

EFEECTO 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

María Teresa Hernández Sierra

Universidad de Guanajuato, México
tere.mths@hotmail.com

Karla Judith Moreno Bello

Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México
Karla.moreno@itcelaya.edu.mx

José Eduardo Báez García

Universidad de Guanajuato, México
jebaez@ugto.mx

Recepción: 12/julio/2022

Aceptación: 9/agosto/2022

Resumen

Los lubricantes se han venido empleando desde las primeras máquinas y mecanismos. Hoy en día se fabrica una gran variedad de lubricantes de distinta naturaleza y para diversas aplicaciones. Erradamente, desde un primer punto de vista, podemos atribuir el desempeño de un lubricante exclusivamente a las propiedades físicas del mismo, es decir a su viscosidad. No obstante, a pesar de que es una propiedad muy importante, las propiedades y características químicas de los aceites base y los aditivos también tienen un papel sustancial en la definición del desempeño de un lubricante. En este trabajo se presenta un análisis del efecto que tiene la estructura o composición química de los lubricantes en el desempeño mecánico del mismo. El trabajo está enfocado principalmente a los aceites vegetales como bases lubricantes debido a la creciente necesidad de emplear lubricantes amigables con el medio ambiente. Se destaca al aceite de ricino debido a sus características químicas las cuales le proveen con propiedades lubricantes sobresalientes.

Palabras Clave: Aceite de Ricino, Aceites vegetales, Estructura química, Lubricantes, Propiedades.

Abstract

Lubricants have been used since the first machines and mechanisms. Today, a wide variety of lubricants of different nature and for diverse applications are manufactured. Erroneously, from the first point of view, it can be attributed the performance of a lubricant exclusively to its physical properties, i.e. its viscosity. However, although it is a very important property, the chemical properties and characteristics of base oils and additives also play a substantial role in defining the performance of a lubricant. This paper presents an analysis of the effect of the structure or chemical composition of lubricants on the mechanical performance of the lubricant. The work is mainly focused on vegetable oils as lubricant bases due to the growing need to use environmentally friendly lubricants. Castor oil is highlighted due to its chemical characteristics which provide it with outstanding lubricating properties.

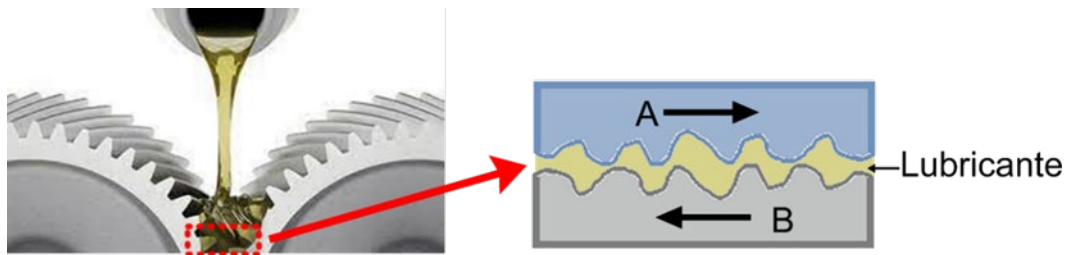
Keywords: *Castor oil, Vegetable oils, Lubricants, Chemical structure, Properties.*

1. Introducción

Un lubricante es una sustancia utilizada en cualquier máquina con el fin de separar las superficies que están en contacto y reducir así la fricción (resistencia al movimiento) y el desgaste (pérdida o daño de los materiales). Otras funciones de los lubricantes son el disipar el calor de las partes críticas de la maquinaria y equipo, eliminar y suspender los depósitos que pueden afectar el rendimiento, así como proteger la superficie metálica de la degradación y la corrosión. Son empleados en una extensa gama de aplicaciones, donde cada una requiere de una combinación de distintos requerimientos. En la figura 1 se muestra el esquema representativo del concepto de un lubricante para aplicaciones mecánicas.

Existen lubricantes en cada uno de los estados de la materia (sólidos, líquidos, y gases), además, éstos pueden ser de naturaleza orgánica o inorgánica. Sin embargo, cualquiera que sea su naturaleza y estado, cada lubricante debe de

cumplir satisfactoriamente con ciertas características básicas. Por ejemplo, debe poseer propiedades que le permitan tener un buen desempeño en su uso, como una adecuada viscosidad y un alto índice de viscosidad. Estas propiedades propician la formación de una capa lubricante gruesa para separar las superficies, reduciendo la fricción y el desgaste, y permiten que esta capacidad no varíe drásticamente con la temperatura. Así mismo, debe de poseer bajo punto de fluidez, alta volatilidad y alto punto de inflamación que le permitan operar en un mayor rango de temperaturas sin que deje de fluir, se evapore, o forme una mezcla inflamable con el aire. Por otro lado, es importante que posea buena estabilidad oxidativa e hidrolítica, así como buena capacidad para inhibir la corrosión, de manera que le permitan alargar su vida útil de operación y almacenamiento. Finalmente, se recomienda que sea amigable con el medio ambiente, es decir, que sea biodegradable y no tóxico para los seres vivos.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 1 Esquematización de la función de un lubricante para aplicaciones mecánicas.

Los lubricantes generalmente constan de un aceite base que puede ser mineral, sintético, o natural [1]. La base lubricante en sí misma realiza la mayoría de las funciones de los lubricantes, sin embargo, suele no proporcionar todas las propiedades que requiere la aplicación. La otra parte del trabajo la realizan los aditivos lubricantes (30% en peso, o menos) los cuales permiten añadir o mejorar propiedades específicas a los lubricantes [1]. La cantidad de aditivos depende generalmente de la aplicación, los lubricantes para engranajes industriales, hidráulicos y de turbina no requieren tanta cantidad de aditivos como aquellos para aplicaciones automotrices, fluidos para transmisiones automáticas (ATF) y para motores de gasolina y diésel [2].

2. Propiedades y Características Químicas de los Aceites Base y los Aditivos

Aceites vegetales como lubricantes

Se puede decir que los aceites vegetales, junto con el agua, fueron los primeros medios lubricantes empleados por el hombre. Los aceites vegetales poseen grandes ventajas para ser utilizados como bases lubricantes, tienen buena biodegradabilidad y baja toxicidad, están clasificados como recursos renovables, generan bajos coeficientes de fricción y poseen altos índices de viscosidad y puntos de inflamación. No obstante, sus deficientes propiedades de flujo a bajas temperaturas y la pobre estabilidad a la oxidación limitaron su uso alrededor del siglo XX, cuando estos fueron reemplazados por los aceites derivados del petróleo y algunos lubricantes elaborados sintéticamente con la finalidad de cumplir con los requerimientos de la época. En las últimas décadas, el uso de aceites vegetales como lubricantes se vio establecido a aplicaciones de pérdida total y aquellas sujetas a muy bajo estrés térmico [1]. Sin embargo, actualmente los lubricantes a base de aceites vegetales han vuelto a estar en el foco de investigadores, tecnólogos, y gobiernos debido a la necesidad de reemplazar los lubricantes dañinos para el medio ambiente por otros más sustentables, así como hacer frente al agotamiento de las reservas e incremento del precio del petróleo [1]. No obstante, con la finalidad de satisfacer los requisitos de las máquinas actuales, los esfuerzos están destinados a mejorar los aceites vegetales mediante la incorporación de aditivos, o mediante modificaciones a su estructura química.

Naturaleza química de los aceites vegetales

Los aceites vegetales son aceites extraídos de plantas, ya sea de las semillas o de otra parte de los frutos. En la figura 2 se muestran ejemplos de algunos aceites vegetales utilizados como lubricantes y el nombre científico de la planta de donde son extraídos. Los aceites vegetales son mezclas de triglicéridos (moléculas formadas de la esterificación del grupo carboxilo de tres ácidos grasos con los tres grupos hidroxilo (OH) de una molécula de glicerol), y en menor medida, monoacilglicéridos, diacilglicéridos, ácidos grasos libres, esteroides y tocoferoles. A

su vez, los ácidos grasos son moléculas orgánicas de cadena larga, hidrocarbonada y lineal, en cuyos extremos se encuentra por un lado el grupo carboxilo que participa en la formación de ésteres, y por el otro un grupo metilo.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 2 Aceites vegetales utilizados como lubricantes.


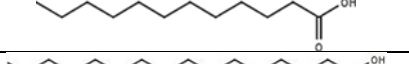
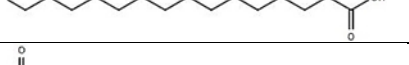
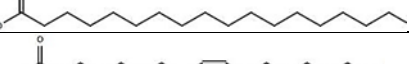
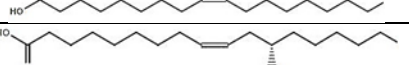
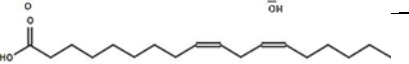
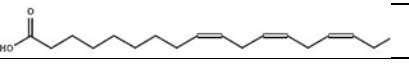
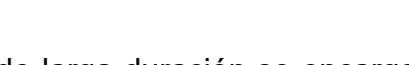
Los ácidos grasos se pueden clasificar de acuerdo con la longitud de la cadena, corta o larga, así como por el número de dobles enlaces carbono-carbono o insaturaciones, saturados (sin dobles enlaces) o insaturados (al menos un doble enlace). La tabla 1 muestra los ácidos grasos más comunes en aceites vegetales.

Efecto de la estructura química de los aceites vegetales en las propiedades lubricantes

Las propiedades de los lubricantes se pueden clasificar en tres grupos: propiedades de rendimiento, de larga duración, y ambientales [5]. Las propiedades de desempeño son fundamentales en la lubricación del contacto tribológico, buscando crear capas protectoras para reducir la fricción y el desgaste. Dentro de

estas propiedades se puede encontrar a las propiedades físicas, como viscosidad e índice de viscosidad, propiedades térmicas, propiedades a baja y alta temperatura, y la sensibilidad a los contaminantes del aire y el agua.

Tabla 1 Ácidos grasos más comunes en aceites vegetales [3,4].

Ácido graso	Estructura molecular	Tipo de ácido graso
Ácido caprílico C8:0		Saturado
Ácido láurico C12:0		Saturado
Ácido palmítico C16:0		Saturado
Ácido esteárico C18:0		Saturado
Ácido oleico C18:1		Mono-insaturado
Ácido ricinoleico C18:1:OH		Mono-insaturado
Ácido linoleico C18:2		Poli-insaturado
Ácido alfa-linolénico C18:3		Poli-insaturado

Por otro lado, las propiedades de larga duración se encargan de mantener por un periodo largo la funcionalidad del contacto lubricado. En esta categoría se encuentra la estabilidad a la oxidación, estabilidad hidrolítica e inhibición de la corrosión. Las propiedades medioambientales tienen un peso importante hoy en día ya que definen el impacto de los lubricantes en el entorno natural. Estas propiedades incluyen la biodegradabilidad, la capacidad de renovación, la toxicidad y la bioacumulación. Aunque a grandes rasgos estas propiedades han sido catalogadas como propiedades físicas o químicas, todas ellas dependen evidentemente de la naturaleza química de los lubricantes. A continuación, se presentan las más representativas, así como el efecto de la estructura o características químicas en cada una de ellas:

- **Viscosidad:** Es una propiedad que indica la resistencia interna que presenta una sustancia a fluir. Esta propiedad es la que permite a los lubricantes formar una capa protectora lo adecuadamente gruesa para separar las superficies sin afectar a la fricción. Esta propiedad del fluido base generalmente aumenta con la longitud de la cadena hidrocarbonada del ácido

carboxílico o del alcohol en los lubricantes de éster [1,6]. Así mismo, la viscosidad también depende del número de funciones hidroxilo presentes [1].

- **Índice de viscosidad (VI):** Es una propiedad que describe qué tan rápido cambia la viscosidad de una sustancia con respecto a la temperatura. Un alto índice de viscosidad significa que hay pocos cambios en un amplio rango de temperatura y es relacionado con un buen rendimiento. Esta característica depende del grado de ramificación en el ácido carboxílico o alcohol [6]. Mientras más larga sea la cadena del ácido carboxílico y el alcohol, más grande será el valor del índice de viscosidad [1]. Así mismo, el índice de viscosidad disminuye al incrementar la ramificación, manteniendo constante el número de carbonos [7].
- **Punto de vertido o fluidez:** Es una propiedad a baja temperatura que indica la temperatura a la cual el aceite lubricante comienza a formar cristales y pierde sus características de fluidez [1,6]. Lo deseable es que un lubricante posea bajos valores de punto de fluidez. Se ve beneficiada cuando el aceite posee un bajo contenido en ácidos grasos saturados y/o son de cadena corta [1]. Además, el punto de fluidez se reduce con el aumento de la ramificación y el acortamiento de la longitud de la cadena [1].
- **Fricción elastohidrodinámica (EHD):** el comportamiento de fricción se ve afectado por la estructura molecular del fluido base. Los líquidos que tienen moléculas de forma lineal con enlaces flexibles dan una fricción considerablemente menor que los líquidos basados en moléculas con grupos laterales o anillos voluminosos [7]. Así mismo, la fricción EHD también aumenta con la viscosidad para líquidos que tienen estructuras moleculares similares [7].
- **Estabilidad oxidativa:** La estabilidad oxidativa de lubricantes vegetales se ve afectada por la presencia de β -hidrógeno, hidrógeno bis-alílico, así como el grado de insaturación [1,8]. Sin embargo, en ambientes libres de oxígeno, la oxidación se vuelve insignificante y la estabilidad térmica de los aceites naturales se vuelve independiente del grado de insaturación [8]. Generalmente, los aceites con menor cantidad de ácidos insaturados tienen

mejor estabilidad oxidativa que aquellos que tienen mayor concentración de estos [1].

- **Estabilidad hidrolítica:** es la habilidad de los lubricantes para resistir a la descomposición química (hidrólisis) en presencia de agua. Esta característica depende en gran medida de los ésteres, aquellos saturados con componentes de cadena lineal son más estables que los insaturados o ramificados [1].
- **Biodegradabilidad:** Es la propiedad que tienen aquellas sustancias a degradarse por acción biológica, es decir, cambiar químicamente a formas más simples y estables. Un lubricante se considera degradable si se degrada al menos un 80 % en 28 días (CECL-33-A-93) o al menos un 60 % después de 28 días (OECD301B) [6]. Se cree que la biodegradabilidad en aceites vegetales puede estar relacionada con la presencia del enlace éster del grupo éster, el cual es un sitio sensible para que los microorganismos comiencen el proceso de biodegradación [9].
- **Ecotoxicidad:** Es una característica de los compuestos químicos a ejercer efectos tóxicos sobre los seres vivos. Esta propiedad se mide utilizando la dosis letal (DL50), que refiere a la dosis necesaria para matar al 50 % de una población [6]. Un lubricante no se considera ecotóxico si su DL50 es superior a 1000 ppm [10].

En la tabla 2 se ilustra, a manera de resumen, la influencia de cada característica de la estructura química de los aceites vegetales sobre las propiedades de los lubricantes. En los aceites vegetales, la composición química (contenido de ácidos grasos) es la principal diferencia entre uno y otro, y como se puede observar, es la que marca una diferencia en el rendimiento que tiene cada lubricante.

Aceite de ricino como lubricante

El aceite de ricino (conocido como Castor oil, en inglés) es un aceite no comestible que se obtiene de las semillas de la planta *Ricinus Communis L.*, la cual tiene facilidades para ser cultivada en zonas agrícolas áridas [11]. Es un aceite único

con grandes propiedades y resistencia debido a su estructura química la cual se centra en la estructura del ácido ricinoleico, el grupo carboxílico, el grupo hidroxilo y el punto único de insaturación [3]. En general, el aceite de ricino está compuesto en su mayoría por el ácido graso ricinoleico (cerca de un 90%), aunque también contiene pequeñas cantidades de ácidos grasos como oleico, esteárico, palmítico, linoleico, linolénico, entre otros. Con ello, su composición de triglicéridos es de triricinoleína (88,9 %), trilinoleína (4,9 %), trioleína (3,5 %), tripalmitina (1,4 %), triestearina (0,9 %) y trilionlenina (0,3 %) [3].

Tabla 2 Efecto de la estructura química de los aceites vegetales en las propiedades lubricantes.

Característica de la estructura química	Viscosidad	Índice de viscosidad	Punto de vertido o fluidez	Fricción EHD	Estabilidad oxidativa	Estabilidad hidrolítica	Bio-degradabilidad
Cadena larga	Mejora	Mejora	Mejora	Mejora	-	-	-
Cadena corta	Afecta	Afecta	Afecta	Afecta	-	-	-
Grado de ramificación	-	Afecta	Afecta	Afecta	-	Afecta	-
Grado de linealidad	-	-	-	Mejora	-	Mejora	-
Ácidos grasos saturados	-	-	Afecta	-	Mejora	Mejora	Afecta
Ácidos grasos insaturados	-	-	Mejora	-	Afecta	Afecta	Mejora

Fuente: Elaboración propia.

Dependiendo del tipo de semilla, la región, y el método de extracción, la composición química de los aceites vegetales puede presentar una variación. En la tabla 3 se muestra a grandes rasgos la composición de ácidos grasos, así como el efecto en las propiedades físicas del aceite de ricino y algunos aceites utilizados como lubricantes. Se puede observar que el aceite de ricino posee un mayor porcentaje de ácido ricinoleico (un ácido graso monoinsaturado, de cadena larga, y con un grupo hidroxilo en su doceavo carbono) y una baja cantidad de ácidos grasos saturados y poliinsaturados, por lo que este aceite presenta una mayor viscosidad tanto a 40 como a 100 °C, así como un menor punto de vertido y mejor estabilidad

oxidativa. En el caso del aceite de ricino, el grupo hidroxilo secundario también ayuda a mejorar notablemente estas propiedades. En contraste se puede observar que el aceite de coco, al estar constituido básicamente de ácidos grasos saturados, presenta menores valores de viscosidad y deficiente punto de vertido.

El desempeño tribológico del aceite de ricino se ha comparado con el de otros lubricantes en diversos sistemas y se ha encontrado que posee características físicas y de rendimiento (mayor viscosidad y menores valores de coeficiente de fricción y tasa de desgaste), que lo señalan como el mejor candidato para ser utilizado como biolubricante en comparación con aceites minerales, sintéticos, así como otros aceites vegetales [12-15]. Este desempeño también se debe a su composición y estructura química única, que le permite tener alta viscosidad para soportar la carga aplicada y separar las superficies en contacto para disminuir el desgaste. Además, al ser una molécula lineal y larga, tiene mejor comportamiento de fricción.

Tabla 3 Composición química y propiedades físicas de algunos aceites vegetales utilizados como bases lubricantes [4,12].

Aceite	Ácidos grasos saturados (%)	Ácidos grasos mono-insaturados (%)	Ácidos grasos poli-insaturados (%)	Viscosidad @40 °C (mm ² /s)	Viscosidad @100 °C (mm ² /s)	Índice de viscosidad	Punto de vertido (°C)	Punto de inflamabilidad (°C)
Aceite de ricino	2.7	91.9	5.4	220.6	19.7	220	—27	250
Aceite de colza	7.6	62.7	30.6	45.6	10.1	180	—12	240
Aceite de ajonjolí	15.9	40.4	44	31.8	7.5	213.5	—15	315
Aceite de coco	90.5	6.5	2	29	6	159	22	320
Aceite de mostaza	5.2	73.7	18.5	44.1	9.4	205	—15	-

Fuente: Elaboración propia.

3. Discusión

Los ácidos grasos contenidos en los aceites vegetales, como se vio anteriormente, son básicamente cadenas largas y lineales, por lo que en general producen menor fricción que los aceites minerales. Así mismo, algunos de los

aceites vegetales como el de girasol alto oleico, oliva, ricino, entre otros, poseen buena estabilidad oxidativa e incluso mejor que algunos aceites minerales puros. Otra ventaja de los aceites vegetales es que se degradan alrededor del 70-100% en un período de 28 días. Siempre se desea que cualquier sistema opere en un nivel óptimo. En lubricación se quiere que el lubricante posea todas las características deseadas para una aplicación en particular, que tenga alta viscosidad, bajos valores de fricción y desgaste, bajo punto de fluidez, sea biodegradable, etc. Sin embargo, difícilmente se pueden lograr todas las características en un solo aceite debido a su naturaleza química. Las formas de poder hacer que cumpla con un mayor número de requisitos, son mediante la incorporación de aditivos con funciones específicas y/o mediante modificaciones químicas. Sin embargo, hay que tener consideraciones importantes en cualquiera de los dos casos. En el caso de la aditivación, se debe de considerar el número y tipo de aditivos que se agregarán al aceite base (dispersantes, detergentes, inhibidores de oxidación, agentes antidesgaste y/o modificadores de fricción). Con ello, se debe de tener en cuenta la interacción, positiva o negativa, entre ellos y el aceite base, ya que puede no existir sinergia con algún otro aditivo o con el tipo de aceite base empleado [2]. La eficacia de los lubricantes depende tanto del aceite base, es decir de la naturaleza química del aceite base, como de su interacción con otros productos químicos. Los lubricantes formulados deben de encontrar un balance entre rendimiento y biodegradabilidad. La biodegradabilidad de un aceite base es una propiedad vital, y esta no puede mejorarse con el uso de aditivos. Así mismo, esta propiedad se ve comprometida por el uso de aditivos no biodegradables, por lo que se necesita emplear sustancias que también sean amigables con el medio ambiente. Por otro lado, si se recurre a la modificación química (como puede ser transesterificación, hidrogenación, epoxidación, entre otras), se debe de tener en cuenta que con cada una de estas modificaciones se presenta una cuestión similar, mejoran alguna propiedad, pero perjudican otra, lo que ocasiona considerar nuevamente la aditivación. En el caso del aceite de ricino, este aceite ha mostrado tener una composición singular y muy adecuada para ser utilizado como lubricante en diversos sistemas mecánicos, incluso sin la necesidad de aditivos o alguna modificación. Esto sugiere

que este aceite en particular tiene gran potencial para ser utilizado como lubricante con o sin modificaciones químicas para una gran cantidad de aplicaciones sin generar un efecto adverso al medio ambiente.

4. Conclusiones

En este trabajo se presentó un análisis sobre el efecto que tiene la naturaleza química de los aceites vegetales sobre las propiedades lubricantes deseadas el cual se puede resumir en lo siguiente:

- Los aceites vegetales consisten básicamente de mezclas de triglicéridos formados por tres ácidos grasos unidos a una molécula de glicerol. La composición en ácidos grasos es propia de cada aceite vegetal y es la que determina sus propiedades particulares.
- Las características químicas de los ácidos grasos como la longitud de la cadena, el grado de linealidad o ramificación, y la insaturación, definen las propiedades lubricantes de los aceites vegetales como viscosidad, índice de viscosidad, fricción EHD, estabilidad oxidativa e hidrolítica, biodegradabilidad, etc.
- Mientras más grande sea la longitud de la cadena de los ácidos grasos, mejor será la viscosidad, el punto de fluidez, y la fricción EHD. Asimismo, mientras más lineal sea la cadena, mejor será la fricción EHD y la estabilidad hidrolítica. Por otro lado, mientras más alto sea el contenido de ácidos grasos saturados mejor será la estabilidad oxidativa e hidrolítica, pero perjudicará el punto de fluidez y la biodegradabilidad. Por el contrario, mientras más alto es el contenido de ácidos grasos insaturados mejor será el punto de fluidez y la biodegradabilidad, pero afectará a la estabilidad oxidativa e hidrolítica.
- Debido a sus características químicas, los aceites vegetales tienen gran capacidad para ser utilizados como lubricantes biodegradables, poseen propiedades similares o mejores a los aceites minerales las cuales se pueden mejorar con la aditivación y modificación química.
- El aceite de ricino es uno de los aceites vegetales con mejores propiedades físicas y de rendimiento que lo hacen factible para ser utilizado como medio

lubricante para muchas aplicaciones industriales, tales como en motosierras, motores, corte de metales, engranes, etcétera. Destacando que, para algunas aplicaciones, no requiere de algún aditivo o modificación de sus características químicas.

Agradecimientos

Los autores reconocen el apoyo constante de la Universidad de Guanajuato y el Tecnológico Nacional de México. M.T. Hernández-Sierra agradece profundamente al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) en México por la beca para la realización de su estancia posdoctoral 2020-2022.

5. Bibliografía y Referencias

- [1] Schneider, M.P. (2006). Review Plant-oil-based lubricants and hydraulic fluids. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 86, 1769–1780.
- [2] Sniderman, D. (2017). The chemistry and function of lubricant additives. *Tribology & Lubrication Technology*, 73(11), 18–28.
- [3] 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 Technology*, 41(2), 399-413.
- [4] Sajeeb, A., Rajendrakumar, P.K. (2019). Comparative evaluation of lubricant properties of biodegradable blend of coconut and mustard oil. *Journal of Cleaner Production*, 240, 118255.
- [5] Torbacke, M., Rudolphi, Å.K., Kassfeldt, E. (2014). Part two: Lubricant Properties. En Torbacke, M., Rudolphi, Å.K., Kassfeldt, E. *Lubricants: Introduction to Properties and Performance*. West Sussex (U.K.): John Wiley & Sons Ltd, 19–44.
- [6] 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.

- [7] Zhang, J., Tan, A., Spikes, H. (2017). Effect of Base Oil Structure on Elastohydrodynamic Friction. *Tribology Letters*, 65(13).
- [8] Reeves, C.J., Menezes, P.L., Jen, T.C., Lovell, M.R. (2015). The influence of fatty acids on tribological and thermal properties of natural oils as sustainable biolubricants. *Tribology International*, 90, 123–134.
- [9] Siti Afida, I., Razmah, G., Yeong, S.K., Hazimah, A.H. (2015). Biodegradability of palm-based lubricants. *Journal of Oil Palm Research*, 27(4), 425–432.
- [10] 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*, 8(3), 1–24, 257.
- [11] 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, 3973657.
- [12] Ortega-Álvarez, R., Hernández-Sierra, M.T., Aguilera-Camacho, L.D., Bravo-Sánchez, M.G., Moreno, K.J., García-Miranda, J.S. (2022). Tribological Performance of 100Cr6/8620 Steel Bearing System under Green Oil Lubrication. *Metals*, 12(2), 362.
- [13] Hernández-Sierra, M.T., Ortega-Álvarez, R., Bravo-Sánchez, M.G., Aguilera-Camacho, L.D., García-Miranda, J.S., Moreno, K.J. (2017). Tribological improvement of hardened and tempered AISI 4140 steel against Al₂O₃ by using bio-lubricant. *MRS Advances*, 2(62), 3873–3881.
- [14] Hernández-Sierra, M.T., Bravo-Sánchez, M.G., Báez, J.E., Aguilera-Camacho, L.D., García-Miranda, J.S., Moreno, K.J. (2019). Improvement Effect of Green Lubricants on the Tribological and Mechanical Performance of 4140 Steel. *Applied Sciences*, 9, 4896.
- [15] Moreno, K.J., Hernández-Sierra, M.T., Báez, J.E., Rodríguez-deLeón, E., Aguilera-Camacho, L.D., García-Miranda, J.S. (2021). On the Tribological and Oxidation Study of Xanthophylls as Natural Additives in Castor Oil for Green Lubrication. *Materials*, 14(18), 5431.