Research Club Scientia Vol. 4, No 4
Frecuencia: Octubre–Diciembre 2026
ISSN: 3103 - 1315
DOI: https://doi.org/10.65415/jetptp82

Síntesis y evaluación reológica de estólidos derivados de ácidos grasos recuperados de residuos agrícolas para aplicaciones lubricantes en sistemas de engranajes

Synthesis and rheological evaluation of estolides derived from fatty acids recovered from agricultural waste for gear lubricant applications

Sintesi e valutazione reologica di estolidi derivati da acidi grassi recuperati da residui agricoli per applicazioni lubrificanti nei sistemi a ingranaggi

Anthony Bolívar Zambrano Rodríguez[I]
azambranor27@unemi.edu.ec
ORCID: https://orcid.org/0009-0002-9364-2880
Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Carrera Ingeniería Industrial, Universidad Estatal de Milagro, Ecuador

Xavier Sebastian Gualato Ruiz[I]
xgualotor@unemi.edu.ec
ORCID: https://orcid.org/0009-0000-7625-1912
Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Carrera Ingeniería Industrial, Universidad Estatal de Milagro, Ecuador

Rafael Fernando Icaza Barrera[I]
ricazab2@unemi.edu.ec
ORCID: https://orcid.org/0009-0000-0212-2640
Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Carrera Ingeniería Industrial, Universidad Estatal de Milagro, Ecuador

Xiomara Lisbeth Espinoza Quiroz[I]
xespinozaq@unemi.edu.ec
ORCID: https://orcid.org/0009-0007-5137-4685
Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Carrera Ingeniería Industrial, Universidad Estatal de Milagro, Ecuador

Jorge Tomas Holguín Anzules[I]
jholguina7@unemi.edu.ec
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4454-4184
Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Carrera Ingeniería Industrial, Universidad Estatal de Milagro, Ecuador

Correspondencia: xespinozaq@unemi.edu.ec

Artículo de Investigación

.

Síntesis y evaluación reológica de estólidos derivados de ácidos grasos recuperados de residuos agrícolas para aplicaciones lubricantes en sistemas de engranajes

Aceptado: 27/Noviembre/2026 **Publicado:** 28/Noviembre/2026

I. Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Carrera Ingeniería Industrial, Universidad Estatal de Milagro, Ecuador

.

Resumen

La valorización de residuos agroindustriales constituye una alternativa para obtener materias primas renovables destinadas a la formulación de lubricantes de origen biológico. En esta línea, los estólidos representan compuestos de interés por su estructura oligomérica derivada de ácidos grasos, la cual permite modificar propiedades como la viscosidad, el comportamiento a bajas temperaturas y la estabilidad química. Esta revisión aborda las rutas de síntesis de estólidos a partir de ácidos grasos obtenidos de biomasa agrícola de rechazo, considerando la influencia del grado de oligomerización en el peso molecular promedio, la viscosidad, la estabilidad hidrolítica y las propiedades térmicas. Para ello, se examinan las condiciones de reacción, la composición de los ácidos grasos, las modificaciones estructurales y el aprovechamiento de subproductos agroindustriales, incluidos los destilados de ácidos grasos de palma y los aceites vegetales residuales. Desde esta perspectiva, se analiza la relación entre la estructura molecular y las características fisicoquímicas que determinan su posible aplicación como lubricantes renovables. Finalmente, se identifican oportunidades para aprovechar residuos agrícolas en la obtención de estólidos, así como limitaciones relacionadas con la falta de comparabilidad de propiedades HTHS, la estabilidad hidrolítica y la evaluación de su desempeño en aplicaciones de engranajes.

Palabras clave: Estólidos; ácidos grasos; biomasa agrícola; residuos agroindustriales; oligomerización; biolubricantes; viscosidad.

Abstract

The valorization of agro-industrial waste represents an alternative for obtaining renewable raw materials intended for the formulation of bio-based lubricants. In this regard, estolides are compounds of interest due to their fatty acid-derived oligomeric structure, which allows the modification of properties such as viscosity, low-temperature behavior, and chemical stability. This review addresses estolide synthesis routes using fatty acids obtained from rejected agricultural biomass, considering the influence of the degree of oligomerization on average molecular weight, viscosity, hydrolytic stability, and thermal properties. To this end, reaction conditions, fatty acid composition, structural modifications, and the utilization of agro-industrial by-products, including palm fatty acid distillates and waste vegetable oils, are examined. From this perspective, the relationship between molecular structure and physicochemical characteristics determining their potential application as renewable lubricants is analyzed. Finally, opportunities for utilizing agricultural waste in estolide production are identified, along with limitations related to the lack of comparability in HTHS properties, hydrolytic stability, and performance evaluation in gear applications.

Keywords: Estolides; fatty acids; agricultural biomass; agro-industrial waste; oligomerization; biolubricants; viscosity.

Riassunto

La valorizzazione dei residui agroindustriali offre una via per ottenere materie prime rinnovabili destinate alla formulazione di lubrificanti di origine biologica. Gli estolidi sono composti di interesse per la loro struttura oligomerica derivata da acidi grassi, che consente di modulare viscosità, comportamento a basse temperature e stabilità chimica. Questa revisione esamina le vie di sintesi degli estolidi a partire da acidi grassi ottenuti da biomassa agricola di scarto e l'influenza del grado di oligomerizzazione sul peso molecolare medio, sulla viscosità, sulla stabilità idrolitica e sulle proprietà termiche. Sono esaminate le condizioni di reazione, la composizione degli acidi grassi, le modifiche strutturali e l'impiego di sottoprodotti agroindustriali, tra cui i distillati di acidi grassi di palma e gli oli vegetali residui. Si analizza il rapporto tra struttura molecolare e caratteristiche fisico-chimiche che ne determinano il potenziale impiego come lubrificanti rinnovabili. La revisione individua opportunità per valorizzare i residui agricoli e limiti legati alla scarsa comparabilità dei dati sulla viscosità HTHS, sulla stabilità idrolitica e sulle prestazioni negli ingranaggi.

Parole chiave: Estolidi; acidi grassi; biomassa agricola; residui agroindustriali; oligomerizzazione; biolubrificanti; viscosità.

1. Introducción

La creciente demanda de productos industriales con menor impacto ambiental ha impulsado la búsqueda de materias primas renovables que reduzcan la dependencia de los recursos derivados del petróleo. En este contexto, los residuos agrícolas y subproductos agroindustriales representan fuentes potenciales de aceites, grasas y ácidos grasos recuperables mediante diferentes procesos químicos. De esta manera, su aprovechamiento contribuye a diversificar las materias primas y promover estrategias de economía circular (Almasi et al., 2021).

Entre las alternativas desarrolladas destacan los biolubricantes, formulados a partir de aceites vegetales, grasas animales y otros derivados lipídicos. Debido a su origen renovable, estos materiales presentan ventajas relacionadas con su biodegradabilidad y potencial de aplicación industrial. Sin embargo, todavía presentan limitaciones asociadas con la estabilidad oxidativa, el comportamiento térmico y la resistencia ante condiciones de operación exigentes. Frente a estas dificultades, los estólidos representan una alternativa para modificar las propiedades de los lubricantes de origen biológico (Kumar et al., 2025).

Los estólidos son compuestos oligoméricos formados mediante la unión de moléculas de ácidos grasos a través de enlaces éster. Como resultado, su estructura influye en el peso molecular y las

propiedades reológicas del producto obtenido. Respecto a su síntesis, destacan procesos como la esterificación y la acidólisis, cuya eficiencia depende de los reactivos, catalizadores y condiciones de reacción. En cuanto a las materias primas, pueden aprovecharse residuos de semillas oleaginosas, aceites usados y destilados de ácidos grasos (Hoong et al., 2025).

A partir de estas consideraciones, el grado de oligomerización y la composición de los ácidos grasos constituyen factores determinantes en las propiedades fisicoquímicas de los estólidos. Para evaluar su aplicación en lubricantes industriales para engranajes, resulta necesario analizar el peso molecular promedio, la viscosidad, el punto de fluidez, la estabilidad hidrolítica y la viscosidad a alta temperatura y tasa de cizallamiento (HTHS). Bajo este enfoque, el presente trabajo analiza sus principales rutas de síntesis y su potencial desempeño como lubricantes de origen biológico.

2. Metodología

2.1. Diseño de la investigación

La investigación adopta un enfoque documental, descriptivo y analítico, orientado al estudio de las rutas de síntesis de estólidos, las materias primas lipídicas y la influencia del grado de oligomerización en las propiedades fisicoquímicas. Bajo este criterio, se examina el aprovechamiento de fuentes renovables para desarrollar biolubricantes. En cuanto a la delimitación temporal, se consideraron publicaciones de 2021 a 2026, entre artículos experimentales, revisiones científicas y documentos técnicos sobre síntesis y caracterización de estos compuestos.

2.2. Fuentes de información

La búsqueda bibliográfica se efectuó en Scopus, Web of Science, ScienceDirect, SpringerLink, Wiley Online Library y Google Scholar, donde se localizaron investigaciones sobre ácidos grasos, síntesis de estólidos y lubricantes biológicos. De forma complementaria, se analizaron las referencias de los documentos seleccionados para ampliar la cobertura bibliográfica. Para delimitar los resultados, se utilizaron términos en inglés como *estolide synthesis*, *fatty acid oligomerization*, *agricultural waste lipids*, *HTHS viscosity* y *hydrolytic stability*.

2.3. Criterios de selección de las publicaciones

La selección documental se fundamentó en la pertinencia científica de las publicaciones sobre síntesis de estólidos, modificación de ácidos grasos y caracterización de compuestos lubricantes. En relación con las materias primas, se incorporaron investigaciones sobre biolubricantes y recursos renovables procedentes de residuos agroindustriales. Respecto al rigor científico, se priorizaron estudios experimentales, revisiones y normas técnicas con información verificable sobre las condiciones de reacción y las propiedades fisicoquímicas. Finalmente, se descartaron documentos duplicados o ajenos a los objetivos de investigación.

2.4. Organización y análisis de la información

La información recopilada se organizó según las categorías de investigación, considerando la procedencia de las materias primas, la recuperación de ácidos grasos, las rutas de síntesis, las condiciones de reacción, el grado de oligomerización y las propiedades fisicoquímicas. A partir de esta clasificación, se analizaron las relaciones entre la composición de los precursores y las características de los estólidos. Para la comparación, se evaluaron la viscosidad, el punto de fluidez, el índice de viscosidad y la estabilidad química, considerando las diferencias metodológicas.

2.5. Alcance y limitaciones metodológicas

La revisión comprende estudios realizados con materias primas residuales, aceites vegetales y ácidos grasos comerciales. Esta inclusión permite examinar los mecanismos de formación de estólidos y comparar las propiedades reportadas para diferentes precursores. Sin embargo, se distingue entre los resultados obtenidos directamente a partir de subproductos agroindustriales y aquellos procedentes de materias primas convencionales, evitando atribuir a los residuos características que no han sido comprobadas experimentalmente.

La disponibilidad de información sobre viscosidad HTHS, estabilidad hidrolítica y desempeño en engranajes constituye una limitación para establecer comparaciones entre los estudios. A esta dificultad se añaden las diferencias en catalizadores, temperaturas, tiempos de reacción y métodos de caracterización. Por este motivo, el análisis se orienta a reconocer tendencias, limitaciones y oportunidades tecnológicas, sin asumir que los resultados obtenidos bajo distintas condiciones sean directamente equivalentes.

3. Resultados

3.1. Caracterización general de las investigaciones seleccionadas

Las investigaciones revisadas abordan la síntesis y caracterización de estólidos mediante diferentes materias primas y procedimientos experimentales. Entre los principales avances, destacan la optimización de reacciones, el uso de ultrasonido, la modificación de ácidos grasos y el aprovechamiento de aceites vegetales y subproductos de palma. Además, se estudian propiedades viscosimétricas, tribológicas y fisicoquímicas, además de la estabilidad de estos compuestos. Estos aportes permiten identificar alternativas para desarrollar bases lubricantes de origen biológico.

Research Club Scientia Vol. 4, No 4, Octubre - Diciembre, pp. 1810-1820, ISSN: 3103 – 1315

Tabla 1. Caracterización de las principales investigaciones seleccionadas.

Aspectos	Materia prima o sistema estudiado	Enfoque principal	Aporte al estudio
Sanap et al. (2022)	Ácido oleico	Optimización de la síntesis de oleic-estolide	Identificación de condiciones de reacción y propiedades viscosimétricas.
Thakur, Sanap, Gogate et al. (2023)	Ácido oleico	Síntesis asistida por ultrasonido	Intensificación, optimización y estudio cinético.
Thakur, Sanap, Patil et al. (2023)	Ácido 12-hidroxiesteárico	Síntesis de estólidos y sus ésteres	Evaluación de propiedades fisicoquímicas según la estructura molecular.
Sanap et al. (2024)	Estólidos y derivados poliol-ésteres	Síntesis y evaluación de propiedades tribológicas	Análisis de propiedades para aplicaciones lubricantes.
Melo et al. (2025)	Aceite de ricino	Síntesis de acilglicerol-estólidos	Caracterización viscosimétrica y comportamiento a bajas temperaturas.
Hoong et al. (2025)	PFAD y ácido oleico	Síntesis de ésteres de estólidos	Aprovechamiento de subproductos para bases lubricantes biológicas.
Kumar et al. (2025)	Diferentes sistemas de estólidos	Revisión de síntesis, caracterización y descomposición	Recopilación de avances y limitaciones de los estólidos.
Watcharapo et al. (2026)	Ácidos oleico y láurico derivados de palma	Síntesis catalítica de estólidos y esterificación	Evaluación de propiedades fisicoquímicas para aplicaciones lubricantes.

Fuente: Elaboración propia.

Las investigaciones revisadas utilizan principalmente ácidos grasos comerciales y aceites vegetales como precursores para analizar los procesos de oligomerización. No obstante, la incorporación de destilado de ácidos grasos de palma (PFAD) representa un avance en la valorización de subproductos industriales. Además, los estudios experimentales permiten identificar la influencia de las condiciones de síntesis en las propiedades fisicoquímicas de los estólidos, aunque la variabilidad de los procedimientos limita la comparación de resultados y la evaluación de su desempeño lubricante (Hoong et al., 2025).

3.2. Materias primas agrícolas y recuperación de ácidos grasos

Las materias primas lipídicas de origen agrícola y agroindustrial constituyen fuentes potenciales de ácidos grasos para la síntesis de estólidos. Entre ellas destacan los aceites residuales, las semillas descartadas y los subproductos de refinación. En este ámbito, Hoong et al. (2025) estudiaron el destilado de ácidos grasos de palma (PFAD), mientras que Melo et al. (2025) analizaron derivados del aceite de ricino. Para determinar su viabilidad, resulta necesario evaluar la composición química, la calidad y los costos de recuperación de los precursores (Almasi et al., 2021).

3.3. Distribución geográfica de las investigaciones

La distribución geográfica de las publicaciones seleccionadas muestra la participación de instituciones de India, Brasil, Malasia y Tailandia. En cuanto a su representación, India concentra la mayor cantidad de estudios dentro del conjunto analizado, mientras que los demás países presentan una participación individual menor. Esta distribución permite reconocer los principales contextos institucionales vinculados con la investigación sobre síntesis y caracterización de estólidos, sin representar necesariamente la producción científica mundial.

Tabla 2. Distribución geográfica de las publicaciones seleccionadas.

País	Número de publicaciones	Porcentaje
India	5	62,5 %
Brasil	1	12,5 %
Malasia	1	12,5 %
Tailandia	1	12,5 %
Total	8	100 %

Nota. Elaboración propia a partir de las afiliaciones institucionales de las ocho publicaciones seleccionadas.

Las investigaciones desarrolladas en India se orientan principalmente a la optimización de la síntesis y las propiedades de los estólidos, mientras que Brasil y Malasia destacan por el estudio de materias primas vegetales y subproductos de refinación. No obstante, persisten limitaciones en el aprovechamiento de residuos agrícolas heterogéneos y en la evaluación del desempeño lubricante para sistemas de engranajes, lo que evidencia la necesidad de ampliar estas investigaciones.

3.4. Mecanismos de síntesis y grado de oligomerización

La formación de estólidos ocurre por la unión de unidades de ácidos grasos a través de enlaces éster, principalmente por esterificación y acidólisis. La temperatura, el tiempo de reacción, la proporción molar y la cantidad de catalizador condicionan la conversión química y el grado de oligomerización. Al respecto, Sanap et al. (2022) obtuvieron un número promedio de estólido de 2,13, mientras que Thakur, Sanap, Gogate, et al. (2023) estudiaron el ultrasonido como alternativa para intensificar la síntesis. Estos factores también influyen en el peso molecular y las propiedades fisicoquímicas de los productos.

3.5. Relación entre peso molecular y propiedades reológicas

El peso molecular influye en la viscosidad de los estólidos debido a su relación con la longitud de las cadenas, la ramificación y las interacciones intermoleculares. En este contexto, Sanap et al. (2022) reportaron una viscosidad cinemática de 203,06 mm^2/s a 40 °C para el oleic-estolide, mientras que Melo et al. (2025) obtuvieron 635 mm^2/s para el acilglicerol-estolide EST12. Esta variación evidencia la influencia de la arquitectura molecular en el comportamiento reológico y la capacidad de formar películas lubricantes, aspectos determinantes para seleccionar estos compuestos en aplicaciones industriales.

3.6. Viscosidad HTHS y aplicaciones en engranajes

La viscosidad HTHS permite evaluar la resistencia al flujo de los lubricantes bajo temperaturas elevadas y altas tasas de cizallamiento. En los sistemas de engranajes, este parámetro resulta fundamental para mantener películas lubricantes y reducir el desgaste superficial. Al respecto, Sanap et al. (2022) y Melo et al. (2025) reportaron viscosidades cinemáticas de 203,06 y 635 mm^2/s a 40 °C, respectivamente. Sin embargo, estos valores no corresponden a mediciones HTHS, por lo que se requieren ensayos específicos para determinar el comportamiento de los estólidos bajo condiciones reales de operación (ASTM International, 2025; SAE International, 2025).

3.7. Punto de fluidez y estabilidad a bajas temperaturas

El punto de fluidez determina la temperatura mínima a la que un lubricante conserva su capacidad de flujo, por lo que influye en el arranque y funcionamiento de los equipos. En este ámbito, Sanap et al. (2022) reportaron −9 °C para el oleic-estolide, mientras que Melo et al. (2025) obtuvieron −30 °C para los acilglicerol-estólidos. Por otra parte, Hoong et al. (2025) identificaron valores entre −12 y −33 °C en estólidos derivados de PFAD y ácido oleico. Estos resultados demuestran que la composición y las modificaciones moleculares influyen en la fluidez a bajas temperaturas.

Research Club Scientia Vol. 4, No 4, Octubre - Diciembre, pp. 1810-1820, ISSN: 3103 – 1315

3.8. Estabilidad hidrolítica y resistencia química

La estabilidad hidrolítica expresa la capacidad de los estólidos para conservar su estructura química ante la presencia de agua. Debido a la existencia de enlaces éster, estos compuestos pueden experimentar hidrólisis bajo determinadas condiciones de humedad, temperatura y pH. En aplicaciones lubricantes, esta propiedad adquiere importancia por la exposición al agua y la condensación, factores que pueden modificar la composición del fluido. Aunque existen avances en la síntesis y caracterización de estos materiales, todavía se requiere profundizar en su resistencia a la degradación química y su comportamiento frente al agua (Kumar et al., 2025).

3.9. Vacíos científicos identificados

La revisión bibliográfica evidencia una disponibilidad limitada de investigaciones sobre estólidos obtenidos directamente de ácidos grasos recuperados de residuos agrícolas heterogéneos. Aunque existen estudios con subproductos agroindustriales, predominan los aceites caracterizados y las materias primas comerciales. A esta limitación se añade la falta de evaluaciones específicas sobre peso molecular, viscosidad HTHS, comportamiento tribológico y estabilidad hidrolítica. Por consiguiente, resulta necesario ampliar los estudios sobre materias primas residuales, condiciones de síntesis y escalamiento industrial para determinar la viabilidad técnica y económica de estos compuestos en aplicaciones lubricantes (Almasi et al., 2021; Hoong et al., 2025; Kumar et al., 2025).

4. Discusión

4.1. Influencia de la estructura molecular en el desempeño de los estólidos

Las propiedades de los estólidos dependen de la composición de los ácidos grasos, las condiciones de síntesis y la arquitectura molecular. Estas variables modifican el peso molecular y las interacciones, con efectos sobre la viscosidad y el comportamiento reológico. Sanap et al. (2022) reportaron 203,06 mm^2/s a 40 °C para el oleic-estolide, mientras Melo et al. (2025) obtuvieron 635 mm^2/s para EST12. Esta diferencia también responde a la ramificación y funcionalización molecular (Thakur, Sanap, Patil, et al., 2023).

4.2. Aprovechamiento de biomasa agrícola de rechazo como materia prima

El aprovechamiento de materias primas residuales permite valorizar subproductos agroindustriales y obtener precursores de estólidos. Hoong et al. (2025) utilizaron destilado de ácidos grasos de palma (PFAD), procedente del refinamiento de aceites, para sintetizar derivados lubricantes. Sin embargo, los resultados con aceite de ricino y ácido oleico no demuestran directamente la viabilidad de residuos agrícolas. Por ello, la recuperación, purificación, composición y disponibilidad de las fracciones lipídicas determinan la viabilidad del proceso.

4.3. Relación entre oligomerización y propiedades lubricantes

El grado de oligomerización modifica el peso molecular y la viscosidad de los estólidos, aunque el incremento de estos parámetros no garantiza un mejor desempeño lubricante. Una viscosidad elevada puede favorecer la película protectora, pero también dificultar la circulación y aumentar las pérdidas por resistencia viscosa. Por otra parte, Melo et al. (2025) y Hoong et al. (2025) reportaron puntos de fluidez de −30 °C y hasta −33 °C. Estos resultados dependen de la composición y arquitectura molecular.

4.4. Potencial aplicación en lubricantes para engranajes

Los estólidos presentan potencial como componentes de lubricantes industriales por la posibilidad de ajustar sus propiedades fisicoquímicas mediante modificaciones estructurales. Sin embargo, la aplicación en engranajes exige evaluar viscosidad, estabilidad al cizallamiento, protección contra el desgaste y compatibilidad de materiales. Aunque los resultados de laboratorio constituyen una base para su desarrollo, la escasez de datos HTHS impide establecer el comportamiento a alta temperatura y cizallamiento. Por tanto, se requieren ensayos específicos acordes con la aplicación (SAE International, 2025).

4.5. Limitaciones de la revisión

La revisión presenta limitaciones asociadas con la diversidad de materias primas, condiciones de reacción y métodos de caracterización. Algunas investigaciones utilizan ácidos grasos comerciales y aceites caracterizados, mientras otras incorporan subproductos agroindustriales, por lo que los resultados no representan evidencia equivalente sobre residuos agrícolas. Además, la escasez de datos sobre HTHS, estabilidad hidrolítica y desempeño prolongado en engranajes restringe las conclusiones. Por ello, los hallazgos deben interpretarse como tendencias tecnológicas y no como validación industrial (Sanap et al., 2022; Hoong et al., 2025).

5. Conclusiones

La revisión permitió identificar que los estólidos representan una alternativa para desarrollar biolubricantes mediante procesos de esterificación y acidólisis. Durante la oligomerización, la formación de estructuras de mayor tamaño molecular modifica determinadas propiedades fisicoquímicas. Sin embargo, el comportamiento final depende de la composición de los ácidos grasos, la arquitectura molecular y las condiciones de síntesis. En cuanto a las materias primas, los subproductos agroindustriales presentan potencial para su aprovechamiento en la producción de estos compuestos.

Respecto a sus aplicaciones, el peso molecular y la arquitectura estructural influyen en la viscosidad y el comportamiento térmico de los estólidos. No obstante, su utilización en engranajes

requiere evaluar la viscosidad HTHS, la estabilidad hidrolítica y la resistencia al desgaste mediante ensayos normalizados. Finalmente, el aprovechamiento de ácidos grasos procedentes de biomasa agrícola de rechazo requiere optimizar la recuperación de materias primas, las condiciones de síntesis y los costos de transformación para determinar su viabilidad industrial.

6. Perspectivas futuras

Las investigaciones futuras podrían enfocarse en recuperar y caracterizar ácidos grasos provenientes de residuos agrícolas y subproductos agroindustriales de composición variable. Bajo esta perspectiva, será importante relacionar el grado de oligomerización con el peso molecular y las propiedades reológicas mediante métodos comparables. De igual manera, la evaluación de la viscosidad HTHS, la estabilidad hidrolítica y la resistencia al desgaste permitirá analizar su comportamiento en sistemas de transmisión. Finalmente, deberán estudiarse el escalamiento de la síntesis, el consumo energético y su viabilidad económica.

Referencias

Almasi, S., Ghobadian, B., Najafi, G., & Dehghani Soufi, M. (2021). A review on bio-lubricant production from non-edible oil-bearing biomass resources in Iran: Recent progress and perspectives. *Journal of Cleaner Production, 290*, Article 125830. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125830

ASTM International. (2025). *Standard test method for measuring viscosity of new and used engine oils at high shear rate and high temperature by tapered bearing simulator viscometer at 150 °C* (ASTM D4683-25). https://doi.org/10.1520/D4683-25

Hoong, S. S., Tang, S. W., Noor Armylisas, A. H., Arniza, M. Z., Nik Siti Mariam, N. M. D., Maznee, T. I. T. N., & Azizul Hasan, Z. A. (2025). Synthesis and physicochemical properties of estolide esters made from mixtures of palm fatty acid distillate and oleic acid as bio-lubricant base oil. *European Journal of Lipid Science and Technology, 127*(6), Article e70025. https://doi.org/10.1002/ejlt.70025

Kumar, P. V. M., Hamnas, A., Jagadeesha, T., & Unnikrishnan, G. (2025). A review on synthesis, characterization, and decomposition of biodegradable functional fluids called estolides. *Journal of the American Oil Chemists' Society, 102*(8), 1201–1223. https://doi.org/10.1002/aocs.12958

Melo, L. N., Barbosa, G. E. G. S., Meneghetti, S. M. P., Meneghetti, M. R., & Bortoluzzi, J. H. (2025). Alkoxide-catalyzed synthesis and characterization of acylglycerol-estolide biolubricants from neat castor oil. *European Journal of Lipid Science and Technology, 127*(4), Article e202400125. https://doi.org/10.1002/ejlt.202400125

SAE International. (2025). *Automotive driveline lubricant viscosity classification* (SAE Standard J306_202502). https://doi.org/10.4271/J306_202502

Sanap, P., Sonawane, D., Patil, S., & Pratap, A. (2022). Optimization of oleic-estolide fatty acid synthesis using response surface methodology and artificial neural networks. *Industrial Crops and Products, 188*, Article 115711. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115711

Sanap, P. S., Bhilpawar, O. V., Patil, S. S., & Pratap, A. P. (2024). Synthesis of polyol esters of estolide and evaluation of their tribological properties. *Tribology International, 198*, Article 109772. https://doi.org/10.1016/j.triboint.2024.109772

Thakur, R., Sanap, P., Gogate, P. R., & Pratap, A. P. (2023). Ultrasound-assisted synthesis of oleic estolide: Optimization, process intensification and kinetic study. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification, 193*, Article 109533. https://doi.org/10.1016/j.cep.2023.109533

Thakur, R., Sanap, P., Patil, S., & Pratap, A. (2023). Synthesis of 12-hydroxystearic estolide and its esters to study the effect of molecular structure on physicochemical properties. *Industrial Crops and Products, 205*, Article 117435. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117435

Watcharapo, P., Pitakjakpipop, P., Anutrasakda, W., & Pitakjakpipop, H. (2026). Catalytic valorization of palm-based fatty acids into high-performance estolide ester lubricants. *ACS Omega, 11*(39), 59378–59390. https://doi.org/10.1021/acsomega.6c05480