethylolpropane. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, *81*, 497–503. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11746-004-0930-7>

- Yusuf, M. M., Muhammad, C., Hassan, L. G., Sokoto, A. M., Abubakar, A. L. , & Ayatullahi, , S. M. (2023). Optimization of Biolubricant from Terminalia catappa (Almond) Seed Oil Using CaO Derived from Limestone as Catalyst. *International Journal of Science for Global Sustainability*, 9(3), 31–40. <https://doi.org/10.57233/ijsgs.v9i3.526>
- Zainal, N. A., Zulkifli, N. W. M., Gulzar, M., & Masjuki, H. H. (2018). A review on the chemistry, production, and technological potential of bio-based lubricants. En *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 82, pp. 80–102). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.004>
- Zeng, Q. (2021). The lubrication performance and viscosity behavior of castor oil under high temperature. *Green Materials*, 10(2), 51–58. <https://doi.org/10.1680/JGRMA.20.00068>

### Lista de Apéndices

#### Apéndice A. Cálculos para determinar la cantidad de materia prima en la producción de biodiésel

Cálculos para determinar la cantidad de materia prima en la producción de biodiésel.

$$V_{CH_3OH}[ml] = m_{aceite} * \frac{1}{\overline{PM}_{aceite}} * \frac{X \text{ moles de } CH_3OH}{1 \text{ mol de aceite}} * \frac{32,04 \text{ g } CH_3OH}{1 \text{ mol } CH_3OH} * \frac{1 \text{ ml } CH_3OH}{0,792 \text{ g } CH_3OH}$$

$$\overline{PM}_{aceite}[g/mol] = \frac{n * 56,1}{IS} * 1000$$

Tomado de: (Bohórquez M. et al., 2022)

Para el cálculo de la cantidad de catalizador se debe tener en cuenta el IA, para calcular el exceso de KOH que se requiere para neutralizar los AGL presentes en el aceite.

$$m_{KOH}[g] = m_{aceite} * \left[ \frac{Y \text{ g } KOH}{100 \text{ g } aceite} + IA * \frac{1 \text{ g } KOH}{1000 \text{ mg } KOH} \right] * \frac{100 \text{ g } \text{impuros } KOH}{85 \text{ g } \text{puros } KOH}$$

Donde

$m_{aceite}$ , es masa del aceite en gramos.

$\overline{PM}_{aceite}$ , peso molecular promedio del aceite en  $g/mol$ .

$IS$ , índice de saponificación del aceite.

$n$ , número de grupos saponificables en la molécula ( $n=3$  para triglicéridos)

$X$ , valor de la razón molar.

$Y$ , porcentaje de catalizador.

$IA$ , índice de acidez.

#### Apéndice B. Diseño central compuesto (DCC)

El diseño central compuesto (DCC) es un diseño de experimentos que se utiliza para ajustar superficies cuadráticas y optimizar variables de respuesta con un número mínimo de experimentos, con el fin de ver con es la interacción de cada una de las variables de operación. El diseño consta de 3 componentes: Una porción factorial, una porción axial y puntos centrales.

En este caso se realiza un DCC variando los siguientes parámetros de operación: Razón molar, tiempo y temperatura.

$$N = 2^K + 2K + N_0$$

$N$ , cantidad de experimentos

$N_0$ , réplicas al punto central

$K$ , número de factores del diseño

El ajuste de la distancia de los puntos axiales al punto central se realiza de la siguiente forma:

$$\alpha = F^{1/4} \quad F = 2^K$$

$\alpha$ , distancia de los puntos axiales al punto central

$$N_0 = \lambda * (\sqrt{F} + 2)^2 - F - 2K$$

$\lambda$ , constante que depende del número de factores  $K$ , aunque los puntos centrales se pueden reducir mínimo a 3.

$$\pm\alpha = \frac{X_i - X_0}{X} \quad X = \frac{(+)-(-)}{2} \quad X_0 = \frac{(+)+(-)}{2}$$

$X_i$ , valor del punto axial

(+), nivel alto

(-), nivel bajo

Se resumen los datos hallados en la siguiente tabla.

	<b>-<math>\alpha</math></b>	<b>-1</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>+<math>\alpha</math></b>
<b>RM</b>	2,16	2,5	3,0	3,5	3,84
<b>t [min]</b>	69,55	90	120	150	170,45
<b>T [°C]</b>	86,36	100	120	140	153,63

Distribución de la matriz de experimentos:

	<b>Experimento</b>	<b>Razón Molar</b>	<b>Tiempo [minutos]</b>	<b>Temperatura [°C]</b>
Puntos Factoriales	<b>1</b>	-1	-1	-1
	<b>2</b>	1	-1	-1
	<b>3</b>	-1	1	-1
	<b>4</b>	1	1	-1
	<b>5</b>	-1	-1	1
	<b>6</b>	1	-1	1
	<b>7</b>	-1	1	1
	<b>8</b>	1	1	1
Puntos Axiales	<b>9</b>	-1,68	0	0
	<b>10</b>	1,68	0	0
	<b>11</b>	0	-1,68	0
	<b>12</b>	0	1,68	0
	<b>13</b>	0	0	-1,68
	<b>14</b>	0	0	1,68
Puntos Centrales	<b>15</b>	0	0	0
	<b>16</b>	0	0	0
	<b>17</b>	0	0	0

A continuación, se presenta la matriz de experimentos del DCC:

<b>Experimento</b>	<b>Razón Molar</b>	<b>Tiempo [minutos]</b>	<b>Temperatura [°C]</b>
1	2,5	90	100
2	3,5	90	100
3	2,5	150	100
4	3,5	150	100
5	2,5	90	140
6	3,5	90	140
7	2,5	150	140
8	3,5	150	140
9	2,16	120	120
10	3,84	120	120
11	3,0	69,55	120
12	3,0	170,45	120
13	3,0	120	86,36
14	3,0	120	153,63
15	3,0	120	120
16	3,0	120	120
17	3,0	120	120

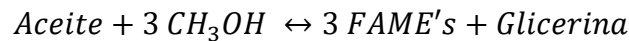
**Apéndice C.** Cálculos para determinar la cantidad de materia prima en la producción de las bases biolubricantes

Cálculos para determinar la cantidad de materia prima en la producción de las bases biolubricantes

$$m_{TMP}[g] = m_{Biodiesel} * \%FAME's * \frac{1}{\overline{PM}_{FAME's}} * \frac{1 \text{ mol de TMP}}{X \text{ moles de Biodiesel}} * \frac{134,17 \text{ g TMP}}{1 \text{ mol TMP}}$$

$$V_{CH_3ONa}[ml] = (m_{Biodiesel} + m_{TMP}) * \frac{Y \text{ g } CH_3ONa}{100 \text{ g solución}} * \frac{1 \text{ ml } CH_3ONa}{0,97 \text{ g } CH_3ONa}$$

Para el peso molecular del biodiésel se puede hacer un balance de masa general respecto a la reacción de transesterificación. Donde el peso molecular promedio del aceite se puede estimar por medio del índice de saponificación (Apéndice A).



$$\overline{PM}_{\text{Aceite}} + 3 \overline{PM}_{\text{CH}_3\text{OH}} = 3 \overline{PM}_{\text{FAME's}} + \overline{PM}_{\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3}$$

$$\overline{PM}_{\text{FAME's}} = \frac{\overline{PM}_{\text{Aceite}} + 3 \overline{PM}_{\text{CH}_3\text{OH}} - \overline{PM}_{\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3}}{3}$$

$$\overline{PM}_{\text{FAME's}} = \frac{\overline{PM}_{\text{Aceite}} + 3 * 32,04 - 92,094}{3}$$

Donde

$m_{Biodiesel}$ , es masa del biodiésel en gramos.

$\overline{PM}_i$ , peso molecular promedio del compuesto i en  $g/mol$

X, valor de la razón molar.

Y, porcentaje de catalizador.

**Apéndice D. Viscosímetro de Ostwald**

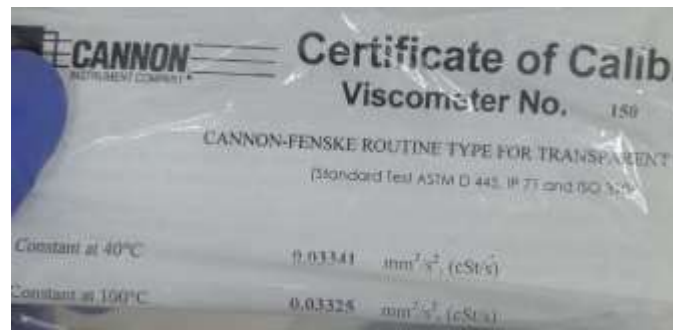
viscosímetro de Ostwald (capilar) disponible en la escuela de ingeniería de petróleos de la UIS



Baño de Aceite térmico para el Viscosímetro de Ostwald



Viscosímetro de Ostwald (Capilar)



Certificado de Calibración de los viscosímetros.

Partes del Viscosímetro de Ostwald:

- Tubo principal: Por donde se introduce el líquido.
- Bulbo principal: Tiene marcas de nivel A y B para controlar el descenso de la muestra.
- Zona capilar: Justo debajo del bulbo principal.
- Bulbo secundario: Almacena el líquido sin necesitar un tubo demasiado largo.

Procedimiento:

- Se ajusta la temperatura del baño a la temperatura deseada.
- Se selecciona el capilar según el rango de viscosidad esperado. Revisar el catálogo del proveedor.
- Se carga por el tubo principal 10 ml de muestra.
- Se coloca el capilar dentro del baño y se deja unos minutos hasta que la muestra en el capilar este en equilibrio con el baño.
- Por medio de una pera de succión se sube la muestra por encima de la marca de nivel superior del bulbo principal.
- Se utilizan las distintas cavidades como marcas para cronometrar el tiempo que tarda el fluido en caer por acción de la gravedad desde una marca hasta la otra.
- El tiempo mínimo debe ser de 200 segundos. Si el tiempo es menor a 200 segundos se debe cambiar el capilar por uno de una referencia menor.
- Se repite la medición 3 veces. Y realiza el promedio de los tiempos.

Cálculos:

$$v = C * \bar{t}$$

Donde

$v$ , viscosidad cinemática en  $mm^2/s$ .

$\bar{t}$ , tiempo promedio en segundos.

$C$ , Constante de calibración en  $mm^2/s^2$  (Varía según el capilar y la temperatura de operación).

**Apéndice E.** Cálculo del índice de viscosidad (IV)

El índice de viscosidad (VI) es un parámetro sin unidades y se utiliza para determinar cómo varía la viscosidad de los aceites lubricantes con los cambios de temperatura. Un índice de viscosidad elevado indica que la viscosidad del aceite cambia muy poco con la temperatura. Para calcular el VI, se sigue los cálculos expuestos en la norma ASTM D2270, según las siguientes condiciones y ecuaciones:

- Si  $U > H$ , calcule el índice de viscosidad, VI, del aceite de la siguiente manera:

$$VI = \left[ \frac{L - U}{L - H} \right] * 100$$

- Si  $U < H$ , calcule el índice de viscosidad, VI, del aceite de la siguiente manera:

$$VI = \frac{(\text{antilog}N) - 1}{0.00715} + 100$$

$$N = \frac{\log H - \log U}{\log Y}$$

Donde:

$U$ , es la viscosidad cinemática a 40 °C del aceite cuyo IV se va a calcular,  $mm^2/s$ .

$Y$ , es la viscosidad cinemática a 100 °C del aceite cuyo IV debe calcularse,  $mm^2/s$ .

$L$ , es la viscosidad cinemática a 40 °C de un aceite con IV de 0 que tiene la misma viscosidad cinemática a 100 °C que el aceite cuyo IV se va a calcular,  $mm^2/s$ .

$H$ , es la viscosidad cinemática a 40 °C de un aceite con un IV de 100 que tiene la misma viscosidad cinemática a 100 °C que el aceite cuyo IV se va a calcular,  $mm^2/s$ .

**Nota:** Los valores de  $L$  y  $H$  se obtiene de la interpolación de los datos suministrados por la norma.

**Apéndice F.** Cálculo de rendimientos del biodiésel y de la base biolubricante

Para el cálculo del rendimiento del biodiésel obtenido por transesterificación se siguió la ecuación utilizada por diferentes investigaciones: (Foroutan et al., 2024) y (Takase et al., 2023).

$$\text{Rendimiento (\%)} = \frac{\text{Peso del Biodiesel [g]}}{\text{Peso del aceite [g]}} * 100$$

$$\text{Yield (\%)} = \frac{\text{Weight of biodiesel [g]}}{\text{Weight of the raw oil/fat [g]}} * 100$$

Para las bases biolubricantes se siguió la ecuación descrita por (Yusuf et al., 2023)

$$\text{Yield (\%)} = \frac{\text{Volumen del Producto [ml]}}{\text{Volumen de la solución [ml]}} * 100$$

$$\text{Yield (\%)} = \frac{\text{masa del Producto [g]}}{\text{masa de la solución [g]}} * 100$$

**Apéndice G.** Procedimiento para la determinación del índice de acidez y acidez

## Norma UNE - EN ISO 660

Norma Europea para la determinación del índice de acidez y la acidez para aceites y grasas de origen animal y vegetal.

El índice de acidez corresponde a la cantidad de KOH en mg necesarios para neutralizar los ácidos grasos libres presentes en un gramo de aceite o grasa. Se determina de la siguiente forma:

- Se prepara la solución patrón con 5 días de anticipación, el cual consistía en una solución de KOH en etanol a una concentración de 0,1 mol/l.
- Se verifica la concentración del patrón con la neutralización con ácido benzoico disuelto en 4-metil-2-pentanona con 4 gotas de fenolftaleína como indicador. Antes de agregar el ácido benzoico se debe hallar el punto de neutralización del 4-metil-2-pentanona.

$$Patrón\left[\frac{mol}{l}\right] = \frac{1000 * m}{122.1 * v}$$

Donde,

m es la masa de ácido benzoico en gramos.

v el volumen de solución de KOH usado en ml.

- Se neutraliza el solvente (2-propanol) mediante la adición de la solución de KOH en presencia de fenolftaleína.
- Se pesan 5 g de muestra (aceite) en un matraz y se disuelve la muestra en 25 ml de 2-propanol neutralizado y se titula con la solución patrón de KOH manteniendo agitación hasta alcanzar el punto de equivalencia.
- Se calcula el índice de acidez con la siguiente formula:

$$IA = \frac{56,1 * V * c}{m}$$

Donde,

V es el volumen de solución patrón usado en ml.

$c$  la concentración exacta del patrón en mol/l.

$m$  la masa de la muestra en gramos.

- El %AGL se calcula así:

$$\%AGL = \frac{V * c * M}{10 * m}$$

Donde,

$V$  es el volumen de solución patrón usado en ml.

$c$  la concentración exacta del patrón en mol/l.

$m$  la masa de la muestra en gramos.

$M$  la masa molar del ácido escogido en g/mol. (Para este caso, se toma el ácido ricinoleico debido a que su concentración es casi del 90% del aceite. Su masa molar es de 298 g/mol).

**Apéndice H.** Procedimiento para la determinación de FAME's por cromatografía de gases

## Norma UNE-EN 14103

Norma Europea para la determinación del contenido de ésteres de ácidos grasos (FAME's) y de éster metílico de ácido linoleico de productos derivados de aceites y grasas.

La cromatografía de gases permite la cuantificación del contenido de metil ésteres utilizando un patrón de éster metílico del ácido nonadecanoico (FAME C19:0) y las condiciones de cromatografía en el Apéndice I.

Se lleva a cabo el siguiente procedimiento:

- Se prepara la solución patrón pesando 250 mg de éster metílico del ácido nonadecanoico y se diluyen en 25 ml de tolueno.
- Se pesan entre 200 a 250 mg de muestra en un vial de 10 ml y se agrega 1 ml de solución patrón con una pipeta aforada.
- Se establecen las condiciones de la cromatografía de gases.

Una vez obtenido el cromatograma se calcula el contenido de metil ésteres con la siguiente ecuación:

$$C = \frac{\sum(A_X * R_X) - A_{EI}}{A_{EI}} * \frac{W_{EI}}{W} * P * 100$$

Donde

$A_X$ , es el área del pico del éster metílico individual X identificado en la muestra de ensayo (desde C6:0 hasta C24:1).

$R_X$ , es el factor de corrección teórico del detector de ionización de llama (TCF) correspondiente al FAME X relativo al patrón interno (C19:0).

$A_{EI}$ , es el área del pico correspondiente al éster metílico del ácido nonadecanoico.

$P$ , es la pureza del éster metílico del ácido nonadecanoico.

$A_x$ , es el peso del éster metílico del ácido nonadecanoico que se utiliza como patrón interno, en miligramos.

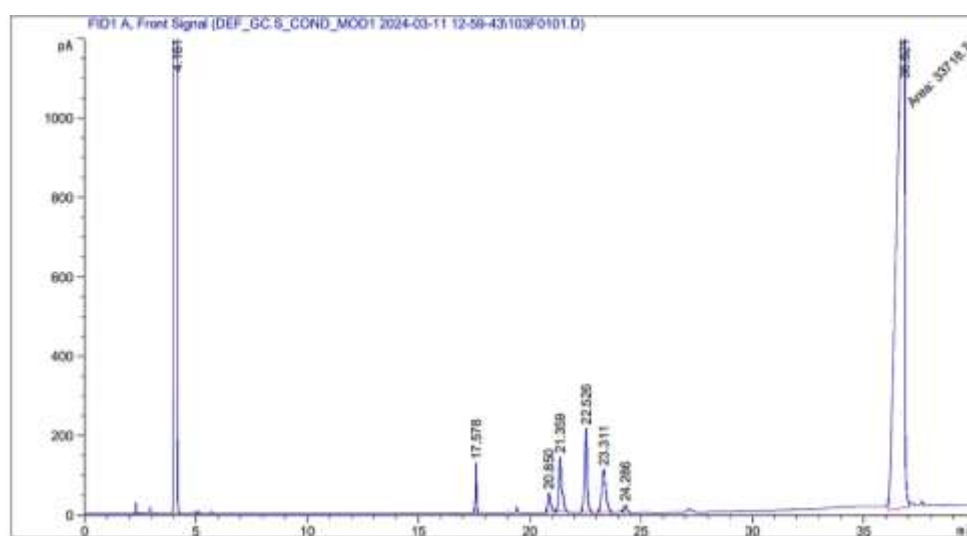
$P$ , es el peso de la muestra de ensayo, en miligramos.

**Apéndice I.** Condiciones del cromatógrafo de gases

Se determinó el contenido de metil ésteres de ácidos grasos según la norma UNE-EN 14103 (Apéndice H) mediante la implementación de un cromatógrafo de gases AGILENT TECHNOLOGIES 7890A con un detector FID a una temperatura de 250°C, flujo de aire 400 ml/min, flujo de hidrógeno de 30 ml/min y flujo de helio de 25 ml/min, el inyector a una temperatura de 250°C, un Split ratio de 1:20, una presión de 24 psi, un flujo total de 140,65 ml/min y flujo de purga de 3 ml/min. EL auto inyector con volumen de 1µl programado para 4 lavados con solvente (Tolueno) y 6 bombeos de la muestra. Se implemento una columna DB-WAX de 30m x 0.250 mm x 0.25µm con una rampa de calentamiento inicial de 60°C permanente durante 2 minutos, posteriormente un aumento de la temperatura de 10°C/min hasta 200°C permanente 10 minutos y finalmente un crecimiento de 5°C/min hasta 240°C permanente durante 7 minutos obteniendo un tiempo total de 41 minutos.

**Apéndice J.** Cromatogramas del biodiésel de ricino

Para cada experimento se obtuvieron 2 cromatogramas y se calculó el %FAME's con la ecuación descrita en el Apéndice H, y se tomó el valor promedio de éstos. A continuación se presentan uno de los 2 cromatogramas obtenidos de los biodiésel de ricino con una variación de la razón molar alcohol:aceite de 6:1 y 9:1.

**Cromatograma del biodiésel de ricino obtenido a 30°C, 1%p KOH, Rm 9:1 y 1h de reacción.**

```

=====
                          Area Percent Report
=====
  
```

```

Sorted By      :      Signal
Multiplier     :      1.0000
Dilution       :      1.0000
Do not use Multiplier & Dilution Factor with ISTDs
  
```

```

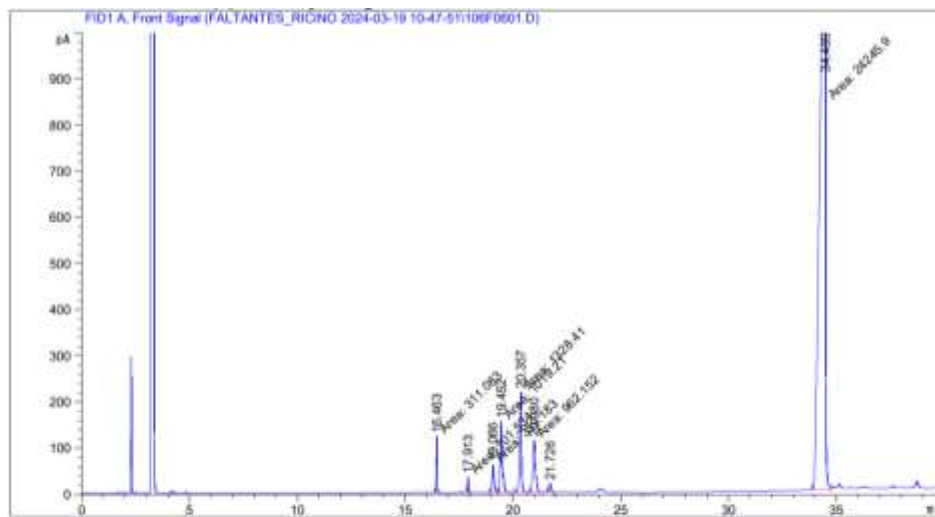
Signal 1: FID1 A, Front Signal
  
```

Peak #	RetTime [min]	Type	Width [min]	Area [pA*s]	Height [pA]	Area %
1	4.161	BB S	0.0688	1.34847e5	2.42748e4	77.53473
2	17.578	BB	0.0487	403.10400	124.85976	0.23178
3	20.850	BB	0.1233	441.72729	48.92129	0.25399
4	21.359	BB	0.1197	1274.87366	138.15733	0.73303
5	22.526	BB	0.1096	1702.40820	212.13145	0.97886
6	23.311	BB	0.1542	1376.24207	108.37507	0.79132
7	24.286	BB	0.1044	154.17151	18.66724	0.08865
8	36.821	MM	0.3642	3.37187e4	1543.08582	19.38766

```

Totals :                      1.73918e5  2.64689e4
  
```

Cromatograma del biodiésel de ricino obtenido a 30°C, 1%p KOH, Rm 6:1 y 1h de reacción.



-----  
 Area Percent Report  
 -----

Sorted By : Signal  
 Multiplier : 1.0000  
 Dilution : 1.0000  
 Use Multiplier & Dilution Factor with ISTDs

Signal 1: FID1 A, Front Signal

Peak #	RetTime [min]	Type	Width [min]	Area [pA*s]	Height [pA]	Area %
1	16.463	MM	0.0425	311.08340	121.87730	1.09370
2	17.913	MM	0.0502	181.53446	33.71065	0.35697
3	19.066	MF	0.0994	359.18253	60.25415	1.26280
4	19.452	FM	0.1101	1019.21136	154.28064	3.58331
5	20.357	MM	0.1019	1328.41260	217.27014	4.67039
6	20.980	MM	0.1423	962.15198	112.67467	3.38271
7	21.726	BB	0.0947	115.76324	18.32139	0.40700
8	34.489	MF	0.2582	2.42459e4	1565.25513	85.24312

Totals : 2.84433e4 2283.64406

**Apéndice K.** Procedimiento para la determinación del punto de fluidez.

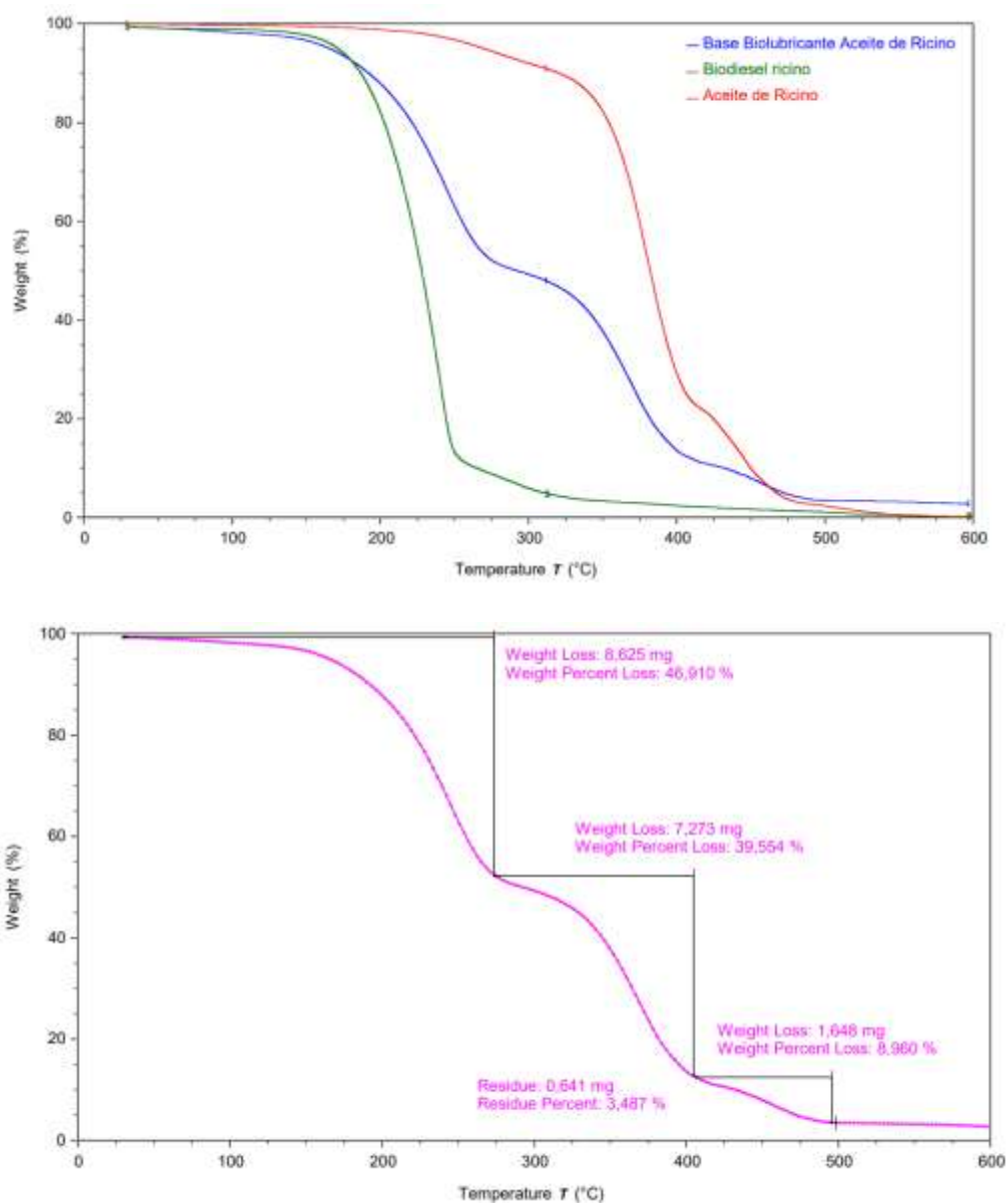
### **PUNTO DE FLUIDEZ NORMA ASTM D-97**

El método consiste en el calentamiento preliminar de la muestra seguido de un enfriamiento a una tasa específica. Se examina la fluidez de la muestra cada 3°C. El procedimiento se describe a continuación:

- Se verta la base biolubricante dentro del recipiente de muestra hasta la marca de nivel.
- Se sella el recipiente con un corcho con un termómetro insertado.
- Se realiza alguno de los siguientes tratamientos dependiendo del valor esperado:
  - a. Si el punto de fluidez esperado está por encima de 33°C: Caliente la muestra sin agitación 9°C por encima de dicho valor y luego transfiera el recipiente a un baño a una temperatura de 24°C.
  - b. Si el punto de fluidez esperado está por debajo de 33°C: Caliente la muestra sin agitación 45°C y luego transfiera el recipiente a un baño a una temperatura de 6°C.
- Inserte el recipiente de muestra en la cubierta del montaje correctamente instalado. Se examina la muestra cada vez que la temperatura disminuya 3°C y se inclina el recipiente lo suficiente para determinar si hay movimiento de la muestra.
- Registre la temperatura a la cual el recipiente de prueba se coloque en posición horizontal por 5 segundos y no se observe movimiento de la muestra.

## Apéndice L. Condiciones del TGA

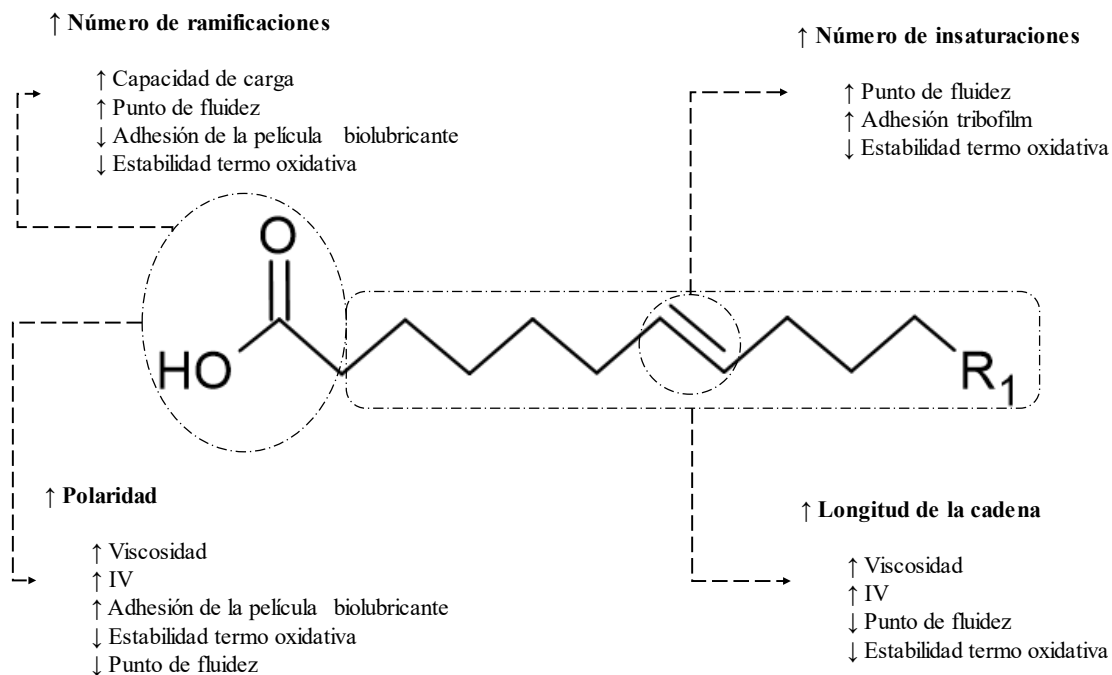
El análisis termogravimétrico (TGA) proporciona una medida cuantitativa de los cambios de peso de la sustancia con respecto al aumento de temperatura debido a la deshidratación y descomposición de esta, se midió con TGA 5500 DISCOVERY TA INSTRUMENTS en atmosfera inerte con un flujo de nitrógeno de 50 ml/min con una rampa de temperatura de 10°C/min.

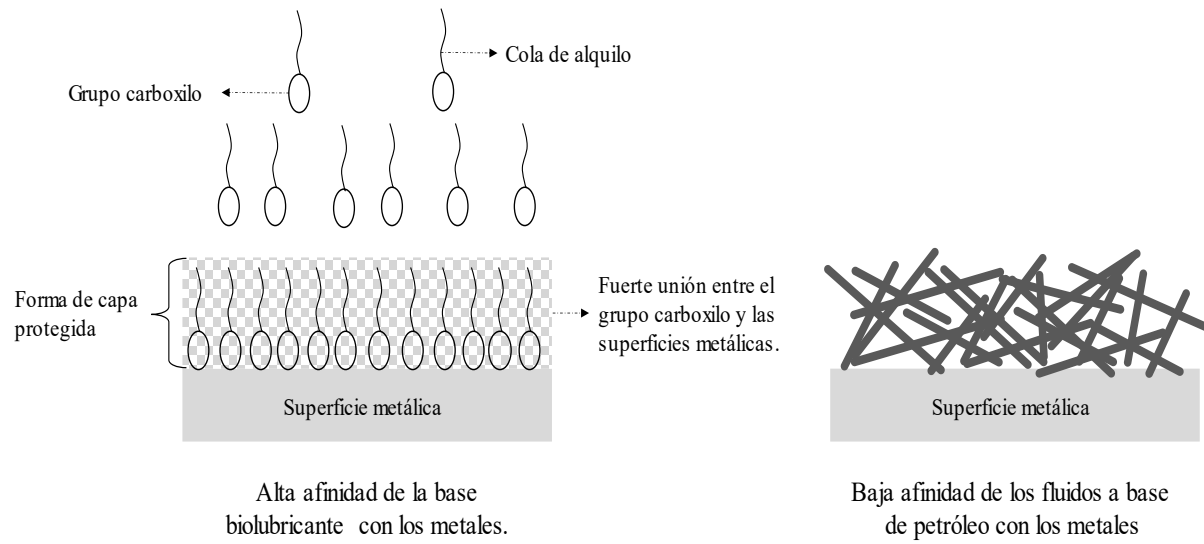


**Apéndice M.** Efecto de la longitud de cadena, ramificación y grado de insaturación sobre el IV, propiedades a bajas temperaturas y la estabilidad oxidativa.

	IV	Viscosidad cinemática	Propiedades a bajas temperaturas	Estabilidad oxidativa
<b>Aumento longitud cadena</b>	Positivo	Positivo	-	-
<b>Aumento ramificación cadena</b>	Negativo	Positivo	Positivo	Positivo
<b>Mayor grado de saturación</b>	Positivo	Negativo	Positivo	Negativo

Tomado de: Zainal et al., 2018





Tomado de: Tulashie & Kotoka, 2020.

**Apéndice N.** Clasificación ISO VG para bases lubricantes

<b>Tipo de Lubricante</b>	<b>Viscosidad 40°C (cSt)</b>	<b>Viscosidad 100°C (cSt)</b>	<b>IV</b>	<b>Flashpoint (°C)</b>	<b>Pour Point (°C)</b>
<b>ISO VG 2</b>	>1,98	-	>90	70	-40
<b>ISO VG 5</b>	>4,14	-	-	65	-48
<b>ISO VG 10</b>	>9	>2,6	>90	177	-39
<b>ISO VG 15</b>	>13,5	>3,3	>84	174	-33
<b>ISO VG 22</b>	>19,8	>4,19	>102	200	-30
<b>ISO VG 32</b>	>28,8	>4,1	>90	204	-6
<b>ISO VG 46</b>	>41,1	>4,1	>90	220	-6
<b>ISO VG 68</b>	>61,4	>4,1	>198	226	-6
<b>ISO VG 100</b>	>90,0	>4,1	>216	246	-6
<b>ISO VG 150</b>	>135	>14,5	>96	236	-18
<b>ISO VG 220</b>	>198	>19,4	>96	238	-18
<b>ISO VG 320</b>	>288	>25,5	>96	245	-10

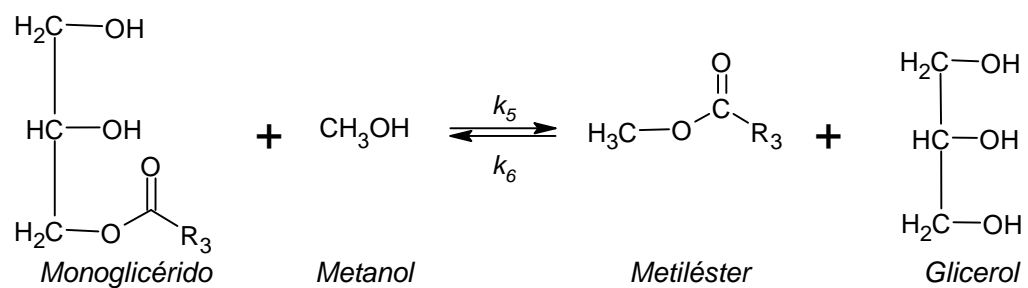
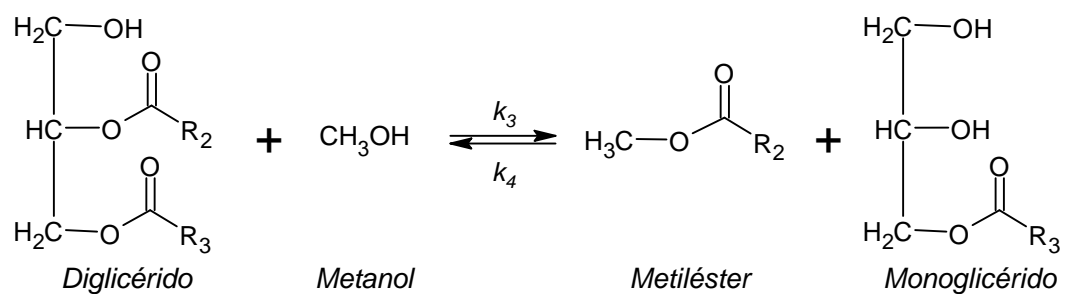
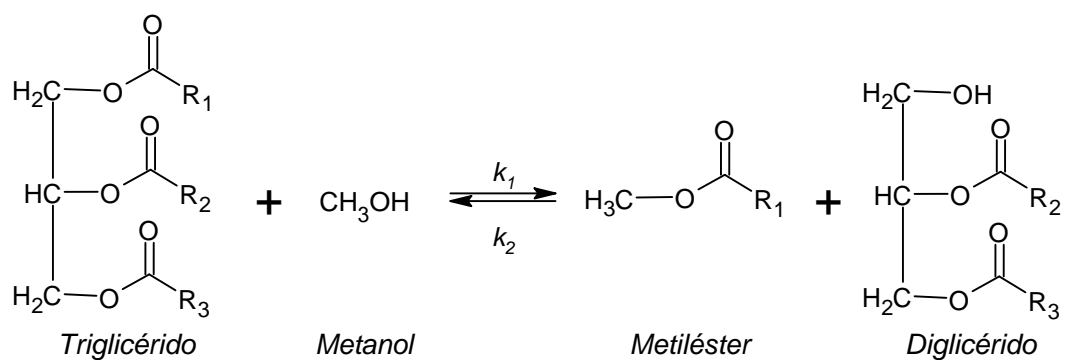
Tomado de: Appiah et al., 2022.

## Aplicaciones según la normativa ISO VG para cada base lubricante

Tipo de Lubricante	Aplicaciones Potenciales
<b>ISO VG 2</b>	<p>Se utiliza como fluido hidráulico de baja presión para:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Lubricación de cojinetes de husillo de alta velocidad en máquinas-herramienta con huecos especialmente reducidos.</li> <li>• Dispositivos que requieren precisión, como equipos de laboratorio e instrumentación óptica.</li> </ul>
<b>ISO VG 5</b>	<p>Se utiliza como fluido hidráulico de baja presión para:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Lubricación de cojinetes de husillo de alta velocidad en máquinas-herramienta con huecos especialmente reducidos.</li> <li>• Dispositivos que requieren precisión, como equipos de laboratorio e instrumentación óptica.</li> </ul>
<b>ISO VG 10</b>	<p>Se utiliza como fluido hidráulico de baja presión para:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Lubricación de cojinetes de husillo de alta velocidad en máquinas-herramienta con huecos especialmente reducidos.</li> <li>• Dispositivos que requieren precisión, como equipos de laboratorio e instrumentación óptica.</li> </ul>
<b>ISO VG 15</b>	<p>Se utiliza como fluido hidráulico de alta operación, principalmente para:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Aplicaciones en frío (es decir, cámaras frigoríficas, en alta mar y aire libre).</li> <li>• Sistemas de dirección asistida y frenos.</li> </ul>
<b>ISO VG 22</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se utiliza como fluido hidráulico de alto funcionamiento utilizado principalmente en líneas aéreas para herramientas neumáticas.</li> <li>• Se utiliza en piezas de transferencia de calor en un generador.</li> </ul>
<b>ISO VG 32</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se utiliza como fluido hidráulico de alto funcionamiento para piezas de máquinas y herramientas.</li> </ul>
<b>ISO VG 46</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se utiliza para torneado, taladrado y aserrado y otros trabajos exigentes.</li> </ul>
<b>ISO VG 46</b>	<p>Se utiliza como fluido hidráulico de operación de alta presión para:</p>

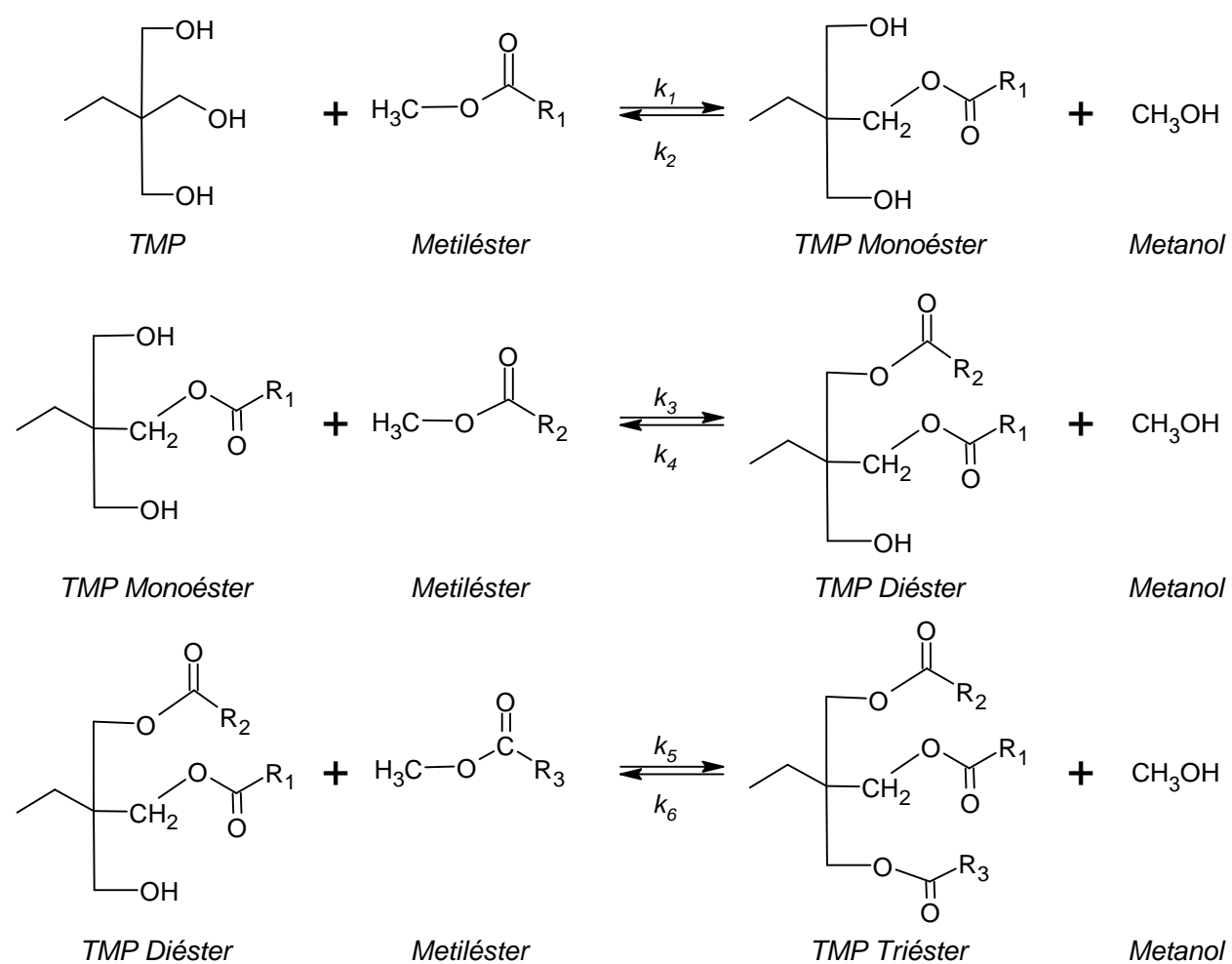
Tipo de Lubricante	Aplicaciones Potenciales
<b>ISO VG 68</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Trabajos en plantas industriales.</li> <li>• Conformación de engranajes y otros trabajos en metal.</li> </ul> <p>Se utiliza como fluido hidráulico de operación de alta presión para:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sistemas que exigen una gran capacidad de carga</li> </ul>
<b>ISO VG 100</b>	<p>Se utiliza como fluido hidráulico de alta presión para:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sistemas industriales que exigen una gran capacidad de carga.</li> </ul>
<b>ISO VG 150</b>	<p>Se utiliza como fluido hidráulico de operación de alta presión para:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Lubricación de piezas pesadas de máquinas, como bombas de vacío.</li> <li>• Lubricación del cárter y de la niebla.</li> </ul>
<b>ISO VG 220</b>	<p>Se utiliza como aceite para engranajes de operación de alta presión para:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sistemas de temperatura extremadamente alta, como cajas de engranajes industriales, cabrestantes, transportadores, polipastos, etc.</li> <li>• Sistemas industriales de alimentación a presión.</li> </ul>
<b>ISO VG 320</b>	<p>Se utiliza como aceite para engranajes de alto rendimiento para:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sistemas de temperatura extremadamente alta, como cajas de engranajes industriales, cabrestantes, transportadores, polipastos, etc.</li> <li>• Lubricación de otras piezas/cargas pesadas de maquinaria.</li> </ul>

Adaptado de: Appiah et al., 2022.

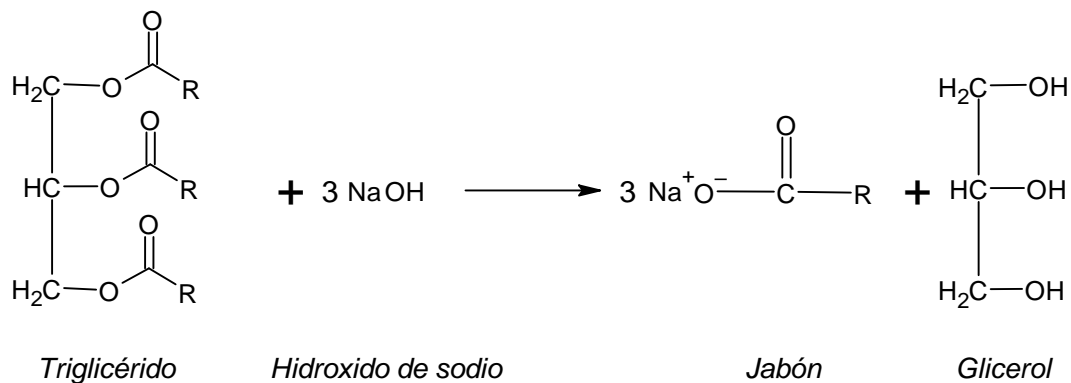
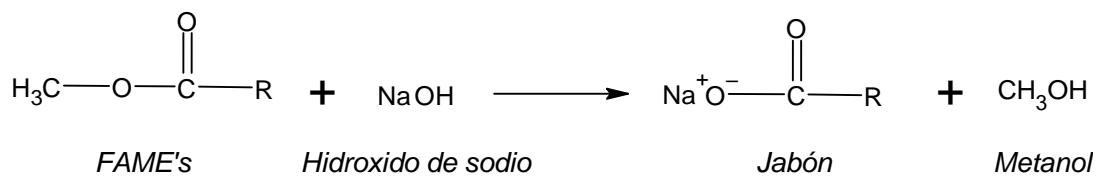
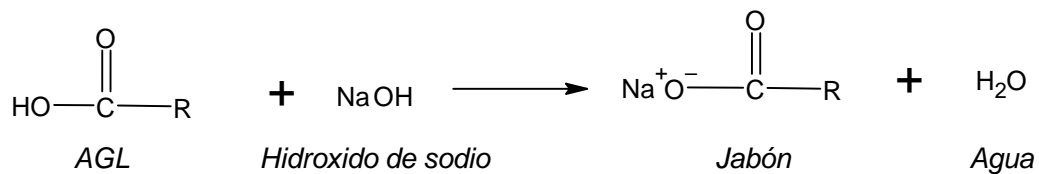
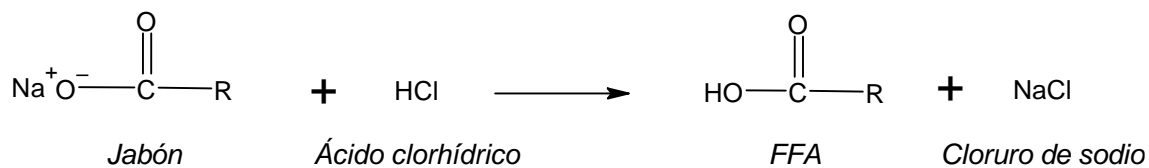
**Apéndice O.** Reacción de transesterificación por etapas.

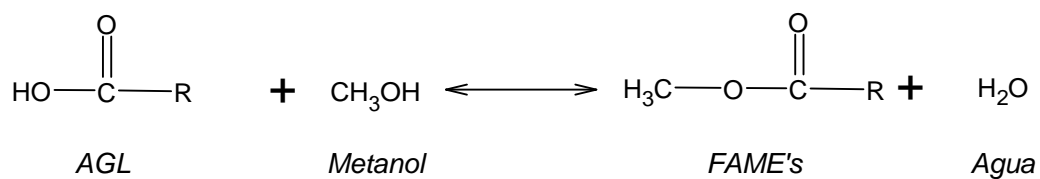
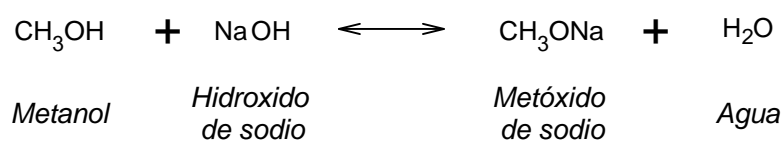
Adaptado de: Durango-Giraldo et al., 2022.

## Apéndice P. Reacción de transesterificación inversa por etapas

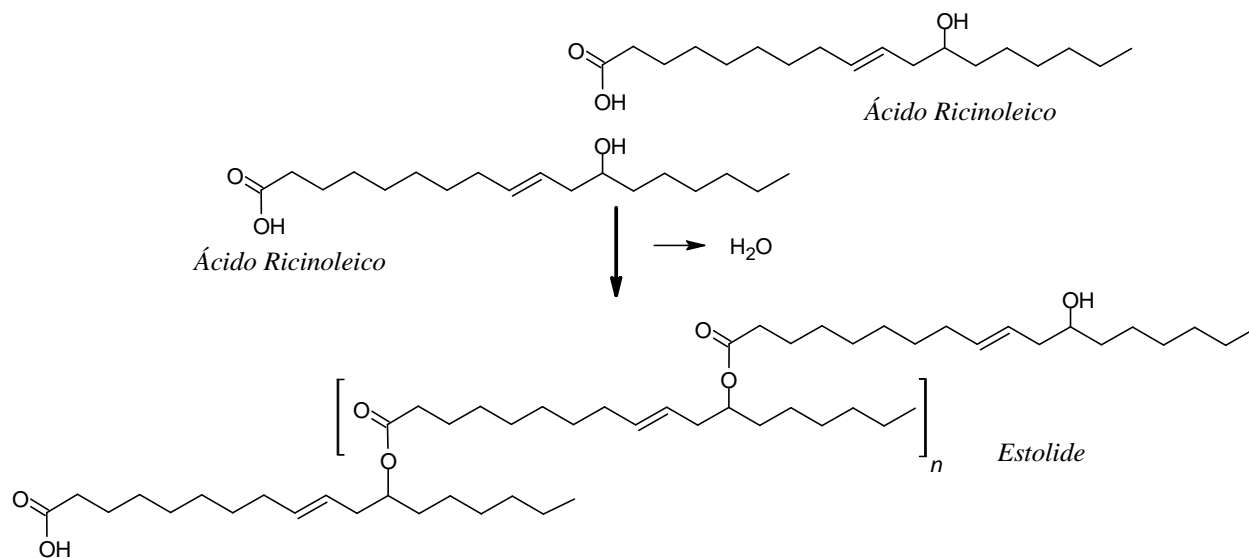


Adaptado de: Xie et al., 2022.

**Apéndice Q. Reacciones Secundarias***Saponificación de Triglicéridos**Saponificación FAME's**Saponificación AGL**Neutralización de jabones*

*Esterificación de AGL**Reacción reversible metóxido de sodio*

Adaptado de: Fang et al., 2018.

*Formación de Estolide*

Adaptado de: Greco-Duarte et al., 2017.

**Apéndice R.** Ficha técnica aceite de ricino adquirido de Laboratorios León S.A.

## DESCRIPCIÓN:

Líquido viscoso, amarillento pálido o casi incoloro, transparente con olor suave, y un sabor característico.

## ESPECIFICACIONES:

- Color (lovibond 5 ¼): Amarillo 16 – rojo 1,4
- Ácidos grasos libres: 0,91%
- Humedad y volátiles: 0,20%
- Peso específico a 25°C: 0,955 – 0,965
- Índice de yodo: 82 – 85
- Índice de saponificación: 176 – 184
- Índice de hidroxilo: 160 – 168
- Impurezas insolubles: 0,01%

**Apéndice S.** Evidencias fotográficas

Montaje de transesterificación (Biodiésel)



Transesterificación a 60°C



Transesterificación a 30°C



Lavados Biodiésel



Lavados con H<sub>2</sub>O acidulada



Lavados con H<sub>2</sub>O



Después de los lavados

Biodiésel



## Montaje transesterificación inversa (Bases biolubricantes)



## Síntesis de la base biolubricante

Base lubricante después de su  
síntesisBase biolubricante antes de  
purificarBase biolubricante después de  
purificar

Muestras gelificadas



Comparación cualitativa del aceite, biodiésel y base biolubricante de ricino.



Aceite de Ricino



Biodiésel de Ricino



Base Biolubricante de Ricino

Medición de Punto de Fluidez



Viscosímetro Brookfield DV2T



Viscosímetro Brookfield DV2T



Aguja SC4-18 del

**Apéndice T.** Autooxidación Biodiésel y Base Biolubricante.

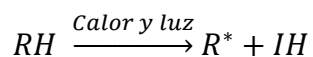
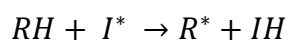
El biodiésel y las bases biolubricantes pueden presentar procesos de autooxidación, debido al grado de insaturación, las fracciones oxigenadas, la temperatura, las trazas de metal, la intensidad de radiación lumínica y la humedad (Jemima Romola et al., 2021), teniendo como consecuencia un aumento en el índice de acidez, índice de peróxido y viscosidad cinemática, donde, las reacciones de oxidación primaria y secundaria conjunto con las reacciones de polimerización (los radicales libres separarán fácilmente un átomo de hidrógeno de la cadena de hidrocarburos conduciendo así a la polimerización) aumentan la longitud media de la cadena del biodiésel, aumentando así la viscosidad (Suraj et al., 2021) (Syahir et al., 2017).

Por otro lado, entre mayor sea la insaturación de la cadena y la presencia de dobles enlaces conduce a un alto nivel de reactividad potencial con el  $O_2$ , haciendo que la oxidación aumente, especialmente cuando se expone al aire y al agua (Jemima Romola et al., 2021). Cabe aclarar que las cadenas hidrocarbурadas son altamente susceptibles a la oxidación tanto en sus dobles enlaces como en los carbonos alquilados adyacentes (Syahir et al., 2017).

El proceso de autooxidación del biodiésel como la base biolubricante presentan 3 etapas: Iniciación, propagación y terminación.

*Iniciación*

Esta etapa implica la eliminación de hidrógeno de la cadena carburada para producir un radical libre de carbono (Jemima Romola et al., 2021).



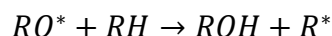
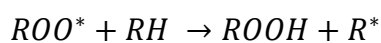
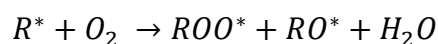
Donde  $I^*$  es el radical iniciador que se forma por la disociación térmica de hidroperóxidos  $ROOH$  o por iones metálicos [ $M^{2+}$ ,  $M^{3+}$ ], los cuales que reacciona con el metil éster para formar radicales de ácidos grasos  $R^*$  (Suraj et al., 2021; Wang et al., 2020).



Los hidroperóxidos alílicos inestables son los principales productos de oxidación de los dobles enlaces de la cadena lipídica (Jemima Romola et al., 2021; Syahir et al., 2017b).

### *Propagación*

El radical libre de carbono reacciona con el  $O_2$  (Jemima Romola et al., 2021) y los radicales de peróxido  $ROO^*$  al ser altamente inestables, forman un nuevo radical de ácidos grasos al reaccionar con los metil ésteres, propagando así las reacciones de oxidación (Suraj et al., 2021); (Syahir et al., 2017).

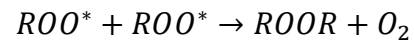


Donde  $ROO^*$  es el radical de peróxido,  $RO^*$  el radical alcoxilo,  $ROH$  es un alcohol (Angelovič et al., 2015) (Syahir et al., 2017)

### *Terminación*

En esta etapa, dos radicales reaccionan entre sí para forman un producto no radical estable.

*Productos Estables:*



Adaptado de: Angelovič et al., 2015, Suraj et al., 2021, Syahir et al., 2017, Wang et al., 2020 y Samadhi et al., 2017.

**Apéndice U. Análisis de Varianza del DCC***Análisis de Varianza*

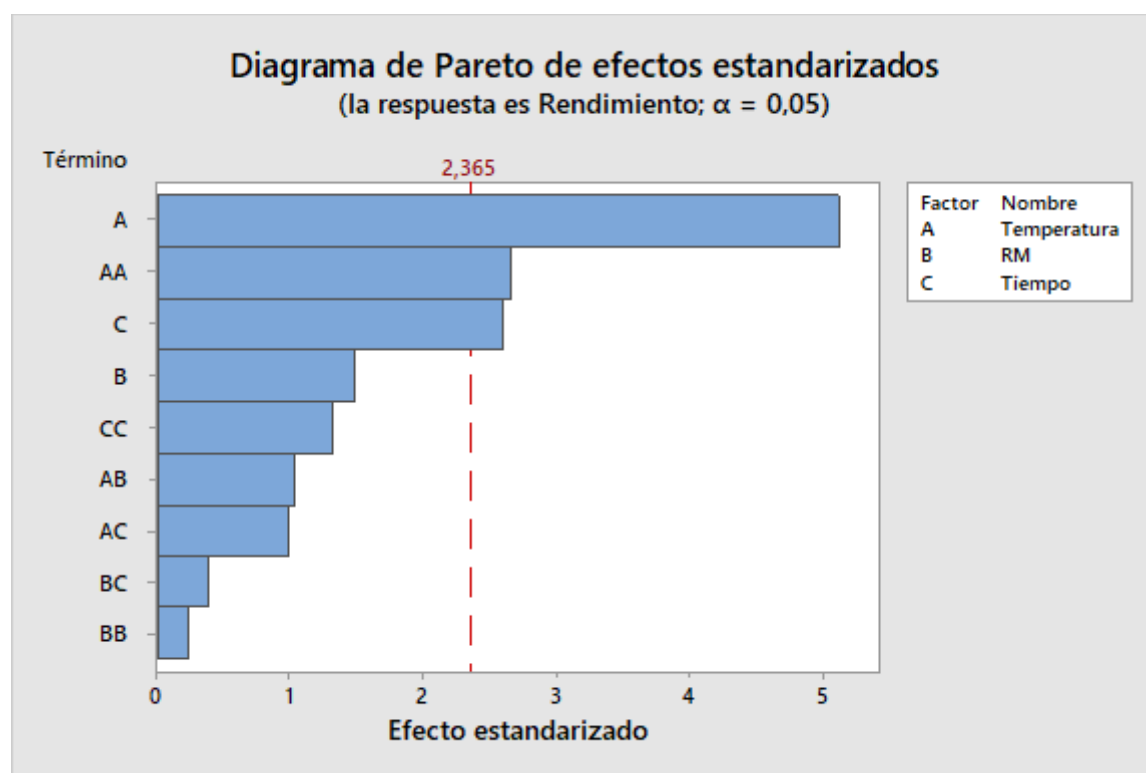
<b>Fuente</b>	<b>GL</b>	<b>SC Ajust.</b>	<b>MC Ajust.</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>
<b>Modelo</b>	9	424,623	47,180	5,04	0,022
<b>Lineal</b>	3	329,420	109,807	11,74	0,004
<b>Temperatura</b>	1	245,455	245,455	26,24	0,001
<b>RM</b>	1	20,775	20,775	2,22	0,180
<b>Tiempo</b>	1	63,190	63,190	6,76	0,035
<b>Cuadrado</b>	3	74,250	24,750	2,65	0,130
<b>Temperatura*Temperatura</b>	1	66,239	66,239	7,08	0,032
<b>RM*RM</b>	1	0,476	0,476	0,05	0,828
<b>Tiempo*Tiempo</b>	1	16,396	16,396	1,75	0,227
<b>Interacción de 2 factores</b>	3	20,953	6,984	0,75	0,558
<b>Temperatura*RM</b>	1	10,260	10,260	1,10	0,330
<b>Temperatura*Tiempo</b>	1	9,331	9,331	1,00	0,351
<b>RM*Tiempo</b>	1	1,361	1,361	0,15	0,714
<b>Error</b>	7	65,476	9,354		
<b>Falta de ajuste</b>	5	63,255	12,651	11,39	0,083
<b>Error puro</b>	2	2,221	1,111		
<b>Total</b>	16	490,099			

*Resumen del modelo*

<b>S</b>	<b>R-cuad.</b>	<b>R-cuad. (ajustado)</b>	<b>R-cuad. (pred)</b>
<b>3,05839</b>	86,64%	69,46%	0,81%

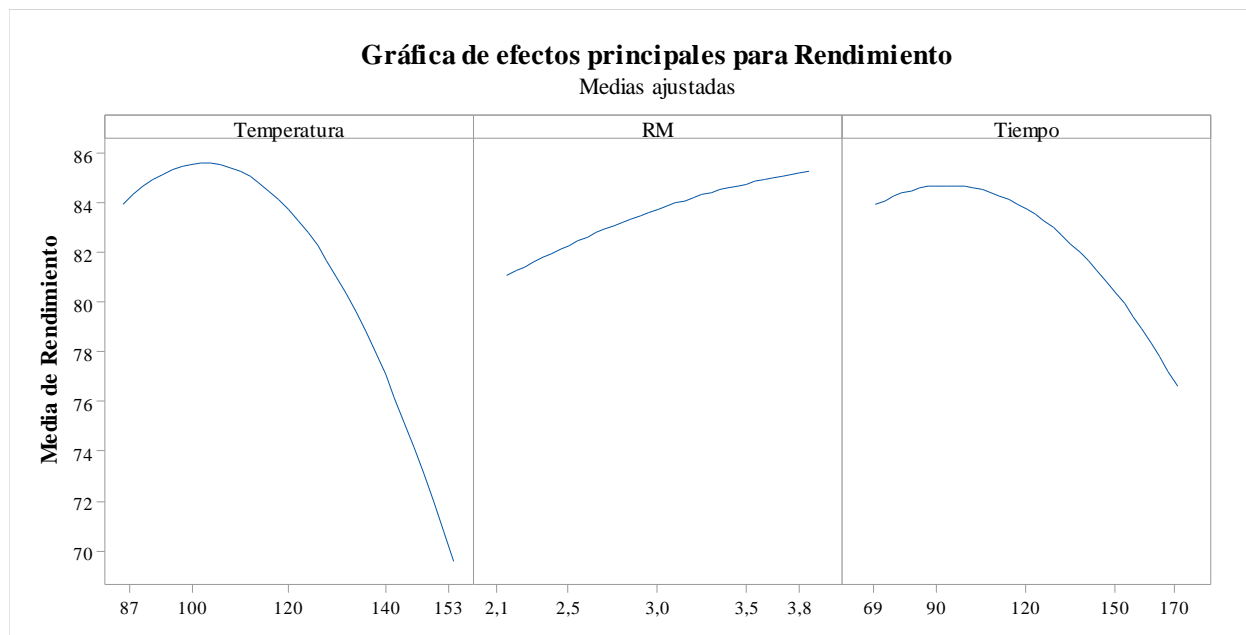
*Coefficientes codificados*

Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante	83,79	1,76	47,55	0,000	
Temperatura	-4,239	0,828	-5,12	0,001	1,00
RM	1,233	0,828	1,49	0,180	1,00
Tiempo	-2,151	0,828	-2,60	0,035	1,00
Temperatura*Temperatura	-2,424	0,911	-2,66	0,032	1,16
RM*RM	-0,205	0,911	-0,23	0,828	1,16
Tiempo*Tiempo	-1,206	0,911	-1,32	0,227	1,16
Temperatura*RM	-1,13	1,08	-1,05	0,330	1,00
Temperatura*Tiempo	1,08	1,08	1,00	0,351	1,00
RM*Tiempo	-0,41	1,08	-0,38	0,714	1,00



*Ecuación de regresión en unidades no codificadas*

$$\begin{aligned} \text{Rendimiento} = & -28,3 + 1,366 * T[^\circ\text{C}] + 24,3 \text{ RM} + 0,116 \text{ t}[\text{min}] - 0,00606 * T[^\circ\text{C}] * T[^\circ\text{C}] \\ & - 0,82 * \text{RM} * \text{RM} - 0,00134 * \text{t}[\text{min}] * \text{t}[\text{min}] - 0,113 * T[^\circ\text{C}] * \text{RM} \\ & + 0,00180 T[^\circ\text{C}] * \text{t}[\text{min}] - 0,0275 \text{ RM} * \text{t}[\text{min}] \end{aligned}$$



**Apéndice V.** Propiedades lubricantes comerciales a base de petróleo.

Propiedad	MOBIL HYDRAULIC AW 32	MOBIL HYDRAULIC AW 46	MOBIL HYDRAULIC AW 68	MOBIL HYDRAULIC AW 100
Grado	ISO 32	ISO 46	ISO 68	ISO 100
Densidad a 15 C, kg/l, ASTM D4052	0,87	0,877	0,880	0,885
Desgaste abrasivo FZG, etapa de falla, DIN 51354	10	10	10	10
Punto de inflamación, copa abierta Cleveland, °C, ASTM D92	224	228	238	252
Viscosidad cinemática @ 100 C, mm <sup>2</sup> /s, ASTM D445	5,2	6,9	8,8	11,2
Viscosidad cinemática @ 40 C, mm <sup>2</sup> /s, ASTM D445	30,2	46,1	67,9	99,7
Punto de fluidez, °C, ASTM D97	-18	-15	-12	-9
Índice de viscosidad, ASTM D2270	103	104	101	98

## Krönen Hidrafluid HC

Pruebas	Método ASTM	Resultados	
		46	68
<b>Grado de Viscosidad ISO</b>	<b>D-2422</b>	<b>46</b>	<b>68</b>
Apariencia	I-CC-04	Brillante	Brillante
Densidad @ 20 °C, g/mL	D-1298	0.8600	0.8665
Color ASTM	D-1500	L0.5	L0.5
Viscosidad Cinemática @ 40 °C, mm <sup>2</sup> /s (cSt)	D-445	46.00	68.00
Viscosidad Cinemática @ 100 °C, mm <sup>2</sup> /s (cSt)	D-445	7.029	9.120
Índice de Viscosidad	D-2270	110	110
Número Acido (AN), mg KOH/g	D-664	0.35	0.35
Punto de Inflamación, °C	D-92	212	226
Punto de Ecurrimiento, °C; máximo	D-97	-24	-27
Voltaje de Ruptura Dieléctrica, procedimiento A; kV	D-877	35	35
Código de Limpieza; máximo	ISO-4406	20/17/14	20/17/14
Espuma Secuencias I, II, III; mL; máximo	D-892	150/0, 75/0, 150/0	150/0, 75/0, 150/0
Demulsibilidad @ 54 °C, aceite-agua-emulsión (30 minutos), mL	D-1401	40-40-0 (30')	39-38-3 (30')
Estabilidad a la Oxidación, minutos	D-2272	554	530