

Comparative Analysis between Mineral Oil and Vegetable Oil used as Dielectrics and Refrigerants for Power Transformers

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

W. Quitiaquez¹ A. Simbaña^{†1} I. Simbaña¹ C. Isaza²
C. Nieto² P. Quitiaquez¹ F. Toapanta¹

¹Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador

E-mail: wquitiaquez@ups.edu.ec; csimbanar@est.ups.edu.ec; asimbana@ups.edu.ec;
rquitiaquez@ups.edu.ec; ltoapanta@ups.edu.ec

²Universidad Pontificia Bolivariana de Medellín, Colombia

E-mail: cesar.isaza@upb.edu.co; cesar.nieto@upb.edu.co

Abstract

The objective of this investigation is to evaluate the properties of vegetable oil and mineral oil used as dielectrics and refrigerants in power transformers, equipment that is used on the oil fields exploitation.

Based on the ASTM D1524 standard, a visual test was carried out with five samples of each oil, obtaining average values of 1,15 and 0,6 for vegetable oil and mineral oil, respectively.

The obtained results showed that vegetable oil keeps its properties for a long time, which extends the equipment's useful life.

For the dielectric strength test, according to the ASTM D1816 test, five measurements were taken for the vegetable oil, obtaining as average values 32,9, 29,6, 31,1, 30,7, 32,6; meanwhile, for the mineral oil, the average results of the five measurements were 31,2, 28,5, 29,6, 28,9, 30.

It demonstrated that the vegetable oil is better due to it has higher dielectric strength.

Index terms— Power transformer, Vegetable oil, Mineral oil, Dielectric strength, Visual inspection

Resumen

El objetivo de la presente investigación es evaluar las propiedades del aceite vegetal y aceite mineral utilizados como dieléctricos y refrigerantes en transformadores de potencia, equipos que son usados en la explotación de los campos petroleros, utilizando.

En base a la norma ASTM D1524, se realizó una prueba visual con cinco muestras de cada uno de los aceites, obteniendo valores promedio de 1,15 y 0,6 para el aceite mineral y aceite vegetal, respectivamente.

Los resultados obtenidos mostraron que el aceite vegetal mantiene sus propiedades durante un tiempo prolongado, lo que ayuda a la vida útil del equipo.

Para la prueba de rigidez dieléctrica según la prueba ASTM D1816, para el aceite vegetal se realizan cinco mediciones obteniendo como valores promedio 32,9, 29,6, 31,1, 30,7, 32,6; mientras que para el aceite mineral los resultados promedio de las cinco mediciones fueron de 31,2, 28,5, 29,6, 28,9, 30.

Así se demostró que el aceite vegetal es mejor al poseer mayor rigidez dieléctrica.

Palabras clave— Transformador de potencia, Aceite vegetal, Aceite mineral, Rigidez dieléctrica, Inspección visual.

Recibido: 10-05-2019, Aprobado tras revisión: 17-07-2019

Forma sugerida de citación: Quitiaquez W.; Simbaña C.; Simbaña I.; Isaza C.; Nieto-Londoño C.; Quitiaquez P.; Toapanta L. (2019) "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. 78-86

ISSN On-line: 2602-8492 - ISSN Impreso: 1390-5074

© 2019 Operador Nacional de Electricidad, CENACE

1. INTRODUCCIÓN

Debido al constante crecimiento poblacional, el consumo de energía eléctrica a nivel mundial está aumentando constantemente [1]. Un transformador eléctrico es el equipo principal dentro de un sistema de potencia eléctrica [2], ya que permite convertir un voltaje alterno principal en un voltaje alterno secundario, pero con la misma frecuencia eléctrica, garantizando la producción económica de una nación [3]. Según Hasan [4] y Delgado et al. [5], un transformador eléctrico es un dispositivo que transfiere energía eléctrica de un circuito a otro.

Radakovic et al. [6] consideran que las principales características de un aceite dieléctrico dentro de un transformador son servir como aislante eléctrico y como refrigerante, disipando el calor generado por las pérdidas en el interior del transformador hacia un agente refrigerante fuera del mismo, información corroborada según la normativa INEN [7].

Los aceites además deben combinar un alto punto de inflamación con una alta resistencia dieléctrica [8]. Para Filippini et al. [9], la conductividad eléctrica de los aceites aislantes es un parámetro importante de caracterización para aceites nuevos y para aceites en servicio de transformadores, siendo la conductividad proporcional a la densidad de electricidad de carga en el líquido en equilibrio termodinámico. La investigación realizada por Mariprasath y Kirubakaran [10], determinó que, en los transformadores, el 70 % de las fallas se presentan por el mal estado del aceite que está dentro del transformador.

La resistencia térmica entre media tensión y aceite se denota como R_{th1} , la resistencia térmica entre baja tensión y aceite es R_{th2} , el circuito magnético de resistencia térmica y aceite es R_{th3} , la resistencia térmica entre el tanque de aceite y el del transformador es R_{th4} y R_{th5} es la resistencia térmica entre el tanque del transformador y el aire, tal y como se puede visualizar en la Fig. 1 [11].

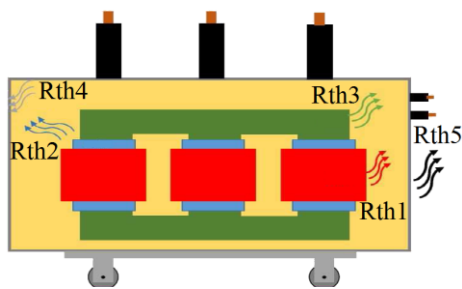


Figura 1: Esquema de pérdidas de calor en transformadores refrigerados por aceite [12]

El aceite mineral dieléctrico es el tipo de aceite más utilizado en los transformadores de potencia y distribución, por su relación costo-beneficio [13]. Los hidrocarburos constituyen una variedad de aceite mineral, que pueden separarse por destilación,

aprovechando la propiedad de que sus pesos de ebullición varían, como sus pesos moleculares [14]. Una desventaja es que presentan una baja conductividad térmica, por lo tanto, poseen una baja eficiencia de refrigeración [15].

La estimación de la vida útil de los aceites minerales utilizados en los transformadores de energía es esencial para los productores de petróleo. Dado que los transformadores de potencia son las partes más caras de un sistema de suministro eléctrico, su vida útil prevista es de varios decenios en condiciones de funcionamiento estándar [16].

Bangladesh importa la mayoría de los aceites de petróleo de Medio Oriente. Desde este punto de vista, el aceite de transformador de desechos (WTO, por sus siglas en inglés) puede ser una fuente alternativa para los aceites de petróleo [17]. El aceite dieléctrico de origen vegetal se fabrica empleando materiales renovables, como productos agrícolas, cuyas emisiones de carbono son inferiores a las del aceite mineral y fueron desarrollados comercialmente desde 1999 por una creciente preocupación hacia el medio ambiente [18]. Con los años, se obtuvieron resultados exitosos en aplicaciones potenciales de semillas, nueces oleaginosas (canola) y utilizando aceites como por ejemplo de almendra [19], de *Jatropha curcas* [20, 21], de palma [22], de coco [23, 24], de soya, de girasol y de ricino [25].

Sin embargo, el desafío que limita el uso de aceite de algunas de estas semillas y nueces es su alto punto de fluidez [26]. Para transformadores nuevos fabricados con aceite biodegradable, según Garba et al. [27], el transformador resiste temperaturas más altas que las convencionales, permitiendo ganancia en la potencia, costo y dimensión, además de aumentar la vida útil del transformador y mitigar los riesgos en los costos resultantes de eventos de explosión y fuego en el transformador [28].

Un análisis comparativo basado en investigaciones previas de las razones de biodegradación entre el aceite mineral y el aceite vegetal es expuesto en la Tabla 1.

Tabla 1: Razón de biodegradación de aceite mineral y vegetal [14]

Razones de Biodegradación					
Componente	Cooper ETV	U. de Lieja	CONCAWE	USACE	TERC
Acetate Vegetal FR3	120 % + 33 % después de 28 días	---	---	---	98 % después de 28 días
Acetate Mineral	---	70 % después de 28 días	28 % después de 28 días	42-49% después de 28 días	30,5 % después de 28 días

Se han realizado y publicado estudios sobre el uso de fluidos dieléctricos con respecto al medio ambiente [29] y varios aceites han sido patentados para este fin. La investigación realizada por Fernández et al. [30] presenta una revisión completa de fluidos alternativos para transformadores de potencia. Un punto importante, con respecto a la adopción de aceite vegetal en transformadores, es la durabilidad del papel aislante, es decir, la forma como este fluido aislante afecta la vida útil del aislamiento sólido. Bajo las mismas condiciones, el envejecimiento del papel kraft en aceite vegetal es mucho más lento que en aceite mineral convencional [31].

El objetivo de esta investigación es determinar experimentalmente cuál aceite, si el vegetal o el mineral, proporciona un mejor rendimiento en transformadores de potencia. La organización del presente manuscrito se indica a continuación. La introducción describe los transformadores de potencia citando estudios enfocados al aceite vegetal y otros al aceite mineral. En materiales y métodos se presentan las normas, rangos de aplicación, así como el procedimiento a seguir para realizar el análisis. En la sección de resultados, se comparan las muestras de los aceites, en una inspección visual y en un análisis de resistencia dieléctrica. Finalmente, en conclusiones se indica el aceite que brinda mayor rendimiento, con base a los resultados obtenidos.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

A continuación, se presentan las características técnicas de los equipos utilizados. Adicionalmente, se indican las normas utilizadas para el desarrollo experimental, así como el rango de aplicación se describe el procedimiento a seguir en cada una de ellas. La Fig. 2 indica el procedimiento a seguir para llevar a cabo la presente investigación.

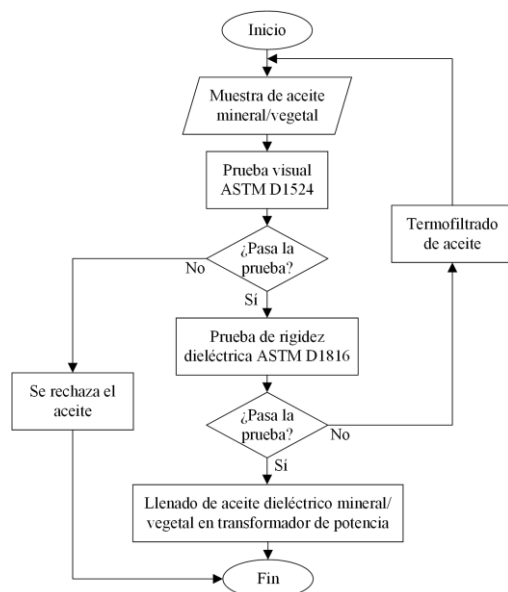


Figura 2: Diagrama de flujo del proceso investigativo

2.1. Transformadores

Para la ejecución de las pruebas se utilizaron 10 transformadores de entre 200 y 1 000 kVA de potencia. Cinco de ellos fueron llenados con aceite mineral Hyvolt II, mientras que los 5 restantes fueron llenados con aceite biodegradable Envirotemp FR3. La Fig. 3 muestra el transformador llenado con aceite biodegradable Envirotemp FR3



Figura 3: Transformador de potencia llenado con aceite biodegradable FR3 [32]

2.2. Medidor de rigidez dieléctrica

La Fig. 4 esquematiza un medidor de rigidez dieléctrica marca BAUR, modelo BPA 75C con un rango de medición de 75 kV y una división de escala de 0,1 kV. Este fue el equipo empleado para la medición de los datos.

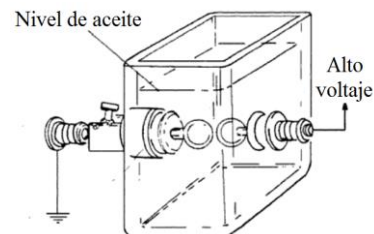


Figura 4: Medidor de rigidez dieléctrica [33]

2.3. Electrodo en forma de hongo

La Norma ASTM D-1816 especifica pruebas con electrodos tipo hongo espaciados entre sí 2,032 mm, como los presentados en la Fig. 5. Este método exige agitación y es sensible a pequeñas cantidades de contaminantes y primariamente se debe usar en aceites nuevos y usados cuando se requiere de una mayor precisión en los resultados [34].

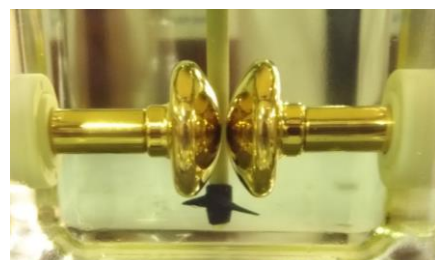



Figura 5: Electrodo tipo hongo

2.4. Procedimiento para el cálculo experimental

Según la norma ASTM D1816, este método de prueba cubre la determinación de la tensión de ruptura dieléctrica de líquidos aislantes, es decir, aceites de origen petrolífero, fluidos de silicona, aceites aislantes eléctricos de alto punto de fuego, fluidos éster sintéticos y fluidos éster naturales. Los rangos de esta norma se indican en la Tabla 2.

Tabla 2: Rangos de la norma ASTM D1816 [35]

Norma	ASTM D1816	
Electrodos	Forma	
	Tamaño de separación	2 o 1 mm
Agitamiento de la muestra de aceite	Impulsor	Sí
	Bola Magnética	Sin opción
Temperatura de prueba en laboratorio	Líquido	Se debe registrar la temperatura
	Ambiente	20 – 30 °C
Temperatura de prueba exterior	Líquido	Se debe registrar la temperatura
	Ambiente	Pruebas de arbitraje 20 – 30 °C
Voltaje de prueba	Velocidad de subida	0,5 kV·s ⁻¹
	Frecuencia	45 – 65 Hz
Rupturas	Definición	< 100 V
	Cantidad en secuencia	5
	Tiempo entre rupturas	1 a 1,5 min
Voltaje de prueba, tiempo de apagado del voltaje de prueba después de una ruptura	Normal	No especificado
	Aceite siliconado	No especificado

Este método de prueba es aplicable a líquidos aislantes comúnmente utilizados en cables, transformadores, disyuntores de aceite y aparatos similares como medio aislante y de enfriamiento [36]. El aceite se agita durante la secuencia de prueba y se especifica un impulsor de dos paletas accionado por un motor.

La norma prescribe las dimensiones y el paso del impulsor, así como la velocidad de operación que debe estar entre 200 y 300 rpm. Para evitar que el aire entre en contacto con el aceite en circulación, el vaso de prueba debe tener una cubierta o deflector [8].

La Tabla 3 presenta los límites de prueba para equipos de ensayo con fluidos de éster natural recibidos, por debajo de 230 kV antes de la activación.

De manera similar, la Tabla 4 presenta los límites de prueba para equipos nuevos, ahora con aceite mineral.

Tabla 3: Límites de prueba con éster natural [37]

Prueba y Método ASTM	Valor para clase de voltaje	
	≤ 69 kV	> 69 < 230 kV
Resistencia dieléctrica, ASTM D1816, [kV] mínimo	-----	-----
Brecha 1	25	30
Brecha 2 [mm]	45	52
Factor de disipación, ASTM D924, %, máximo 25 °C	0,5	0,5
Color, ASTM D1500 unidades ASTM, máximo	L1,0	L1,0
Examinación visual, ASTM D1524	Brillante y claro	Brillante y claro
Número de neutralización (acidez), ASTM D974, mg KOH/g, máximo	0,06	0,06
Contenido de agua, ASTM D1533, mg/kg, máximo	300	150
Punto de inflamación, ASTM D92 °C	300	300
Viscosidad cinemática, ASTM D445, mm ² ·s ⁻¹ (cSt) a 40 °C, máximo	50	50

Tabla 4: Límites de prueba con aceite mineral [38]

Prueba y Método ASTM	Valor para clase de voltaje	
	≤ 69 kV	> 69 < 230 kV
Brecha 1 [mm]	25	30
Brecha 2 [mm]	45	52
% máximo, 25 °C	0,05	0,05
% máximo, 100 °C	0,4	0,4
Color, ASTM D1500, unidades ASTM, máximo	L1,0	L1,0
Examinación visual, ASTM D1524	Brillante y claro	Brillante y claro
Número de neutralización (acidez), ASTM D974, mg KOH/g, máximo	0,015	0,015
Contenido de agua, ASTM D1533, mg·kg ⁻¹ , máximo	20	10
Tensión interfacial, ASTM D971 mN·m ⁻¹ , mínimo	38	38
Contenido de inhibidor de oxidación cuando se especifica ASTM D2668	-----	-----
Aceite tipo I, % máximo	-----	0,08
Aceite tipo I, % mínimo	-----	0
Aceite tipo II, % máximo	0,3	0,3
Aceite tipo I, % mínimo	> 0,08	> 0,08

2.5. Aumento de temperatura

El aumento de la temperatura del líquido aislante por encima de la temperatura ambiente no debe superar los 65 °C cuando se mide cerca de la parte superior del tanque principal [36].

La Fig. 6 describe el método de medición del color ASTM D1524 para combustibles que incluyen aceites lubricantes, aceites para calefacción, combustibles diésel y ceras de petróleo. La escala de colores varía entre 0,5 y 8. El valor más bajo de 0,5 es un amarillo claro, 2 es amarillo, 5 es naranja y 8 es rojo intenso [39].





Figura 6: Colores y examen visual del aceite usado ASTM D1524 [40]

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se realizó la medición de la resistencia dieléctrica, realizando cinco muestreos con cinco mediciones, tanto para el aceite mineral como para el aceite vegetal. El aceite dieléctrico, al poseer mejores resultados de rigidez dieléctrica, asegura un mejor resguardo para el equipo, protegiéndolo contra posibles cortocircuitos y sobrecargas, optimizando de esta manera el rendimiento del equipo en condiciones de trabajo forzado.

Según la norma ASTM D1816, para pruebas del aceite dieléctrico vegetal se tiene que el valor mínimo de rigidez dieléctrica para la aceptación del aceite dieléctrico vegetal es de 25 kV. Los resultados obtenidos en las cinco mediciones realizadas mostraron que el aceite sobrepasó esta barrera, ubicándose 4,58 puntos sobre la norma en su muestra más baja y 7,9 puntos sobre la norma en su muestra más alta como se indica en la Tabla 5, obteniendo un valor promedio de 6,24 puntos sobre la norma.

Tabla 5: Medición y resultados de la prueba ASTM D1816 de rigidez dieléctrica del aceite vegetal

Aceite Vegetal	Muestra 1 [kV]	Muestra 2 [kV]	Muestra 3 [kV]	Muestra 4 [kV]	Muestra 5 [kV]
Medición 1	36,1	27,2	29,6	34,5	28
Medición 2	23,9	34,6	30,5	31,2	30,6
Medición 3	38,3	31,8	31,5	26,1	35
Medición 4	42,5	36,4	28,3	33,5	43,4
Medición 5	23,7	17,9	35,5	28,1	26
Media	32,9	29,6	31,1	30,7	32,6
Promedio	31,4				

Mientras que, para pruebas del aceite dieléctrico mineral, se tiene que el valor mínimo de rigidez dieléctrica para la aceptación del aceite es de 25 kV. Por los resultados obtenidos en las cinco mediciones realizadas, el aceite sobrepasó esta barrera, con 3,5 y 6,16 puntos sobre la norma en su muestra más baja y más alta, respectivamente, con un valor promedio de 4,83 puntos sobre la norma. Estos valores se presentan en la Tabla 6.

Los resultados de las mediciones se presentan en la Fig. 7. El aceite vegetal o biodegradable obtuvo valores

de muestreo promedio mayores al mineral, así como un valor promedio de 31,38 kV. Esto quiere decir que el aceite vegetal cumple y supera los valores establecidos para la resistencia dieléctrica para transformadores por debajo de los 230 kV. Por este motivo presentó las condiciones para ser un mejor aislante eléctrico para el transformador.

Tabla 6: Medición y resultados de la prueba ASTM D1816 de rigidez dieléctrica del aceite vegetal

Aceite Vegetal	Muestra 1 [kV]	Muestra 2 [kV]	Muestra 3 [kV]	Muestra 4 [kV]	Muestra 5 [kV]
Medición 1	34,5	26	29,4	33,8	14,6
Medición 2	30,4	29,1	32,4	25,2	31,5
Medición 3	28,1	29,7	27,3	24,4	36,9
Medición 4	42,5	27,5	29,1	29,9	36,9
Medición 5	28,8	30,2	30	31,4	34,8
Media	31,2	28,5	29,6	28,9	30
Promedio	29,6				

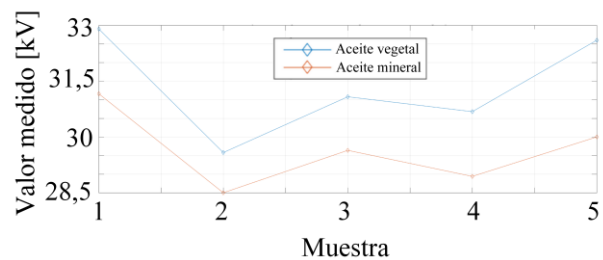


Figura 7: Medición de la prueba ASTM D1816 de rigidez dieléctrica para aceite vegetal y mineral

En las muestras obtenidas, el aceite biodegradable superó en todos los casos al aceite mineral. Los transformadores cuentan con un promedio de cuatro semanas de funcionamiento en campo. Los valores obtenidos se presentan en la Tabla 7, donde el aceite biodegradable cambió su tonalidad de aceite nuevo en dos ocasiones, con un aumento de 0,5; mientras que el aceite mineral cambió su tonalidad en cuatro ocasiones entre 0,5 y 1.

Tabla 7: Prueba visual ASTM D1524

Aceite Mineral		Aceite Vegetal	
# Muestra	Tonalidad Según Norma	# Muestra	Tonalidad Según Norma
1	1	1	0,5
2	1,25	2	1
3	1	3	0,5
4	1,5	4	0,5
5	1	5	0,5

La comparación de los resultados de la inspección visual entre los dos aceites se presenta en la Fig. 8. Esta variación en la tonalidad de ambos aceites se originó en



base al calentamiento durante su funcionamiento, y a su vez, mientras más se acerque a la tonalidad 8, indica un deterioro superior del mismo. La tonalidad 8 se presenta cuando un transformador se cortocircuita por fallas eléctricas y el aceite se mezcla con el carbono expulsado por la parte activa del mismo. La Fig. 9a presenta una muestra de aceite vegetal usado, con una tonalidad de 0,5, es decir igual al aceite nuevo. Mientras que la Fig. 9b es una muestra de aceite vegetal nuevo con una tonalidad de 0,5. Esto significa que el aceite no ha sufrido variación alguna y en conjunto con la prueba de rigidez dieléctrica se encuentra en perfecto estado para ser usado dentro de transformadores refrigerados por aceite dieléctrico.

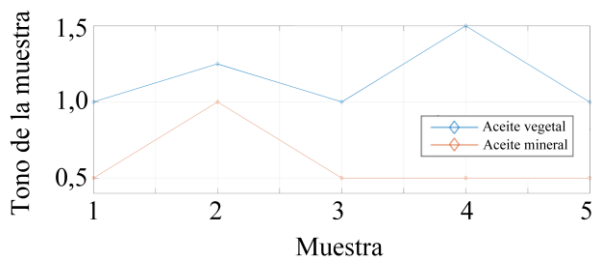


Figura 8: Medición de la prueba ASTM D1816 de rigidez dieléctrica para aceite vegetal y mineral

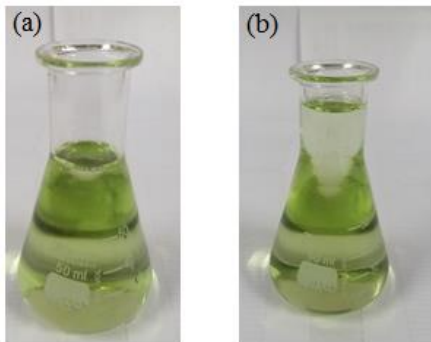


Figura 9: Muestra de aceite vegetal a) usado; b) nuevo

La Fig. 10a es una muestra de aceite mineral usado durante cuatro semanas con una tonalidad de 1,25, siendo así apto para su uso. Sin embargo, presentó un cambio de tonalidad que puede ser causado por un exceso de humedad dentro del equipo, contaminantes en la parte activa al momento de su ensamblaje o simplemente por una mala manipulación por parte del operario durante su instalación. La Fig. 10b presenta una muestra de aceite mineral nuevo con una tonalidad de 0,5. El aceite no ha sufrido variación alguna y en conjunto con la prueba de rigidez dieléctrica, se encuentra en perfecto estado para ser usado dentro de transformadores refrigerados por aceite dieléctrico. Al ser un aceite de tonalidad más clara y casi transparente, tiende a cambiar su tonalidad de manera más rápida, aunque esto no asegura que el aceite se encuentre deteriorado. Se debe respaldar los resultados del mismo con pruebas de rigidez dieléctrica para comprobar su calidad dentro del equipo.

De las muestras de elevación de temperatura en diferentes ciudades del país se tiene que tanto los transformadores llenados con aceite mineral y aceite vegetal cumplen con la norma INEN [7], es decir no superan los 65 °C sobre la temperatura ambiente. La Tabla 8 contiene la información de la elevación de temperatura de los transformadores ubicados en diferentes localizaciones.

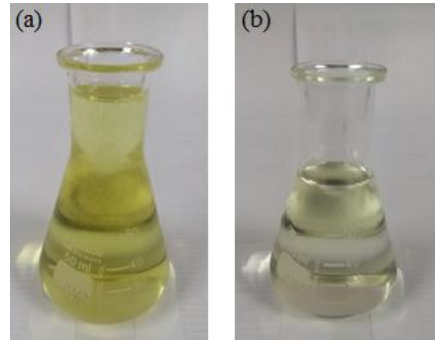


Figura 10: Muestra de aceite mineral a) usado; b) nuevo

Tabla 8: Temperatura de elevación de los transformadores en funcionamiento

Ciudad	Muestra	Temp. Amb. [°C]	Temp. total aceite mineral [°C]	Temp. total aceite vegetal [°C]
Quito	1	22	84	78
Guayaquil	2	29,8	93	89
El Coca	3	28,3	90	88
El Coca	4	24,5	85	80
El Coca	5	25,6	86	83

En equipos de la misma potencia y localizados en la misma ubicación geográfica, se determinó que los equipos llenados con aceite vegetal tienden a elevar su temperatura en promedio 57,56 °C, mientras que los equipos llenados con aceite mineral elevan su temperatura en promedio 61,56 °C durante su funcionamiento. La Fig. 11 presenta esta variación de temperatura comparando los valores obtenidos con el aceite vegetal y el mineral.

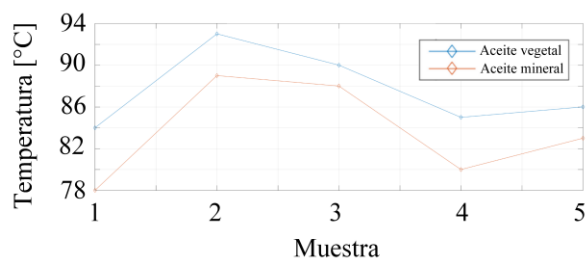


Figura 11: Temperatura de elevación de los transformadores en funcionamiento

4. CONCLUSIONES

Se desarrolló un análisis comparativo utilizando aceite mineral y aceite vegetal en transformadores de potencia mediante normas de inspección visual y de rigidez dieléctrica. De los resultados obtenidos, se presentan las siguientes afirmaciones.

En base a la norma ASTM D1524, se realizó una prueba visual con cinco muestras de aceites, vegetal y mineral. Los resultados promedios de tonalidad fueron de 1,15 para el aceite mineral y de 0,6 para el aceite biodegradable. El aceite vegetal conserva sus propiedades de tonalidad durante un período de tiempo mayor que el aceite mineral. Se puede afirmar que el aceite biodegradable, al no cambiar su tonalidad de manera significativa, permite mantener en un estado óptimo la parte activa del equipo, aumentando así la vida útil del transformador. Sin embargo, esto no significa que el aceite con más cambio de tonalidad se encuentre deteriorado, ya que el cambio en tonalidades puede darse por contaminantes durante el proceso de llenado de aceite en el equipo.

En cuanto a la prueba de rigidez dieléctrica ASTM D1816, el aceite vegetal, como promedio, se encuentra 6,24 puntos sobre la norma, mientras que el aceite mineral 4,83 puntos, en promedio sobre la norma. Considerando estos resultados, el aceite vegetal Envirotemp FR3 funciona de mejor manera como dieléctrico dentro del transformador, obteniendo un valor de 1,8 kV de resistencia dieléctrica mayor sobre el aceite mineral Hyvolt II.

En la temperatura de elevación del aceite dentro de un equipo en funcionamiento, la diferencia de temperatura de elevación en promedio fue de 61,56 y 57,56 °C para el aceite mineral y para el aceite vegetal, respectivamente. Al ser equipos de potencias similares y encontrarse en ubicaciones geográficas semejantes, se concluyó que el aceite vegetal, al ser capaz de disipar 4 °C más que el aceite mineral, es un mejor refrigerante bajo las mismas condiciones que el aceite mineral.

Los equipos llenados con aceite vegetal aumentan su vida útil al poseer mejores características de refrigeración y propiedades dieléctricas, además de sus propiedades de biodegradación, 98 y 30,5 % para el aceite vegetal y el aceite mineral, respectivamente, después de 28 días de ser derramado, siendo la mejor alternativa para cuidar el medio ambiente de posibles derrames de aceite dieléctrico y en conjunto con un desarrollo sostenible en el área petrolífera.

AGRADECIMIENTO

Este trabajo investigativo tuvo el apoyo del Área de Investigación y Desarrollo de Ingeniería Mecánica de la Universidad Politécnica Salesiana y de la Universidad Bolivariana de Medellín.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] I. Fofana, V. Wasserberg, H. Gockenbach and E. Borsi, "Challenge of mixed insulating liquids for use in high-voltage transformers," IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 18, pp. 5-16, 2002.
- [2] X. Zhang, H. Cui, J. Zhang and J. Tang, "Adsorption characteristic of Pd-4 cluster carbon nanotube towards transformer oil dissolved components: A simulation," Applied Surface Science, no. 419, pp. 802-810, 2017.
- [3] J. Corrales, Teoría, Cálculo y Construcción de Transformadores., Barcelona: Labor S.A, 1969.
- [4] M. Hasan, "Improving the cooling performance of electrical distribution transformer using transformer oil – Based MEPCM suspension," Engineering Science and Technology, an International Journal, vol. 2, pp. 502-510, 2017.
- [5] D. Fernando, Alfredo, I. Fernandez, Arroyo, A. Ortiz and M. Jose, "Study on the cooling capacity of alternative liquids in power transformers," ETSi Industriales y Telecomunicación, pp. 1-6, 2012.
- [6] Z. Radakovic, M. Jevtic and B. Das, "Dynamic thermal model of kiosk oil immersed transformers based on the thermal buoyancy driven air flow," Electrical Power and Energy Systems, vol. 92, pp. 14-24, 2017.
- [7] INEN, Transformadores de Energía – Parte 2: Elevación de Temperatura de Transformadores Sumergidos en Líquido, Quito: (IEC 60076-2:2011, IDT, 2017.
- [8] Megger, La guía de Megger sobre las pruebas de ruptura dieléctrica de aceites de aislamiento., 2011.
- [9] J. Filippini, R. Tobazéon, P. Guinic and O. Moreau, "The spontaneous ionic purification phenomenon of transformer oil: Presentation and consequences," Journal of Electrostatics, vol. 67, pp. 737-740, 2009.
- [10] T. Mariprasath and V. Kirubakaran, "A critical review on the characteristics of alternating liquid dielectrics and feasibility study on pongamia pinnata oil as liquid dielectrics," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 65, pp. 784-799, 2016.
- [11] D. Navas, H. Ramírez and D. Echeverry, "Aplicación del aceite dieléctrico de origen vegetal en transformadores eléctricos," Ingeniería y Universidad, vol. XVI, no. 1, pp. 201-223, 2012.
- [12] S. Najar, J. Tissier, S. Cauet and E. Etien, "Improving Thermal for Oil Temperature Estimation in Power Distribution," 03 Mayo 2019. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017>.

- 03.061.
- [13] P. Kopcansky, L. Tomco, K. Marton, M. Koneracka, M. Timko and I. Potokova, "The DC dielectric breakdown strength of magnetic fluids based on transformer oil," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, no. 289, pp. 415-418, 2005.
- [14] R. Villanueva, *Alternativas ecológicas para transformadores de potencia*, Lima: Víctor López Guazmán, 2012.
- [15] J. Lee, W. Lee, S. Lee and S. Lee, "Positive and negative effects of dielectric breakdown in transformer oil based magnetic fluids," *Materials Research Bulletin*, no. 47, pp. 2984-2987, 2012.
- [16] R. Polansky, P. Prosr, D. M. R. Vik and ". J. Pihera, "Comparison of the mineral oil lifetime estimates obtained by differential scanning calorimetry, infrared spectroscopy, and dielectric dissipation factor measurements," *Thermochimica Acta*, no. 647, pp. 86-93, 2017.
- [17] N. Nabi, S. Akhter and A. Rahman, "Waste transformer oil as an alternative fuel for diesel engine," *Procedia Engineering*, vol. 5, no. 56, pp. 401-406, 2013.
- [18] J. Echeverry, *Transformadores clase alta temperatura*, 2016.
- [19] A. Abdelmalik, *The Feasibility of Using a Vegetable Oil-Based Fluid as Electrical Insulating Oil*, 2012.
- [20] Z. Garba, G. C.E. and P. Emmanuel, "Production and characterisation of biobased transformer oil from jatropha curcas seed," *Journal of Physical Science*, vol. 24, no. 2, pp. 49-61, 2013.
- [21] N. Zaharaddeen, C. Emmanuel and P. Emmanuel, "Production and Characterisation of Biobased Transformer Oil from Jatropha Curcas Seed," *Journal of Physical Science*, vol. 24, no. 2, pp. 49-61, 2013.
- [22] M. Mentik, A. Agu, P. Onyelucheya and O. Ejikeme, "Chemically improved Terminalia catappa L. oil: A possible renewable substitute for conventional mineral transformer oil," *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 5, pp. 1107-1118, 2017.
- [23] M. Usman, O. Olanipekun and U. Henshaw, "A comparative study of soya bean oil and palm kernel oil as alternatives to transformer oil," *Journals of Emerging Trends in Engineering and Applied Sciences*, vol. 3, pp. 33-37, 2012.
- [24] A. Sulaeman, S. Sudirham and S. A. Rajab, "A Comparison of Dielectric Properties of Palm Oil with Mineral and Synthetic Types Insulating Liquid under Temperature Variation," *ITB Journal*, vol. 43, no. 3, pp. 191-208, 2011.
- [25] A. Olawuni and I. Adejumbi, "Breakdown voltage characteristics of castor oil as alternative to transformer insulation oil," *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 2, no. 4, pp. 31-37, 2017.
- [26] Z. Shah and Q. Tahir, "Dielectric properties of vegetable oils," *Journal Science Resource*, vol. 3, no. 3, pp. 481-492, 2011.
- [27] Envirotemp, *Tecnología del Fluido Dieléctrico Envirotemp FR3: Nueva norma IEEE de Aislamientos de Altas Temperaturas*, 2013.
- [28] J. Piñeros, *Fluidos Esteres, Una Solución Innovadora para Transformadores de Potencia*, Chile, 2015.
- [29] T. Oomen, C. Claiborne and M. J.T., "Biodegradable Electrical Insulation Fluids," *Electrical Insulation Conference*, Rosemont, pp. 465-468, 1997.
- [30] I. Fernández, A. Ortiz, F. Delgado, C. Renedo and S. Péres, "Comparative evaluation of alternative fluids for power transformers," *Electric Power Systems Research*, no. 98, pp. 59-69, 2013.
- [31] A. Granero, "IMSE Ingeniería," 05 Mayo 2019. [Online]. Available: imseingenieria.blogspot.com.es.
- [32] Promelsa, "Transformadores de Distribución," 08 Mayo 2019. [Online]. Available: <http://www.promelsa.com.pe/pdf/cat-transformadores-promelsa.pdf>.
- [33] RVR Transformadores, "Medición de Rigidez Dieléctrica del Aceite," Quito, 2016, pp. 1-11.
- [34] O. Fonseca, *Ensayos al Aceite Dieléctrico*, Carabobo, 2009.
- [35] IEEE Standard Association, *IEEE C57.12.00-2015 - IEEE Standard for General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers*, New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2010.
- [36] SAI Global Limited, "ASTM D1816: 2012," 05 Mayo 2019. [Online]. Available: <https://infostore.saiglobal.com/store/details.aspx?ProductID=1545400>.
- [37] Neta World, *Standard for Acceptance Testing Specifications for Electrical Power Equipment and Systems*, USA: International Electrical Testing Association, 2009.
- [38] Neta World, *Standard for Maintenance Testing Specifications for Electrical Power Equipment*

and Systems, USA: International Electrical Testing Association, 2011.

- [39] G. Wave, "Guided Wave," 13 Abril 2019. [Online]. Available: <http://guided-wave.com/general-documents/>.
- [40] Britransformadores S.A., "Diagnóstico de Laboratorio," 17 Noviembre 2018. [Online]. Available: <http://britransformadores.com/diagnostico-de-laboratorio-2.html>.



William Quitiaquez. - Nació en Quito en 1988. Recibió su título de Ingeniero Mecánico de la Universidad Politécnica Salesiana en 2011; de Magister en Gestión de Energías de la Universidad Técnica de Cotopaxi, en 2015; de Magister en Ingeniería de la Universidad Pontificia Bolivariana de Medellín, en 2019. Actualmente, obtuvo la distinción de Candidato a Doctor en la Universidad Pontificia Bolivariana de Medellín, y su campo de investigación se encuentra relacionado Fuentes Renovables de Energía, Transferencia de Calor y Simulación.



Andrés Simbaña[†]. - Nació en Quito en 1993. Recibió su título de Ingeniero Mecánico de la Universidad Politécnica Salesiana en 2019. Lamentablemente, falleció en mayo del 2019. Trabajaba en ACV Transformadores.



Isaac Simbaña. - Nació en Quito, Ecuador en 1990. Recibió su título de Ingeniero Mecánico de la Universidad Politécnica Salesiana en 2018. Sus campos de investigación están relacionados a Procesos de Manufactura, así como el estudio de Termodinámica y Fuentes Renovables de Energía.



César Isaza-Roldán. - Nació en Medellín en 1972. Recibió su título de Ingeniero Mecánico de la Universidad Pontificia Bolivariana en 1996; su Doctorado en Ingeniería de la Universidad Pontificia Bolivariana, en 2009. Su campo de investigación se

encuentra relacionado con Refrigeración y Fuentes Renovables de Energía.



César Nieto-Londoño. - Nació en Medellín en 1978. Recibió su título de Ingeniero Mecánico de la Universidad Nacional de Colombia en 2003; de Magister en Ingeniería Energética de la Universidad de Antioquia; su Doctorado en Ingeniería de la Universidad Pontificia Bolivariana de Medellín, en 2012. Su campo de investigación se encuentra relacionado a Simulación, Termodinámica y Transferencia de Calor.



Patricio Quitiaquez. - Nació en Quito en 1969. Recibió su título de Ingeniero Mecánico de la Universidad Politécnica Nacional de Ecuador en 2002; de Magister en Gestión de la Producción de la Universidad Técnica de Cotopaxi, en 2007. Su campo de investigación se encuentra relacionado con Gestión de Operaciones, Diseño Estructural, Procesos de Manufactura y Simulación.



Fernando Toapanta. - Nació en Quito en 1986. Recibió su título de Ingeniero Mecánico de la Universidad Politécnica Salesiana en 2012; de Magister en Gestión de Energías de la Universidad Técnica de Cotopaxi, en 2016. Actualmente, se encuentra cursando sus estudios de Doctorado en la Universidad Pontificia Bolivariana de Medellín, y su campo de investigación se encuentra relacionado la Mecánica de Fluidos, Termodinámica y Simulación.