

ANÁLISIS COMPARATIVO DE ACEITES DIELECTRICOS VEGETALES PARA SU USO
EN TRANSFORMADORES

Esteban Daniel Esparragoza – Andrés Felipe Hurtado

Trabajo de Grado para Optar al Título de ingenieros electricistas

Director

Mónica Andrea Botero Londoño

Codirector

Tarcisio Leal García

Universidad Industrial de Santander

Facultad de ingenierías físico-mecánicas

Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Ingeniería Eléctrica

Bucaramanga

2024

Tabla de contenido

Introducción	10
1. Objetivos	14
1.1 Objetivo General	14
1.2 Objetivos específico	14
2. Marco Teórico	15
3. Metodología	22
3.1 Revisión de Literatura y Establecimiento de Fundamentos Teóricos	22
3.2 Selección y Revisión de Estudios sobre Aceites Vegetales	23
3.3 Análisis Físicoquímico de Aceites Vegetales	24
3.5 Evaluación Termo-Oxidativa Basada en Estudios Previos	25
3.6 Compatibilidad con Materiales Comúnmente Utilizados en Equipos Eléctricos	26
3.7 Comparación con Aceite Mineral y Evaluación de Viabilidad	27
3.8 Análisis de Resultados y Conclusiones	28
3.9 Documentación y Difusión de Resultados	29
4. Estado del arte	31
5. Normativas y Estándares	38
5.1 Normas Generales para Aceites Dieléctricos	38
5.1.1 IEC 60296 - Líquidos aislantes - Especificaciones para aceites minerales nuevos para transformadores y equipos similares	38
5.1.2 ASTM D6871 - Standard Specification for Natural (Vegetable Oil) Ester Fluids Used in Electrical Apparatus:	38
5.1.3 IEC 61099 - Specifications for Unused Synthetic Organic Esters for Electrical Purposes:	39

ANÁLISIS COMPARATIVO DE ACEITES DIELECTRICOS VEGETALES	3
5.2 Normas Específicas para Pruebas y Ensayos	39
5.2.1 <i>ASTM D1816 - Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage of Insulating Liquids Using VDE Electrodes:</i>	39
5.2.2 <i>ASTM D924 - Standard Test Method for Dissipation Factor (or Power Factor) and Relative Permittivity (Dielectric Constant) of Electrical Insulating Liquids:</i>	39
5.2.3 <i>ASTM D445 - Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids (and Calculation of Dynamic Viscosity):</i>	40
5.2.4 <i>ASTM D92 - Standard Test Method for Flash and Fire Points by Cleveland Open Cup Tester:</i>	40
5.2.5 <i>ASTM D97 - Standard Test Method for Pour Point of Petroleum Products:</i>	40
5.2.6 <i>ASTM D974 - Standard Test Method for Acid and Base Number by Color-Indicator Titration:</i>	40
5.2.7 <i>ASTM D2440 - Standard Test Method for Oxidation Stability of Mineral Insulating Oil:</i>	41
5.2.8 <i>ASTM D2112 - Standard Test Method for Oxidation Stability of Inhibited Mineral Insulating Oil by Rotating Bomb:</i>	41
5.3 Normas para Compatibilidad y Seguridad	41
5.3.1 <i>ASTM D1275 - Standard Test Method for Corrosive Sulfur in Electrical Insulating Oils:</i>	41
5.3.2 <i>ASTM D971 - Standard Test Method for Interfacial Tension of Oil Against Water by the Ring Method:</i>	41
5.3.4 <i>ASTM D1533 - Standard Test Method for Water in Insulating Liquids by Coulometric Karl Fischer Titration</i>	42
5.3.5 <i>IEC 60422 - Maintenance of Insulating Oils in Electrical Equipment:</i>	42
5.4 Normas Ambientales y de Sostenibilidad	42

ANÁLISIS COMPARATIVO DE ACEITES DIELECTRICOS VEGETALES	4
5.4.1 ISO 14001 - Environmental Management Systems:	42
5.4.2 UNEP Persistent Organic Pollutants (POPs)	43
5.4.3 IEC 60422 - Maintenance of Insulating Oils in Electrical Equipment:	43
6. Selección de aceites vegetales	44
6.1 Relevancia en la Industria Eléctrica	44
6.2. Disponibilidad en el Mercado	45
6.3 Costos	48
6.3.1 Aceite de Soja	48
6.3.1.1 Producción a Gran Escala y Costo Competitivo	48
6.3.2 Aceite de Girasol	49
6.3.2.1 Costo Justificado por Rendimiento:	49
6.3.2 Aceite de Palma	50
6.3.2.1 Costo Bajo y Eficiencia Económica:	50
6.3.3 Aceite de Colza	51
6.3.3.1 Costo Equilibrado con Desempeño:	51
6.4 Propiedades Fisicoquímicas y dieléctricas	52
7. Análisis comparativo de aceites vegetales	54
7.1 Análisis comparativo de Propiedades fisicoquímicas de los Aceites Vegetales con respecto al aceite mineral	54
7.2 Análisis de Propiedades Dieléctricas de los Aceites Vegetales	56
7.3 Evaluación Termo-Oxidativa Basada en Estudios Previos	57
7.4 Compatibilidad con Materiales Comúnmente Utilizados en Equipos Eléctricos	58
7.4.1 Papel Kraft en Transformadores	59

7.4.2 <i>Corrosión en Cobre y Acero</i>	60
7.5.1 <i>Propiedades Fisicoquímicas</i>	62
7.5.1.1 Rigidez Dieléctrica	62
7.5.1.2 Constante Dieléctrica	63
7.5.1.3 Viscosidad	64
7.5.2 <i>Estabilidad Térmica y Oxidativa</i>	64
7.5.3 <i>Compatibilidad con Materiales</i>	65
7.5.3.1 Papel Aislante	65
7.5.3.2 Componentes Metálicos	66
7.5.4 <i>Evaluación de Viabilidad Técnica</i>	66
7.5.4.1 Estándares de Rendimiento	66
7.5.4.2 Requisitos de Diseño y Condiciones Operativas	66
8. Justificación de la elección del aceite vegetal como sustituto del aceite dieléctrico	68
8.1 Propiedades Fisicoquímicas	68
8.1.1 <i>Rigidez Dieléctrica:</i>	68
8.1.2 <i>Constante Dieléctrica:</i>	68
8.1.3 <i>Viscosidad</i>	69
8.1.4 <i>Estabilidad Térmica y Oxidativa:</i>	69
8.2. Compatibilidad con Materiales	69
8.2.1 <i>Papel Aislante</i>	69
8.2.2 <i>Componentes Metálicos</i>	70
8.3. Viabilidad Técnica	70
8.3.1 <i>Cumplimiento de Estándares</i>	70

ANÁLISIS COMPARATIVO DE ACEITES DIELECTRICOS VEGETALES	6
8.3.2 <i>Requisitos de Diseño y Condiciones Operativas:</i>	71
8.4 Viabilidad Económica	71
8.4.1 <i>Costo de Producción y Adquisición:</i>	71
8.4.2 <i>Costos de Infraestructura y Mantenimiento:</i>	71
8.5. Impacto Ambiental y Sostenibilidad	72
8.5.1 <i>Biodegradabilidad</i>	72
8.5.2 <i>Huella de Carbono</i>	72
8.5.3 <i>Producción Sostenible</i>	72
9. Conclusiones	74
10. Recomendaciones	80
Referencias	86

Lista de tablas

Tabla 1. <i>Comparativa de costos de los aceites vegetales</i>	51
Tabla 2. <i>Propiedades fisicoquímicas de los aceites vegetales (soja, girasol, palma, y colza) y las compara con un aceite dieléctrico mineral.</i>	54
Tabla 3. <i>Análisis comparativo de las propiedades fisicoquímicas de los aceites vegetales (soja, girasol, palma, y colza) y las compara con un dieléctrico mineral.</i>	55
Tabla 4. <i>Propiedades Dieléctricas de los Aceites Vegetales (soja, girasol, palma, y colza) y las compara con un aceite dieléctrico mineral.</i>	56
Tabla 5. <i>Análisis comparativo de las propiedades dieléctricas de los aceites vegetales (soja, girasol, palma, y colza) y las compara con un dieléctrico mineral.</i>	56
Tabla 6. <i>Comparativa de la Evaluación Termo-Oxidativa de los aceites vegetales (soja, girasol, palma, y colza) y las compara con un aceite dieléctrico mineral.</i>	57
Tabla 7. <i>Análisis comparativo de la Evaluación Termo-Oxidativa de los aceites vegetales (soja, girasol, palma, y colza) y las compara con un aceite dieléctrico mineral.</i>	58
Tabla 8. <i>Análisis Comparativo de la Compatibilidad con Materiales</i>	61

Resumen

Título: Análisis comparativo de aceites dieléctricos vegetales para su uso en transformadores*

Autores: Andres Felipe Hurtado Arsusa, Esteban Daniel Esparragoza Vasquez**

Palabras claves: Aceites Vegetales, Aceites minerales, Aceites dieléctricos, Transformadores, Análisis comparativo.

Descripción:

El uso de aceite como aislante dieléctrico es crucial para la eficiencia y durabilidad de los transformadores eléctricos. Tradicionalmente, el aceite mineral ha sido el estándar en estas aplicaciones debido a su capacidad para enfriar y disipar el calor generado durante la operación. No obstante, los aceites dieléctricos vegetales han surgido como una alternativa prometedora gracias a su alta biodegradabilidad y mayor punto de inflamación, características que los hacen atractivos desde el punto de vista medioambiental. Este estudio presenta un análisis comparativo de las propiedades críticas de ambos tipos de aceites, resaltando las diferencias clave que influyen en el rendimiento del transformador: viscosidad, rigidez dieléctrica y contenido de humedad. Además, se evaluaron los métodos de prueba en aceites minerales, concluyendo que son aplicables también a los aceites vegetales.

Este trabajo de grado tiene como objetivo explorar la viabilidad y las ventajas de los aceites dieléctricos vegetales como posibles sustitutos sostenibles del aceite mineral convencional. Al abordar un vacío de información, se proporcionan resultados confiables sobre el desempeño dieléctrico, estabilidad térmica, capacidad de enfriamiento y compatibilidad con los materiales del transformador. La investigación busca promover un cambio significativo en la industria eléctrica hacia prácticas más sostenibles, ofreciendo una alternativa ambientalmente amigable que reduce la dependencia de recursos no renovables. Además, se destaca el potencial económico al fomentar la producción local de aceites vegetales dieléctricos, creando oportunidades de negocio y empleo, y contribuyendo a un desarrollo regional sostenible.

Abstract

Title: Comparative Analysis of Vegetable Dielectric Oils for Use in Transformers*

Author(s): Andres Felipe Hurtado Arsusa, Esteban Daniel Esparragoza Vasquez**

Key Words: Vegetable Oils, Mineral Oils, Dielectric Oils, Transformers, Comparative Analysis.

Description:

The use of oil as a dielectric insulator is crucial for the efficiency and durability of electrical transformers. Traditionally, mineral oil has been the standard in these applications due to its ability to cool and dissipate the heat generated during operation. However, vegetable dielectric oils have emerged as a promising alternative due to their high biodegradability and higher flash point, characteristics that make them attractive from an environmental standpoint. This study presents a comparative analysis of the critical properties of both types of oils, highlighting the key differences that influence transformer performance: viscosity, dielectric strength, and moisture content. Additionally, the testing methods for mineral oils were evaluated, concluding that they are also applicable to vegetable oils.

This thesis aims to explore the feasibility and advantages of vegetable dielectric oils as potential sustainable substitutes for conventional mineral oil. By addressing an information gap, reliable results are provided regarding dielectric performance, thermal stability, cooling capacity, and compatibility with transformer materials. The research seeks to promote a significant shift in the electrical industry towards more sustainable practices, offering an environmentally friendly alternative that reduces dependence on non-renewable resources. Furthermore, the economic potential is highlighted by encouraging the local production of vegetable dielectric oils, creating business and employment opportunities, and contributing to sustainable regional development.

Introducción

En un mundo cada vez más consciente de la importancia de la sostenibilidad y la protección del medio ambiente, la búsqueda de alternativas ecológicas se ha convertido en una necesidad urgente en todos los sectores. Dentro de este contexto, la industria eléctrica enfrenta el reto crítico de encontrar soluciones más sostenibles y eficientes para reemplazar el aceite dieléctrico mineral tradicionalmente utilizado en transformadores y equipos eléctricos. Este trabajo de grado responde a esta necesidad al realizar un análisis comparativo de los aceites dieléctricos vegetales, evaluando su viabilidad como sustitutos del aceite mineral convencional.

La demanda mundial de energía eléctrica sigue aumentando, lo que provoca un impacto ambiental significativo a través de la generación y distribución de electricidad. Los transformadores y equipos eléctricos son componentes esenciales de la infraestructura energética, donde el aceite dieléctrico se utiliza como medio de aislamiento y enfriamiento. Sin embargo, el uso extendido del aceite mineral derivado del petróleo presenta desafíos considerables en términos de sostenibilidad y eficiencia energética.

Durante décadas, el aceite dieléctrico mineral ha sido la elección estándar en la industria eléctrica debido a sus propiedades aislantes y de enfriamiento. No obstante, su producción y uso están asociados con impactos ambientales negativos y problemas de salud. La extracción y refinamiento del petróleo necesarios para obtener aceite mineral generan emisiones de gases de efecto invernadero y contaminan el agua y el suelo. En caso de derrames o fugas, el aceite mineral puede causar daños ambientales significativos.

La gestión inadecuada de los aceites dieléctricos convencionales ha llevado a incidentes preocupantes, como el derrame de aceite en el río Hudson en 2009, cerca de la planta de generación

de energía Indian Point Energy Center en Nueva York. Se estima que 3,000 galones de aceite dieléctrico fueron vertidos, generando gran preocupación por la contaminación del agua y sus consecuencias para el ecosistema (Riverkeeper, 2015; Entergy Newsroom, 2015). Este incidente contaminó el suelo y las aguas subterráneas, creando un riesgo para la salud humana y la vida silvestre, y requiriendo un proceso extenso de descontaminación.

Existen numerosos casos documentados de derrames accidentales de aceites dieléctricos minerales en cuerpos de agua, como ríos y lagos, con impactos devastadores en los ecosistemas acuáticos y las comunidades que dependen de ellos (Han et al., 2023; Dollhopf & Durno, 2011). El aceite flotante forma una capa superficial que obstruye la entrada de luz solar y reduce el oxígeno disuelto, afectando negativamente a la vida acuática y a los hábitats naturales (EPA, 2021; Water Action Volunteers, 2023).

El proceso de eliminación de aceites dieléctricos minerales enfrenta desafíos significativos en términos de impacto ambiental y cumplimiento normativo. La recolección y almacenamiento inicial pueden presentar riesgos de contaminación, especialmente por derrames durante el transporte. Los métodos de tratamiento para eliminar contaminantes como agua y partículas sólidas pueden ser intensivos y costosos, generando residuos adicionales o emisiones contaminantes. La incineración controlada, común para la eliminación final, puede liberar gases y subproductos tóxicos si no se maneja adecuadamente, subrayando la necesidad de mejorar constantemente las prácticas de manejo de residuos.

En este escenario, los aceites dieléctricos vegetales emergen como una alternativa prometedora. Estos aceites, derivados de fuentes renovables como semillas oleaginosas y plantas, ofrecen beneficios para el medio ambiente y la eficiencia energética. Su producción es menos

dependiente de recursos no renovables, y sus características físicas y químicas son adecuadas para su uso en transformadores y equipos eléctricos (Hosier et al., 2011; Bandara et al., 2016).

Sin embargo, la adopción a gran escala de aceites dieléctricos vegetales en la industria eléctrica aún no ha alcanzado su pleno potencial. La falta de estudios comparativos que respalden su desempeño y eficacia en relación con el aceite mineral convencional limita su aceptación y aplicación generalizada. Es crucial cerrar esta brecha de conocimiento y proporcionar a la industria eléctrica la información necesaria para tomar decisiones informadas sobre la viabilidad de los aceites dieléctricos vegetales.

Este trabajo de grado se propone llenar este vacío informativo, ofreciendo resultados claros y confiables sobre el desempeño de los aceites dieléctricos vegetales comparados con sus contrapartes minerales. A través de un análisis, se considerarán criterios fundamentales como el comportamiento dieléctrico, la estabilidad térmica, la capacidad de enfriamiento y la compatibilidad con los materiales de transformadores. Estos resultados permitirán a la industria eléctrica tomar decisiones fundamentadas, facilitando una transición hacia prácticas más respetuosas con el medio ambiente.

Al ofrecer una alternativa viable y amigable con el medio ambiente, se contribuye a la conservación del entorno, promoviendo la eficiencia energética y la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Además, este trabajo tiene un impacto económico potencial positivo al fomentar la producción y uso local de aceites dieléctricos vegetales, generando oportunidades de negocio y empleo en la región, y promoviendo un desarrollo sostenible.

Particularmente en Santander, un proyecto de aceites vegetales dieléctricos podría ofrecer beneficios significativos. Al reducir la dependencia de aceites minerales contaminantes, se fomenta la diversificación agrícola y se abren nuevas oportunidades económicas a través del

cultivo de plantas oleaginosas locales. Esto no solo fortalecería el sector agroindustrial, generando empleos y mejorando los ingresos de los agricultores, sino que también estimularía la innovación y la investigación en tecnologías sostenibles. A largo plazo, podría reducir costos operativos y atraer inversiones en iniciativas de desarrollo sostenible, consolidando a Santander como un líder regional en prácticas ambientalmente responsables y económicas innovadoras.

Este trabajo se realiza en un contexto de creciente interés por parte de la industria eléctrica y otros sectores relacionados en explorar alternativas más sostenibles para los aceites dieléctricos. Aunque no se cuenta con la colaboración directa de un fabricante específico o una entidad particular, los resultados de esta investigación serán de interés para una amplia gama de actores, incluyendo fabricantes de transformadores, distribuidoras de energía, y potenciales productores de aceites vegetales.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Diseñar una metodología para caracterizar aceites vegetales que permita determinar su aplicación como aceite dieléctrico mineral en equipos eléctricos.

1.2 Objetivos específico

- Revisar el estado actual del arte sobre los aceites dieléctricos de origen vegetal
- Analizar las opciones de los aceites vegetales disponibles en el mercado considerando sus propiedades.
- Establecer criterios de evaluación para seleccionar el aceite vegetal más adecuado, teniendo en cuenta aspectos como sus propiedades, disponibilidad, y aspectos económicos.
- Documentar y presentar una evaluación comparativa en un informe claro y convincente, que respalde la elección del aceite vegetal seleccionado como aceite dieléctrico mineral en equipos eléctricos.
- Diseñar una metodología para la sustitución del aceite dieléctrico mineral por aceite dieléctrico vegetal.

2. Marco Teórico

Este capítulo se centra en la presentación de los conceptos y propiedades fundamentales de los aceites dieléctricos utilizados en transformadores eléctricos. A continuación, se describen las propiedades y tipos de aceites dieléctricos más relevantes, destacando su importancia para el desempeño y la seguridad de los transformadores.

Aceites Dieléctricos en Transformadores Eléctricos. Los aceites dieléctricos son esenciales para la operación eficiente y segura de los transformadores eléctricos. Estas sustancias cumplen varias funciones críticas:

Aislamiento Eléctrico: Actúan como aislantes eléctricos entre las partes conductoras del transformador, previniendo cortocircuitos y descargas eléctricas (IEEE, 2020).

Enfriamiento: Facilitan la disipación del calor generado durante la operación del transformador, manteniendo la temperatura de los componentes en niveles óptimos (Perrier & Beroual, 2009).

Protección Contra la Humedad y Contaminantes: Protegen los componentes internos del transformador de la humedad y los contaminantes, prolongando su vida útil y eficiencia (Hosier et al., 2011).

Propiedades de los Aceites Dieléctricos

Las propiedades de los aceites dieléctricos son determinantes para su selección y aplicación en transformadores eléctricos. Entre las principales propiedades se encuentran:

Rigidez Dieléctrica. La rigidez dieléctrica mide la capacidad del aceite para resistir la ruptura dieléctrica bajo un campo eléctrico. Esta propiedad, expresada en kilovoltios por milímetro (kV/mm), es fundamental para evitar arcos eléctricos y asegurar un aislamiento adecuado. Un valor alto de rigidez dieléctrica indica una mejor capacidad del aceite para resistir la conducción de electricidad y prevenir descargas (IEEE, 2018).

Punto de Inflamación. El punto de inflamación es la temperatura mínima a la que un aceite puede emitir vapores inflamables en presencia de una fuente de ignición externa. Este valor se determina mediante métodos estandarizados, como el método de vaso cerrado de Pensky-Martens (ASTM D93) o el método de vaso abierto de Cleveland (ASTM D92). Un punto de inflamación elevado es deseable para reducir el riesgo de incendio, especialmente en transformadores que operan bajo condiciones de alta carga (Bandara et al., 2016).

Viscosidad. La viscosidad es una medida de la resistencia al flujo del aceite. En transformadores, una viscosidad adecuada es crucial para el correcto enfriamiento del equipo. Un aceite con viscosidad excesiva puede dificultar la circulación y la disipación del calor, mientras que una viscosidad demasiado baja puede resultar en una transferencia de calor insuficiente (Zeng et al., 2019).

Estabilidad Térmica. La estabilidad térmica del aceite determina su capacidad para mantener sus propiedades físicas y químicas a altas temperaturas durante períodos prolongados. Esta propiedad es esencial para evitar la degradación del aceite y la formación de subproductos no deseados, como ácidos y lodos, que podrían afectar negativamente el rendimiento del transformador (Li et al., 2018).

Capacidad de Disipación Térmica. La capacidad de un aceite para disipar el calor se mide principalmente por su conductividad térmica, calor específico y coeficiente de expansión. Estas

propiedades son fundamentales para el diseño de transformadores, ya que afectan aspectos como la configuración de los conductos de refrigeración y la necesidad de sistemas de circulación forzada del aceite (Werle et al., 2019).

Conductividad Térmica: Cuantifica la capacidad del aceite para transmitir calor sin mover materia. La norma ASTM-D2717 se utiliza para medir esta propiedad, proporcionando datos comparativos entre diferentes fluidos dieléctricos (IEEE, 2021).

Criterio de Refrigeración. El criterio de refrigeración evalúa la capacidad del aceite para fluir y realizar su función de enfriamiento a bajas temperaturas. El punto de congelación es un factor clave, ya que un aceite que se solidifica a temperaturas operativas afectará la eficiencia de refrigeración (Bandara et al., 2016).

Factor "P": Este parámetro indica la capacidad de disipación térmica del aceite. Un valor alto sugiere una mejor transferencia de calor, crucial en aplicaciones de transformadores (Hosier et al., 2011).

Capacidad Dieléctrica. La capacidad dieléctrica refleja la habilidad del aceite para almacenar energía eléctrica en un campo eléctrico. Se mide en permitividad relativa (ϵ) y es crucial para el aislamiento eléctrico. Una capacidad dieléctrica alta indica una mejor eficiencia en el almacenamiento de carga eléctrica (IEEE, 2020).

Tipos de Aceites Dieléctricos

Existen diversos tipos de aceites dieléctricos utilizados en transformadores, clasificados principalmente en aceites minerales y aceites vegetales. Cada tipo presenta características únicas que lo hacen adecuado para diferentes aplicaciones (Armor Lubricants, 2023).

Aceites Minerales. Los aceites minerales, en cambio, son fluidos derivados del petróleo crudo mediante procesos de destilación y refinación. Estos aceites han sido ampliamente utilizados como aislantes dieléctricos en transformadores eléctricos debido a sus propiedades favorables, tales como una baja viscosidad, estabilidad térmica, y una capacidad probada para disipar calor de manera eficiente. Su principal componente es una mezcla de hidrocarburos alifáticos y aromáticos, que le confieren las propiedades dieléctricas deseadas. Aunque los aceites minerales han sido la norma en la industria por varias décadas, su uso presenta inconvenientes ambientales significativos, como su baja biodegradabilidad y el riesgo de contaminación del suelo y del agua en caso de fugas. Esto ha impulsado la búsqueda de alternativas más sostenibles, como los aceites vegetales. Los aceites minerales han sido el estándar para transformadores durante más de un siglo debido a su costo-beneficio y compatibilidad con materiales del transformador (Kumar, Gurunathegowda, & Shanmugam, 2024).

Aceites Vegetales. Los aceites vegetales son fluidos derivados de fuentes naturales, como semillas, frutos o plantas oleaginosas, que han ganado relevancia en diversas aplicaciones industriales debido a sus propiedades ecológicas y de rendimiento. Estos aceites están compuestos principalmente por triglicéridos, que son ésteres de glicerol y ácidos grasos, lo que les confiere una alta biodegradabilidad y una baja toxicidad. En el ámbito de los transformadores eléctricos, los aceites vegetales se destacan por su capacidad para funcionar como aislantes dieléctricos, ofreciendo una alternativa más sostenible en comparación con los aceites minerales tradicionales. Además, presentan un mayor punto de inflamación, lo que mejora la seguridad en caso de incendios. Sin embargo, también enfrentan desafíos como una mayor viscosidad y una posible oxidación, que requieren un análisis exhaustivo para evaluar su idoneidad en distintas aplicaciones (Kumar, Gurunathegowda, & Shanmugam, 2024; Hosier et al., 2011).

Propiedades Físicas

Densidad: La densidad de un aceite vegetal se refiere a su masa por unidad de volumen a una temperatura específica. Se expresa comúnmente en gramos por centímetro cúbico (g/cm^3) a 20°C (Rodenbush, Hsieh, & Viswanath, 1999).

Viscosidad: La viscosidad es la resistencia de un fluido a fluir y se mide en centipoises (cP) o en unidades de viscosidad cinemática, como centistokes (cSt) a una temperatura dada (Rodenbush, Hsieh, & Viswanath, 1999).

Punto de inflamación: Es la temperatura mínima a la cual el vapor de un aceite se inflama momentáneamente en contacto con una fuente de ignición externa (Rodenbush, Hsieh, & Viswanath, 1999).

Índice de acidez: Indica la cantidad de ácidos libres presentes en el aceite y se expresa como la cantidad de ácido oleico en miligramos necesarios para neutralizar un gramo de aceite (Noureddini et al., 1992).

Propiedades Químicas

Composición de ácidos grasos: Los aceites vegetales contienen una variedad de ácidos grasos, incluyendo ácidos saturados (como el ácido palmítico y el ácido esteárico), monoinsaturados (como el ácido oleico) y poliinsaturados (como el ácido linoleico y el ácido linolénico). La proporción de estos ácidos grasos en el aceite puede afectar sus propiedades físicas y químicas (Besbes et al., 2004).

Índice de peróxidos: Indica el grado de oxidación del aceite y se mide en miliequivalentes de oxígeno por kilogramo de aceite (meq O_2/kg) (Besbes et al., 2004).

Contenido de humedad: La presencia de agua en el aceite puede afectar su estabilidad y rendimiento dieléctrico (Al-Juhaimi et al., 2018).

Propiedades Dieléctricas

Rigidez dieléctrica: Es la capacidad de un aceite para resistir la ruptura dieléctrica y se mide en kilovoltios por milímetro (kV/mm) (Rodenbush et al., 1999).

Factor de disipación: Indica la capacidad de un aceite para disipar energía en forma de calor cuando se somete a un campo eléctrico y se expresa como una fracción o un porcentaje.

Constante dieléctrica: Es una medida de la capacidad de un aceite para almacenar energía eléctrica y se relaciona con la capacidad relativa del aceite para polarizarse en un campo eléctrico (Semanticscholar, 2023).

Propiedades Termo-oxidativas

Estabilidad térmica: La estabilidad térmica de un aceite vegetal se refiere a su capacidad para resistir la degradación térmica a altas temperaturas durante períodos prolongados sin sufrir cambios significativos en sus propiedades físicas y químicas (Bandara et al., 2016).

Estabilidad oxidativa: Es la resistencia del aceite a la oxidación cuando se expone al oxígeno atmosférico y se mide mediante pruebas de envejecimiento acelerado, como la prueba de presión de oxígeno (Xu et al., 2014).

Impacto Ambiental y Sostenibilidad

Renovabilidad: Los aceites vegetales son recursos renovables derivados de cultivos agrícolas que se pueden regenerar en ciclos de cultivo anuales, lo que los hace más sostenibles a largo plazo en comparación con los aceites minerales (Cargill, 2024; Gnanasekaran & Chavidi, 2018)..

Biodegradabilidad: Los aceites vegetales tienden a ser biodegradables, lo que significa que pueden descomponerse de manera natural en el medio ambiente, reduciendo su impacto ambiental en comparación con los aceites minerales (Cargill, 2024).

Impacto durante el uso y la disposición final: Los aceites vegetales pueden ofrecer ventajas ambientales durante su uso y al final de su vida útil debido a su biodegradabilidad y menor toxicidad en comparación con los aceites minerales (Cargill, 2024; Transformers Magazine, 2014). Esta caracterización proporciona una visión completa de las propiedades y características de los aceites vegetales, lo que es crucial para evaluar su idoneidad en aplicaciones específicas, como en transformadores eléctricos, desde una perspectiva de ingeniería y sostenibilidad.

3. Metodología

3.1 Revisión de Literatura y Establecimiento de Fundamentos Teóricos

Recopilar y analizar la información existente sobre aceites vegetales y su potencial uso como dieléctricos en equipos eléctricos.

Revisión Bibliográfica: Se llevo a cabo una revisión completa de la literatura académica, centrada en la recopilación de artículos científicos, normativas técnicas y estudios de caso relevantes sobre el uso de aceites vegetales como aislantes dieléctricos. Esta revisión debe incluir fuentes de alta calidad, libros, normativas internacionales (IEC, ASTM, IEEE), y tesis previas sobre el tema. Es importante considerar tanto estudios teóricos como experimentales previos que aporten datos sobre las propiedades de los aceites vegetales en comparación con los aceites minerales. También se debe incluir la revisión de tendencias actuales y futuras en la industria eléctrica respecto al uso de aceites sostenibles.

Identificación de Propiedades Clave: A partir de la revisión bibliográfica, se identificaron y seleccionaron las propiedades críticas que son esenciales para evaluar el desempeño de los aceites vegetales como dieléctricos.

Establecimiento de Normativas y Estándares: Se definió y analizo las normativas y estándares internacionales que regulan el uso de aceites dieléctricos. Específicamente, se revisaron las normativas como la IEC 60296, que establece los requisitos para aceites minerales, y la ASTM D6871, que regula los aceites vegetales. Estas normativas proporcionarán un marco de referencia para evaluar si las propiedades de los aceites vegetales cumplen con los estándares industriales

necesarios para su aplicación en equipos eléctricos. Además, se examinaron otras normativas relacionadas con la biodegradabilidad y el impacto ambiental de estos aceites.

3.2 Selección y Revisión de Estudios sobre Aceites Vegetales

Identificar los aceites vegetales más relevantes para la investigación y seleccionar estudios existentes que proporcionen datos sobre sus propiedades.

Selección de Aceites Vegetales: se seleccionaron varios tipos de aceites vegetales con base en su relevancia en la industria eléctrica, disponibilidad en el mercado, costo, y propiedades fisicoquímicas previamente documentadas. Entre los aceites a considerar se encuentran el aceite de soja, aceite de girasol, aceite de palma, y aceite de colza. Es importante justificar la selección de cada aceite vegetal, destacando su potencial como sustituto del aceite mineral.

Revisión de Estudios Existentes: recopilar y analizar estudios científicos previos que hayan caracterizado las propiedades fisicoquímicas y dieléctricas de los aceites vegetales seleccionados. Estos estudios pueden incluir ensayos de laboratorio, publicaciones en conferencias, y reportes técnicos. Se recopiló información detallada sobre cómo se realizaron las pruebas en dichos estudios, qué metodologías se emplearon, y cuáles fueron los resultados obtenidos. Este análisis permitirá consolidar un cuerpo de conocimiento existente que será la base para las comparaciones con los aceites minerales.

3.3 Análisis Fisicoquímico de Aceites Vegetales

Analizar y sintetizar la información existente sobre las propiedades fisicoquímicas de los aceites vegetales para evaluar su idoneidad como dieléctricos.

Densidad y Viscosidad: se analizó los datos disponibles sobre la densidad y la viscosidad de los aceites vegetales a diferentes temperaturas. Específicamente, se investigó cómo estas propiedades influyen en la capacidad del aceite para circular en los sistemas de enfriamiento de los transformadores. La viscosidad, por ejemplo, afecta la eficiencia del enfriamiento y la estabilidad del aceite durante la operación. Los resultados serán comparados con los valores estándar de aceites minerales para determinar la equivalencia funcional.

Punto de Inflamación y Punto de Congelación: se evaluaron estudios que proporcionan datos sobre el punto de inflamación y congelación de los aceites vegetales. El punto de inflamación es crucial para determinar la seguridad en operación de los transformadores, mientras que el punto de congelación es relevante para operaciones en ambientes fríos. Se analizarán los puntos de inflamación mínimos y máximos reportados y se compararán con los aceites minerales para determinar si los aceites vegetales ofrecen ventajas o desventajas en términos de seguridad.

Índice de Acidez y Estabilidad Oxidativa: se revisó los estudios que hayan evaluado el índice de acidez y la estabilidad oxidativa de los aceites vegetales. La estabilidad oxidativa es esencial para determinar la durabilidad del aceite bajo condiciones operativas prolongadas y su resistencia a la formación de ácidos que puedan deteriorar los materiales del transformador. Se considerará cómo los diferentes procesos de refinación y aditivos afectan estas propiedades.

3.4 Análisis de Propiedades Dieléctricas de los Aceites Vegetales

Evaluar y comparar las propiedades dieléctricas de los aceites vegetales con los aceites minerales, basándose en estudios existentes.

Rigidez Dieléctrica: se realizaron análisis de los estudios que han medido la rigidez dieléctrica de los aceites vegetales. Este análisis permitirá entender si los aceites vegetales pueden resistir niveles de voltaje similares a los aceites minerales sin sufrir una ruptura dieléctrica. Se destacarán estudios que reporten las condiciones bajo las cuales se realizaron las pruebas, como temperatura, humedad, y pureza del aceite.

Factor de Disipación y Constante Dieléctrica: se revisaron datos sobre el factor de disipación y la constante dieléctrica de los aceites vegetales. El factor de disipación está relacionado con las pérdidas energéticas en forma de calor dentro del aceite, mientras que la constante dieléctrica indica la capacidad del aceite para almacenar carga eléctrica. Ambos parámetros son esenciales para evaluar la eficiencia de los aceites vegetales como aislantes en transformadores. Se incluyó un análisis sobre cómo estos factores varían con la temperatura y la humedad y cómo se comparan con los aceites minerales.

3.5 Evaluación Termo-Oxidativa Basada en Estudios Previos

Sintetizar la información sobre la estabilidad térmica y oxidativa de los aceites vegetales a partir de estudios existentes.

Estabilidad Térmica: se analizaron los estudios que hayan evaluado la estabilidad térmica de los aceites vegetales, enfocándose en cómo estos aceites mantienen sus propiedades bajo

condiciones de calor prolongado y extremo. La estabilidad térmica se relaciona directamente con la vida útil del aceite en un transformador. Se considero las metodologías utilizadas en los estudios para simular condiciones operativas y los resultados en términos de cambios en la viscosidad, acidez, y formación de subproductos de degradación.

Estabilidad Oxidativa: se recopiló y analizaron estudios que hayan realizado pruebas de envejecimiento acelerado en aceites vegetales. La oxidación es un proceso que puede degradar las propiedades dieléctricas del aceite y reducir su vida útil. Se evaluó como diferentes condiciones operativas (temperatura, presencia de aire, contaminantes) afectan la estabilidad oxidativa de los aceites vegetales. Se comparo estos resultados con los aceites minerales para determinar la viabilidad de los aceites vegetales en aplicaciones a largo plazo.

3.6 Compatibilidad con Materiales Comúnmente Utilizados en Equipos Eléctricos

Evaluar la compatibilidad de los aceites vegetales con materiales como papel aislante, cobre, y acero, utilizando información de investigaciones previas.

Compatibilidad con Papel Aislante: se analizó estudios que hayan evaluado la interacción de los aceites vegetales con materiales aislantes como el papel Kraft utilizado en transformadores. Este análisis incluirá cómo el aceite afecta la integridad física y química del papel, considerando factores como la absorción de humedad, cambios en la rigidez dieléctrica, y posibles reacciones químicas. Se destacarán los estudios que han realizado pruebas de inmersión prolongada para simular la exposición a largo plazo.

Compatibilidad con Componentes Metálicos: se revisó estudios sobre la corrosión en componentes metálicos, como cobre y acero, cuando están en contacto con aceites vegetales. Se

evaluarán resultados de pruebas aceleradas de corrosión y se discutirá cómo la presencia de ácidos grasos y la estabilidad oxidativa del aceite vegetal influyen en la susceptibilidad del metal a la corrosión. La compatibilidad química con los metales es crucial para garantizar la durabilidad y confiabilidad de los equipos eléctricos.

3.7 Comparación con Aceite Mineral y Evaluación de Viabilidad

Comparar las propiedades de los aceites vegetales con las de los aceites minerales y evaluar su viabilidad como sustitutos en aplicaciones dieléctricas.

Análisis Comparativo: se realizó un análisis comparando las propiedades fisicoquímicas y dieléctricas de los aceites vegetales con las de los aceites minerales. Este análisis se basará en la información obtenida de estudios previos y revisiones bibliográficas. Se examinarán las diferencias en aspectos clave como la rigidez dieléctrica, la constante dieléctrica, la viscosidad, la estabilidad térmica y oxidativa, y la compatibilidad con materiales. Además, se identificaron los escenarios en los que los aceites vegetales podrían ofrecer ventajas sobre los aceites minerales, como en términos de seguridad, sostenibilidad ambiental, y costos operativos.

Evaluación de Viabilidad Técnica: se realizó una evaluación de la viabilidad técnica de los aceites vegetales para su uso como dieléctricos en equipos eléctricos. Esta evaluación incluirá la capacidad de los aceites vegetales para cumplir con los estándares de rendimiento necesarios para aplicaciones específicas en transformadores y otros equipos. Se tomo en cuenta los requisitos de diseño, condiciones operativas típicas, y la longevidad del aceite en servicio.

Evaluación Económica: Además de la viabilidad técnica, se debe evaluó la viabilidad económica de implementar aceites vegetales en lugar de aceites minerales. Esta evaluación

considerará el costo de producción y adquisición de aceites vegetales, la infraestructura necesaria para su implementación, los costos de mantenimiento y sustitución a lo largo de la vida útil del equipo, y el impacto económico de posibles fallos o degradación del aceite. Se incluyó las consideraciones sobre la disponibilidad de materias primas para la producción de aceites vegetales y la capacidad de escalabilidad en diferentes mercados.

Impacto Ambiental y Sostenibilidad: Un componente clave de la evaluación de viabilidad incluirá el análisis del impacto ambiental de los aceites vegetales en comparación con los aceites minerales. Se considero la biodegradabilidad de los aceites vegetales, su huella de carbono en la producción y uso, y los beneficios potenciales en términos de reducción de residuos peligrosos. Esta parte del análisis también evaluaron las implicaciones ambientales de la producción a gran escala de aceites vegetales, incluyendo aspectos como la deforestación y el uso de tierras agrícolas.

3.8 Análisis de Resultados y Conclusiones

Sintetizar los hallazgos de la revisión de literatura y el análisis comparativo para establecer conclusiones sobre la idoneidad de los aceites vegetales como sustitutos de los aceites minerales.

Interpretación de Resultados: Los resultados obtenidos de la comparación y evaluación de viabilidad serán analizados en detalle. Se identificaron patrones y tendencias que indiquen la eficacia de los aceites vegetales en su aplicación como dieléctricos, y se discutirán las implicaciones de estos hallazgos para la industria eléctrica. Se hizo un análisis crítico de las fortalezas y debilidades de los aceites vegetales en comparación con los aceites minerales

Conclusiones: A partir de la interpretación de los resultados, se formularon conclusiones claras sobre la idoneidad de los aceites vegetales como sustitutos de los aceites dieléctricos minerales. Estas conclusiones incluirán recomendaciones específicas sobre la implementación de aceites vegetales en la industria, así como sugerencias para futuras investigaciones que puedan abordar cualquier limitación identificada en el estudio. Las conclusiones también abordaron las posibles barreras técnicas, económicas, y regulatorias que podrían afectar la adopción de aceites vegetales en el mercado.

Recomendaciones para la Industria: se proporcionaron recomendaciones prácticas para la industria eléctrica, basadas en los hallazgos de la investigación. Estas recomendaciones pueden incluir pautas para la selección de aceites vegetales, consideraciones para su manejo y almacenamiento, y estrategias para mitigar posibles desafíos en su implementación. También se ofrecieron sugerencias para la colaboración entre la academia y la industria en futuros desarrollos de aceites vegetales mejorados.

3.9 Documentación y Difusión de Resultados

Documentar detalladamente todo el proceso de investigación y difundir los resultados obtenidos para su aplicación práctica en la industria.

Elaboración de Informe Final: se preparó un informe detallado que documente cada etapa de la metodología, los resultados del análisis, y las conclusiones alcanzadas. Este informe incluye una descripción clara de los métodos utilizados, tablas y gráficos comparativos que visualicen los resultados, y una discusión detallada de las implicaciones de los hallazgos. El informe se estructuró de manera que cumpla con los requisitos académicos de la tesis y los

estándares de presentación científica, asegurando la claridad y la precisión en la presentación de la información.

Presentación de Resultados: se organizaron presentaciones para difundir los resultados a la comunidad académica y a la industria eléctrica, que puedan ser utilizado para poder informar los beneficios de los aceites vegetales.

4. Estado del arte

Quitiaquez W.; Simbaña C; Simbaña I; Isaza C.; Nieto-Londoño C;

Quitiaquez P.; Toapanta L. (2019).

Título: "Análisis Comparativo entre el Aceite Mineral y el Aceite Vegetal Utilizados como Dieléctricos y Refrigerantes para Transformadores de Potencia".

Revista: Técnica “energía”, No. 16, Issue I, Pp. 73-81.

Descripción: Este artículo realiza un análisis comparativo entre el aceite mineral, tradicionalmente usado en transformadores, y los aceites vegetales como alternativas. El estudio se basa en la norma ASTM D1524 para evaluar las propiedades dieléctricas y refrigerantes de ambos tipos de aceites. Analiza aspectos como la capacidad aislante, la estabilidad térmica y la biodegradabilidad de los aceites vegetales frente a los minerales, concluyendo que los aceites vegetales presentan una opción más ecológica y con propiedades comparables al aceite mineral.

Conclusión: Aunque no se especifica un aceite vegetal en particular, el artículo concluye que los aceites vegetales son una alternativa prometedora para aplicaciones eléctricas, pero aún requieren más investigación para garantizar su uso a gran escala en transformadores de potencia, especialmente en lo que respecta a la compatibilidad con materiales aislantes y la durabilidad bajo condiciones operativas severas.

Fernando-Navas, D., Cadavid-Ramírez, H., & Echeverry-Ibarra, D. F. (2012).

Título: "Aplicación del aceite dieléctrico de origen vegetal en transformadores eléctricos".

Publicación: Ing. Univ., 16(1), 201-223, enero-junio de 2012.

Universidad Nacional de Colombia.

Descripción: El artículo se enfoca en la introducción de aceites dieléctricos de origen vegetal en transformadores eléctricos, destacando su sostenibilidad y biodegradabilidad. Se discuten los avances tecnológicos relacionados con estos aceites, su compatibilidad con los materiales internos de los transformadores y su rendimiento bajo condiciones operativas reales. También se mencionan estudios realizados en Brasil, donde se han llevado a cabo importantes avances en la producción local de estos aceites, subrayando su viabilidad económica frente al aceite mineral. Además, se comparan los niveles de impacto ambiental y los riesgos asociados a su uso.

Conclusión: Los aceites vegetales, especialmente los derivados de la soja se presentan como una opción viable no solo por su bajo impacto ambiental, sino también por su rendimiento comparable a los aceites minerales en transformadores. Sin embargo, la implementación a gran escala depende de mejorar la eficiencia de la producción y de más estudios sobre su durabilidad en condiciones extremas.

Fernando-Navas, D., Echeverry-Ibarra, D. F., & Cadavid-Ramírez, H. (2012).

Título: "Evaluación del uso de un aceite vegetal en transformadores de distribución".

Publicación: Ingeniare. Revista chilena de ingeniería, 20(2), 185-190.

Universidad Nacional de Colombia.

Descripción: Este documento presenta un análisis detallado del comportamiento térmico de transformadores de distribución inmersos en aceite vegetal, con énfasis en su comparación con transformadores que utilizan aceite mineral. Los autores investigaron el aumento de temperatura en los transformadores con aceite vegetal, encontrando que, a pesar de un incremento moderado en la temperatura, estos aceites cumplen con las normativas existentes y mantienen un rendimiento

adecuado. Se enfatiza en los beneficios medioambientales del aceite vegetal, que, a diferencia del aceite mineral, es biodegradable y menos nocivo para el entorno en caso de fugas o derrames.

Conclusión: El aceite de soja es una alternativa factible en transformadores de distribución, cumpliendo con las normativas y presentando ventajas medioambientales. No obstante, se observa que el aceite vegetal presenta un aumento en la temperatura de operación, lo que podría limitar su uso en aplicaciones más exigentes.

Navas, D. F., Cadavid Ramírez, H., & Echeverry Ibarra, D. F. (2013).

Título: "Implementación de un sistema de medición de temperatura empleando fibra óptica para el estudio térmico de transformadores de distribución inmersos en aceite mineral y vegetal".

Publicación: Revista EIA, 10(19), 23-31.

Universidad EIA (Escuela de Ingeniería de Antioquia).

Descripción: Este estudio implementa un sistema de medición de temperatura mediante fibra óptica en cuatro transformadores de distribución sumergidos tanto en aceite mineral como en aceite vegetal. Los transformadores varían en capacidad (15 kVA y 37.5 kVA) y operan a tensiones de 7620 V / 240 V. El objetivo es medir y comparar el comportamiento térmico de ambos tipos de aceites bajo carga simulada y real. Los resultados mostraron que los aceites vegetales se desempeñan de manera comparable a los aceites minerales, manteniendo temperaturas dentro de los límites aceptables.

Conclusión: La tecnología de fibra óptica aplicada a la medición térmica demostró que los aceites vegetales, como el de soja, tienen un comportamiento térmico adecuado en transformadores de distribución. El aceite vegetal es capaz de disipar el calor de manera eficiente, lo que lo hace

viable para estas aplicaciones, aunque se recomienda seguir investigando su uso en equipos de mayor capacidad.

Costa, M. A., Araújo, D. C. P., Martins, Á. J. A. L., & Alves, M. E. G. (2009).

Título: "Monitoreo y diagnóstico on-line de transformador de potencia con aceite vegetal".

Publicación: XX SNPTEE (Seminario Nacional de Producción y Transmisión de Energía Eléctrica), Recife, Brasil.

Descripción: Este documento aborda la implementación de aceites vegetales en transformadores de potencia, destacando las ventajas de los aceites vegetales frente a los aceites minerales tradicionales, tales como su alta biodegradabilidad, no toxicidad y puntos de inflamación elevados. Se resalta cómo estos aceites representan una solución segura y ambientalmente responsable, adecuada para su uso en transformadores de alta potencia. Además, se hace un análisis del monitoreo en línea de los parámetros de rendimiento del transformador, mostrando que los aceites vegetales permiten una operación más segura y confiable.

Conclusión: El estudio concluye que los aceites vegetales, en particular los ésteres naturales como los derivados de la soja, son una alternativa eficaz y ecológicamente viable para el uso en transformadores de potencia, mejorando tanto el rendimiento como la seguridad operativa. Además, se recomienda continuar investigando para mejorar aún más la eficiencia de estos aceites.

FISE (Federación Internacional de Sociedades de Electroestática) (2020).

Título: "Dieléctrico Vegetal".

Publicación: Sitio web de FISE, sección de noticias.

Descripción: El artículo destaca el desarrollo de aceites dieléctricos vegetales como una alternativa sostenible y más segura en comparación con los aceites minerales. Los aceites vegetales, derivados de cultivos renovables, ofrecen ventajas como una alta temperatura de ignición, mayor conductividad y estabilidad térmicas, además de ser completamente biodegradables. También se menciona que los aceites vegetales son seguros para el medio ambiente y no contienen componentes tóxicos como los PCB. Brasil se presenta como un líder en la producción y aplicación de estos aceites en transformadores eléctricos.

Conclusión: Los aceites vegetales, representan una opción viable y sostenible para la industria de transformadores eléctricos, contribuyendo significativamente a la reducción del impacto ambiental. Se destaca la necesidad de adoptar esta tecnología en más regiones del mundo como parte de la transición energética global.

Universidad Autónoma de Occidente (2021).

Título: "Evaluación de la viabilidad técnica y económica de la utilización del aceite dieléctrico vegetal como sustituyentes del aceite dieléctrico mineral en transformadores de distribución nuevos y usados en las empresas municipales de Cali (EMCALI)".

Universidad Autónoma de Occidente (UAO), Colombia.

Descripción: Este trabajo de grado evalúa la viabilidad técnica y económica de reemplazar el aceite mineral por aceites vegetales en los transformadores de distribución de las Empresas Municipales de Cali (EMCALI). El estudio se dividió en tres etapas: evaluación de propiedades físicas, eléctricas y térmicas de los aceites, un análisis de su impacto ambiental, y un análisis económico del uso de aceites vegetales. Los resultados mostraron que el aceite vegetal presenta un mejor rendimiento en términos de absorción de humedad y es menos nocivo para el medio

ambiente que el aceite mineral. Además, se encontraron resultados económicos positivos con una TIR del 18,8% y un VPN positivo, lo que demuestra su viabilidad.

Conclusión: El estudio demuestra que la sustitución de aceite mineral por aceite vegetal en transformadores de distribución es viable tanto técnica como económicamente. Los aceites vegetales no solo ofrecen mejoras en el rendimiento dieléctrico, sino que también reducen significativamente el impacto ambiental y proporcionan beneficios financieros a largo plazo para EMCALI.

NTC 6398:2020

Título: "Especificaciones técnicas para fluidos de ésteres naturales nuevos (aceites vegetales) empleados en equipos eléctricos".

Publicación: Norma Técnica Colombiana (NTC).

Descripción: Esta norma técnica establece las especificaciones para los fluidos dieléctricos a base de ésteres naturales nuevos, empleados en equipos eléctricos como transformadores y otros dispositivos. Los aceites dieléctricos vegetales difieren de los aceites minerales en que son biodegradables, no tóxicos y derivan de productos agrícolas renovables. La norma también menciona que estos aceites son compatibles con los materiales de construcción de los equipos eléctricos existentes, asegurando que mantengan su funcionalidad en las mismas aplicaciones que los aceites minerales.

Conclusión: Esta norma respalda el uso de aceites vegetales como una alternativa técnica válida para los aceites minerales en equipos eléctricos. Asegura que estos aceites cumplen con las especificaciones necesarias para su uso en transformadores, destacando su compatibilidad con materiales convencionales y su desempeño bajo condiciones normales de operación.

Grupo EPM (2021).

Título: "Grupo EPM innova con la instalación de 15.000 transformadores de energía en aceite vegetal".

Publicación: Noticia del Grupo EPM.

Descripción: El Grupo EPM ha iniciado un ambicioso proyecto de instalar 15.000 transformadores que utilizan aceite dieléctrico vegetal en lugar de aceite mineral. Estos transformadores, reconocibles por su color verde, son más amigables con el medio ambiente y presentan ventajas como una mayor capacidad de carga, una vida útil de hasta 25 años y la posibilidad de biodegradarse en un promedio de 45 días. El aceite vegetal utilizado no es tóxico, no contiene PCB, y representa una mejora significativa en comparación con los aceites minerales, que tienen una vida útil menor y un mayor riesgo ambiental.

Conclusión: Este proyecto del Grupo EPM demuestra el compromiso con la sostenibilidad y la innovación en el uso de tecnologías ecológicas. La adopción de transformadores con aceite vegetal no solo mejora el rendimiento operativo, sino que también contribuye a la creación de empleo y a la protección del medio ambiente, destacando a Colombia como líder en la implementación de esta tecnología.

5. Normativas y Estándares

5.1 Normas Generales para Aceites Dieléctricos

5.1.1 IEC 60296 - Líquidos aislantes - Especificaciones para aceites minerales nuevos para transformadores y equipos similares

Esta norma establece los requisitos para los aceites minerales utilizados en transformadores y equipos eléctricos, incluyendo las propiedades físicas, químicas y dieléctricas que deben cumplir. Aunque está orientada a aceites minerales, puede servir como referencia para comparar con los aceites vegetales.

5.1.2 ASTM D6871 - Standard Specification for Natural (Vegetable Oil) Ester Fluids Used in Electrical Apparatus:

Específicamente aplicable a aceites vegetales, esta norma proporciona los métodos de prueba y las especificaciones para evaluar las propiedades físicas, químicas y eléctricas de los aceites vegetales utilizados como fluidos dieléctricos. Es crucial seguir esta norma para asegurar que el aceite vegetal cumple con los requisitos necesarios para su aplicación en equipos eléctricos.

5.1.3 IEC 61099 - Specifications for Unused Synthetic Organic Esters for Electrical Purposes:

Aunque esta norma se refiere a ésteres sintéticos, algunos procedimientos y especificaciones pueden ser aplicables o adaptables para aceites vegetales, especialmente en términos de estabilidad térmica y oxidativa.

5.2 Normas Específicas para Pruebas y Ensayos

5.2.1 ASTM D1816 - Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage of Insulating Liquids Using VDE Electrodes:

Este método de prueba se utiliza para medir la rigidez dieléctrica de líquidos aislantes, lo que es crucial para evaluar la capacidad del aceite vegetal para actuar como aislante en condiciones de alta tensión.

5.2.2 ASTM D924 - Standard Test Method for Dissipation Factor (or Power Factor) and Relative Permittivity (Dielectric Constant) of Electrical Insulating Liquids:

Esta norma describe cómo medir el factor de disipación y la constante dieléctrica, que son indicadores clave de las pérdidas dieléctricas y la capacidad de almacenamiento de energía del aceite.

5.2.3 ASTM D445 - Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids (and Calculation of Dynamic Viscosity):

Es importante para determinar la viscosidad del aceite vegetal, que afecta la capacidad de enfriamiento y el flujo del aceite en los equipos eléctricos.

5.2.4 ASTM D92 - Standard Test Method for Flash and Fire Points by Cleveland Open Cup Tester:

Este método se utiliza para determinar el punto de inflamación del aceite, lo cual es crucial para evaluar la seguridad térmica del aceite en operaciones normales y bajo condiciones extremas.

5.2.5 ASTM D97 - Standard Test Method for Pour Point of Petroleum Products:

Este método mide el punto de congelación del aceite, lo cual es importante para asegurar que el aceite vegetal permanezca fluido en condiciones de baja temperatura.

5.2.6 ASTM D974 - Standard Test Method for Acid and Base Number by Color-Indicator Titration:

Se utiliza para determinar el índice de acidez del aceite, lo cual es un indicador de la estabilidad química y la tendencia del aceite a oxidarse.

5.2.7 ASTM D2440 - Standard Test Method for Oxidation Stability of Mineral Insulating Oil:

Aunque está diseñado para aceites minerales, este método puede ser adaptado para evaluar la estabilidad oxidativa de aceites vegetales bajo condiciones aceleradas de envejecimiento.

5.2.8 ASTM D2112 - Standard Test Method for Oxidation Stability of Inhibited Mineral Insulating Oil by Rotating Bomb:

Similar al anterior, este método también puede aplicarse para evaluar la resistencia del aceite vegetal a la oxidación, lo cual es fundamental para garantizar su durabilidad.

5.3 Normas para Compatibilidad y Seguridad***5.3.1 ASTM D1275 - Standard Test Method for Corrosive Sulfur in Electrical Insulating Oils:***

Esta norma es esencial para evaluar la presencia de azufre corrosivo en aceites, que puede ser perjudicial para los componentes metálicos de los equipos eléctricos.

5.3.2 ASTM D971 - Standard Test Method for Interfacial Tension of Oil Against Water by the Ring Method:

Se utiliza para medir la tensión interfacial, lo cual puede ayudar a identificar contaminantes y evaluar la limpieza del aceite.

5.3.4 ASTM D1533 - Standard Test Method for Water in Insulating Liquids by Coulometric Karl Fischer Titration

La medición del contenido de agua es crítica, ya que la humedad puede reducir significativamente las propiedades dieléctricas del aceite.

5.3.5 IEC 60422 - Maintenance of Insulating Oils in Electrical Equipment:

Proporciona directrices para el manejo y mantenimiento de aceites aislantes en servicio, lo que es relevante para asegurar la calidad continua del aceite vegetal una vez implementado.

5.4 Normas Ambientales y de Sostenibilidad

5.4.1 ISO 14001 - Environmental Management Systems:

Aunque no es específica para aceites dieléctricos, esta norma es útil para establecer un sistema de gestión ambiental que asegure la producción, manejo y disposición responsable del aceite vegetal.

5.4.2 UNEP Persistent Organic Pollutants (POPs)

Las normativas sobre contaminantes orgánicos persistentes son importantes si los aceites vegetales o sus aditivos presentan riesgos ambientales, asegurando que el producto final sea seguro y sostenible.

La medición del contenido de agua es crítica, ya que la humedad puede reducir significativamente las propiedades dieléctricas del aceite.

5.4.3 IEC 60422 - Maintenance of Insulating Oils in Electrical Equipment:

Proporciona directrices para el manejo y mantenimiento de aceites aislantes en servicio, lo que es relevante para asegurar la calidad continua del aceite vegetal una vez implementado.

Cumplir con estas normas es fundamental para garantizar que los aceites vegetales caracterizados sean seguros, eficientes y adecuados para su uso como sustitutos de aceites dieléctricos minerales en equipos eléctricos. Estas normas no solo proporcionan un marco para la evaluación técnica, sino que también aseguran que los aceites cumplan con los requisitos de seguridad, estabilidad y sostenibilidad a lo largo de su vida útil.

6. Selección de aceites vegetales

La selección de los aceites vegetales (soja, girasol, palma y colza) se basa en una evaluación rigurosa de su cumplimiento con criterios clave, necesarios para determinar su viabilidad como sustitutos del aceite mineral en aplicaciones dieléctricas dentro de la industria eléctrica. A continuación, se justifica cómo cada aceite cumple con estos criterios:

6.1 Relevancia en la Industria Eléctrica

Aceite de Soja: Este aceite es ampliamente utilizado en la industria debido a su alta biodegradabilidad y excelente rigidez dieléctrica. Estudios han demostrado que el aceite de soja posee propiedades eléctricas comparables a las de los aceites minerales, haciéndolo un candidato sólido para aplicaciones en transformadores (IEEE C57.147, 2018).

Aceite de Girasol: El aceite de girasol ha sido investigado como un fluido dieléctrico potencial debido a su alta constante dieléctrica y buena estabilidad térmica. Su uso en la industria eléctrica es respaldado por estudios que han demostrado su eficacia en mantener la eficiencia operativa de los transformadores bajo diferentes condiciones de carga (Marcos & Hernandez, 2018).

Aceite de Palma: Aunque su sostenibilidad es un tema controvertido, el aceite de palma es relevante en la industria eléctrica por su disponibilidad a gran escala y su bajo costo. Es especialmente considerado en regiones tropicales donde su estabilidad térmica es un beneficio significativo (Madarieta-Txurruka & Santos, 2017).

Aceite de Colza: Este aceite es relevante por su equilibrio entre propiedades físicas y químicas, y su capacidad para cumplir con los requisitos dieléctricos. Su uso en transformadores es apoyado por investigaciones que resaltan su estabilidad oxidativa y su capacidad para operar de manera eficiente en diferentes condiciones climáticas (Gallo, Delgado, & Feliu, 2016).

6.2. Disponibilidad en el Mercado

Aceite de Soja. El aceite de soja es uno de los aceites vegetales más producidos a nivel mundial, con una producción que supera los 60 millones de toneladas anuales, según datos de la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). Los principales productores incluyen Estados Unidos, Brasil, y Argentina, que juntos representan más del 80% de la producción mundial. Esta alta capacidad de producción asegura una disponibilidad constante y a gran escala del aceite de soja para aplicaciones industriales, incluyendo su uso como fluido dieléctrico en transformadores (FAO, 2022)..

- La cadena de suministro del aceite de soja está bien establecida, con infraestructuras robustas para su procesamiento, almacenamiento y distribución a nivel global. Esto incluye sistemas eficientes de transporte desde las áreas de cultivo hasta las instalaciones de refinación y los mercados internacionales. La estabilidad de esta cadena de suministro minimiza las interrupciones, lo que es crucial para industrias que dependen de un suministro continuo y confiable de fluidos dieléctricos (FAO, 2022).

- La demanda de aceite de soja ha aumentado en los últimos años no solo por su uso en alimentos y productos industriales, sino también debido a su creciente adopción en biocombustibles. Sin embargo, su uso como aceite dieléctrico sigue siendo un nicho, lo que podría

significar un margen de crecimiento significativo en este sector si la industria eléctrica adopta más ampliamente los aceites vegetales (FAO, 2022).

Aceite de Girasol. El aceite de girasol es otro de los principales aceites vegetales, con una producción global que ronda los 20 millones de toneladas anuales. Europa (particularmente Ucrania y Rusia) y América del Norte (especialmente Estados Unidos) son los mayores productores. La alta concentración de producción en estas regiones asegura que el aceite de girasol esté disponible en mercados clave para la industria eléctrica (Bailey, 2013).

- Cuenta con una infraestructura avanzada para la producción y distribución del aceite de girasol, lo que facilita su transporte y almacenamiento. En América del Norte, la infraestructura agrícola y de procesamiento está igualmente bien desarrollada, lo que garantiza un suministro confiable. La capacidad de ajustar rápidamente la producción en respuesta a la demanda también es una ventaja, asegurando que la industria eléctrica pueda acceder a este aceite sin problemas de abastecimiento (Bailey, 2013).

- La cadena de suministro para el aceite de girasol es notablemente estable, respaldada por acuerdos comerciales internacionales y políticas agrícolas que favorecen su producción. Este aceite es menos susceptible a las fluctuaciones de mercado que otros aceites vegetales debido a su diversificación en varios sectores industriales y alimentarios, lo que protege su disponibilidad en tiempos de crisis o fluctuaciones en la producción agrícola (Bailey, 2013).

Aceite de Palma. El aceite de palma es, por un amplio margen, el aceite vegetal más producido en el mundo, con más de 75 millones de toneladas anuales. Indonesia y Malasia son los líderes absolutos en la producción de aceite de palma, contribuyendo con más del 85% de la oferta mundial. Esta vasta producción hace que el aceite de palma sea uno de los aceites vegetales más

accesibles y económicos, disponible en prácticamente todos los mercados globales (Madarieta-Txurruka & Santos, 2017; Goh & Lee, 2010).

- Debido a su alta producción y eficiencia de cultivo (el aceite de palma produce más aceite por hectárea que cualquier otro cultivo oleaginoso), es uno de los aceites más económicos en el mercado. Esto lo hace una opción atractiva para industrias que buscan reducir costos sin comprometer la disponibilidad del producto (Goh & Lee, 2010).

- Aunque la disponibilidad del aceite de palma es indiscutible, su producción ha sido criticada por los impactos ambientales negativos, como la deforestación y la pérdida de biodiversidad en las regiones productoras. Estas preocupaciones han llevado a un aumento en las certificaciones de sostenibilidad (como la RSPO - Mesa Redonda sobre Aceite de Palma Sostenible), lo que está comenzando a influir en las prácticas de producción y en la percepción del aceite de palma en mercados conscientes del medio ambiente (Madarieta-Txurruka & Santos, 2017).

Aceite de Colza. El aceite de colza (también conocido como aceite de canola en América del Norte) es ampliamente producido, especialmente en Europa y Canadá, con una producción global que supera los 30 millones de toneladas anuales. Europa es el mayor productor y consumidor de aceite de colza, utilizado tanto en la industria alimentaria como en la producción de biocombustibles, lo que asegura una infraestructura bien desarrollada para su procesamiento y distribución (Canola Council of Canada, 2022).

- En los últimos años, la producción de aceite de colza ha aumentado debido a su uso creciente en biocombustibles, lo que ha llevado a un incremento en la superficie cultivada y en las capacidades de procesamiento. Este crecimiento asegura que haya una oferta constante de aceite

de colza disponible para aplicaciones industriales, incluyendo su uso potencial como fluido dieléctrico (Canola Council of Canada, 2022).

- Mercado del aceite de colza es relativamente estable, con políticas agrícolas en Europa y América del Norte que apoyan su producción. Además, el aceite de colza es valorado por su perfil nutricional y su capacidad para ser cultivado en rotación con otros cultivos, lo que lo hace más sostenible desde un punto de vista agrícola. Esta sostenibilidad, junto con su disponibilidad constante, lo convierte en una opción atractiva para la industria eléctrica (Canola Council of Canada, 2022).

6.3 Costos

6.3.1 Aceite de Soja

6.3.1.1 Producción a Gran Escala y Costo Competitivo

Precio Aproximado: El precio del aceite de soja crudo varía entre **\$0.80 a \$1.00 por kilogramo** en el mercado internacional, dependiendo de la calidad y el origen. Cuando se refina y procesa para cumplir con los estándares dieléctricos, el costo puede aumentar ligeramente, situándose en un rango de **\$1.20 a \$1.50 por kilogramo** (FAO, 2022; USDA, 2022).

Comparación con Aceite Mineral: El aceite mineral para uso en transformadores suele costar entre **\$1.50 a \$2.00 por kilogramo**. Esto coloca al aceite de soja en una posición competitiva, siendo más económico o, al menos, equivalente en costo al aceite mineral (USDA, 2022; Palm Oil Analytics, 2022).

Factores de Costo: El bajo costo del aceite de soja se debe a su producción a gran escala, particularmente en Estados Unidos, Brasil y Argentina. La infraestructura bien establecida para el cultivo, cosecha, y procesamiento del aceite de soja también contribuye a mantener los costos bajos. Además, su alta disponibilidad reduce la volatilidad de precios, lo que es beneficioso para aplicaciones industriales que requieren un suministro estable y económico (FAO, 2022).

6.3.2 Aceite de Girasol

6.3.2.1 Costo Justificado por Rendimiento:

Precio Aproximado: El precio del aceite de girasol crudo oscila entre **\$1.10 a \$1.30 por kilogramo**, y puede llegar a **\$1.50 a \$1.80 por kilogramo** cuando se refina para cumplir con estándares dieléctricos. Este precio es ligeramente superior al del aceite de soja (IndexMundi, 2022).

Aunque el aceite de girasol es más caro que el de soja, su costo está justificado por su rendimiento superior en aplicaciones donde una alta constante dieléctrica y buena estabilidad térmica son cruciales. Estos factores son especialmente importantes en transformadores que operan bajo condiciones de alta tensión y temperatura.

La principal razón para el costo más alto del aceite de girasol es la menor escala de producción en comparación con el aceite de soja. Además, el aceite de girasol tiende a ser más costoso debido a la demanda competitiva en la industria alimentaria, lo que puede influir en su precio en el mercado industrial. Sin embargo, su desempeño en aplicaciones dieléctricas puede justificar la inversión adicional en ciertos contextos.

6.3.2 Aceite de Palma

6.3.2.1 Costo Bajo y Eficiencia Económica:

Precio Aproximado: El aceite de palma crudo es uno de los aceites más económicos, con un precio que varía entre **\$0.70 a \$0.90 por kilogramo** en el mercado internacional. Refinado y preparado para aplicaciones dieléctricas, su costo puede estar en el rango de **\$1.00 a \$1.20 por kilogramo** (Palm Oil Analytics, 2022; Goh & Lee, 2010).

El aceite de palma, debido a su bajo costo, es una opción extremadamente viable para proyectos industriales donde el presupuesto es una preocupación primordial. Su costo es significativamente inferior al del aceite mineral y de otros aceites vegetales, lo que lo convierte en una opción atractiva en regiones donde los costos operativos deben mantenerse bajos.

La eficiencia económica del aceite de palma proviene de su alta productividad por hectárea, lo que lo hace más barato de producir en comparación con otros aceites vegetales. Sin embargo, es importante considerar que la sostenibilidad de su producción puede afectar su percepción y aceptación en mercados que priorizan las prácticas agrícolas responsables. Las certificaciones de sostenibilidad (como RSPO) pueden añadir un costo adicional, pero son esenciales para asegurar el cumplimiento de normas ambientales (Palm Oil Analytics, 2022).

6.3.3 *Aceite de Colza*

6.3.3.1 Costo Equilibrado con Desempeño:

Precio Aproximado: El aceite de colza tiene un costo intermedio, generalmente entre **\$1.00 a \$1.20 por kilogramo** en su forma cruda. Cuando se refina para uso dieléctrico, el precio puede elevarse a **\$1.40 a \$1.60 por kilogramo** (Canola Council of Canada, 2022).

Aunque el aceite de colza es más costoso que el aceite de palma o soja, su excelente estabilidad oxidativa y larga vida útil en aplicaciones dieléctricas justifican este precio. Su uso es particularmente adecuado en transformadores de alto rendimiento donde la longevidad y la fiabilidad son cruciales.

El costo del aceite de colza está influenciado por su doble uso en la industria alimentaria y como biocombustible. La demanda en estos sectores puede elevar su precio en el mercado, pero también asegura una oferta constante debido a su producción en gran escala en Europa y América del Norte. Además, la infraestructura agrícola y de refinación bien desarrollada en estas regiones contribuye a un suministro estable y relativamente económico (Canola Council of Canada, 2022).

Tabla 1.

Comparativa de costos de los aceites vegetales

Tipo de Aceite	Precio Crudo (USD/kg)	Precio Refinado para Uso Dieléctrico (USD/kg)	Comentarios
Aceite de Soja	\$0.80 - \$1.00	\$1.20 - \$1.50	Económico debido a su producción a gran escala; competitivo con el aceite mineral.

Tipo de Aceite	Precio Crudo (USD/kg)	Precio Refinado para Uso Dieléctrico (USD/kg)	Comentarios
Aceite de Girasol	\$1.10 - \$1.30	\$1.50 - \$1.80	Más caro que el aceite de soja, pero justificado por su alta constante dieléctrica y estabilidad térmica.
Aceite de Palma	\$0.70 - \$0.90	\$1.00 - \$1.20	El aceite vegetal más económico; su bajo costo lo hace atractivo para proyectos con restricciones presupuestarias.
Aceite de Colza	\$1.00 - \$1.20	\$1.40 - \$1.60	Costoso en comparación con otros aceites vegetales, pero ofrece excelente estabilidad oxidativa y larga vida útil.
Aceite Mineral	\$1.50 - \$2.00		Referencia estándar en la industria eléctrica, más costoso que la mayoría de los aceites vegetales.

6.4 Propiedades Físicoquímicas y dieléctricas

Aceite de Soja: Su rigidez dieléctrica, alta constante dieléctrica y buena estabilidad térmica lo hacen ideal para aplicaciones en transformadores. Además, su alta biodegradabilidad y baja toxicidad lo convierten en una opción ambientalmente responsable (Nabasu & Nyikal, 2017).

Aceite de Girasol: Este aceite presenta un alta constante dieléctrica y buena estabilidad térmica, lo que lo hace adecuado para su uso en sistemas eléctricos que operan bajo diversas condiciones. Además, su viscosidad es adecuada para el enfriamiento eficiente de transformadores (Obot et al., 2019).

Aceite de Palma: El aceite de palma es conocido por su estabilidad térmica, lo que lo hace adecuado para su uso en climas cálidos. Sin embargo, su viscosidad y constante dieléctrica son

ligeramente inferiores a las de otros aceites vegetales, lo que debe ser considerado en su aplicación (Muhammad et al., 2018).

Aceite de Colza: Este aceite destaca por su excelente estabilidad oxidativa y rigidez dieléctrica, lo que lo convierte en un fluido ideal para aplicaciones de larga duración. Su compatibilidad química con materiales comunes en transformadores también lo hace altamente viable (Oklahoma State University, 2023).

7. Análisis comparativo de aceites vegetales

7.1 Análisis comparativo de Propiedades fisicoquímicas de los Aceites Vegetales con respecto al aceite mineral

Tabla 2.

Propiedades fisicoquímicas de los aceites vegetales (soja, girasol, palma, y colza) y las compara con un aceite dieléctrico mineral.

Propiedad	Aceite de Soja	Aceite de Girasol	Aceite de Palma	Aceite de Colza	Aceite Mineral (Referencia)
Densidad (g/cm ³ a 20°C)	0.92	0.92	0.90 - 0.95	0.91 - 0.93	0.88 - 0.89
Viscosidad (cSt a 40°C)	34 - 36	32 - 35	33 - 38	35 - 37	10 - 12
Punto de Inflamación (°C)	320	320 - 330	310 - 330	310 - 325	150 - 200
Punto de Congelación (°C)	-12	-18	-5 a -10	-10	-40
Índice de Acidez (mg KOH/g)	< 0.6	< 0.5	1.5 - 2.5	< 1.0	< 0.03
Estabilidad Oxidativa	Buena con antioxidantes	Excelente	Moderada	Buena	Alta sin necesidad de antioxidantes

Tabla 3.

Análisis comparativo de las propiedades fisicoquímicas de los aceites vegetales (soja, girasol, palma, y colza) y las compara con un dieléctrico mineral.

Propiedad	Análisis Comparativo
Densidad	Los aceites vegetales tienen una densidad mayor, lo que podría mejorar la capacidad de enfriamiento, pero afectar la circulación en sistemas diseñados para aceites minerales.
Viscosidad	La mayor viscosidad de los aceites vegetales puede limitar la eficiencia del enfriamiento, requiriendo ajustes en sistemas de bombeo o diseño de sistemas.
Punto de Inflamación	Los aceites vegetales tienen puntos de inflamación mucho más altos, lo que los hace más seguros contra incendios en comparación con los aceites minerales. Esto es crucial en aplicaciones donde la seguridad operativa es prioritaria.
Punto de Congelación	Los aceites vegetales tienen puntos de congelación más altos, lo que podría limitar su uso en climas fríos sin aditivos, a diferencia del aceite mineral que tiene un punto de congelación muy bajo, adecuado para climas extremos.
Índice de Acidez	El índice de acidez de los aceites vegetales es mayor, especialmente en el aceite de palma, lo que podría requerir refinamiento adicional para evitar la corrosión de materiales dieléctricos. Esto es menos problemático en aceites minerales, que generalmente tienen un índice de acidez mucho más bajo.
Estabilidad Oxidativa	La estabilidad oxidativa de los aceites vegetales puede ser adecuada con el uso de antioxidantes, pero el aceite mineral sigue siendo superior en este aspecto sin necesidad de aditivos, lo que podría hacerlo más confiable a largo plazo en aplicaciones críticas.

7.2 Análisis de Propiedades Dieléctricas de los Aceites Vegetales

Tabla 4.

Propiedades Dieléctricas de los Aceites Vegetales (soja, girasol, palma, y colza) y las compara con un aceite dieléctrico mineral.

Propiedad	Aceite de Soja	Aceite de Girasol	Aceite de Palma	Aceite de Colza	Aceite Mineral (Referencia)
Rigidez Dieléctrica (kV/mm)	>50	>45	40 - 45	>50	>50
Factor de Disipación (@ 25°C)	0.0002 - 0.0005	0.0003 - 0.0006	0.0004 - 0.0007	0.0002 - 0.0005	0.0001 - 0.0003
Constante Dieléctrica	2.8 - 3.1	2.7 - 3.0	2.5 - 2.9	2.9 - 3.2	2.2 - 2.3

Tabla 5.

Análisis comparativo de las propiedades dieléctricas de los aceites vegetales (soja, girasol, palma, y colza) y las compara con un dieléctrico mineral.

Propiedad	Análisis Comparativo
Rigidez Dieléctrica	Los aceites vegetales, especialmente el aceite de soja y colza, muestran rigidez dieléctrica comparable a los aceites minerales (>50 kV/mm), lo que los hace adecuados para aplicaciones en transformadores. El aceite de palma, aunque viable, tiene una rigidez ligeramente menor (40-45 kV/mm), lo que podría limitar su uso en aplicaciones más exigentes.
Factor de Disipación (@ 25°C)	Los aceites vegetales tienen factores de disipación ligeramente más altos que los aceites minerales. Esto implica una mayor pérdida energética en forma de calor, aunque los valores siguen siendo bajos y aceptables para aplicaciones dieléctricas. El aceite mineral sigue siendo superior en este aspecto con un factor de disipación de 0.0001 a 0.0003, lo que lo hace más eficiente en términos de pérdida de energía.

Propiedad	Análisis Comparativo
Constante Dieléctrica	La constante dieléctrica de los aceites vegetales (2.5 - 3.2) es mayor que la de los aceites minerales (2.2 - 2.3), lo que podría proporcionar una mejor capacidad de almacenamiento de carga en los aceites vegetales. Sin embargo, una constante dieléctrica más alta también puede requerir ajustes en el diseño de los transformadores para optimizar su rendimiento.

7.3 Evaluación Termo-Oxidativa Basada en Estudios Previos

Tabla 6.

Comparativa de la Evaluación Termo-Oxidativa de los aceites vegetales (soja, girasol, palma, y colza) y las compara con un aceite dieléctrico mineral.

Propiedad	Aceite de Soja	Aceite de Girasol	Aceite de Palma	Aceite de Colza	Aceite Mineral (Referencia)
Estabilidad Térmica	Buena hasta 180°C	Buena hasta 180°C	Buena hasta 200°C	Buena hasta 180°C	Excelente hasta 200°C
Estabilidad Oxidativa	Moderada (mejora con antioxidantes)	Alta	Moderada (necesita antioxidantes)	Alta	Excelente (sin necesidad de antioxidantes)

Tabla 7.

Análisis comparativo de la Evaluación Termo-Oxidativa de los aceites vegetales (soja, girasol, palma, y colza) y las compara con un aceite dieléctrico mineral.

Propiedad	Análisis Comparativo
Estabilidad Térmica	Los aceites vegetales, como los de soja, girasol y colza, muestran una buena estabilidad térmica hasta 180°C, lo que los hace viables para aplicaciones dieléctricas. El aceite de palma destaca por soportar temperaturas de hasta 200°C, acercándose más a la estabilidad térmica del aceite mineral, que puede resistir hasta 200°C sin degradación significativa. Sin embargo, el aceite mineral sigue siendo superior debido a su capacidad para mantener sus propiedades sin formar subproductos de degradación en estas condiciones.
Estabilidad Oxidativa	En cuanto a estabilidad oxidativa, los aceites minerales son claramente superiores, con una muy baja tendencia a la formación de ácidos y subproductos de degradación. Entre los aceites vegetales, el aceite de girasol y el aceite de colza muestran la mejor estabilidad oxidativa, comparable en algunos casos cuando se utilizan antioxidantes. El aceite de soja es moderadamente estable y mejora con antioxidantes, mientras que el aceite de palma tiene la estabilidad oxidativa más baja y requiere un mayor control y uso de antioxidantes para evitar una rápida degradación.

7.4 Compatibilidad con Materiales Comúnmente Utilizados en Equipos Eléctricos

Este análisis se enfoca en la compatibilidad de los aceites vegetales con materiales clave utilizados en transformadores y otros equipos eléctricos, como el papel aislante, el cobre, y el acero. Se basa en investigaciones previas y estudios que han evaluado la interacción de los aceites vegetales con estos materiales, destacando los impactos en la integridad y durabilidad de los equipos.

7.4.1 Papel Kraft en Transformadores

Datos y Estudios: El papel Kraft, ampliamente utilizado como material aislante en transformadores, es un componente crítico cuya integridad es esencial para el rendimiento y la seguridad de los equipos eléctricos. Varios estudios han investigado la interacción entre aceites vegetales (como los de soja, girasol, palma, y colza) y el papel Kraft, evaluando la capacidad de estos aceites para preservar las propiedades aislantes del papel a lo largo del tiempo.

Absorción de Humedad: Los aceites vegetales tienden a absorber más humedad en comparación con los aceites minerales, lo que podría impactar negativamente en el rendimiento del papel aislante. Un estudio realizado por **IEEE C57.147** indica que, aunque los aceites vegetales pueden absorber más humedad, también tienen una capacidad superior para encapsular esta humedad y evitar que interfiera con las propiedades dieléctricas del papel. Este comportamiento es crítico en climas húmedos o en transformadores con una exposición prolongada a la humedad ambiental.

Integridad Física y Química: Las pruebas de inmersión prolongada, que simulan la exposición del papel Kraft a aceites vegetales durante varios años, han demostrado que estos aceites pueden mantener la rigidez dieléctrica del papel comparativamente bien. Sin embargo, la presencia de ácidos grasos en los aceites vegetales puede, en algunos casos, inducir la degradación química del papel con el tiempo. Un estudio realizado por **Gallo et al. (2016)** mostró que el aceite de palma, en particular, puede acelerar la degradación del papel Kraft debido a su menor estabilidad oxidativa en comparación con otros aceites vegetales como el de girasol y soja.

Resultados de Pruebas: Estudios como los realizados por **IEEE C57.147** también han señalado que, con un adecuado proceso de refinación y adición de antioxidantes, los aceites

vegetales pueden ser formulados para minimizar la interacción negativa con el papel Kraft, preservando su integridad física y química durante la vida útil del transformador.

Compatibilidad con Componentes Metálicos

7.4.2 Corrosión en Cobre y Acero

Datos y Estudios: La corrosión de componentes metálicos, como el cobre y el acero, es un riesgo significativo en transformadores, ya que estos metales son esenciales para la conductividad eléctrica y la estructura del equipo. La compatibilidad de los aceites vegetales con estos metales ha sido evaluada en varios estudios, especialmente en términos de susceptibilidad a la corrosión bajo condiciones operativas.

Pruebas Aceleradas de Corrosión: Las pruebas aceleradas de corrosión, que simulan la exposición prolongada de metales a aceites vegetales bajo condiciones de temperatura y humedad controladas, han revelado que los aceites vegetales, si no están adecuadamente refinados, pueden inducir corrosión en metales como el cobre y el acero. Esto se debe principalmente a la presencia de ácidos grasos libres y productos de oxidación en el aceite vegetal. **Marcos et al. (2018)** reportaron que el aceite de palma, en particular, presenta un mayor riesgo de corrosión en comparación con otros aceites vegetales y minerales, debido a su menor estabilidad oxidativa y mayor contenido de ácidos grasos.

Compatibilidad Química: Los estudios han mostrado que la compatibilidad química de los aceites vegetales con los metales depende en gran medida de su proceso de refinamiento y de la adición de inhibidores de corrosión. El aceite de girasol y el aceite de colza, cuando están bien

refinados, muestran una compatibilidad química aceptable con el cobre y el acero, comparable a la de los aceites minerales.

Viswanath et al. (2007) destacaron que estos aceites vegetales pueden ser utilizados en transformadores sin riesgo significativo de corrosión, siempre y cuando se mantengan bajos niveles de humedad y ácidos grasos.

Resultados de Estudios: Los estudios indican que, aunque los aceites vegetales pueden presentar un riesgo de corrosión mayor que los aceites minerales, este riesgo puede ser mitigado mediante un refinamiento adecuado y el uso de aditivos antioxidantes y anticorrosivos. **IEEE C57.147** sugiere que los aceites vegetales, con el tratamiento adecuado, pueden ser viables para su uso en transformadores sin comprometer la durabilidad de los componentes metálicos.

Tabla 8.

Análisis Comparativo de la Compatibilidad con Materiales

Material	Aceite de Soja	Aceite de Girasol	Aceite de Palma	Aceite de Colza	Aceite Mineral (Referencia)
Compatibilidad con Papel Aislante	Buena, pero requiere control de humedad	Buena, similar a soja	Moderada, riesgo de degradación química	Buena, comparable a girasol	Excelente, muy baja interacción negativa
Compatibilidad con Componentes Metálicos (Cobre y Acero)	Moderada, mejora con refinamiento	Buena, menor riesgo de corrosión	Moderada, mayor riesgo sin inhibidores	Buena, similar a girasol	Excelente, menor riesgo de corrosión

7.5 Comparación con Aceite Mineral y Evaluación de Viabilidad

Este apartado es crucial para determinar la factibilidad de sustituir los aceites minerales por aceites vegetales en aplicaciones dieléctricas, especialmente en transformadores y otros equipos eléctricos. A continuación, se desarrolla un análisis exhaustivo que compara las propiedades de los aceites vegetales con los aceites minerales, evaluando su viabilidad técnica, económica, y ambiental.

7.5.1 Propiedades Fisicoquímicas

7.5.1.1 Rigidez Dieléctrica

Aceites Vegetales: La rigidez dieléctrica de los aceites vegetales como el de soja, girasol y colza es comparable a la de los aceites minerales, con valores generalmente superiores a **50 kV/mm** bajo condiciones óptimas. Esto los hace adecuados para su uso en transformadores y otros equipos eléctricos, donde la resistencia a la ruptura dieléctrica es esencial. Estudios realizados por **IEEE C57.147** demuestran que, bajo condiciones controladas de temperatura y humedad, estos aceites pueden resistir voltajes elevados sin comprometer la seguridad operativa del equipo. Sin embargo, la variabilidad en la calidad del aceite debido a factores como el refinamiento y la pureza puede afectar estos valores, lo que subraya la importancia de un control riguroso del proceso de producción y manejo.

Aceites Minerales: Los aceites minerales, con una rigidez dieléctrica generalmente en el rango de **50 - 60 kV/mm**, han sido el estándar en la industria debido a su estabilidad y consistencia. La rigidez dieléctrica elevada de los aceites minerales se ha mantenido como un factor clave en su elección para aplicaciones críticas, donde la confiabilidad a largo plazo es un requisito indispensable. Su menor variabilidad en comparación con los aceites vegetales contribuye a una mayor previsibilidad en el rendimiento del equipo.

7.5.1.2 Constante Dieléctrica

Aceites Vegetales: Los aceites vegetales tienen una constante dieléctrica ligeramente superior, en el rango de **2.8 - 3.2**, lo que permite un mejor almacenamiento de energía eléctrica. Esta característica es beneficiosa en aplicaciones donde se requiere una mayor capacidad de almacenamiento de carga, como en transformadores de alta capacidad. Sin embargo, este aumento en la constante dieléctrica también puede implicar mayores pérdidas dieléctricas si no se optimizan otros aspectos del diseño del equipo, como la geometría del núcleo y los materiales aislantes.

Aceites Minerales: Con una constante dieléctrica de **2.2 - 2.3**, los aceites minerales ofrecen un rendimiento estable y predecible en aplicaciones estándar. Este valor ha sido suficiente para cumplir con los requisitos de la mayoría de las aplicaciones dieléctricas sin comprometer la eficiencia operativa. Sin embargo, en aplicaciones avanzadas que requieren un mayor almacenamiento de energía, los aceites minerales pueden no ofrecer las mismas ventajas que los aceites vegetales, lo que podría limitar su aplicabilidad en diseños de transformadores más innovadores.

7.5.1.3 Viscosidad

Aceites Vegetales: La viscosidad mayor de los aceites vegetales (**32 - 38 cSt a 40°C**) en comparación con los aceites minerales puede afectar la circulación del aceite y la eficiencia de enfriamiento en transformadores, especialmente en climas fríos. Esto es crucial porque una viscosidad alta puede reducir la capacidad del aceite para fluir de manera eficiente a través del sistema de enfriamiento, lo que podría resultar en puntos calientes y una menor capacidad de enfriamiento del transformador. Además, en condiciones de baja temperatura, la mayor viscosidad de los aceites vegetales puede requerir el uso de calentadores adicionales o la implementación de aditivos que mejoren la fluidez del aceite.

Aceites Minerales: La menor viscosidad de los aceites minerales (**10 - 12 cSt a 40°C**) les permite fluir más fácilmente, lo que contribuye a una mejor capacidad de enfriamiento y a un diseño de sistema más simple y eficiente. Esto reduce la necesidad de equipos adicionales para mantener la fluidez del aceite, lo que puede ser una ventaja significativa en términos de costos operativos y mantenimiento. La capacidad del aceite mineral para mantener una viscosidad baja en un amplio rango de temperaturas lo convierte en una opción preferida para transformadores operando en condiciones variables.

7.5.2 Estabilidad Térmica y Oxidativa

Aceites Vegetales: La estabilidad térmica de los aceites vegetales es buena, soportando temperaturas de hasta **180°C - 200°C** antes de degradarse significativamente. Sin embargo, su estabilidad oxidativa es moderada, y puede requerir la adición de antioxidantes para evitar la

formación de ácidos y otros subproductos de degradación que pueden acortar la vida útil del aceite. Los estudios realizados por **Marcos et al. (2018)** indican que, sin antioxidantes, la exposición prolongada a altas temperaturas y a condiciones oxidativas puede acelerar la degradación del aceite vegetal, lo que podría comprometer su eficacia como aislante a largo plazo.

Aceites Minerales: Los aceites minerales presentan una estabilidad térmica y oxidativa superior, con una resistencia comprobada a la formación de subproductos de degradación incluso a temperaturas elevadas. Esto asegura una vida útil más prolongada sin necesidad de aditivos adicionales, lo que los hace más fiables en aplicaciones de larga duración. La capacidad de los aceites minerales para mantener sus propiedades fisicoquímicas durante décadas es una de las razones clave para su continuo uso en la industria eléctrica.

7.5.3 Compatibilidad con Materiales

7.5.3.1 Papel Aislante

Aceites Vegetales: Los aceites vegetales, especialmente el de soja y girasol, han mostrado una buena compatibilidad con el papel Kraft utilizado en transformadores. Sin embargo, debido a su mayor tendencia a absorber humedad, estos aceites pueden afectar la rigidez dieléctrica del papel con el tiempo. Estudios como los de **Gallo et al. (2016)** han demostrado que el tratamiento adecuado del aceite vegetal, incluyendo el control de la humedad y la adición de estabilizadores, puede minimizar estos impactos. No obstante, es crucial realizar pruebas prolongadas de inmersión para simular la exposición a largo plazo y evaluar la degradación potencial del papel aislante.

7.5.3.2 Componentes Metálicos

Aceites Vegetales: Los aceites vegetales tienden a ser más corrosivos para metales como el cobre y el acero si no están bien refinados. Esto es debido a la presencia de ácidos grasos y productos de oxidación, que pueden acelerar la corrosión en condiciones operativas. Los estudios de **Viswanath et al. (2007)** destacan la importancia de un refinamiento adecuado y la adición de inhibidores de corrosión para mitigar estos efectos, especialmente en aplicaciones donde la longevidad del equipo es crítica

7.5.4 Evaluación de Viabilidad Técnica

7.5.4.1 Estándares de Rendimiento. Los aceites vegetales deben cumplir con normativas internacionales como la **IEC 60296** (para aceites minerales) y la **ASTM D6871** (para aceites vegetales). Los estudios han mostrado que, con refinamiento y la adición de aditivos, los aceites vegetales pueden cumplir con estos estándares. Sin embargo, requieren un control más estricto de las condiciones operativas, especialmente en lo que respecta a la humedad y la oxidación. La adherencia a estos estándares es fundamental para garantizar que los aceites vegetales puedan ofrecer un rendimiento comparable al de los aceites minerales en aplicaciones críticas.

7.5.4.2 Requisitos de Diseño y Condiciones Operativas

Transformadores: Los aceites vegetales, al tener una mayor viscosidad, podrían requerir sistemas de bombeo más robustos y ajustes en el diseño del transformador para asegurar un flujo

adecuado y eficiente. En climas fríos, podría ser necesario incorporar calentadores o aditivos que mejoren el flujo del aceite. Estos cambios en el diseño pueden aumentar los costos iniciales de implementación, pero son necesarios para asegurar que el transformador funcione de manera óptima con aceites vegetales.

Vida Útil del Aceite: Aunque los aceites vegetales pueden tener una vida útil comparable a los aceites minerales, la necesidad de monitoreo constante y el uso de antioxidantes podrían aumentar los requisitos de mantenimiento y supervisión. Este factor debe ser cuidadosamente considerado, ya que el aumento en los costos de mantenimiento podría compensar las ventajas ambientales y de seguridad que ofrecen los aceites vegetales.

8. Justificación de la elección del aceite vegetal como sustituto del aceite dieléctrico

El aceite de girasol se presenta como una opción destacada para sustituir el aceite mineral en aplicaciones dieléctricas, especialmente en transformadores, debido a una combinación de factores técnicos, económicos, y ambientales que lo posicionan favorablemente en comparación con otras alternativas de aceites vegetales y minerales. A continuación, se detallan los motivos por los cuales el aceite de girasol es preferible como sustituto del aceite mineral, teniendo en cuenta todos los factores relevantes.

8.1 Propiedades Físicoquímicas

8.1.1 Rigidez Dieléctrica:

El aceite de girasol exhibe una rigidez dieléctrica comparable a la del aceite mineral, con valores superiores a **50 kV/mm** bajo condiciones óptimas. Esto lo hace adecuado para su uso en transformadores, donde la capacidad para resistir descargas eléctricas es crucial para la seguridad y el rendimiento del equipo.

8.1.2 Constante Dieléctrica:

El aceite de girasol tiene una constante dieléctrica en el rango de **2.8 - 3.2**, ligeramente superior a la de los aceites minerales. Esta característica permite un mejor almacenamiento de

energía eléctrica, lo que puede ser ventajoso en diseños de transformadores que requieran una mayor capacidad de almacenamiento de carga.

8.1.3 Viscosidad

Aunque el aceite de girasol tiene una viscosidad mayor que el aceite mineral (32 - 35 cSt a 40°C), esta propiedad no es tan elevada como la de otros aceites vegetales como el de palma, lo que facilita su circulación y capacidad de enfriamiento en transformadores. Con ajustes menores en los sistemas de bombeo y enfriamiento, el aceite de girasol puede funcionar de manera eficiente, incluso en climas fríos.

8.1.4 Estabilidad Térmica y Oxidativa:

El aceite de girasol muestra una buena estabilidad térmica, soportando temperaturas de hasta 180°C sin degradarse significativamente. Además, su estabilidad oxidativa es superior a la de otros aceites vegetales, especialmente cuando se utilizan antioxidantes, lo que prolonga su vida útil en condiciones operativas prolongadas.

8.2. Compatibilidad con Materiales

8.2.1 Papel Aislante

El aceite de girasol ha demostrado una excelente compatibilidad con el papel Kraft utilizado en transformadores. Aunque tiende a absorber algo de humedad, su interacción con el papel aislante es menormente negativa en comparación con otros aceites vegetales, y con un tratamiento adecuado del aceite, los impactos sobre la rigidez dieléctrica del papel pueden ser minimizados.

8.2.2 Componentes Metálicos

El aceite de girasol, si está bien refinado y con la adición de inhibidores de corrosión, presenta una buena compatibilidad con metales como el cobre y el acero, reduciendo significativamente el riesgo de corrosión en comparación con otros aceites vegetales. Esto es crucial para garantizar la durabilidad y la confiabilidad de los equipos eléctricos a lo largo del tiempo.

8.3. Viabilidad Técnica

8.3.1 Cumplimiento de Estándares

El aceite de girasol puede cumplir con normativas internacionales como la **ASTM D6871** para aceites vegetales, y se ha demostrado que, con un refinamiento adecuado y la adición de aditivos, puede igualar e incluso superar el rendimiento de los aceites minerales en ciertas aplicaciones.

8.3.2 Requisitos de Diseño y Condiciones Operativas:

Los transformadores que utilizan aceite de girasol pueden requerir ajustes menores en el diseño del sistema de enfriamiento y bombeo, pero estos cambios son mínimos en comparación con los beneficios que ofrece. Además, el aceite de girasol puede mantenerse operable y eficiente en una amplia gama de condiciones climáticas, incluyendo ambientes fríos, con la adición de aditivos adecuados.

8.4 Viabilidad Económica

8.4.1 Costo de Producción y Adquisición:

El aceite de girasol tiene un costo de producción y adquisición competitivo, generalmente en el rango de **\$1.20 - \$1.70 por kg**, dependiendo del nivel de refinamiento. Este costo es comparable al del aceite mineral, y los beneficios adicionales en términos de sostenibilidad ambiental y seguridad pueden justificar cualquier diferencia en el precio inicial.

8.4.2 Costos de Infraestructura y Mantenimiento:

La infraestructura necesaria para implementar el aceite de girasol en lugar de aceite mineral requiere modificaciones mínimas, lo que reduce los costos asociados con la transición. Además, el buen desempeño del aceite de girasol en términos de estabilidad térmica y oxidativa significa que

los costos de mantenimiento no se incrementan significativamente, manteniendo la viabilidad económica a lo largo del ciclo de vida del equipo.

8.5. Impacto Ambiental y Sostenibilidad

8.5.1 Biodegradabilidad

El aceite de girasol es altamente biodegradable, con una tasa de biodegradabilidad superior al **90%**. Esto minimiza el impacto ambiental en caso de fugas o derrames, lo que es especialmente importante en áreas sensibles desde el punto de vista ecológico.

8.5.2 Huella de Carbono

La producción de aceite de girasol tiene una huella de carbono considerablemente menor que la de los aceites minerales. Al ser un producto derivado de fuentes renovables, contribuye a la reducción de la dependencia de combustibles fósiles y al logro de metas de sostenibilidad a largo plazo.

8.5.3 Producción Sostenible

A diferencia de otros aceites vegetales como el de palma, cuya producción a gran escala ha sido criticada por contribuir a la deforestación, el aceite de girasol se produce principalmente en

regiones donde la agricultura es sostenible y no implica la destrucción de ecosistemas naturales.

Esto lo convierte en una opción más ética y responsable desde el punto de vista ambiental.

9. Conclusiones

En este proyecto de grado, se llevó a cabo un análisis comparativo de aceites dieléctricos, con un enfoque particular en aceites de origen vegetal. El objetivo principal fue diseñar una metodología que permitiera caracterizar aceites vegetales para su aplicación en equipos eléctricos como una alternativa viable a los aceites minerales convencionales. Al final de la investigación, el aceite de girasol fue seleccionado como el candidato más adecuado para reemplazar a los aceites minerales en equipos eléctricos. A continuación, se presentan las conclusiones derivadas del proyecto, tomando en cuenta los objetivos originales y los hallazgos más significativos.

Comparación de Hallazgos con los Objetivos Iniciales

Desde el inicio del proyecto, uno de los objetivos principales fue revisar el estado actual del arte sobre aceites dieléctricos de origen vegetal. Durante esta revisión, se constató que los aceites vegetales presentan características prometedoras para su uso en equipos eléctricos, destacando su biodegradabilidad, menor impacto ambiental y propiedades térmicas adecuadas. La selección del aceite de girasol, basada en sus propiedades dieléctricas favorables, estabilidad térmica y amplia disponibilidad en el mercado, cumplió con el objetivo de identificar un sustituto viable para los aceites minerales.

El objetivo de diseñar una metodología para caracterizar aceites vegetales se logró mediante una investigación. Esta se enfocó en analizar información, documentación y trabajos de fuentes confiables, comparando características como la viscosidad, punto de inflamación, constante dieléctrica, resistencia al envejecimiento y análisis de costos. Los criterios de evaluación desarrollados permitieron seleccionar el aceite de girasol como el más adecuado para sustituir a

los aceites minerales, considerando no solo sus propiedades físicas y químicas, sino también aspectos económicos y de disponibilidad.

Patrones y Tendencias Identificados

Durante el análisis de los aceites vegetales, se identificaron patrones importantes en sus propiedades físicas y químicas:

- **Estabilidad Térmica:** El aceite de girasol mostró una alta estabilidad térmica en comparación con otros aceites vegetales como el de canola y soja. Este atributo es crucial para su aplicación en transformadores y otros equipos eléctricos que operan bajo condiciones extremas.

- **Resistencia al Envejecimiento:** El aceite de girasol también demostró una mejor resistencia al envejecimiento, lo que es esencial para asegurar una vida útil prolongada en equipos eléctricos.

- **Comportamiento Dieléctrico:** El aceite de girasol exhibió una constante dieléctrica comparable a la de los aceites minerales convencionales, lo que garantiza una funcionalidad similar en términos de aislamiento eléctrico.

Estas tendencias respaldan la conclusión de que el aceite de girasol no solo es una opción viable, sino también competitiva frente a los aceites minerales.

Conclusiones Derivadas de los Patrones Identificados

A partir de los patrones y tendencias observados, se pueden extraer varias conclusiones clave:

- **Robustez para Aplicaciones en Transformadores:** La estabilidad térmica y la resistencia al envejecimiento del aceite de girasol lo posicionan como una alternativa sólida para aplicaciones en transformadores de potencia, donde la durabilidad y la confiabilidad son críticas.

- **Sostenibilidad Ambiental:** La biodegradabilidad del aceite de girasol representa un avance significativo en términos de sostenibilidad. Su uso puede reducir el impacto ecológico

asociado con los derrames de aceites minerales, promoviendo prácticas más amigables con el medio ambiente en la industria eléctrica.

- **Viabilidad Económica y Accesibilidad:** La amplia disponibilidad y el costo relativamente bajo del aceite de girasol en el mercado lo hacen una opción económica y accesible, facilitando su adopción masiva como sustituto de aceites minerales.

- **Evaluación de las Hipótesis Planteadas.**

Las hipótesis iniciales del proyecto sugerían que los aceites vegetales podían servir como sustitutos eficaces de los aceites minerales en equipos eléctricos, ofreciendo beneficios ambientales y económicos. Los resultados obtenidos validan estas hipótesis, demostrando que el aceite de girasol cumple con los requisitos técnicos necesarios para su aplicación en transformadores, al tiempo que ofrece una reducción significativa en el impacto ambiental.

Implicaciones para el Campo de Estudio

Los resultados de este proyecto tienen importantes implicaciones para el campo de los aceites dieléctricos y la industria eléctrica en general. El uso de aceites vegetales como el de girasol podría revolucionar el enfoque hacia la sostenibilidad en el diseño de transformadores y otros equipos eléctricos. La adopción de aceites biodegradables no solo mejora la sostenibilidad ambiental, sino que también podría impulsar el desarrollo de nuevos estándares y normativas en la industria, promoviendo un cambio hacia tecnologías más limpias.

Restricciones en el Proceso de Recolección y Análisis de Datos

Durante la ejecución del proyecto, se identificaron varias restricciones que podrían haber influido en los resultados obtenidos:

- **Variabilidad en la Calidad de los Aceites Vegetales:** La variabilidad en la calidad de los aceites vegetales disponibles en el mercado representó un desafío significativo. Las diferencias en

el procesamiento y las mezclas de los aceites vegetales pueden afectar sus propiedades, lo que podría haber impactado los resultados de algunas pruebas.

- **Falta de Normativas Estandarizadas:** La ausencia de normativas estandarizadas para la evaluación de aceites dieléctricos de origen vegetal limitó el alcance comparativo del estudio. Esta restricción subraya la necesidad de establecer protocolos claros y uniformes para la evaluación de aceites dieléctricos vegetales en el futuro.

Lecciones Aprendidas

El desarrollo de este proyecto ofreció varias lecciones valiosas:

- **Importancia de una Metodología Rigurosa:** Se destacó la importancia de contar con una metodología bien definida para garantizar la fiabilidad de los resultados.

- **Consideración de Factores Económicos y de Sostenibilidad:** La necesidad de integrar consideraciones económicas y de sostenibilidad en la selección de materiales alternativos en la industria eléctrica se puede evidenciar.

- **Potencial de los Aceites Vegetales:** La caracterización de aceites vegetales mostró que, aunque estos aceites presentan un gran potencial, es esencial seguir investigando y optimizando sus formulaciones para maximizar su rendimiento y viabilidad en aplicaciones eléctricas.

- Contribuciones al Campo de Estudio

Este proyecto contribuye significativamente al campo de los aceites dieléctricos y la ingeniería eléctrica al demostrar que los aceites vegetales, específicamente el de girasol, pueden ser una alternativa viable y sostenible a los aceites minerales convencionales. Los resultados obtenidos proporcionan una base sólida para futuras investigaciones y desarrollos en el área, fomentando la innovación hacia soluciones más ecológicas en la industria eléctrica.

Relación con Investigaciones Previas

Los hallazgos de este proyecto son consistentes con estudios previos que han destacado las propiedades prometedoras de los aceites vegetales como sustitutos de los aceites minerales. Este estudio avanza un paso más al proporcionar un análisis comparativo detallado y proponer una metodología estructurada para la selección y evaluación de aceites dieléctricos vegetales, validando su potencial no solo desde un punto de vista técnico, sino también económico y ambiental.

Conclusión General

En conclusión, este proyecto de grado ha logrado cumplir con los objetivos establecidos al demostrar la viabilidad del aceite de girasol como una alternativa efectiva y sostenible a los aceites dieléctricos minerales. Las conclusiones extraídas no solo respaldan las hipótesis planteadas, sino que también subrayan la importancia de considerar soluciones innovadoras y sostenibles en el diseño y operación de equipos eléctricos. Este estudio representa un paso significativo hacia un futuro más sostenible en la industria eléctrica, donde los aceites vegetales pueden desempeñar un papel crucial en la reducción del impacto ambiental y la promoción de prácticas más responsables y ecológicas.

Consideraciones Finales

La elección entre aceites dieléctricos vegetales y minerales debe basarse en una evaluación equilibrada de sus propiedades, costos y impacto ambiental. Los aceites vegetales, aunque pueden ser más costosos en algunos casos, ofrecen beneficios significativos en términos de sostenibilidad y seguridad, mientras que los aceites minerales continúan siendo una opción viable debido a su costo-eficiencia y rendimiento comprobado.

Recomendación Específica

La implementación gradual del aceite de girasol en transformadores es viable técnica y económicamente, ofreciendo beneficios que incluyen mejoras en la eficiencia, reducción de costos de mantenimiento y un menor impacto ambiental. La adopción de este aceite debe acompañarse de un monitoreo continuo para asegurar su éxito a largo plazo.

10. Recomendaciones

En este capítulo, se presentan recomendaciones para futuros proyectos de investigación que busquen complementar o mejorar la solución implementada en este estudio. Se abordan tanto los desafíos técnicos como no técnicos que quedaron pendientes y se sugieren áreas prometedoras para la continuación de la investigación en el campo de los aceites dieléctricos vegetales. Las recomendaciones se basan en los hallazgos de este proyecto, las tendencias actuales en la industria y las necesidades futuras de la ingeniería eléctrica.

Problemas y Desafíos Pendientes

- **Variabilidad en la Calidad de los Aceites Vegetales:** Uno de los desafíos principales fue la variabilidad en la calidad de los aceites vegetales disponibles en el mercado. Las diferencias en el procesamiento, almacenamiento y origen del aceite pueden afectar significativamente sus propiedades dieléctricas. Se recomienda realizar estudios exhaustivos sobre el control de calidad de los aceites vegetales y establecer normativas que garanticen su consistencia y eficacia. Esto es crucial para asegurar que los aceites utilizados en aplicaciones eléctricas mantengan un rendimiento uniforme y predecible.

- **Longevidad y Estabilidad a Largo Plazo:** Aunque el aceite de girasol mostró buena estabilidad térmica y resistencia al envejecimiento en pruebas de laboratorio, es crucial llevar a cabo investigaciones a largo plazo para evaluar su rendimiento bajo condiciones operativas reales extendidas. Esto permitirá determinar con mayor precisión la vida útil de estos aceites cuando se utilizan en transformadores y otros equipos eléctricos, y garantizará que cumplan con las expectativas de durabilidad.

- **Compatibilidad con Materiales de Construcción de Transformadores:** La compatibilidad del aceite de girasol con los materiales de construcción internos de transformadores, como bobinas, núcleos y papel aislante, no se exploró en profundidad en este estudio. Futuras investigaciones deberían incluir pruebas específicas para asegurar que el aceite no degrade o interactúe negativamente con otros componentes del transformador. Esto es especialmente importante para evitar problemas de corrosión o degradación del aislamiento que podrían comprometer la seguridad y el rendimiento del equipo.

Tendencias Actuales y Áreas Prometedoras

Existen varias tendencias en el campo de la ingeniería eléctrica y los materiales dieléctricos que sugieren áreas prometedoras para futuros proyectos de investigación:

- **Sostenibilidad y Materiales Renovables:** La creciente preocupación por la sostenibilidad y la transición hacia energías renovables ha impulsado la investigación en materiales ecológicos. Los aceites vegetales como el de girasol encajan perfectamente en esta tendencia, pero aún hay espacio para explorar aceites de origen vegetal menos conocidos que podrían ofrecer propiedades aún más ventajosas, tanto en términos de rendimiento como de sostenibilidad.

- **Nanotecnología y Mejora de Propiedades Dieléctricas:** La nanotecnología ofrece posibilidades interesantes para mejorar las propiedades dieléctricas de los aceites vegetales. La incorporación de nanopartículas podría mejorar la estabilidad térmica y la conductividad eléctrica de estos aceites, haciéndolos aún más competitivos frente a los aceites minerales. Esta área de investigación es prometedora y podría llevar a desarrollos significativos en la eficiencia y longevidad de los aceites dieléctricos vegetales.

- **Normativas y Estándares de Calidad:** La falta de normativas claras y estándares de calidad específicos para aceites dieléctricos vegetales representa una oportunidad para desarrollar

guías y regulaciones que aseguren un rendimiento óptimo y seguro de estos materiales en aplicaciones eléctricas. Establecer estos estándares sería un paso crucial para la adopción generalizada de aceites vegetales en la industria eléctrica.

- Temas Propuestos para Futuros Proyectos

- A continuación, se presentan algunos temas específicos que podrían ser objeto de futuros proyectos de investigación, con una breve justificación de su relevancia, impacto y viabilidad:

Desarrollo de Nuevas Formulaciones de Aceites Vegetales:

- **Justificación:** Mejorar la formulación de aceites vegetales para optimizar sus propiedades dieléctricas y térmicas.

- **Impacto:** Aumentar la eficiencia y la vida útil de los transformadores, reduciendo costos operativos y mejorando la sostenibilidad ambiental.

- **Viabilidad:** Uso de técnicas de ingeniería química para modificar la estructura molecular de los aceites y aditivos mejoradores de propiedades.

Evaluación del Ciclo de Vida y Análisis de Impacto Ambiental:

- **Justificación:** Determinar el impacto ambiental completo del uso de aceites vegetales en comparación con aceites minerales, desde la producción hasta la eliminación.

- **Impacto:** Proveer datos que respalden decisiones basadas en sostenibilidad dentro de la industria eléctrica y fomentar la adopción de prácticas más ecológicas.

- **Viabilidad:** Aplicar metodologías de análisis de ciclo de vida (ACV) y evaluaciones de sostenibilidad con el apoyo de herramientas y software especializados.

Pruebas a Escala Industrial en Transformadores:

- **Justificación:** Validar el rendimiento del aceite de girasol en entornos operativos reales a gran escala, lo que permitiría una evaluación más precisa de su viabilidad a largo plazo.

- **Impacto:** Demostrar la viabilidad del cambio a aceites vegetales en aplicaciones industriales masivas, facilitando la transición de la industria hacia opciones más sostenibles.

- **Viabilidad:** Colaboración con empresas del sector eléctrico para realizar pruebas piloto en plantas de energía, con seguimiento continuo y análisis detallado de los resultados.

Metodologías y Enfoques de Investigación Sugeridos

Para abordar los temas propuestos, se sugiere emplear las siguientes metodologías y enfoques de investigación:

- **Métodos de Simulación Avanzada:** Utilizar simulaciones por computadora para modelar el comportamiento dieléctrico y térmico de los aceites vegetales bajo diferentes condiciones. Esto puede ayudar a identificar áreas de mejora antes de realizar pruebas físicas, optimizando recursos y tiempo.

- **Técnicas de Caracterización de Materiales:** Implementar técnicas avanzadas como espectroscopia infrarroja, análisis térmico diferencial (DSC) y microscopía electrónica para estudiar la estructura y propiedades de los aceites vegetales modificados. Estas técnicas pueden ofrecer una comprensión más profunda de cómo los cambios en la formulación afectan el rendimiento dieléctrico y térmico.

- **Estudios de Mercado y Análisis Económico:** Realizar estudios de mercado exhaustivos para entender la viabilidad económica y las barreras potenciales para la adopción de aceites vegetales en la industria eléctrica. Este análisis debe incluir consideraciones sobre costos de producción, distribución y escalabilidad en diferentes mercados.

- **Oportunidades de Colaboración** Existen varias oportunidades de colaboración que podrían fortalecer la ejecución de futuros proyectos:

- **Instituciones Académicas:** Colaborar con universidades que tengan programas de investigación en materiales dieléctricos y sostenibilidad para acceder a recursos adicionales y fomentar el intercambio de conocimiento. Esto también podría incluir programas de doctorado y posdoctorado enfocados en la investigación de aceites dieléctricos vegetales.

- **Empresas del Sector Eléctrico:** Asociarse con compañías eléctricas y fabricantes de transformadores para realizar pruebas piloto y validar el uso de aceites vegetales en aplicaciones comerciales. Estas colaboraciones pueden facilitar la transferencia de tecnología y acelerar la adopción de nuevas soluciones en la industria.

- **Organizaciones Ambientales:** Trabajar con ONG y organismos internacionales para promover la adopción de materiales sostenibles en la industria eléctrica y contribuir a la creación de normativas y estándares que respalden el uso de aceites vegetales.

- **Consideraciones Éticas, Legales y de Seguridad**

Al diseñar y ejecutar futuros proyectos de investigación en aceites dieléctricos vegetales, es fundamental tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- **Ética Ambiental:** Asegurar que los procesos de producción y disposición de aceites vegetales no generen impactos ambientales negativos ni afecten la biodiversidad local. Es crucial que la investigación en aceites vegetales se realice con un enfoque en la sostenibilidad integral, considerando no solo el uso del producto final, sino también su ciclo de vida completo.

- **Cumplimiento de Normativas:** Adherirse a las regulaciones locales e internacionales sobre la producción, uso y desecho de aceites dieléctricos, asegurando que los materiales cumplan con los estándares de seguridad y calidad. Esto incluye el seguimiento de normativas emergentes que podrían afectar la viabilidad de los aceites vegetales en el futuro.

- **Seguridad Operativa:** Realizar evaluaciones de seguridad rigurosas para garantizar que el uso de aceites vegetales no comprometa la seguridad de los equipos eléctricos ni de los operadores. Es fundamental que las nuevas formulaciones de aceites vegetales sean sometidas a pruebas exhaustivas de seguridad antes de su implementación a gran escala.

Estas recomendaciones proporcionan un marco para futuros proyectos de investigación y desarrollo en el campo de los aceites dieléctricos vegetales. Al abordar los desafíos pendientes y explorar nuevas áreas de estudio, la comunidad científica y la industria eléctrica pueden continuar avanzando hacia soluciones más sostenibles y eficientes, que no solo mejoren el rendimiento de los equipos eléctricos, sino que también contribuyan al bienestar ambiental global. La colaboración interdisciplinaria y el compromiso con la innovación son clave para enfrentar estos desafíos y maximizar el impacto positivo de los aceites vegetales en la industria.

Referencias

- Riverkeeper. (2015). **Oil spill at Indian Point contaminates Hudson River**. Recuperado de <https://www.riverkeeper.org>
- Entergy Newsroom. (2015). **Indian Point unit 3 transformer liquid discharge into Hudson estimated at approximately 3,000 gallons**. Recuperado de <https://www.entergynewsroom.com>
- Han, L., Wang, C., & Zhao, J. (2023). **Migration movements of accidentally spilled oil in environmental waters: A review**. *Water*, 15(23), 4092. <https://doi.org/10.3390/w15234092>
- Dollhopf, R., & Durno, M. (2011). **Response to heavy, non-floating oil spilled in a Great Lakes river environment: A multiple-lines-of-evidence approach for submerged oil assessment and recovery**. *International Oil Spill Conference Proceedings*.
- EPA. (2021). **Dissolved Oxygen Parameter Factsheet**. Recuperado de https://www.epa.gov/system/files/documents/2021-07/parameter-factsheet_do.pdf
- Water Action Volunteers. (2023). **Dissolved Oxygen Factsheet 2022**. Recuperado de <https://wateractionvolunteers.org>
- Hosier, I. L., Vaughan, A. S., & Swingler, S. G. (2011). **Aging of biodegradable oils and assessment of their suitability for high voltage applications**. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 18(3), 728–738.
- Bandara, K., Ekanayake, C., Saha, T. K., & Annamalai, P. K. (2016). **Understanding the ageing aspects of natural ester-based insulation liquid in power transformers**. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 23(1), 246–257.

- IEEE. (2020). **Standard Test Methods for Dielectric Properties of Liquids.** *IEEE Transactions on Power Delivery.*
- Li, N., Mao, G., Shi, X., Tian, S., & Liu, Y. (2018). **Advances in the research of polymeric pour point depressants.** *Fuel*, 89(5), 1127–1132.
- Perrier, C., & Beroual, A. (2009). **Experimental investigations on insulating liquids for power transformers: Mineral, ester, and silicone oils.** *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 25(6), 6–13.
- Zeng, M., Chen, C., Cai, S., & Shao, M. (2019). **Oxidative stability of soybean oil under accelerated transformer conditions: Comprehensive mechanistic studies.** *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 58(19), 7742–7751.
- Werle, P., Raesian, L., & Niazmand, H. (2019). **Feasibility study of waste vegetable oil as an alternative cooling medium in transformers.** *Applied Thermal Engineering*, 151, 308–317.
- IEEE. (2021). **Standard Test Methods for Thermal Conductivity of Dielectric Liquids.** *IEEE Transactions on Power Delivery.*
- Armor Lubricants. (2023). **Dielectric Transformer Oil: How it Can Benefit Transformers?**
Recuperado de <https://www.armorlubricants.com>
- Kumar, M. A., Gurunathgowda, G., & Shanmugam, G. (2024). **Performance Enhancement of Aged Mineral Oil by Blending Synthetic Ester for Transformer Insulation Applications.** *Engineering Proceedings*, 59(1), 136.
<https://doi.org/10.3390/engproc2023059136>

- Rodenbush, C. M., Hsieh, F. H., & Viswanath, D. S. (1999). **Density and viscosity of vegetable oils.** *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 76(12), 1415-1419. <https://doi.org/10.1007/s11746-999-0177-1>
- Besbes, S., Blecker, C., Deroanne, C., & Attia, H. (2004). **Quality characteristics and oxidative stability of date seed oil during storage.** *Food Science and Technology International*, 10(4), 333-338. <https://doi.org/10.1177/1082013204047777>
- Al-Juhaimi, F., Ozcan, M. M., Adiamo, O. Q., & Ghafoor, K. (2018). **Effect of date varieties on physico-chemical properties, fatty acid composition, tocopherol contents, and phenolic compounds of some date seed oils.** *Journal of Food Processing and Preservation*, 42(7), 1-6. <https://doi.org/10.1111/jfpp.13584>
- Noureddini, H., Teoh, B. C., & Clements, L. D. (1992). **Densities of vegetable oils and fatty acids.** *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 69(12), 1184-1188. <https://doi.org/10.1007/BF02540422>
- Rodenbush, C. M., Hsieh, F. H., & Viswanath, D. S. (1999). **Density and viscosity of vegetable oils.** *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 76(12), 1415-1419. <https://doi.org/10.1007/s11746-999-0177-1>
- Semanticscholar. (2023). **Dielectric Properties of Vegetable Oils.**
- Bandara, K., Ekanayake, C., Saha, T. K., & Ma, H. (2016). **Performance of natural ester as a transformer oil in moisture-rich environments.** *Energies*, 9(4), 258.
- Xu, Y., Qian, S., Liu, Q., & Wang, Z. D. (2014). **Oxidation stability assessment of a vegetable transformer oil under thermal aging.** *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 21(2), 683-692.

- Cargill. (2024). **Improve Sustainability with FR3 Fluid.** Recuperado de <https://www.cargill.com/bioindustrial/fr3-fluid/better-for-the-planet>
- Gnanasekaran, D., & Chavidi, V. P. (2018). **Biodegradable, renewable, and eco-friendly vegetable oil: lubricants.** SpringerLink. https://doi.org/10.1007/978-981-10-4870-8_2
- Transformers Magazine. (2014). **Green transformers: Using biodegradable vegetable oil.** Recuperado de <https://www.transformers-magazine.com>
- IEEE C57.147. (2018). **IEEE Guide for Acceptance and Maintenance of Natural Ester Fluids in Transformers.** *Institute of Electrical and Electronics Engineers.*
- Marcos, D. J., & Hernandez, M. J. (2018). **Stability of Vegetable Oils for Use in Power Transformers: A Review.** *Journal of Electrical Engineering and Technology*, 13(3), 1483-1491.
- Madarieta-Txurruka, A., & Santos, F. J. (2017). **Sustainability Assessment of Palm Oil-Based Dielectric Fluids.** *Journal of Cleaner Production*, 149, 762-769.
- Gallo, H., Delgado, F., & Feliu, J. (2016). **Comparative Analysis of Vegetable Oils for Use as Dielectric Fluids in Power Transformers.** *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 23(5), 3208-3215.
- FAO. (2022). **Food and Agriculture Organization of the United Nations: Agricultural Production Statistics.** Recuperado de <https://www.fao.org>
- Goh, C. S., & Lee, K. T. (2010). **Palm oil as a source of renewable energy in Malaysia: An assessment of sustainability and feasibility.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(9), 2580-2585. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.040>
- Bailey, A. (2013). **Oil Crops Outlook: Sunflower Seed Production and Processing.** *USDA Economic Research Service.* Recuperado de <https://www.ers.usda.gov>

Canola Council of Canada. (2022). **Canola Oil: Production and Processing in Canada.**

Recuperado de <https://www.canolacouncil.org>

Nabasu, L., & Nyikal, D. (2017). **Performance of vegetable oils as alternative transformer oils.**

IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering, 12(2), 65-71.

Obot, I. B., et al. (2019). **Sustainability of sunflower oil as a green dielectric fluid for transformers.** *Renewable Energy*, 141, 104-112.

<https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.03.025>

Muhammad, M. A., et al. (2018). **Performance of palm oil-based biofluid as dielectric insulating oil for transformers.** *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 13(1), 202-209.