



DOI: 10.5377/revminerva.v6i2.17082

Nota Técnica | Technical Report

Análisis Comparativo del uso de aceite mineral y aceite vegetal en transformadores de distribución

Comparative Analysis of the Use of Mineral Oil and Vegetable Oil in Distribution Transformers

Amigdael Osmir Calderón Cerna¹

Juan Ernesto Pérez Lúe¹

Ramiro Moisés Pérez Mendoza¹

Kevin Rolando Sánchez Yescas¹

Armando Martínez Calderón¹

Correspondencia:
armando.martinez@ues.edu.sv

Presentado: febrero de 2023
Aceptado: septiembre de 2023

¹ Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de El Salvador

RESUMEN

El uso de aceite como aislante dieléctrico es parte fundamental del funcionamiento y vida útil de los transformadores. La función más importante que debe desarrollar un aceite dieléctrico es la de enfriamiento y disipación del calor generado durante la operación de los transformadores, siendo el aceite mineral, el tradicionalmente usado en este tipo de aplicaciones. Sin embargo, en la actualidad se han empezado a desarrollar aceites de tipo vegetal que resultan atractivos debido a su alta biodegradabilidad y punto de inflamación. Este artículo está elaborado de la siguiente manera: primero se realiza una breve descripción del aislamiento usado en el transformador, en la segunda parte se presentan las características químicas, físicas y eléctricas que debe poseer un aceite para que realice su función de manera efectiva. Finalmente se presenta un análisis de los resultados de la transferencia de calor de ambos tipos de aceites.

Palabras clave: Aceite vegetal, aceite mineral, seguridad medio ambiental, transformador.

ABSTRACT

The use of oil as dielectric insulator is a fundamental part of the operation and useful life of transformers. The most important function that a dielectric oil must develop is the cooling and dissipation of heat generated during the operation of transformers, being mineral oil the one traditionally used in this type of applications. However, nowadays vegetable oils have started to be developed, which are attractive due to their high biodegradability and flash point. This article is elaborated as follows: first, a brief description of the insulation used in the transformer is given. In the second part, the chemical, physical and electrical characteristics that a given oil must have in order to perform its function effectively are presented. Finally, an analysis of the heat transfer results of both types of oils is presented.

Keywords: Vegetable oil, mineral oil, environmental safety, transformer.

INTRODUCCION

Los transformadores de distribución tienen una gran presencia en las redes eléctricas, por ello resulta importante que se desempeñen adecuadamente y tengan un amplio periodo de funcionamiento. Por tanto, es de suma importancia realizar un óptimo diseño que le permita realizar sus principales funciones de la mejor manera. El fluido ampliamente utilizado como aislante dieléctrico es el aceite mineral, debido a que posee buenas características físicas, químicas y eléctricas, tales como la viscosidad, la cual permite realizar mejor su función de transferencia de calor de las bobinas hacia el exterior (RTE de Mexico, 2013). Sin embargo, en la actualidad se ha empezado a utilizar aceite vegetal en transformadores de distribución que además de ser un fluido altamente biodegradable (amigable con el medioambiente) también posee un alto punto de inflamación, lo cual lo hace ideal para su uso en condiciones severas de operación donde las temperaturas alcanzan valores muy altos. El aceite vegetal parece ser el sustituto ideal del aceite mineral (Revista Electricidad, 2018). No obstante, se necesita seguir realizando estudios que permitan comprobar su funcionamiento en distintas condiciones de operación.

Aislamiento usado en transformadores

El aceite en los transformadores sirve como aislante y refrigerantes. Su mecanismo de operación es impregnar el papel que envuelve el cobre de las bobinas en el transformador y transportar el calor generado en este punto por las variaciones de corrientes, al exterior. El aceite evita la formación de arcos eléctricos. La ruptura eléctrica de los gases acompañados por la descarga y la ionización resultante, conocida como corona, protege al equipo frente a descargas eléctricas en su interior, mismas que pueden dañar la aislación, sus partes, o en el peor de los casos, provocar una pérdida total del transformador.

Los transformadores están constituidos principalmente por dos sistemas de aislamiento; el sólido y el líquido. El líquido es un aislamiento de fácil mantenimiento y tratamiento para la recuperación de sus propiedades, de hecho, si está muy deteriorado se podrá sustituirlo con un costo moderado. Además, el aceite actúa como elemento refrigerante conduciendo el calor desde la parte activa del transformador, núcleo y arrollamiento, hacia el exterior. Sin embargo, el aislamiento sólido es el encargado de recubrir el cobre del interior del transformador, por lo que no es pensable la sustitución del mismo o tratarlo.

La no accesibilidad del aislamiento sólido del transformador hace más complicado el diagnóstico, por lo que dicho diagnóstico se realiza por medio del aceite aislante (aislante líquido). El estado de envejecimiento de un transformador es de vital importancia para poder planificar su sustitución. Si un transformador se pone fuera de servicio antes de tiempo se está desaprovechando dicha máquina, lo que supone usos de recursos poco eficientes. Si, por el contrario, no fuese retirado de servicio un transformador que está al final de su vida útil se correrá los riesgos de fallos y a causa del mismo puede conllevar a perjuicios económicos ya sea por reclamos de usuarios o multas, entre otros. El conocimiento de la vida de un transformador no es algo simple ya que la pérdida de vida depende de muchos factores tal como la calidad de fabricación, calidad de mantenimiento, temperatura ambiente, grado de carga, etc (Martínez Amaya et al., 2014).

Así, teniendo un buen seguimiento continuo y adecuado de mantenimiento dará como resultado un aproximado de su estado y de esta manera poder prestar a sus usuarios, un servicio de energía eléctrica que cumpla con los índices o indicadores de calidad exigidos por las normas de la SIGET. Esto lleva a poner una particular atención al estado del transformador y a sus aislantes, especialmente al aislante líquido, ya que a través de él se puede dar cuenta del

buen o mal funcionamiento que presente el transformador, y así poder prevenir futuras fallas o perturbaciones a los usuarios, también así poder prever el reemplazo del mismo (Martínez Amaya et al., 2014).

Aislamiento sólido

El sistema de aislamiento sólido, de los transformadores de potencia sumergidos en aceite, está constituido por papel Kraft y Carton Prensado (o pressboard), y debido a su función se considera la parte más importante del sistema de aislamiento, ya que separa los devanados en la parte activa, los cuales si sufren degradación reducen considerablemente la vida útil del transformador. El aislamiento sólido está diseñado a base de celulosa tratados por el método Kraft, el cual es un proceso que consiste en la cocción de troncos de madera con una solución alcalina de sulfato de sodio e hidróxido de sodio, usando el primero como solución catalizadora, y de este procedimiento resultan papeles térmicamente mejorados para usarse como aislamientos sintéticos, que en general poseen diferentes espesores y densidades acordes a los esfuerzos dieléctricos y mecánicos a los que son sometidos durante la operación del transformador. Su función en la operación del transformador es aislar las partes metálicas con tensión, dividir los espacios de aceite en volúmenes más pequeños aptos para soportar mayores gradientes de campo y soportar mecánicamente los conductores y arrollamientos con el resto de la estructura (RTE de México, 2013).

El aislamiento sólido también se utiliza para formar sistemas de barreras divisorias en el aceite, dividiendo el espacio entre arrollamientos en canales y aumentando así la rigidez dieléctrica del aceite en los canales. El aislamiento a partir de pura celulosa "Kraft" proporciona excelentes características de impregnación de aceite, por lo tanto un excelente rendimiento en los campos eléctricos, tiene una buena estabilidad geométrica en aceite, es fácil de moldear, de alta densidad, uniforme, alta rigidez mecánica,

buena flexibilidad, alta rigidez dieléctrica (mayor que la del aceite mineral), resistencia térmica, buena transferencia de calor, y es con mucho, el aislamiento sólido más económico para la refrigeración en aceite de transformadores de potencia (Martínez Amaya et al., 2014).

Clasificación de los aislamientos sólidos

Aislamientos delgados y calientes (Martínez Amaya et al., 2014). Son los aislamientos que están en contacto directo con los conductores y suelen estar constituidos por papel Kraft, por lo que son los aislamientos menos densos. En total suponen alrededor de un 20 % de la masa total del aislamiento sólido. Su temperatura se mantiene próxima a la del conductor, y se estima que un 5 % de ellos está a una temperatura próxima a la del punto caliente (Martínez Amaya et al., 2014).

Aislamientos delgados y fríos

Dentro de esta categoría se clasifican todos los cartones prensados, y en general todos los elementos dieléctricos de los arrollamientos que no están en contacto directo con los conductores. La temperatura de estos aislamientos es similar a la del aceite. Los aislamientos delgados y fríos tienen una densidad entre media y baja. Suponen entre el 20 % y el 30 % de la masa total del aislamiento sólido (Martínez Amaya et al., 2014).

Aislamientos gruesos

Son las piezas celulósicas utilizadas para sujetar mecánicamente los conductores. Representan alrededor del 50 % de la masa total de aislamiento sólido. Están constituidos por materiales celulósicos de elevada densidad y suelen presentar temperaturas más reducidas que otras zonas del transformador (Martínez Amaya et al., 2014).

Envejecimiento del papel aislante

El proceso de envejecimientos del papel es esencialmente una despolimerización (Piñeros, 2015). Cuando los vínculos entre las unidades, en las cadenas de celulosa, se rompen, el grado

de polimerización y la resistencia mecánica se reducen.

Cuando se obtiene el papel, este presenta un grado de polimerización (DP) aproximadamente de 1200. Después de pasar por el proceso de secado en la fábrica este DP se reduce a 1000 con un contenido en agua de 0,5 %, comúnmente cuando el DP a caído cerca del 200, La resistencia a la tracción se reduce en torno a un 20 % de su valor original. La resistencia a la tracción mecánica del papel depende de su grado de polimerización. Por debajo de un grado de polimerización de 200 no se garantiza que el transformador sea capaz de soportar los esfuerzos de repulsión de cortocircuitos y el transformador debe destruirse. En un transformador de potencia se producen muchos procesos de envejecimiento debido a factores internos que se dan cuando el transformador está en servicio. El aislamiento sufre principalmente por reacciones químicas tales como pirolisis (degradación térmica), la oxidación (oxígeno en el aislante) y la hidrólisis (humedad) (Martínez Amaya et al., 2014).

Aplicaciones de líquidos aislantes en transformadores

En la actualidad hay varios tipos de fluidos empleados como medio aislante en transformadores de distribución y potencia, en la Tabla 1 se muestra un resumen de la aplicación de líquidos aislantes en transformadores (Piñeros, 2015).

Tabla 1

Grado de uso de aceites aislantes

Transformadores	Aceite Mineral	Siliconas	Ésteres Sintéticos	Ésteres Naturales (aceites vegetales)
Potencia	USADO	NO USADO	USADO	USADO
Distribución	USADO	USADO	USADO	USADO
Medición	USADO	NO USADO	NO USADO	NO USADO

Nota. Tomado de SIGET (2003)

Propiedades físico-químicas

La Tabla 2 permite comparar de manera rápida las propiedades físico-químicas de especial relevancia para un fluido aislante de un transformador.

Color

El color del aceite vegetal generalmente es verde y el aceite mineral es transparente; ambos cambian según los años de servicio, el verde es amigable con el medio ambiente, el fabricante lo presenta como biodegradable, que no necesita un proceso complejo para el desecho con respecto al aceite mineral.

Composición química

Se puede señalar que el aceite mineral es una mezcla compleja de hidrocarburos producida a partir de destilación del petróleo. En cambio, tanto el aceite de silicona como los ésteres sintéticos son productos químicos: el aceite de silicona consiste en una mezcla de polímeros inorgánicos-orgánicos y los ésteres sintéticos se forma por la unión química de un alcohol con un ácido graso. Esta última reacción química se produce también en los ésteres naturales, que se obtienen por refinado de una amplia variedad de aceites (soya, colza, aceite de girasol) (Cicuéndez Simonneau, 2012).

Seguridad medioambiental

Los líquidos aislantes con una biodegradabilidad elevada y baja toxicidad son considerados como amigables con el medioambiente. Estos dos

Tabla 2

Principales propiedades de los líquidos aislantes

Nombre	Aceite mineral	Aceite de silicona	Éster sintético	Éster natural
Tipo	Destilado del petróleo	Sintético	Sintético	Aceite vegetal refinado
Componentes principales	Mezcla compleja de hidrocarburos	Siloxanos o polisiloxanos polimerizados	Un poliol con ácidos carboxílicos naturales o sintéticos enlazados	Cadena central de glicerol con 3 ácidos grasos naturales enlazados
Fuente	Petróleo	Producto químico	Producto químico	Extraído de cultivos
Biodegradabilidad	Muy baja	Muy Baja	Muy alta	Muy alta
Estabilidad frente a la oxidación	Aceite de silicona (Exc.) > éster sintético (Exc.) > aceite mineral (Buena) > éster natural (susceptible)			
Tra de inflamación °C	160-170	>300	>250	>300
Tra de ignición °C	170-180	>350	>300	>350
Clasificación frente al fuego (IEC 61100)	O	K3	K3	K2
Saturación de agua a Ambiente (ppm)	55	220	2600	1100
Viscosidad	Aceite mineral < silicona baja viscosidad < éster sintético < silicona < éster Natural			

Nota. Tomado de Huillca Cameron (2015)

factores son importantes cuando se considera el uso de líquidos aislantes en áreas donde el ambiente no es normal e intervienen otros factores. Los ésteres naturales y sintéticos están clasificados como biodegradables y no dañinos para el medioambiente, mientras los aceites minerales y silicona tienen más baja la biodegradación y más nocivos para el medioambiente (Cicuéndez Simonneau, 2012).

Oxidación

La estabilidad de los líquidos aislantes frente a la oxidación es un aspecto clave, ya que esta puede modificar las propiedades físico-químicas (propiedades dieléctricas, capacidad de corrosión, viscosidad, etc) de los fluidos,

afectando negativamente el funcionamiento del transformador. En el aceite de silicona químicamente inerte tiene buena resistencia a la oxidación. Este proceso se produce muy lentamente y a temperaturas mayores de 175 °C no generándose ácidos ni lodos peligrosos. En cambio, en el caso de los ésteres sintéticos, el proceso se produce con temperaturas de 125 °C en adelante, generándose además ácidos orgánicos. Por lo que respecta al aceite mineral, se comienza a oxidar y volatilizar con temperaturas superiores a 105 °C, produciéndose muchos subproductos resultados de la degradación, entre ellos ácidos orgánicos y lodos. Estos subproductos pueden reducir las propiedades

dieléctricas del líquido aislante y corroer los metales. Por último, los ésteres naturales son los más susceptibles a la oxidación, dependiendo su grado de estabilidad de su composición química. No obstante, independientemente de su composición, esta reacción produce líquidos gelatinosos y otros productos (alcoholes, ácidos, etc.) que aumentan además su viscosidad, reduciendo así su capacidad refrigerante (Cicuéndez Simonneau, 2012).

Punto de Inflamación

Para determinar el punto de inflamación se aplica la norma ASTM D 92 en esta característica el valor cambia drásticamente, el menor valor lo presenta el aceite mineral permitido de 145 °C y el mayor valor lo tiene el aceite vegetal permitido de 275 °C. Los fabricantes ponen mucho énfasis en esta característica, que a simple vista se observa que la temperatura del líquido inflamable la soporta mejor el aceite vegetal en ambientes donde la temperatura es alta.

Seguridad contra incendios

La seguridad contra incendios desempeña un papel clave en aplicaciones específicas, por ejemplo, ambientes susceptibles a explosiones y fuego, que pongan en riesgo la vida humana o generar elevados costes económicos. Así son los líquidos alternativos, nos ofrecen una mayor ventaja por su alto grado de seguridad contra incendios (Clase K) gracias a su baja susceptibilidad al fuego (Tabla 3-5). Además, esto supone que las instalaciones dotadas con estos fluidos tengan menores costes de instalación y mantenimiento de los equipos de seguridad, que su riesgo de incendio sea mucho menor en caso de fallo eléctrico importante (IEC 61100) y que producido no sea tóxico y de baja densidad.

Propiedades de los Fluidos

Contenido de agua

El contenido de agua es de las características más importantes para ambos tipos de aceites la norma ASTM 1533 permite valores de 35

Tabla 3

Punto de flameo, Clasificación de los Fluidos según IEC-61100

Clase	punto de fuego
O	≤ 300°C
K	> 300°C
L	NO MEDIBLE

Nota. Tomada de Piñeros (2015)

Tabla 4

Poder calorífico

Clase	Valor neto calorífico
1	≥ 42 MJ/Kg
2	≤ 42 MJ/kg ≥ 32 MJ/Kg
3	< 32 MJ/Kg

Nota. Tomada de Piñeros (2015)

Tabla 5

Propiedades de los líquidos aislantes

Tipo De Fluido	Punto de Inflamación °C	Punto de Fuego °C	Clase
Aceite Mineral	160 – 170	170 - 180	O
Fluido de Silicona	>300	>350	K3
Ester Natural	>300	>350	K2
Ester Synthetic	>250	>300	K3

Nota. Tomada de Piñeros (2015)

ppm para aceites minerales y el valor asciende para aceites vegetales a 200 ppm, destacar que el aceite vegetal retiene más contenido de agua, los fabricantes presentan esto como ventaja, debido a que aumenta la vida útil del aislamiento sólido.

Solubilidad del agua

Los ésteres sintéticos y naturales, por su mayor grado de polaridad, son capaces de disolver mayor cantidad de agua que los aceites minerales y de silicona. Esta propiedad es clave

para determinar la tensión de ruptura de estos fluidos (Cicuéndez Simonneau, 2012).

Humedad de saturación

Los ésteres tienen límites mucho más altos de saturación en todas las temperaturas que el aceite mineral.

En condiciones normales, la saturación de agua de los aceites ésteres naturales es de 5 a 8 veces más que la de aceites minerales. Los ésteres tienen una mayor afinidad por el agua que el aceite mineral. En los sistemas éster/papel, el papel retiene menos agua que en sistemas aceite mineral/papel (Piñeros, 2015).

Los transformadores llenos con ésteres permitirán la reducción del tiempo de secado en las unidades en campo usando secado por aceite caliente. El límite permisible de humedad en los aceites éster puede ser mucho mayor que el permitido para el aceite mineral (Figura 1).

Viscosidad

La viscosidad de un fluido juega un papel clave en la determinación de su capacidad de refrigeración. Salvo el aceite de silicona de

baja viscosidad, el resto de fluidos alternativos son más viscosos que el aceite mineral. Como consecuencia, su capacidad de refrigeración será menor, aumentando la temperatura de funcionamiento del transformador. Además, la impregnación de los aislantes de celulosa durante el proceso de fabricación del transformador se verá dificultada por esa alta viscosidad.

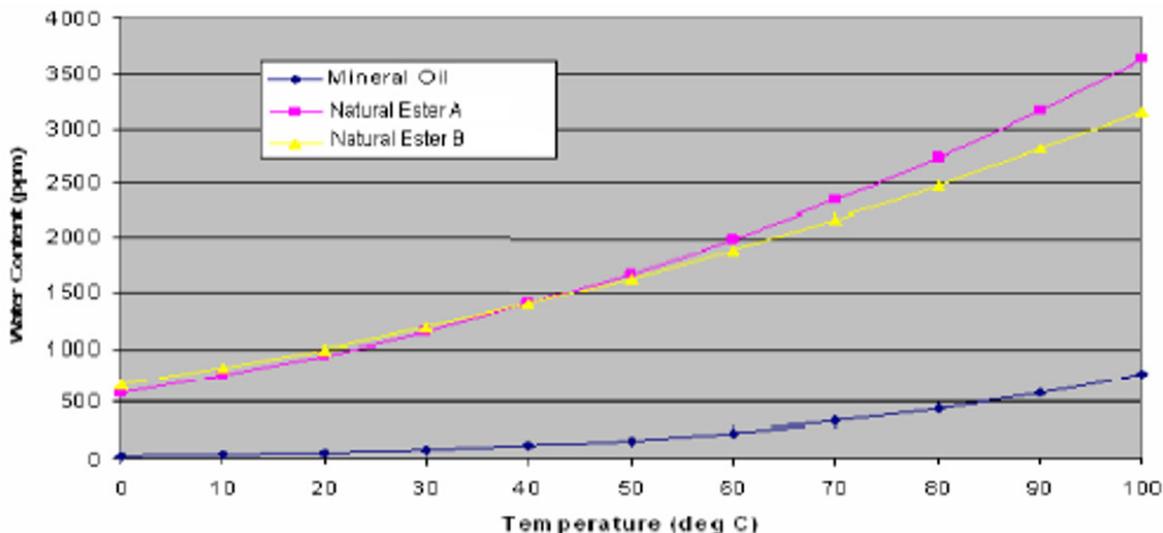
La viscosidad cinemática es una característica que presenta un valor significativo en el cambio de aceite, pues los valores presentan un aumento, para aceites vegetales a temperatura normal de operación, en un rango que varía desde los $31 \text{ mm}^2/\text{s}$ hasta alcanzar valores de $42 \text{ mm}^2/\text{s}$ en relación con aceites minerales que presentan valores de $9 \text{ mm}^2/\text{s}$ hasta valores máximos de $12 \text{ mm}^2/\text{s}$. Se puede observar que los aceites vegetales tienen una mayor viscosidad que puede presentar problemas al desarrollar la función de refrigeración con respecto al aceite mineral.

Densidad Relativa

La densidad relativa no presenta un cambio significativo los valores mantienen un margen

Figura 1

Temperatura de saturación de líquidos aislantes



Nota. Tomada de Piñeros (2015)

que permanece en valores cercanos a 0.9 para ambos tipos de aceites los cuales cumplen con la norma ASTM1298 que permite un valor máximo para aceite vegetal de 0.96 a una temperatura de 15 °C.

Miscibilidad

La miscibilidad (Tabla 6) de los líquidos alternativos, con el aceite mineral y entre sí, es una propiedad importante al momento de proceder a la sustitución de uno de ellos: el procedimiento de lavado del transformador será más eficaz si el líquido usado es miscible con el líquido sustitutivo. Esto no quiere decir que un procedimiento de rellenado pueda llevarse a cabo con fluidos inmiscibles, pero sí debería tenerse más cuidados en estos casos.

A temperatura ambiente, tanto los ésteres como el aceite de silicona son miscibles con el aceite mineral. En cambio, los ésteres no son miscibles con aceite de silicona. Pequeñas cantidades de aceite de silicona en los ésteres puede causar la formación de espuma.

Biodegradabilidad

Los transformadores inmersos en aceite vegetal, los derrames de aceite vegetal pueden ser eliminados a través de medios normales y no se tratan como residuos tóxicos (Figura

2). También ofrece un descarte potencial de sanciones gubernamentales y costosos procedimientos de limpieza ocasionados por derrames. Reducen al mínimo la contaminación del aire durante la combustión.

Beneficios Expectativa de Vida

Menor envejecimiento de la celulosa las pruebas realizadas con aceite vegetal han mostrado una más baja tasa de envejecimiento en comparación con el papel impregnado de aceite mineral que lleva a un aumento de la vida útil del sistema de aislamiento, por lo tanto, en la vida útil del transformador (Figura 3 y 4).

Propiedades eléctricas

Con relación a las propiedades eléctricas, la mayoría de los parámetros que se estudian buscan caracterizar desde el punto de vista dieléctrico estos fluidos.

Tensión de ruptura

Se puede determinar la tensión de ruptura de estos líquidos. Generalmente deben de cumplir con el nivel de aislamiento requerido para garantizar que no exista la formación de arcos eléctricos que involucren las partes internas del transformador que le puedan causar daños. Así como la celulosa impregnada en el papel,

Tabla 6

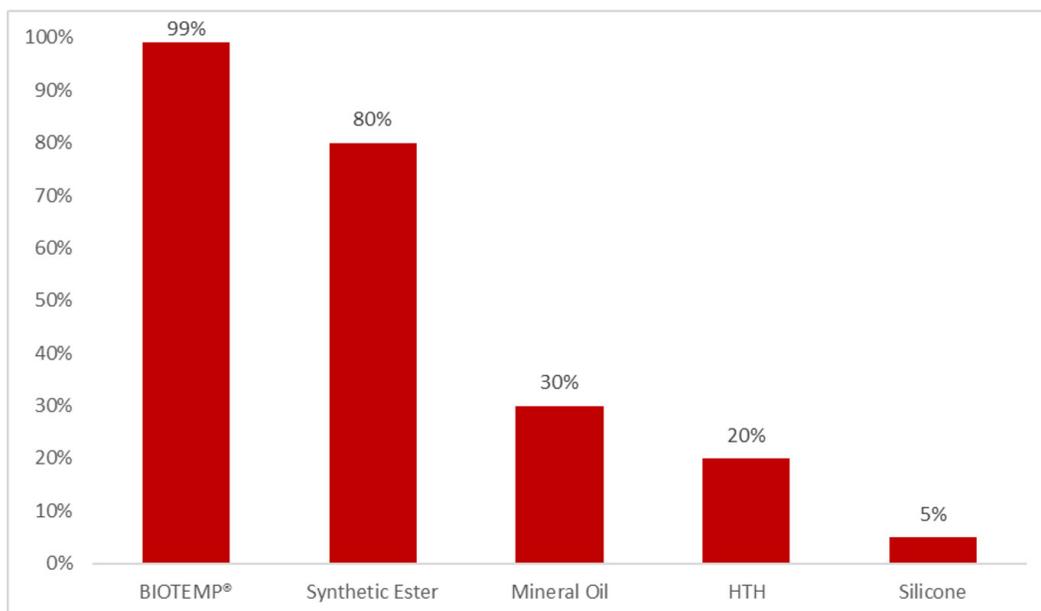
Miscibilidad entre líquidos aislantes a temperatura ambiente

	Aceite Mineral	Aceite de Silicona	Éster Sintético	Éster Natural
Aceite Mineral	X	Miscible	Miscible	Miscible
Aceite de Silicona	Miscible	X	No Miscible	No Miscible
Éster Sintético	Miscible	No Miscible	X	Miscible
Éster Natural	Miscible	No Miscible	Miscible	X

Nota. Tomada de Piñeros (2015)

Figura 2

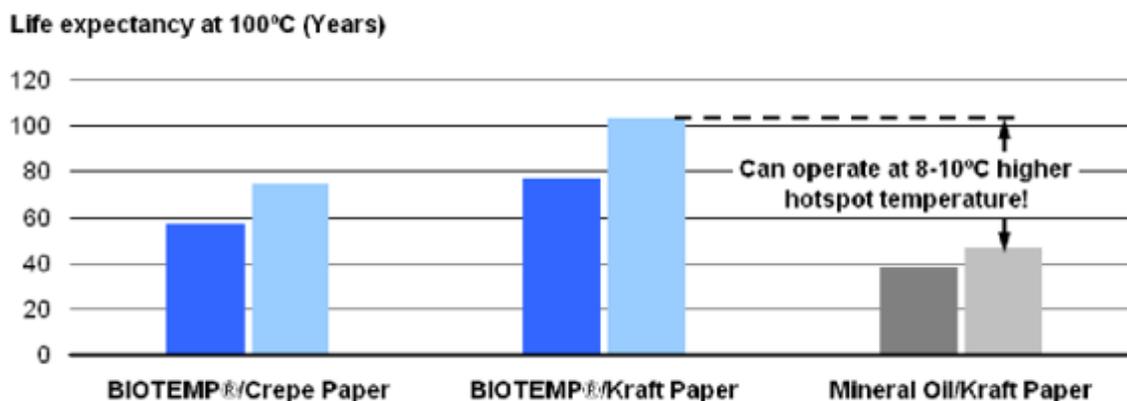
Biodegradabilidad de los líquidos aislantes



Nota. Tomada de Piñeros (2015)

Figura 3

Expectativa de vida en años



Nota. Tomada de Piñeros (2015)

mediante la realización de numerosas pruebas de acuerdo a normas internacionales. En la siguiente tabla se presenta un comparativo resumen de los valores obtenidos de las hojas técnicas de los diferentes fluidos de este parámetro (Tabla 7).

Rigidez dieléctrica en pruebas de impulso

En cuanto a la rigidez dieléctrica en pruebas de impulso entre el aceite mineral y vegetal, la norma ASTM D 3300 permite para el aceite mineral un valor de 145 kV y para el aceite

Figura 4

Estudios de envejecimiento del papel Kraft



Nota. Tomada de Piñeros (2015)

vegetal disminuye el valor a 130 kV, ambos presentan valores aceptables. En esta parte juega un papel importante el contenido de humedad ya que puede producir un efecto de conducir la electricidad debido a la disminución de la distancia entre el agua y otras partes que en este punto conducen y puede saltar el arco de un lugar a otro.

Análisis del comportamiento térmico del transformador monofásico tipo poste sumergido en aceite dieléctrico vegetal y mineral

Transferencia de calor por Conducción

La conducción puede definirse como la propagación de energía en un medio sólido, líquido o gaseoso, mediante comunicación molecular directa o entre cuerpos a distintas temperaturas. El medio a través del cual la conducción ocurre en forma íntegra es en el sólido. En los medios líquido o gaseoso, a menos que se esté prácticamente con cero energías cinéticas en las moléculas, el impacto de la conducción en la transferencia de calor es mínimo. En este caso, la convección es el mecanismo de transferencia más significativo.

De acuerdo con la segunda ley de la termodinámica, al tenerse la situación anterior, la transferencia de calor se llevará a cabo desde la región con la temperatura mayor hacia la región con la temperatura menor. La ecuación más básica para la conducción de calor, conocida como la ley de Fourier de conducción de calor, establece que la cantidad de calor por unidad de área que fluye de un punto a una temperatura T1, a otro con una temperatura T2, en la dirección X.

Tabla 7

Comparación de las tensiones de ruptura de líquidos aislantes

Normas	Líquido aislante				
	Aceite mineral	Éster sintético	Ester natural	Aceite de silicona	Aceite de silicona baja viscosidad
IEC60156	>70 kV	>75 kV	>75 kV	50 kV	70 kV
ASTM1816 1mm	*	*	37 kV	*	*
ASTM1816 2mm	60 kV	56 kV	56 kV	*	*
ASTM D877	55 kV	43 kV	45 kV	43 kV	*

Transferencia de calor por convección

Es un proceso de transporte de energía que se lleva a cabo como consecuencia del movimiento de un fluido (líquido o gas) y está íntimamente relacionado con su movimiento. Generalmente, el movimiento del fluido es en dirección paralela a una superficie sólida, a través de la cual, el fluido cede o absorbe calor. Para que exista el flujo de calor, debe haber una diferencia de temperaturas entre el fluido y el sólido (Figura 5).

Hay dos clasificaciones del fenómeno de convección: la convección forzada y la convección natural. La primera se da cuando el movimiento del fluido se debe a la acción de algún agente externo, como una bomba, un abanico, o situaciones ambientales. En este caso, se fuerza el movimiento del fluido sobre la superficie, presentándose una velocidad del fluido que, dependiendo de la geometría de la superficie expuesta, da origen a que se establezca un flujo laminar o un flujo turbulento. La segunda clasificación se presenta al estar el fluido en presencia de zonas a diferentes temperaturas, lo cual provoca cambios de densidades en el mismo, ocasionando un movimiento natural de las zonas de mayor a menor densidad. Comúnmente, el régimen de fluido que se establece para la convección natural o libre es laminar (Valdés Cruz, 1993).

Transferencia de calor por radiación

Es la emisión de ondas electromagnéticas que se desplazan a la velocidad de la luz representan en temperaturas elevadas un mecanismo de pérdidas de calor. En los transformadores la transferencia de calor a través del tanque y las aletas es por radiación.

Análisis de resultados

El cálculo de la transferencia de calor no ha sido posible debido a falta de datos, sin embargo, se tomará como referencia la investigación realizada por Torregoza, et. al. (2018) en la que utiliza el programa COMSOL Multiphysics para evaluar el comportamiento térmico del

Figura 5

Ciclos de Transferencia de Calor en el Transformador



transformador utilizando aceite mineral y lo comparan con el vegetal, los resultados que obtuvieron se muestran en la Figura 6.

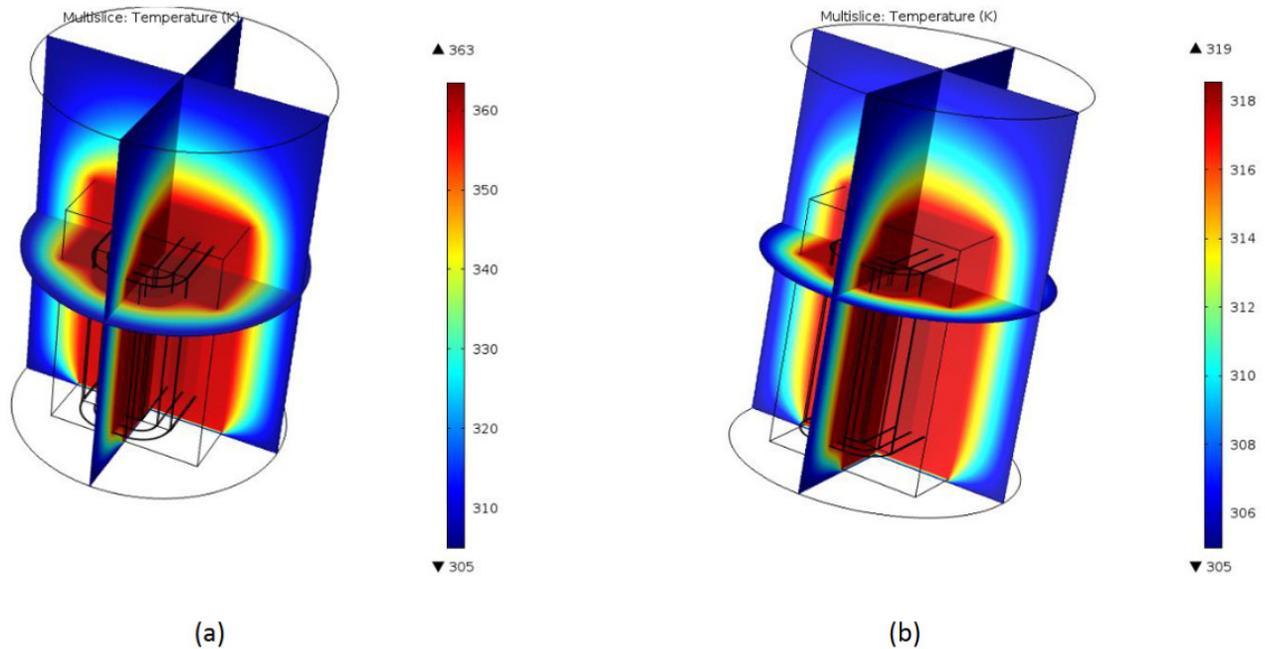
En la Figura 6 se observa un valor máximo de temperatura de 363 K (89.85 °C) para el aceite vegetal y de 319 K (45.85 °C) para el aceite mineral. Estas temperaturas máximas representan una relación de un 113 % del aceite vegetal con respecto al mineral, es decir 44 grados más en el aceite vegetal como 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.

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

Figura 6

Comportamiento térmico (a) vegetal (b) mineral



Nota. Obtenido de Torregroza (2018)

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.

CONCLUSIONES

En los últimos años se han empezado a buscar alternativas al aceite mineral como medio refrigerante, tal es el caso del aceite vegetal, el cual mediante un análisis realizado se muestra que contiene las propiedades idóneas para poder ser usado en transformadores, características como bajo punto de inflamabilidad, cero daños al medio ambiente y mayor extensión de la vida útil del papel Kraft, lo hacen parecer el más adecuado para su implementación. Sin embargo, debe tenerse en cuenta el diseño adecuado para este tipo de fluido y así lograr el mejor rendimiento posible.

REFERENCIAS

- Cicuéndez Simonneau, E. (2012). *Estudio fluido-térmico de varios aceites de silicona en un transformador de potencia*. <https://repositorio.unican.es/xmlui/handle/10902/1371>
- Huillca Cameron, B. (2015). *Técnicas de alta tensión*. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.
- Martínez Amaya, W. S., Ramírez Sorto, L. M., & Soto Hernández, P. A. (2014). *Evaluación térmica en transformadores de potencia cargabilidad y efectos en la vida del sistema de aislamiento* [Engd, Universidad de El Salvador]. <https://ri.ues.edu.sv/id/eprint/6538/>
- Piñeros, J. (2015). *Fluidos Esteres: Una solución innovadora para Transformadores de Potencia*. <https://new.abb.com/docs/>

librariesprovider78/chile-documentos/
novenas-jornadas-tecnicas-2015/pp/
jose-pi%C3%B1eros---fluidos-esteres.
pdf?sfvrsn=2

Revista Electricidad. (2018). Aceite mineral es el más usado para los transformadores de alta tensión. *Revista Electricidad*, 227. <https://www.revistaei.cl/reportajes/aceite-mineral-mas-usado-los-transformadores-alta-tensaceite-mineral-es-el-mas-usado-para-los-transformadores-de-alta-tension-ion/>

RTE de Mexico. (2013). Partes Constructivas de Transformadores RTE. *RTE*. <https://rte.mx/partes-constructivas-de-los-transformadores>

SIGET. (2003). *301-E-2003 Normativa de Materiales y Equipos para Construcción de Líneas Aéreas y Sus Anexos*.

Torregozza, M. I., Arrieta, E. M., & Florez, L. E. (2018). *Comportamiento Térmico de Transformadores Eléctricos de Distribución Inmersos en Aceite Dieléctrico de Origen Vegetal*. http://www.advancesincleanerproduction.net/7th/files/cessoes/6B/8/torregozza_et_al_academic.pdf

Valdés Cruz, J. C. (1993). *Análisis de transferencia de calor en transformadores con la técnica de elementos finitos*. <https://repositorio.tec.mx/handle/11285/568914>