



# 7<sup>th</sup> INTERNATIONAL WORKSHOP ADVANCES IN CLEANER PRODUCTION Academic

“CLEANER PRODUCTION FOR ACHIEVING SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS”

## Comportamiento Térmico de Transformadores Eléctricos de Distribución Inmersos en Aceite Dielectrico de Origen Vegetal

TORREGROZA, M.I. <sup>a\*</sup>, ARRIETA, E.M. <sup>a</sup>, SILVA, J.I. <sup>b</sup>, FLOREZ L.E. <sup>c</sup>

*a. Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI). Minas Gerais, Brasil.*

*b. Universidad de la Costa (CUC), Grupo de Investigación en Optimización Energética GIOPEN. Estudiante de Doctorado en Ingeniería. Universidad Pontificia Bolivariana, Colombia.*

*c. GGroup Company. Barranquilla, Colombia.*

*\* meistorosas@gmail.com*

### Resumen

Desde principios de la década de los noventa se han desarrollado líquidos dieléctricos de origen vegetal como alternativa a la creciente crisis energética y ambiental que enfrenta el planeta. Sus principales ventajas, frente a los líquidos dieléctricos de origen mineral, son: ser biodegradables, provenir de un recurso renovable, mayor seguridad en su operación debido a su alto punto de inflamación. No obstante, su costo de adquisición, los pocos de estudios que pueden respaldar sus características de operación en el largo plazo y un escaso tiempo de aplicación, son barreras que limitan su masiva implementación.

Este estudio presenta un análisis empleando método de elementos finitos (MEF) del comportamiento térmico de un transformador eléctrico de distribución utilizando un tipo de aceite vegetal como líquido dieléctrico. Adicionalmente, se realizará el estudio numérico en el mismo equipo empleando aceite de origen mineral para comparar sus resultados.

*Palabras llave: Aceite vegetal, Método de Elementos Finitos (MEF), comportamiento térmico transformador.*

### 1. INTRODUCCIÓN

En los procesos productivos, tradicionalmente el pensamiento de “Responsabilidad ambiental” ha estado presente bajo un enfoque reactivo, esto supone ejercer control y tratamiento una vez generado los desechos y emisiones, implementando las llamadas medidas de “Final de tubo” o de “Etapa final”, conocidas como “*End of pipe*” en inglés, las cuales no están diseñadas para incentivar la prevención de la contaminación y sólo consiguen trasladar el problema de un lugar a otro (Varela Rojas, 2003).

Como alternativa a lo anterior, el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP), de la mano con la Organización de Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (UNIDO), introdujeron en concepto de “*Cleaner Production*”, conocido en español como “Producción más Limpia” (P+L). La P+L consiste en la “*Aplicación continua de una estrategia ambiental preventiva integral a procesos,*

“CLEANER PRODUCTION FOR ACHIEVING SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS”

Barranquilla - Colombia - June 21<sup>st</sup> and 22<sup>nd</sup> - 2018

*productos y servicios para aumentar la eficiencia general y para reducir los riesgos para los seres humanos y el ambiente*". La P+L puede ser aplicada a procesos utilizados por cualquier industria, a los productos mismos y a varios servicios ofrecidos en la sociedad (UNIDO, 2016; UNIDO & UNEP, 2015)

En lo referente a la energía eléctrica, gran parte de los esfuerzos actuales en relación a P+L se enfocan en áreas como la generación, a través del uso de fuentes de energía limpia, entre ellas energía solar, energía eólica, biomasa o pequeñas centrales hidroeléctricas y en el uso final, donde se han implementado conceptos como la eficiencia energética, el uso racional de la energía y se han diseñado normas como la ISO 50001 (UNECE, 2017). Por otro lado, en el área de transmisión y distribución, se apuesta por sistemas más robustos y dotados con mejor capacidad de auto gestión. En lo relacionado al sistema de comercialización, se espera que la red sea capaz de evolucionar, técnica, económica y legislativamente; en un conjunto de redes inteligentes que permitan a la energía proveniente de las fuentes limpias entrar al mercado, indiferentemente de la capacidad instalada de las unidades de generación, pasando de ser sistemas aislados de los consumidores a agentes activos en la comercialización de energía eléctrica (UNECE, 2017).

Dentro de los Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP), infraestructuras indispensables para el uso de energía eléctrica a gran escala, los transformadores eléctricos son empleados como frontera física entre los distintos niveles de tensión presentes en la red (Alta, media y baja tensión), esto permite elevar dichos niveles y minimizar las pérdidas en el transporte de electricidad entre largas distancias, para posteriormente reducirlos a valores que puedan ser empleados por los diferentes usuarios finales (Industriales, comerciales y residenciales), razón por la cual son considerados como un equipo de vital importancia en la confiabilidad, seguridad y flexibilidad de los SEP.

Uno aspectos principales para el buen funcionamiento y el aseguramiento de la vida útil de los transformadores eléctricos, es la óptima refrigeración de sus componentes y el correcto aislamiento eléctrico entre cada una de sus partes. Para ello, es necesario contar con un fluido que permita realizar estas funciones, en el caso de los transformadores los líquidos suelen ser ampliamente usados frente a los gases, dejando estos últimos para otras aplicaciones como disyuntores y dispositivos de conmutación (Divakaran et. Al., 2012; Fofana, 2013).

El aceite mineral ha sido el líquido empleado mayoritariamente como refrigerante y dieléctrico en los transformadores eléctricos, sin embargo, hoy en día existen varias razones para migrar a otras alternativas, entre ellas el hecho de que este no es biodegradable, convirtiéndose en un inconveniente al momento de su disposición final o en caso de derramamiento, debido a la alta contaminación que genera sobre el suelo y las fuentes de agua (Yanuar Z. et. Al., 2014). Por otro lado, la volatilidad en el mercado del petróleo, sumado a su condición de recurso no renovable y limitado a ciertas regiones geográficas, tiene considerables efectos en sobre su precio de fabricación y expone como realidad, la seguridad que se presentará escasez en algún momento futuro, a mediano o largo plazo.

El presente trabajo tiene como objetivo es analizar el comportamiento térmico de un transformador de media tensión usado en sistemas de distribución de energía, refrigerado por aceite vegetal, empleando el Método de Elementos Finitos y posteriormente, comparar su desempeño con respecto a las condiciones térmicas de un transformador refrigerado por aceite mineral.

## **2. ESTADO DEL ARTE**

### *2.1 Aceites vegetales.*

Un aceite vegetal, también llamado éster vegetal, pertenece a un grupo de compuestos orgánicos, que se generan por la reacción de un ácido con alcohol en la eliminación de agua. La grasa y el aceite emergen de la esterificación de glicerina y ácidos grasos (Muhamad et. Al., 2008). El aceite vegetal se puede clasificar en dos clases principales; una con una mayor concentración de ácidos grasos

saturados que es más estable a la oxidación pero posee un punto de fusión más alto, y la otra con una mayor concentración de grasas no saturadas ácidos que es altamente susceptible a la oxidación, pero posee punto de fusión más bajo (Abdelmalik et. Al., 2011).

## 2.2 *Uso de aceites vegetales en transformadores eléctricos.*

Desde 1892, el uso de aceite de origen mineral, como medio refrigerante y dieléctrico, se masificó debido a experimentos que demostraron un mejor desempeño de este frente a otras opciones, incluidos los aceites de origen vegetal. Adicionalmente, ninguna otra sustancia demostró ser comercialmente exitosa. Sin embargo, en la década de los 70's los descubrimientos en relación a los policlorobifenilos (PCB's) y sus efectos negativos sobre la salud, sumados a la crisis del petróleo, obligaron a la industria a la búsqueda de nuevas alternativas, como los fluidos de silicona (Polidimetilsiloxano o PDMS), hidrocarburos de alta temperatura (HTH), algunos miembros de la familia de clorofluorocarbonos (freones), entre otros (Vishal et. Al., 2011).

A mediados de los años 90's, inicia un esfuerzo en materia de Investigación y Desarrollo (I+D) para encontrar una alternativa al aceite mineral, que fuese: biodegradable, de producción sostenible y técnico-económicamente viable. Bajo este contexto, resurge el interés por los aceites provenientes de fuentes vegetales. En septiembre de 1999, es otorgada a la compañía ABB la patente del primer aceite comercial de tipo vegetal, conocido como BIOTEMP®. Para la misma época, Waverly Ligth & Power en Iowa obtiene una patente para un aceite vegetal obtenido de granos de soya y en marzo de 2000, en Milwaukee, empieza a ser comercializado el FR3, por la empresa Cooper Industries Inc (Navas et. Al., 2012).

Como sustituto de los aceites minerales en los transformadores eléctricos, los aceites vegetales presentan ventajas demostradas en aspectos como (Oommen, 2002; Marulanda et. Al., 2008; Ruijin et. Al., 2010; Tenbohlen et. Al., 2010; Navas Fernando et. Al., 2012; Martins, 2015; McShane et. Al., 2009):

- Seguridad para el medio ambiente: De acuerdo a las pruebas para biodegradabilidad, está categorizado como "Finalmente biodegradable" y "Fácilmente biodegradable" según EPA (Environmental Technology Verification). Adicionalmente, para la prueba de toxicidad acuática aguda, luego de retirado el agente inhibidor de oxígeno, los resultados mostraron una toxicidad de cero a través del período de prueba estándar de 96 horas a 1000 mg / kg. Dada su naturaleza, al momento de su disposición final, estos pueden ser transformados en otras sustancias como jabón y aceite endurecido.
- Seguridad para las personas y las instalaciones: Dadas sus altos puntos de combustión e inflamación (300°C en promedio, en comparación con un rango de 160°C-180°C en los aceites minerales), los ésteres naturales han sido certificados como líquidos menos inflamables para uso en transformadores por la Factory Mutual y Underwriters Laboratories. Esto significa que los ésteres naturales ofrecen una mayor seguridad ante incendios, por tener una elevada resistencia al fuego. Además, se ha considerado que las distancias de seguridad entre equipos pueden ser disminuidas. Otro factor importante en este aspecto, es la
- Menor envejecimiento y mayor vida útil del papel aislante: Los aceites vegetales poseen un límite de saturación de agua, entre cinco a ocho veces, superior a los aceites minerales en condiciones normales de operación del equipo. Lo anterior representa que menos humedad se mantenga en los materiales aislantes de celulosa, el cual es un factor crítico en la vida útil de estos equipos.
- Mayor conductividad térmica: Esto permite que el calor generado por las partes activas del transformador se transfiera a una mayor velocidad hacia el aceite, y de este hacia la cuba, para finalmente dispersarse en el exterior.

- Proviene de un recurso renovable: La materia prima para la obtención de estos compuestos está en las semillas o granos de diferentes cultivos como la soya, la canola, el girasol, el cocotero, la palma africana, entre otros. Ello hace que su disponibilidad no esté basado en procesos de extracción de combustibles fósiles, sino en la cosecha de distintas especies vegetales, liberándolo de la volatilidad de los mercados del petróleo y creando mayor seguridad en su disponibilidad, por estar desligado de un recurso no renovable, el cual en algún punto agotará sus reservas y entrará valores de escases.

### 2.3 *Análisis del comportamiento térmico de transformadores eléctricos implementando el método de elementos finitos (MEF).*

El Método de Elementos Finitos (MEF) es un método de aproximación de problemas continuos que son divididos en un número finito de partes, denominados "Elementos finitos" (EF´s). De este modo, la idea principal del MEF es dividir un problema complejo en pequeñas áreas. El comportamiento de estas pequeñas áreas se especifica mediante un número finito de parámetros asociados a los "nodos", los cuales son una serie de puntos que conectan entre sí los elementos. El comportamiento en cada elemento está definido por una matriz, la cual está formada por un grupo de funciones polinómicas que dependen de la interpolación de valores conocidos en los nodos. El proceso de dividir el modelo geométrico discreto en pequeños EF´s se conoce como "Mallado", conocidas como "Mesh" en inglés (Arrieta, 2017).

Entre las principales ventajas del MEF está su amplio campo de aplicabilidad, esto permite que pueda ser empleado en cualquier geometría, sin presentar inconveniente con la discontinuidad entre las propiedades de los materiales. A través de este tipo de análisis, es posible identificar problemas en la etapa de diseño de un prototipo, lo cual disminuye el tiempo de desarrollo de un producto y el número de etapas de ensayo. En el caso de elementos que se encuentran en funcionamiento en la industria, este método permite realizar un estudio detallado y conocer en funcionamiento de los mismos, sin necesidad del parar el proceso productivo (Arrieta, 2017).

Como desventaja del MEF, se puede mencionar que la validez de sus resultados está dada por la correcta definición de las condiciones de contorno, así como las propiedades de los materiales. La precisión de los resultados dependerá del número de mallas que conforman el elemento discreto, cuanto mayor sea el número de mallas los resultados serán más parecidos a los resultados del sistema real, pero aumentará el tiempo de computo proporcionalmente.

Esta herramienta ha sido utilizada en el análisis de distintas propiedades y características térmicas, magnéticas y eléctricas en los transformadores eléctricos, así como complemento en el diseño de los mismos. Diversos estudios han sido desarrollados para estudiar el comportamiento térmico de estos equipos empleando el MEF, tanto en transformadores de tipos seco (Mafra G, 2017) como en transformadores refrigerados por aceite (Barroso, 2017; Iglesias, 2017). Estos han sido comparados con medidas reales obtenidas a través de sondas térmicas, con resultados de un error por debajo del 5% en el caso de los refrigerados por aceite, además de curvas de comportamiento térmico muy similares en el caso de los transformadores refrigerados por aire.

### 2.4 *COMSOL Multiphysics.*

COMSOL® Multiphysics es un paquete de software de análisis y resolución por el MEF para varias aplicaciones físicas y de ingeniería, especialmente fenómenos acoplados, o multifísicos. Mediante el empleo de esta aplicación se reduce de forma considerable el esfuerzo y el tiempo de resolución si se comparan, por el contrario, con los necesarios para realizar los cálculos de forma manual, además de conseguir mayor precisión (Resa, 2011).

En la figura 1 se presenta un esquema para representar una solución de carácter general, realizada por el software, para el modelo de un medio físico, compuesto básicamente por tres etapas: Pre-procesamiento, procesamiento y pos-procesamiento.

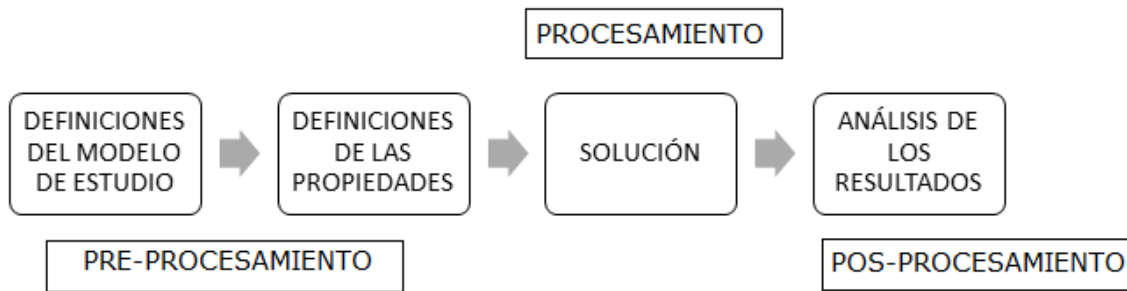


Fig. 1 Esquema de solución genérica de sistemas usando COMSOL

En primer lugar está la etapa de pre-procesamiento, en ella se define el modelo desde el punto de vista geométrico y físico. Para continuar, son definidas las propiedades, en este paso son especificadas las ecuaciones, condiciones de contorno, propiedades de los materiales y la fuente externa. Estas ecuaciones son especificadas dependiendo del tipo de análisis (estático o dinámico) y las leyes asociadas al fenómeno estudiado (Leyes de termodinámica, leyes de Maxwell etc). Las condiciones del contorno definen las magnitudes en las fronteras de la región de interés. En las propiedades de los materiales se definen aquellos que conforman el medio físico, los cuales pueden ser obtenidos de las bibliotecas del programa y por último, se define la fuente de excitación del modelo (Arrieta, 2017).

En la segunda etapa, procesamiento, se da la solución del modelo, se genera la “Malla” del sistema discretizado. Adicionalmente, se realiza el cálculo de las ecuaciones que conforman el sistema para obtener las magnitudes de interés. En la última etapa, pos-procesamiento, se representa gráficamente los resultados de la simulación para el análisis de los resultados. También pueden ser exportados los datos para ser analizados en otro software (Arrieta, 2017).

COMSOL® es usado en (Alvarado, 2012), para analizar el caso de las reactancias obtenidas durante las pruebas de determinación de impedancias de secuencia positiva y secuencia cero. Para ello se realizaron simulaciones mediante el MEF, usando modelos en dos y tres dimensiones, las cuales posteriormente fueron comprobadas de dos formas, primero con mediciones reales de reluctancia y campos magnéticos en transformadores de potencia y por último, comparando los resultados obtenidos con simulaciones realizadas en un programa basado en el método de las diferencias finitas. Los resultados en ambos casos, fueron muy similares, lo cual permite obtener certidumbre sobre la validez de los resultados obtenidos, siempre que los diversos detalles que influyen de manera significativa en los resultados, sean los correctos.

También pueden encontrarse en la literatura, estudios relevantes sobre la utilización del software en procesos de diseño de transformadores eléctricos (Soto, 2012; Morales, 2015), con resultados significativos en lo relacionado a precisión y la optimización de recursos económicos.

### 3. CASO DE ESTUDIO

#### 3.1 Descripción del caso de estudio.

En el presente caso de estudio se desarrolló un análisis numérico del comportamiento térmico de un transformador eléctrico de media tensión, empleando el Método de Elementos Finitos – MEF, a través del software COMSOL®. Para ello, se realizaron simulaciones de las propiedades físicas, magnéticas y

eléctricas del equipo en funcionamiento con dos aceites refrigerantes, uno de tipo mineral ampliamente comercializado y otro de tipo vegetal, el cual también se encuentra disponible en el comercio, pero su uso no es extensivo en este tipo de equipos.

Para este estudio se ha utilizado un modelo de transformador eléctrico común en las redes de distribución de la Costa Caribe Colombiana, sin ninguna característica o propiedad especial. Corresponde a un equipo monofásico tipo poste de tres columnas, con los arrollamientos rectangulares situados en su columna central de manera concéntrica, con el arrollamiento de baja tensión en la parte interna y el de alta tensión la externa, con una canal entre ambos. El núcleo ferromagnético está compuesto de láminas de acero al silicio y el material utilizado en los conductores del primario y secundario es cobre, estos se encuentran aislados por capas de papel Kraft. El equipo es refrigerado por aceite y cuenta con una cuba de tipo cilíndrica. En la tabla 1 se muestran los principales valores nominales del equipo mencionado.

Tabla 1 Valores nominales del transformador

<b>VALORES NOMINALES TRANSFORMADOR</b>	
<i>Potencia nominal</i>	75 KVA
<i>Tensión nominal primaria</i>	13200 V
<i>Tensión nominal secundaria</i>	240 V
<i>Frecuencia</i>	60 Hz

### 3.2 Modelo en COMSOL®

El modelo empleado corresponde a una geometría en tres dimensiones, el tipo de estudio es estacionario, las físicas utilizadas fueron "Transferencia de calor en sólidos" y "Campos magnéticos. En la figura 2 se muestra el mallado generado por COMSOL®, este corresponde al tipo tetraédrico. Los materiales fueron elegidos de la librería de COMSOL® y algunas de sus propiedades se modificaron de acuerdo a las características de los elementos que componen el equipo (Ver tabla 2).



Fig. 2 Mallado tetraédrico generado en COMSOL®

Tabla 2 Propiedades de los materiales

<b>ACEITE</b>	
<i>Permeabilidad relativa</i>	
<i>Permisividad relativa</i>	
<i>Conductividad eléctrica</i>	
<b>NÚCLEO</b>	
<i>Permeabilidad relativa</i>	
<i>Calor específico a presión constante</i>	
<i>Densidad</i>	
<i>Conductividad térmica</i>	

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La figura 3 muestra los valores de temperatura del equipo funcionando con dos tipos de aceites refrigerantes, vegetal y mineral. En la imagen se observa un valor máximo de temperatura de 363 K (89.85 °C) para el aceite vegetal y de 319 K (45.85 °C) para el aceite mineral. Estas temperaturas máximas representan una relación de un 113% del aceite vegetal con respecto al mineral, con una

diferencia de 44 grados la una de la otra. Como punto mínimo de temperatura para ambos casos se tiene un valor de 306 K (31.85 °C), esto corresponde a la temperatura ambiente del entorno.

Para el caso del aceite vegetal, la diferencia entre la temperatura máxima y mínima es de 57 grados, mientras que para el caso del aceite vegetal sólo llega a 13 grados. Esto significa, más de un 400% del delta del aceite vegetal con respecto al aceite mineral. En el caso del núcleo del transformador, su parte externa presenta valores cercanos a los 350 K en el aceite vegetal y de 316 K en el mineral. Una diferencia que supone 34 grados entre ambos valores y que en el caso del aceite mineral supone sólo 2 grados menos que su máxima temperatura, mientras que en el del aceite vegetal supone 13 grados, lo que puede estar relacionado con una mayor capacidad térmica del aceite vegetal y la baja viscosidad del aceite mineral. Esto último permite al aceite mineral moverse más fácilmente entre las distintas partes del transformador y la mayor capacidad térmica del aceite vegetal, permite que el calor sea transferido con mayor velocidad al aceite desde las partes activas del equipo, posteriormente a la cuba y finalmente sea disipado hacia el exterior.

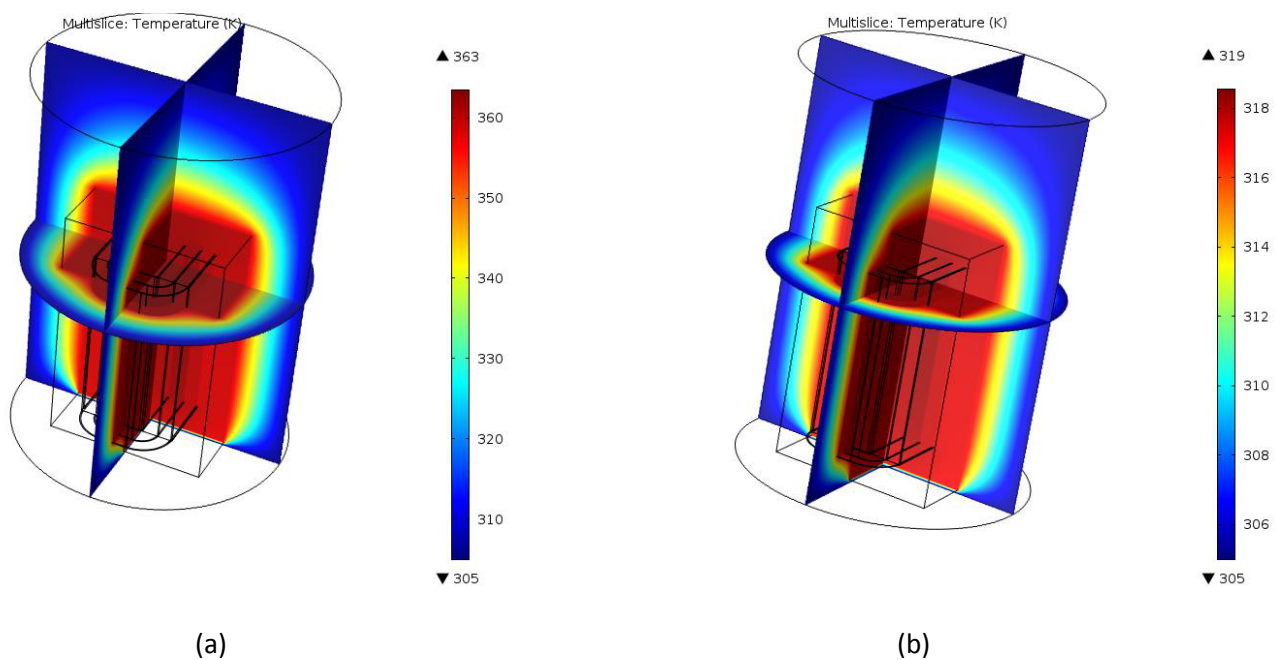


Fig. 3 Comportamiento térmico (a) aceite vegetal y (b) aceite mineral

La diferencia entre la temperatura máxima y mínima del aceite vegetal es significativamente mayor que la del aceite mineral, lo cual indica un cantidad de calor disipado superior en el primero. Los resultados anteriores permiten evidenciar la posibilidad de emplear el aceite vegetal como refrigerante del transformador estudiado, debido a que aun cuando alcanza valores de temperatura superiores, no supera los umbrales de seguridad establecidos.

En lo relacionado con el aislamiento, en primera instancia se podría pensar que al tener una mayor temperatura con el uso del aceite vegetal, este sufriría un deterioro más rápido, sin embargo, al tener una constante dieléctrica muy similar a la del aceite vegetal, se presenta una mejor distribución del campo eléctrico sobre el material aislante.

## 5. CONCLUSIONES

Las simulaciones de la temperatura promedio en los devanados del transformador de potencia refrigerado por aceites minerales y vegetales, demostraron que los aceites vegetales pueden soportar una mayor temperatura de operación que el aceite mineral. Esto debido a que los aceites vegetales presentan mayor viscosidad, lo cual reduce la velocidad de la circulación del fluido. El trabajo realizado contribuye a demostrar que el desempeño térmico del aceite vegetal es favorable como sustituto tecnológico del aceite mineral al igual que mejora las condiciones de operación reduciendo el riesgo por sobrecarga en los transformadores de distribución.

Se destaca que como sustituto tecnológico los aceites vegetales son biodegradables, reutilizables y no contaminantes ubicándolo como una tecnología sostenible y con criterios orientados hacia la producción mas limpia.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- Abdelmalik, A., Fothergill, J., Dodd, S., Abbott, A., & Harris, R. (2011). Effect of Side Chains on the Dielectric Properties of Alkyl Esters Derived from Palm Kernel Oil. *IEEE International Conference on Dielectric Liquids*.
- Alvarado Vargas, S. C. (2012). *Cálculo de los campos magnéticos y reactancias en transformadores por el Método de Elementos Finitos*. Sartenejas.
- Arrieta Martínez, E. M. (28 de Septiembre de 2017). Estudio do comportamento do fluxo magnético de geradores síncronos com falhas de curto circuito no rotor usando o método de elementos finitos. Itajubá, Minas Gerais, Brasil.
- Barroso Cuerdo, J. (01 de Julio de 2017). COMSOL Multiphysics para la simulación de propiedades dieléctricas y térmicas en estado estacionario de aceites de transformadores de potencia. Madrid, Madrid, España.
- Divakaran, D., & Kalaivanan, C. (2012). Investigation of lightning impulse voltage characteristics and other thermo-physical characteristics of vegetable oils for power apparatus applications. *10th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials* (págs. 24-28). Bangalore: IEEE.
- Fofana, I. (01 de Septiembre de 2013). 50 Years in the Development of Insulating Liquids. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, págs. 13-25.
- Iglesias Ruiz, F. (02 de Febrero de 2017). Análisis numérico del comportamiento fluido térmico magnético de un transformador monofásico. Cantabria, Cantabria, España.
- Mafra G, R. (1 de Marzo de 2017). Análise Numérica e Experimental do Comportamento Térmico de Transformador à Seco Suprimindo Cargas Não Lineares. Itajubá, Minas Gerais, Brasil.



- Martins, A. (2015). Óleo vegetal – um substituto do óleo mineral para uso em transformadores: revisão do estado da arte. *Ciência & Tecnologia dos Materiais*, 136-142.
- Marulanda, A., Artigas, M., Gavidia, A., Labarca, F., & Paz, N. (2008). Study of the vegetal oil as a substitute for mineral oils in distribution transformer. *Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, 2008 IEEE/PES* (págs. 1-6). Bogotá: IEEE.
- McShane, C., Corkran, J., Rapp, K., & Luksich, J. (2009). Natural Ester Dielectric Fluid Development Update. *Power & Energy Society General Meeting, 2009. PES '09. IEEE* (págs. 1-6). Calgary: IEEE.
- Morales, G. (2015). *Diseño y evaluación de un transformador de reluctancia variable*. Sevilla: Universidad de Sevilla.
- Muhamad, N. A., Phung, B., & Blackburn, T. (2008). Dissolved Gas Analysis (DGA) of Arcing Faults in Biodegradable Oil Insulation Systems. *Proceedings of 2008 International Symposium on Electrical Insulating Materials*, 24-27.
- Navas Fernando, D., Cadavid Ramírez, H., & Echeverry Ibarra, D. (2012). Aplicación del aceite dieléctrico de origen vegetal en transformadores eléctricos. *Ingeniería y Universidad*, 201-223.
- Oommen, T. (2002). Vegetable Oils for Liquid-Filled Transformers. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 6-11.
- Resa Arribas, J. (2011). *Cálculo de pérdidas en la cuba de un transformador por el método de elementos finitos*. Madrid: Universidad Carlos III de Madrid.
- Ruijin , L., Jian , H., George , C., Zhiqin , M., & Lijun , Y. (2010). A Comparative Study of Physicochemical, Dielectric and Thermal Properties of Pressboard Insulation Impregnated with Natural Ester and Mineral Oil. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 1626-1637.
- Soto Meza, D. (2012). *Técnicas computacionales para el diseño dieléctrico de transformadores de potencia*. Ciudad de México: Instituto Politécnico Nacional.
- Tenbohlen, S., & Koch, M. (2010). Aging Performance and Moisture Solubility of Vegetable Oils for Power Transformers. *IEEE Transactions On Power Delivery*, 825-830.
- UNECE. (2017). *Coordinated Operations of Flexible Coal and Renewable Energy Power Plants: Challenges and Opportunities*. New York: ONU.
- UNECE. (2017). *Overcoming barriers to investing in energy efficiency*. New York: ONU.
- UNIDO & UNEP. (2015). *National Cleaner Production Centres: 20 years of achievement*. ONU.
- UNIDO. (2016). *UNIDO's Environment Solution: Resource Efficient and Cleaner Production (RECP) Programme*. ONU.

- Varela Rojas, I. (2003). Definición de producción mas limpia. *Tecnología en marcha*, 3-12.
- Vishal, Saurabh, Vikas, & Prashant. (2011). Transformer's History and its Insulating Oil. *Proceedings of the 5th National Conference; INDIACom-2011 Computing For Nation Development*. New Delhi.
- Yanuar Z. , A., Mohd Hafizi , A., K. Y. , L., Nor Asiah , M., Mohd, N. K., Huey, L. W., Azeehan Azli, S. (2014). A Comparative Study on the Effect of Electrical Ageing on Electrical Properties of Palm Fatty Acid Ester (PFAE) and FR3 as Dielectric Materials. *IEEE International Conference Power & Energy (PECON)* (págs. 128-133). Putrajaya: IEEE.