

Aplicación del aceite dieléctrico de origen vegetal en transformadores eléctricos¹

Application of Dielectric Vegetable Oil in Electrical Transformers²

Aplicação do óleo dielétrico de origem vegetal em transformadores elétricos³

Código SICI: 0123-2126(201206)16:1<201:ADADOV>2.3.TX;2-W

Diego Fernando-Navas⁴

Héctor Cadavid-Ramírez⁵

Diego Fernando Echeverry-Ibarra⁶

¹ Fecha de recepción: 9 de diciembre de 2010. Fecha de aceptación: 21 de noviembre de 2011. Este artículo se deriva del proyecto de investigación denominado *Evaluación de la aplicación de aceite dieléctrico de origen vegetal en transformadores de distribución*. Código: 1106-454-21945. Desarrollado por el Grupo de Investigación en Alta Tensión (GRALTA), de la Universidad del Valle y EPM, Cali, Colombia.

² Submitted on December 9, 2010. Accepted on November 21, 2011. This article is the result of the research project *Evaluation of the use of vegetable dielectric oil in distribution transformers*. Registration number 1106-454-21945. Developed by the research group Alta Tensión (GRALTA), Universidad del Valle and EPM, Cali, Colombia.

³ Data de recepção: 9 de dezembro de 2010. Data de aceitação: 21 de novembro de 2011. Este artigo deriva de um projeto de pesquisa denominado *Avaliação da aplicação de óleo dielétrico de origem vegetal em transformadores de distribuição*. Código: 1106-454-21945. Desenvolvido pelo Grupo de Pesquisa em Alta Tensão (GRALTA), da Universidade do Valle e EPM, Cali, Colômbia.

⁴ Tecnólogo en electrónica, Universidad del Valle, Palmira, Colombia. Ingeniero electricista, Universidad del Valle, Cali, Colombia. Estudiante de Maestría en Ingeniería Eléctrica, Universidad del Valle. Profesor auxiliar de la Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad del Valle. Correo electrónico: diego.navas@correounivalle.edu.co.

⁵ Ingeniero electromecánico, Instituto Superior Energético de Moscú, Moscú, Rusia. Master of Science en Ingeniería, Instituto Superior Energético de Moscú. Doctor of Philosophy, Instituto Superior Energético de Moscú. Profesor titular de la Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad del Valle, Cali, Colombia. Correo electrónico: hector.cadavid@correounivalle.edu.co.

⁶ Ingeniero electricista, Universidad del Valle, Cali, Colombia. Doctor en Ingeniería, Universidad del Valle. Profesor asistente de la Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad del Valle. Correo electrónico: diego.echeverry@correounivalle.edu.co.

Resumen

Desde principios de la década de los noventa se han desarrollado líquidos dieléctricos de origen vegetal que tienen como principales ventajas las mejoras de los limitantes presentes en los aceites derivados del petróleo. Son fluidos sumamente biodegradables y tienen un alto punto de inflamación; sin embargo, su elevado costo y su no muy amplia evaluación en servicio (desempeño), dado su relativo poco tiempo de uso, han limitado su aplicación. En el presente trabajo se presenta una revisión del estado de la técnica de los aceites dieléctricos de origen vegetal para uso en transformadores. Se muestra un repaso de su evolución desde sus inicios hasta la actualidad.

Palabras clave

Dispositivos dieléctricos, dieléctricos, aceites para aisladores eléctricos, transformadores eléctricos.

Abstract

Since the early 1990s, dielectric fluids have been developed from plants. The use of plants has the main advantage of improving the limitations of petroleum oils. Plant fluids are highly biodegradable and have a high flash point; but their high cost and their not-very-wide in-service evaluation (performance), because of its relatively short time of use, have limited their application. This study reviews the state of the art of dielectric oils of plant origin to be used in transformers, including an overview of their evolution from their origin until today.

Keywords

Dielectric devices, dielectrics, electric insulators and insulation oils, electric transformers.

Resumo

Desde princípios da década dos noventa foram desenvolvidos líquidos dieléctricos de origem vegetal que têm como principais vantagens as melhoras dos limitantes presentes nos óleos derivados do petróleo. São fluidos extremamente biodegradáveis e têm um alto ponto de inflamação; porém, seu elevado custo e sua não muito ampla avaliação em serviço (desempenho), dado seu relativo pouco tempo de uso, tem limitado sua aplicação. No presente trabalho apresenta-se uma revisão do estado da técnica dos óleos dieléctricos de origem vegetal para uso em transformadores. Mostra-se um percurso de sua evolução desde seus inícios até a atualidade.

Palavras chave

Dispositivos dieléctricos, dieléctricos, óleos para isoladores elétricos, transformadores elétricos.

Introducción

Los transformadores son aparatos fundamentales de presencia significativa dentro de un sistema de potencia. Ellos, junto con otros equipos, hacen parte de los elementos que conforman los sistemas de transmisión y distribución de energía eléctrica que permite el suministro de potencia eléctrica a los usuarios finales.

Durante cientos de años, los transformadores inmersos en aceite han empleado primordialmente como elemento aislante y refrigerante aceites derivados del petróleo (aceite mineral). Por un lado, este tipo de aceites posee ventajas técnico-económicas que lo hacen atractivo para su uso, entre las cuales están su comprobado buen desempeño en servicio durante sus amplios años de uso y su costo relativamente bajo cuando se compara con otras alternativas presentes en el mercado (Oommen, Claiborne, Walsh y Baker, 2000; Yang, Liao, Caixin y Zhu, 2011). Por otro lado, estos fluidos tienen limitantes que pueden ser considerados desventajas. Una de ellas es su baja biodegradación, que ocasiona un alto impacto ambiental a nuestro medio, y otra no menos importante, su bajo punto de inflamación, que puede conducir a la generación de incendios y accidentes, e impedir, por lo tanto, su uso en ambientes interiores.

El transformador es una máquina muy eficiente, por lo que las ligeras mejoras que se puedan hacer están relacionadas principalmente con el desarrollo de materiales con mejores propiedades (McShane, 2002). En los últimos años, el aspecto medioambiental ha cobrado importancia y el desarrollo de tecnologías limpias e igualmente funcionales desde el punto de vista técnico se ha venido imponiendo (Bertrand y Hoang, 2003; Oommen, Claiborne y Mullen, 1997). Los líquidos éster (incluyen tanto los ésteres naturales como los ésteres sintéticos) se han considerado posibles alternativas del aceite mineral, debido a sus ventajas en cuanto a la seguridad y el medio ambiente (Liu y Wang, 2011; Oommen, Claiborne y Walsh, 1998). Algunos autores incluso (Yang, Liao, Caixin y Zhu, 2011) se atreven a afirmar que los ésteres naturales son el mejor sustituto para los aceites minerales.

Muchas incógnitas surgen a la hora de adoptar esta nueva tecnología: se tiene su relativamente poco tiempo de uso (doce años aproximadamente) (McShane, Luksich y Martins, 2006); su elevado costo, si se compara con el de otras alternativas del mercado (McShane, 2002), y, además, no se registran investigaciones relacionadas con el impacto medioambiental y social que puede tener el cultivo de las plantas utilizadas como materia prima en la fabricación de estos aceites.

En el presente documento se hace una revisión de la literatura existente sobre los aspectos que se deben considerar para el uso de los aceites de origen vegetal en transformadores. El estudio se centra en los aceites cuya fuente de fabricación son las semillas de soja, maíz y girasol. La búsqueda se orientó específicamente hacia la aplicación de estos líquidos aislantes en transformadores y se hizo un repaso por las recientes investigaciones y publicaciones sobre la temática. Se tocaron aspectos como las características químicas, las propiedades físicas y eléctricas, la compatibilidad de estos líquidos con los materiales y accesorios pertenecientes a los transformadores, su proceso de envejecimiento e inspección cuando se encuentra en operación para finalmente cerrar con su costo y posible fabricación en Colombia. El documento finaliza con algunas recomendaciones de investigaciones futuras y conclusiones globales sobre cada uno de los aspectos tratados.

1. Aplicación de líquidos aislantes en transformadores

En 1886, la compañía que hoy conocemos como Westinghouse Electric Company construye el primer transformador de uso comercial. Este fue un transformador tipo seco, basado en un diseño y un modelo propuesto y patentado antes (1882-1885). Años más tarde (1892), la misma compañía desarrolló la primera aplicación conocida de un transformador inmerso en aceite mineral, basándose en una de las muchas ideas patentadas por el inglés Elihu Thomson.

Dado que el transformador inmerso en líquido tenía un tamaño más reducido y era más eficiente que el seco, las industrias centraron sus esfuerzos en determinar las propiedades ideales del aceite mineral y así producir un fluido de mayor calidad para uso en equipos eléctricos. Hacia 1899, una refinería de aceite mineral comenzó a producir este líquido especialmente diseñado para transformadores.

Hoy en día, varios tipos de fluidos son empleados como medio aislante en transformadores de distribución y potencia. Las investigaciones en el área van en aumento y cada vez se dispone de más y más datos, lo cual hace que los usuarios se arriesguen con cierto grado de confianza a emplear sustancias diferentes a las

tradicionales. En la tabla 1 se muestra un resumen de la aplicación de líquidos aislantes en transformadores.

Tabla 1. Uso de líquidos aislantes

| Transformadores | Aceite mineral | Siliconas | Ésteres sintéticos | Ésteres naturales (aceite vegetales) |
|-----------------|----------------|-----------|--------------------|--------------------------------------|
| Potencia | AU | UN | UC | UC |
| Distribución | AU | AU | AU | AU |
| Medida | AU | UN | NU | NU |

AU: ampliamente usado; UC: usado pero es menos común; NU: no usado con frecuencia.

Fuente: (CIGRÉ, 2010).

Como se observa en la tabla 1, en la actualidad, el aceite mineral es el líquido aislante más usado para su aplicación en transformadores (Marchesan y Fanchin, 2010). Sus características físicas y químicas, su buen desempeño en asociación con los aislantes de papel, sus años de experiencia (se cuenta con una gran cantidad de información) y su buena relación costo-beneficio (Bertrand y Hoang, 2003; Oommen, 2002a; Perrier y Beroual, 2008) lo hacen ser el preferido del momento.

Sin embargo, su bajo punto de inflamación condiciona su uso en ciertas locaciones y, en muchos casos, obliga a migrar hacia otras alternativas. Ante la eventualidad de un derrame, el aceite mineral, además de representar un riesgo potencial de incendio, constituye una amenaza ambiental. Hoy en día, debido a la conciencia ambiental, el uso de aceites minerales está sujeto a requerimientos adicionales.

Los transformadores inmersos en silicona surgen como una alternativa a los ya censurados policlorobifenilos (PCB). Estos fluidos, al igual que los ésteres sintéticos, son empleados en transformadores para aplicaciones especiales, por ejemplo, en industrias papeleras o en general donde se exige una elevada seguridad al fuego. Son reconocidos por tener una excelente resistencia a la oxidación; sin embargo, son poco amigables con el medio ambiente, lo cual puede restringir su uso en áreas ambientalmente sensibles. De igual forma, su disposición final puede ser problemática. Aunque suelen ser empleados en transformadores de distribución, su alta viscosidad supedita su uso a aplicaciones donde puedan emplearse refrigeradores o bombas, debido a una reducción en la capacidad de transferencia de calor.

En los últimos años, los ésteres sintéticos se han aplicado en transformadores de potencia no solo gracias a un aceptable comportamiento con el medio

ambiente, sino también por los beneficios reportados en lo que respecta a la humedad de la celulosa. Por esto, tales fluidos se han empleado ampliamente para el rellenado de transformadores de distribución, en los que el usuario final requiere un mayor grado de seguridad contra incendios y protección del medio ambiente.

Los ésteres naturales comenzaron a estudiarse y a desarrollarse como líquidos para transformadores desde inicios de la década de los noventa, debido principalmente a una creciente preocupación por el medio ambiente. Estos han sido comercialmente desarrollados desde 1999 por la empresa Cooper Power System y por Asea Brown Boveri (ABB) un año más tarde (McShane, 1999; Oommen, Claiborne, Walsh y Baker, 2000). Años más tarde, otros aceites basados de semillas fueron, asimismo, desarrollados como sustitutos para el aceite mineral (Badent, Hemmer y Schwab, 2002; Wilhelm, Luciane y Uhren, 2009; Abdullahi, Bashi, Yurius y Nurdin, 2004). En la actualidad existen varios tipos de aceites biodegradables provenientes de diferentes fabricantes, algunos de ellos son: Envirotemp FR3, Midel 731, Biotrans 1000, BIOTEMP, Coconut Oil, ECO Fluid (Lopes Oliveira, 2005) y BIOVOLT.

2. Investigaciones en el campo de los ésteres naturales

Dada una creciente conciencia ambiental, es cada vez más usual el pensar que los líquidos dieléctricos, además de proporcionar un buen balance funcional en el rendimiento del transformador, deben de impactar en la menor medida posible el medio ambiente. En busca de esto, han sido desarrollados fluidos alternos. Los ésteres naturales, al igual que el aceite mineral, fueron probados como fluidos dieléctricos desde la invención y aplicación de los transformadores inmersos en líquido. Los primeros dieléctricos de éster natural fueron encontrados no aptos para uso en equipo eléctrico, sobre todo en aquellos no sellados herméticamente, debido a su composición química (inferior estabilidad al oxígeno y su mayor punto de fluidez y viscosidad) (McShane, 2002). Sin embargo, hoy por hoy, estos aceites desechados en el pasado vuelven a ser considerados por las empresas del sector eléctrico como una alternativa de reemplazo a los tradicionalmente empleados aceites minerales (Stocco, 2009).

El resurgimiento de los ésteres naturales inicia como proyecto de investigación en 1991, por parte de la empresa Cooper Power System y ABB (McShane, Luksich y Martins, 2006; Oommen, Claiborne, Walsh y Baker, 2000). Cooper Power System en el periodo 1991-1995 evaluó cerca de veinticuatro aceites vegetales y mezclas usando una serie de pruebas a escala. Bajo un procedimiento

de prueba, en 1995 iniciaron experimentos con envejecimiento acelerado a gran escala. Los primeros prototipos de transformadores los instalaron en 1996. Se iniciaron por parte de las electrificadoras pruebas de campo en 1997 en Estados Unidos. Los primeros prototipos rellenos (cambio de aceite mineral por aceite vegetal) se dieron en 1998. Los transformadores con éster natural empezaron a ser producidos en 1999 con la radicación de las patentes de estos fluidos (Thottathil, Oommen y Claiborne, 1999; McShane, 1999).

Pensando en estandarizar los criterios de aceptación de los nuevos fluidos, se desarrollaron en el 2008 dos guías (Transformers Committee IEEE, 2008 y ASTM International, 2008) con las especificaciones y condiciones para aceptación y mantenimiento de los ésteres naturales en transformadores y equipo eléctrico. En ellas se enuncian, entre otras cosas, los requerimientos mínimos que deben poseer los aceites vegetales nuevos, las normatividades asociadas a la comprobación de dichos requerimientos y los cuidados especiales, dadas las particularidades de estos fluidos. En Suramérica se cuenta con un referente brasilero. En noviembre del 2006 fue publicada una norma sobre la especificación para el aceite vegetal nuevo (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2006). Esta norma fue elaborada con base en el estudio realizado por el grupo de trabajo TF-02 del Consejo Internacional de Grandes Sistemas Eléctricos (CIGRÉ), responsable por la definición de las pruebas de aceptación de este nuevo fluido y en la norma ASTM D6871-03 (Cecato Stocco, 2009).

Específicamente, en el ámbito del uso del aceite vegetal en transformadores no existen, a la fecha, referentes normativos. Al respecto se tienen unas primeras aproximaciones por parte de la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC, por su sigla en inglés) y el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE, por su sigla en inglés) (Transformers Committee IEC, 2009; Transformers Committee IEEE, 2010), las cuales son estándares para transformadores de alta temperatura. Aunque en el primero de ellos (Transformers Committee IEC, 2009) se discute la clase térmica de los ésteres naturales (clase K), esta no da ninguna orientación sobre los sistemas aislantes con éster natural. El IEEE actualmente está desarrollando el estándar para transformadores de alta temperatura (Transformers Committee IEEE, 2010). El borrador actual incluye una discusión de las características de envejecimiento de los sistemas aislantes compuestos por ésteres naturales y papel *kraft* térmicamente mejorado. La versión final podría dar recomendaciones específicas sobre la temperatura del punto caliente (Bingenheimer et ál., 2011).

En el mundo se ha iniciado la proliferación de transformadores inmersos en aceite vegetal (CIGRÉ, 2010; Del Fiacco, Greven y Bingenheimer, 2011).

Países como España (Linaza, Gisbert y Calvo 2009), Canadá y Estados Unidos son ejemplos de ello (Cooper Power System, 2010). En Suramérica, Brasil ha sido uno de los países que más han adoptado esta nueva tecnología; incluso las electrificadoras (un ejemplo de ello es CPFL Energía) han llegado a cambiar lotes considerables de sus transformadores de distribución inmersos en aceite mineral por transformadores con aceite vegetal (CPFL Energía, s. f.; Wilhelm, Luciane y Uhren, 2009).

El cambio no ha sido producto del azar. En torno a esta temática ellos han realizado múltiples investigaciones desde la óptica productiva (empresas del sector) (Lopes Oliveira, 2005; Mak, Maciel, Franchini y Vasconcellos, 2006; Bingenheimer et ál., 2011) y desde la academia (Uhren, 2007; Luciane, 2008; Stocco, 2009; Cecato Stocco, 2009; Siqueira Franch, 2010). Incluso una de ellas terminó en el 2007 en el desarrollo de un aceite vegetal, cuyo nombre comercial es BIOVOLT (Wilhelm, Luciane y Uhren, 2009).

Otras investigaciones encaminadas al crecimiento del conocimiento de estos nuevos fluidos se han realizado en Francia (Bertrand, Hoang y Valentin, 2009; Bertrand y Hoang, 2003; Perrier y Beroual, 2008), Portugal (Lopes Oliveira, 2005), Inglaterra (Hosier, Guushaa, Vaughan y Swingler, 2009; Liu y Wang, 2011), Austria (Wruss, 2008), Malasia (Binti Md Akil, 2010), Venezuela (Marulanda et ál., 2008) y Colombia (Cadavid et ál., 2010; Gómez et ál., 2011; Roa, 2011).

En Colombia, desde el 2009 el tema empezó a tomar interés. Empresas como Siemens Colombia, en el marco de la Feria Internacional del Sector Eléctrico (FISE 2009) presentó lo que ellos denominaron “Primer transformador de energía amigable con el medio ambiente” (Siemens, 2010). Por el lado de las electrificadoras, con la financiación de Colciencias, Empresas Públicas de Medellín (EPM) y la Universidad del Valle se adelantó el proyecto *Evaluación de la aplicación del aceite dieléctrico de origen vegetal en transformadores de distribución* (Cadavid et ál., 2010) con el objeto de explorar las diferentes características de desempeño y vida útil del transformador de distribución convencional cuando emplea aceite de origen vegetal como líquido dieléctrico y refrigerante.

Ese mismo año, EPM instala alrededor de la cuenca del río Medellín cuatro transformadores de un megavoltiamperio para alimentación de luces navideñas. Actualmente, EPM parece estar interesado en incursionar más de lleno en el uso de esta tecnología dentro de sus redes eléctricas con el pliego de condiciones y especificaciones técnicas para la compraventa de treinta transformadores de distribución sumergidos en aceite vegetal (Unidad de Compras EPM, 2011).

Las investigaciones realizadas a la fecha convergen en que para que estos fluidos tengan una total aceptación y empleo en transformadores de cualquier capacidad, deben demostrar ser seguros, económicos (en contraste con otras alternativas del mercado) y ofrecer un alto rendimiento térmico y eléctrico durante su vida de trabajo. A continuación se enuncian las características inherentes a estos aceites. Como es natural en cualquier material, se dilucidan ventajas y desventajas al ser usados en transformadores. Los comentarios se realizan tomando como punto de comparación base los aceites minerales.

3. Características químicas

Estructuralmente, los ésteres naturales son diferentes a los aceites minerales. Estos últimos son derivados del petróleo; mientras que los ésteres naturales son productos agrícolas y, como tal, provienen de fuentes renovables.

Los productos derivados del petróleo son tan vitales hoy para el mundo que es difícil imaginarse sin ellos (plásticos, farmacéuticos o químicos orgánicos). El problema radica en que este recurso es no renovable (se agotará eventualmente y podría escasear seriamente) (Oommen, 2002a).

Los ésteres naturales son productos disponibles principalmente en semillas y usados comúnmente para propósitos comestibles. En los últimos años se ha incrementado su uso en aplicaciones industriales (Amaah, Islam y Chami, 2005). Respecto a esta situación, surge la duda de si vale la pena cultivar para “alimentar transformadores” y dejar, quizás, la población sin el sustento diario. Desde esta óptica, sería necesaria para la producción en masa de estos fluidos una cantidad suficiente de cultivos para satisfacer ambas demandas. Por otro lado, esto podría ser beneficioso, pues se tendría un nuevo ingreso a la economía local y a la de los agricultores (Del Fiacco, Greven y Bingenheimer, 2011).

Dada su naturaleza, los ésteres naturales pueden ser reciclados (convertido en otro producto) y son completamente biodegradables. Respecto a su disposición final, los ésteres naturales pueden convertirse, con relativa facilidad, según Gómez et ál. (2011), en biodiésel (Del Fiacco, Greven y Bingenheimer, 2011), jabón y aceite endurecido. El hecho de que sea biodegradable, facilita de algún modo su manipulación y evita grandes catástrofes en el momento de un derrame inesperado. Según lo anterior, menos medidas deben ser tenidas en cuenta para las instalaciones y en ciertas ocasiones incluso podrían omitirse algunas obras civiles (fosas recolectoras de aceite). De todos modos, es recomendable hacer una disposición adecuada de estos fluidos.

La susceptibilidad a la oxidación de los ésteres naturales ha sido el obstáculo primario para su utilización como un líquido dieléctrico (factor que, por el

contrario, favorece las propiedades medioambientales). Gómez et ál. (2011) afirman que el oxígeno es el factor más sensible en el deterioro del aceite. Hoy por hoy, el aspecto ha sido mejorado gracias a la combinación del fluido con aditivos y a los sistemas de llenado y hermeticidad desarrollados e implementados.

4. Propiedades físicas

En general, estas propiedades para cualquier tipo de aceite para transformadores incluyen las características de color, apariencia, viscosidad, punto de fluidez, punto de combustión, punto de inflamación y densidad relativa. Los límites de especificación están definidos en las normatividades de la American Section of the International Association for Testing Materials (ASTM International, 2008) e IEEE (Transformers Committee IEEE, 2008). La tabla 2 muestra una comparación entre el aceite mineral y el éster vegetal con valores típicos de estos fluidos. Algunos de estos valores fueron verificados en investigaciones de (Cadavid et ál., 2010) y se obtuvieron resultados muy similares.

Tabla 2. Comparación del aceite mineral y el éster natural: valores típico

| Propiedad | Aceite mineral | Éster natural |
|-------------------------------------|----------------|-----------------|
| Color | Incoloro | Amarillo, verde |
| Apariencia | Clara y limpia | Clara y limpia |
| Viscosidad | 40 °C | 33 |
| | 100 °C | 7,9 |
| Punto de fluidez | -50 | -21 |
| Punto de combustión (°C) | 165 | 357 |
| Punto de inflamación (°C) | 147 | 328 |
| Densidad relativa (°C) | 0,87 | 0,92 |
| Conductividad térmica (W/m K) 25 °C | 2,4 | 3,3 |

Fuente: presentación propia de los autores.

La tabla 2 refleja diferencias entre los valores propios de cada uno de los fluidos. Un aspecto importante para considerar son los valores más elevados de viscosidad y conductividad térmica de los ésteres naturales. Este es un aspecto que pudiera limitar el comportamiento térmico del transformador. A menor viscosidad, el aceite se desplaza más fácilmente entre las diferentes partes del transformador, lo cual favorece la función de refrigeración. De igual manera, una mayor conductividad térmica 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 disiparse en el exterior.

Como se observa, los ésteres naturales tienen viscosidades de hasta tres veces la de los aceites de origen mineral. Esta condición limita el desempeño refrigerante del líquido de origen vegetal; sin embargo, los fabricantes de este tipo de aceites dicen compensar esta desventaja con una conductividad térmica mayor, que en los aceites de origen mineral.

Recientes investigaciones demuestran que los ésteres naturales para un mismo diseño de transformador (diseño convencional para aceite mineral) están sometidos a un menor esfuerzo eléctrico, debido a la relación más cercana entre los valores de las constantes dieléctricas de los materiales (el esfuerzo de tensión en el aislamiento papel-conductor, por lo tanto, se incrementa) (Marchesan y Fanchin, 2010). Otras investigaciones (Smith y Beaster, 2009; Cadavid et ál., 2010) muestran para un mismo diseño de transformador (diseño convencional para aceite mineral) elevaciones de temperatura más altas en el aceite y en el promedio del devanado para los transformadores sumergidos en aceite de origen vegetal. No obstante, los valores alcanzados no superan los límites establecidos en las normatividades de capacidad de carga de transformadores (Cadavid et ál., 2010).

Lo anterior muestra que, en principio, los ésteres naturales pueden emplearse en transformadores con los mismos diseños de los inmersos en aceite mineral sin exceder los límites térmicos. A pesar de esto, consideraciones especiales y particulares a cada caso han de ser tenidas en cuenta. Para transformadores de distribución quizás a veces baste con algo de refrigeración adicional para mantener las elevaciones de temperatura por debajo de las nominales (Smith y Beaster, 2009). Para el caso de transformadores de potencia, las características de diseño de los transformadores inmersos en éster natural pueden ser diferentes de las comúnmente usadas para aceite mineral (Marchesan y Fanchin, 2010).

Dadas sus altas propiedades de puntos de combustión e inflamación, 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 (Oommen, 2002b). Este es un factor positivo, puesto que posibilita el empleo de transformadores inmersos en aceite en lugares donde se exige una elevada seguridad al fuego (por ejemplo, complejos comerciales, industrias, escuelas, parques, etc.). Incluso, en algunos casos podrían llegar a omitirse sistemas de protección al fuego (paredes cortafuegos) (Lopes Oliveira, 2005). A pesar de las bondades citadas, siempre es deseable una evaluación previa antes de tomar cualquier decisión.

5. Propiedades eléctricas

Se han realizado estudios de tensión de ruptura, factor de disipación y resistividad (Binti Md Akil, 2010) con trabajos experimentales basados en normas estándares. Los resultados muestran que el dieléctrico cumple con las propiedades establecidas para ser empleado como sustituto del aceite mineral y que, además, posee una mayor resistividad (habilidad del aceite para oponerse al flujo de corrientes eléctricas, evitando el movimiento de carga eléctrica) y rigidez dieléctrica (previene rupturas del aceite bajo condiciones de esfuerzos eléctricos). Sin embargo, (Marchesan y Fanchin, 2010) indican que a pesar de que los ésteres naturales pueden ser usados como líquidos aislantes y refrigerante en transformadores de distribución y potencia, las características de diseño empleadas en estos equipos son diferentes de las comúnmente utilizadas para diseño con aceite mineral.

Siguiendo con el mismo orden de ideas, Mak et ál. (2006) y Bingenheimer et ál. (2011) proponen diseños más compactos para transformadores de distribución. Los primeros inician con un prototipo en el 2006, lo que conduce a que finalmente se pongan en funcionamiento cerca de 2100 transformadores por parte de los segundos. Actualmente, se encuentra en ejecución en Brasil una nueva etapa de proyecto con el uso de aceite vegetales en transformadores. Se están desarrollando transformadores inmersos en aceite vegetal con menores pérdidas de vacío y mejores condiciones mecánicas. Los ensayos de estas máquinas iban a ser ejecutados en diciembre del 2011.

Otros estudios (Liu y Wang, 2011) se han realizado en busca de caracterizar el fenómeno de ruptura en los líquidos éster. Los resultados muestran que las rupturas se propagan a una mayor velocidad en aceite vegetal.

En este aspecto, es deseable contar con mayor información de ensayos de impulso tipo rayo para diferentes capacidades de transformadores. Con ello se podrían validar diseños desde el punto de vista eléctrico.

6. Compatibilidad con materiales y equipos

La compatibilidad de los ésteres naturales con cada uno de los elementos que conforman el transformador es un aspecto que debe estar claro. El deterioro de las partes a causa de la interacción entre materiales (aceite y material con el que se construye la parte) no debe ser permitido para garantizar la vida útil de diseño. Los fabricantes afirman ser plenamente compatibles con otros materiales empleados para la construcción de transformadores (ABB, 2002). En el 2010 (Siqueira y Franch, 2010) se realizó en Brasil un estudio de evaluación de compatibilidad de los aceite vegetales aislantes (empleando dos marcas comerciales) con los

materiales internos de los transformadores de distribución bajo el mismo criterio planteado para compatibilidad de materiales con aceite mineral. Los resultados con los materiales probados confirman las afirmaciones de los fabricantes. Sin embargo, estudios de (CIGRÉ, 2010) recomiendan prestar un cuidado especial a los empaques. Estos pueden deformarse (contraerse o expandirse) o cambiar de estado (blandos o duros).

La compatibilidad de los fluidos éster con el papel se reporta como buena. Estudios muestran que el aceite vegetal puede retener considerablemente más agua que el aceite mineral (Mak et ál., 2006). Esta propiedad mejora las características de envejecimiento del papel al mantenerlo más seco. El resultado final es una capacidad térmica del aislamiento papel-aceite más alta, lo que en principio puede permitir operaciones del transformador por encima de sus valores de placa sin afectar su vida útil (McShane et ál., 2002).

También han sido realizados estudios particulares sobre el comportamiento de componentes de un transformador, como los cambiadores de derivaciones en presencia de ésteres naturales (Dix y Hopkinson, 2006). Los resultados obtenidos de los ensayos avalan su uso, dado el buen desempeño, incluso mejor que el presente en aceite mineral (minimiza corrosión en los contactos). En este campo, es necesario evaluar todos y cada uno de los materiales presentes para validar completamente su uso.

7. Envejecimiento y vida útil

Muchos estudios se han realizado en torno al envejecimiento y vida útil del transformador sumergido en aceite de origen vegetal. Estos dos aspectos han sido presentados desde el punto de vista técnico, además del ambiental, como el valor agregado de estos fluidos, puesto que ofrecen mayor vida útil para unas mismas condiciones de carga que los transformadores sumergidos en aceite mineral. Bajo ese supuesto, se puede afirmar que para una misma vida útil del transformador con diferentes fluidos (aceite mineral y aceite de origen vegetal) aquel inmerso en aceite vegetal puede ser operado a condiciones que superen sus valores de placa (sobrecargado). Por ello es usual emplear el rellenado de transformadores. El resultado podría ser un aumento en la capacidad de carga base instalada del transformador sin sacrificar vida útil (Bingenheimer et ál., 2011). Las afirmaciones anteriores se basan en resultados de estudios de envejecimiento acelerado a iguales condiciones de exposición de temperatura y tiempo (Hopkinson, 2006), en las cuales se concluye que los ésteres naturales reducen las tasas de envejecimiento de la celulosa (Luksich, 2003).

Gran parte de los estudios han sido llevados a cabo realizando pruebas a escala de laboratorio. Pruebas a escala real son deseables para determinar el envejecimiento y vida útil del transformador bajo sus condiciones normales de operación. Desde este orden de ideas, Gómez et ál. (2011) recientemente llevaron a cabo investigaciones sobre el comportamiento del aceite extraído de transformadores en operación. Su análisis se centra en tres muestras con diferentes tiempos de operación (envejecimiento de 4, 8 y 168 meses expuestas a diferentes condiciones de carga), todas ellas extraídas de transformadores que se encontraban en funcionamiento. Los autores concluyeron no encontrar diferencias estructurales en los aceites analizados, lo que garantiza que después de siete años de operación el aceite sigue como nuevo.

8. Inspección y monitoreo

Los líquidos aislantes empleados en transformadores requieren pruebas apropiadas y mantenimiento para inspeccionar su condición y mantener la rigidez dieléctrica requerida. Los líquidos aislantes que se han deteriorado pueden causar daños en los equipos y convertirse en un peligro para el personal.

El análisis de gases disueltos (DGA, por su sigla en inglés), junto a otras pruebas, puede proporcionar información útil para la detección temprana de problemas en desarrollo. Con el transcurso de los años, esta técnica ha demostrado ser predictiva y valiosa (Western Area Power Administration, 1990). El DGA se ha usado durante muchas décadas en transformadores inmersos en aceite mineral y, por ello, se dispone de una importante base de datos. Sin embargo, estudios particulares deberían realizarse para el caso de los aceites vegetales, dadas las diferencias existentes. De esta manera se podría conocer cómo el DGA puede aplicarse a esta clase de líquidos.

Recientemente Perrier, Marugan y Saravolac (2011) realizaron fallas eléctricas y térmicas a escala de laboratorio con el ánimo de generar y detectar gases. Los autores concluyen que para fallas eléctricas los mismos gases se generan en relativamente iguales proporciones tanto en aceite mineral como en vegetal. Lo anterior hace aplicable para el diagnóstico el clásico triángulo de Duval. En el caso de fallas térmicas no se presentan las mismas condiciones (en aceite vegetal el etanol es el gas clave) (Perrier, Marugan y Saravolac, 2011; Eberhardt et ál., 2011), por lo que para el diagnóstico se deben introducir algunas consideraciones.

9. Costos

En el caso de Brasil, todos los materiales usados en la producción de los transformadores inmersos en aceite vegetal es producida y está para la venta en el país

(Bingenheimer et ál., 2011), lo que de alguna manera garantiza sostenibilidad. Esto les reduce costos de transporte e impuestos por ingreso legal de productos. Sin embargo, en 2005 el costo del aceite vegetal estaba alrededor de dos a tres veces el del aceite mineral (basado en el costo en abril de 2005 de nueve reales/litro). En febrero del 2007, el precio cayó a 7,50 reales/litro (Uhren, 2007). Hoy en día, el precio debe ser más competitivo en relación con el del aceite mineral, dada su difusión y desarrollo interno en ese país. Para el caso de países que deben importar el producto, el precio se conserva del orden de dos a tres veces. En el caso particular de Colombia, el precio está alrededor de 2,5 veces el del aceite mineral importado desde Brasil o Estados Unidos.

10. Aceites vegetales en Colombia

El proceso de fabricación de los aceites vegetales para uso en equipo eléctrico es fundamentalmente el mismo empleado para la producción de aceite vegetal comestible. El proceso difiere en su etapa terminal, en la cual al aceite para uso en transformadores se agregan algunos aditivos para mejorar sus propiedades dieléctricas y ser más estable a la oxidación. En Brasil, el encargado de fabricar aceite vegetal FR3 es la multinacional Cargill Industrias Oil, que produce aceite de semilla. Colombia tiene el potencial para desarrollar una industria para la fabricación de este tipo de aceites. Al igual que Brasil, Colombia es rica en recursos naturales renovables.

La pregunta que debe responderse en este campo es si se dejan de producir productos para el consumo humano en pro de fabricar productos para el desarrollo de las industrias (aproximadamente una hectárea de cultivo produce suficiente aceite de semilla para llenar tres transformadores de tipo distribución de 45 kVA (Minería Chilena, 2005). Lo anterior tendrá solución en la medida en que se aumente considerablemente la plantación de las semillas fuente para la elaboración de estos aceites. Esto puede verse como una oportunidad para aumentar los ingresos de nuestros agricultores y, de paso, mejorar las economías tanto locales como nacionales a partir de la explotación de estos recursos.

Todo apunta a que día a día esta tecnología tendrá más adeptos, considerando tanto las ventajas técnicas como las medioambientales, sin olvidar las desventajas existentes de por medio. EPM es un ejemplo con la incursión en sus redes de esta tecnología, posiblemente dentro de poco con la difusión y el crecimiento del conocimiento más empresas se quieran adherir.

Los fabricantes de transformadores deben estar preparados para adoptar sin ningún problema este nuevo reto. Con el reciente cierre del tratado de libre

comercio con Estados Unidos de Norteamérica podrían llegar al país una ola de transformadores y equipos eléctricos a precios competitivos que ofrecen, además de un buen desempeño desde el punto de vista eléctrico, un *plus* como lo es una “credencial verde”.

11. Futuras investigaciones

Nuevas fuentes de investigación se abren en el mundo en esta temática como son:

- Estudios de envejecimiento y estimación de vida útil a escala real.
- Diseños particulares para transformadores inmersos en aceite vegetal.
- Diagnóstico de transformadores en servicio con éster natural (inspección y monitoreo).
- Estudio de propiedades y ventajas del uso de mezclas de aceite mineral y vegetal.
- Afinidad con todos los materiales y accesorios empleados en la fabricación de un transformador inmerso en aceite vegetal.

En Colombia se iniciaron recientemente los primeros estudios sobre el tema (Cadavid et ál., 2010), en los cuales se analizó tanto el comportamiento térmico del transformador inmerso en aceite de origen vegetal como sus posibilidades de reutilización una vez cumplido su ciclo de vida útil como material aislante.

Hacia el futuro queda por construir toda una base de conocimiento fundamentada en las experiencias propias. Empresas del sector eléctrico, fabricantes de transformadores y accesorios y entidades de educación deben de trabajar en conjunto para enriquecer los aspectos relacionados con esta temática e introducir en las normatividades las consideraciones a las que haya lugar. Actualmente, los autores trabajan en el análisis del comportamiento eléctrico del transformador de distribución sumergido en aceite vegetal.

12. Conclusiones

En la actualidad, las empresas del sector están viendo los aceites de origen vegetal como un posible sustituto para el tradicionalmente empleado aceite mineral. Alrededor del mundo, se encuentran dentro de las redes eléctricas transformadores inmersos en aceite de origen vegetal de diferentes capacidades, los cuales en su mayoría son de distribución. Países como Brasil han hecho una apuesta fuerte a largo plazo en esta temática y en torno a ello han desarrollado múltiples investigaciones. Colombia, desde el 2009, se ha interesado en esta temática y alrededor de ella se ha desarrollado una investigación. Recientemente una em-

presa del sector hizo su primera apuesta por introducir dentro de sus redes esta nueva tecnología, lo que podría desencadenar en años futuros una masificación de los transformadores ecológicos.

Desde el punto de vista estructura, los ésteres naturales y los aceites minerales son diferentes. Ambos poseen fortalezas y debilidades cuando se usan como aislantes y refrigerantes en transformadores. Los primeros aparecen como un fluido alternativo a los aceites minerales y muestran como principal credencial el provenir de fuentes renovables y ser biodegradables. Estas dos características catalogan a estos fluidos como materiales amigables con el medioambiente. Desde algunas ópticas, la condición de renovable puede ser contraproducente, puesto que se dejaría de cultivar específicamente con el propósito de alimentar seres vivos para empezar a pensar en cultivar para producir materiales para las industrias. Este último aspecto podría convertirse en un problema si no se toman las acciones adecuadas. La preocupación al respecto pierde interés si se hace una planeación a futuro de las demandas necesarias para cubrir ambas necesidades. Si esto se hace, lo que en principio podía verse como un problema, se convierte en una oportunidad de mejores ingresos para los agricultores y la nación en general.

Se destacan dentro de las propiedades de los ésteres naturales sus puntos de combustión e inflamación. Estos, comparados con los de los aceites minerales, son elevados. Lo anterior ubica a estos fluidos como seguros y les da la particularidad de tener una mayor seguridad contra incendios y ello permite, en principio, que transformadores sumergidos en aceites de origen vegetal puedan ser instalados sin riesgos en sitios en los que normalmente no se concibe. Adicional a esto, se habla de eliminación de algunas obras civiles. Cualquiera sea el caso, es recomendable evaluar siempre las particularidades del montaje que se va a realizar, pues primarían aspectos diferentes a los eminentemente técnicos y económicos.

Un aspecto importante por considerar son las altas viscosidades propias de los ésteres naturales. Estas suelen triplicar el valor característico de los aceites minerales. Una mayor viscosidad puede en un momento determinado limitar las propiedades de refrigerante del fluido dieléctrico y hacer que se alcancen mayores temperaturas dentro del transformador. Es posible que el resultado final sea una disminución de la vida útil. Para compensar posibles incrementos de temperatura, pueden llegar a ser necesarios bancos adicionales de refrigeración forzada. Los resultados de los estudios muestran temperaturas internas superiores al interior de los transformadores inmersos en aceite vegetal. Sin embargo, las elevaciones de temperatura alcanzadas no superan los límites establecidos por la normatividades. A pesar de esto, es recomendable evaluar las condiciones

particulares de instalación y considerar dentro de la planeación todos los aspectos que intervienen en el resultado final.

La literatura expresa la necesidad de considerar diseños particulares para los transformadores inmersos en aceite de origen vegetal. Resultados de estudios muestran que al conservar los mismos diseños, las distribuciones de campo eléctrico son diferentes entre las partes activas que conforman los transformadores (papel-aceite). Para el caso de transformadores con aceite vegetal, los esfuerzos eléctricos tanto en el papel como en el aceite se equilibran, dada una mayor similitud en las constantes dieléctricas de ambos materiales. Por ejemplo, actualmente Brasil trabaja en un proyecto de transformador que básicamente emplea el mismo tanque de un transformador de capacidad menor para operar un transformador de una mayor capacidad (incremento de capacidad). Su apuesta se ha hecho en una modificación en los núcleos de los transformadores. A la fecha existen los primeros prototipos. En este aspecto, cada fabricante tendrá que tomar las consideraciones necesarias para la toma de decisiones de sus diseños, basándose en las particularidades de operación del transformador y en las expectativas finales.

A fin de garantizar la vida útil del transformador, además de preservar el sistema aislante papel-aceite, se debe evaluar la afinidad de cada uno de los elementos y accesorios que constituyen el transformador con los fluidos aislantes. Respecto a la preservación del papel, los ésteres naturales muestran grandes ventajas al mantenerlo más seco, gracias a su propiedad intrínseca de ser altamente higroscópico. Lo anterior disminuye la degradación del papel y no interfiere en las propiedades del aceite como dieléctrico, puesto que su rigidez dieléctrica es buena incluso en presencia de humedad. Deben tenerse cuidados especiales con la interacción del aceite con el oxígeno pues este último disminuye en gran medida sus propiedades como dieléctrico. Es aconsejable mantener sistemas bien herméticos. En cuanto a la afinidad con los materiales y accesorios que componen el transformador, se conoce de algunas incompatibilidades con los materiales de los empaques. Estos pueden tender a deformarse o cambiar de estado.

Es necesario fortalecerse en el ámbito de la inspección y el monitoreo de transformadores con aceite vegetal. Información histórica con técnicas como el DGA y su diagnóstico a través del triángulo de Duval deben empezar a construirse. Son necesarios más estudios para la caracterización de los gases presentes en los ésteres naturales en los momentos de fallas para formar una base del conocimiento que ayude a la toma de decisiones.

Una vez los ésteres naturales cumplen su ciclo de vida como dieléctricos, pueden ser convertidos con relativa facilidad en productos alternos como biodiésel

y jabón. El primero de estos productos, en fuente de insumo de los vehículos de las empresas del sector y disminuir, de esta manera, los costos asociados a movilidad y transporte de personal.

La producción de aceite dieléctrico de origen vegetal en Colombia es viable. El país cuenta con los recursos agrícolas como materia prima para lograrlo, lo que lo haría sostenible. Para que la producción sea una realidad, los procesos de fabricación del aceite comestible deben ser ajustados agregando al proceso la inserción de aditivos. La fabricación nacional nos puede llegar a hacer más competitivos en precios, de cara al reciente cierre del tratado de libre comercio. La relación en precio con el aceite mineral podría disminuir notablemente.

Referencias

- ABDULLAHI, U. U.; BASHI, S. M.; YURIUS, R. y NURDIN, H. J. A. The potentials of palm oil as a dielectric fluid. In *PECon 2004. Proceedings, National Power and Energy Conference* [publicación en línea]. 2004, pp. 224-228. <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1461648>>. [Consulta: 19-10-2011].
- AMAAH, M.; ISLAM S. M., y CHAMI, S. Analyses of physical characteristics of vegetable oils as an alternative source to mineral oil-based dielectric fluid. *Dielectric Liquids* [publicación en línea]. 2005. <http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1490109> [Consultado: 2-11- 2010].
- ASEA BROWN BOVERI (ABB). *BIOTEMP: Biodegradable Dielectric Insulating Fluid*. s. e., 2002.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Especificação de óleo vegetal isolante novo*. Brasilia: ABNT, 2006.
- ASTM INTERNATIONAL. Standard Specification for Natural (Vegetable Oil) Ester Fluids Used in Electrical. *Annual Book of ASTM Standards*. 2008. núm. 3, pp. 1-4.
- BADENT, R.; HEMMER, M. y SCHWAB, A. J. Inhibited rape-seed oil as substitute for mineral oils. En *Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena* [publicación en línea]. 2002, pp. 268-271. <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1048787>> [Consultado 19-10-2011].
- BERTRAND, Y.; HOANG, L. C. y VALENTIN, G. Des huiles végétales comme alternative aux huiles minérales isolantes. s. d., 2009, pp. 1-5.
- BERTRAND, Y. y HOANG, L. C. Vegetable oils as substitute for mineral oils. En *Proceedings of the 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials (Cat. No.03CH37417)* [documento en línea]. 2003, vol. 2, pp. 491-494. <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1218460> [Consultado: 17-01-2011].
- BINGENHEIMER, D. et ál. Sustainable electrical energy using natural ester technology. En *21st International Conference on Electricity Distribution*. 2011, 4, (Frankfurt).

- BINTI Md, A. y FADILLA AZWANI, N. *Comparison of electrical properties between new insulating oil with petroleum based mineral oil as liquid insulating*. s. d., 2010.
- CADAVID, H. et ál. *Evaluación de la aplicación del aceite dieléctrico de origen vegetal en transformadores de distribución*. Santiago de Cali: s. e., 2010.
- CECATO, M. *Aplicação de óleos vegetais como fluidos isolantes em transformadores de distribuição da rede elétrica*. s. d., 2009.
- CONSEJO INTERNACIONAL DE GRANDES SISTEMAS ELÉCTRICOS (CIGRÉ). *Experiences in Service with New Insulating Liquids*. Paris, 2010.
- COOPER POWER SYSTEM. Medium y Large Power Transformer Users List Retrofill & New Installations. 2010, pp. 1-9. <http://www.cooperindustries.com/content/dam/public/powersystems/resources/library/900_Fluids/B90004062.pdf> [Consultado: 12-01-2012].
- CPFL ENERGIA. Transformador verde. *Revista P&D: Projetos Ambientais*, núm 23.
- DEL FIACCO, E.; GREVEN, J.-Y. y BINGENHEIMER, D. Sustainable electrical energy enabled by natural éster technology. En *European Conference on HV & MV Substation Equipment - MatPost*. Lyon: s. e., 2011.
- DIX, L. y HOPKINSON, P. J. Tapchangers for De-energized Operation in Natural Éster Fluid, Mineral Oil, and Silicone. En *2005/2006 PES TD* [documento en línea]. 2006, pp. 40-44. <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1668451>> [Consultado 21-10-2011].
- EBERHARDT, R. et ál. Dissolved gas analysis investigations on éster liquids after breakdown. En *2011 IEEE International Conference on Dielectric Liquids* [documento en línea]. 2011, pp. 1-4. <http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6015447> [Consultado: 21-10-2011].
- GÓMEZ, N. A. et ál. Chemical and spectroscopic characterization of a vegetable oil used as dielectric coolant in distribution transformers. *Journal of the Brazilian Chemical Society*. 2011, pp. 1-12.
- HOPKINSON, P. J. Panel discussion to focus on natural ester fluids. *The Line*. 2006, núm 240, pp. 8-11.
- HOSIER, I. L. et ál. Selection of a suitable vegetable oil for high voltage insulation applications. *Journal of Physics: Conference Series* [publicación en línea]. 2009, núm. 183, pp. 1-6. <http://stacks.iop.org/1742-6596/183/i=1/a=012014?key=crossref.31f1ee5f339e2d6e4f2649493575a0d7> [Consultado: 10-10-2011].
- LINAZA, D. B.; GISBERT, N. y CALVO, S. The Spanish experience in the use of HV/LV integrated transformer substations, environmentally friendly. In *IET Conference Publications*, 775-775, (Prague): IET, 2009. Available from world wide web: <<http://link.aip.org/link/IEECPS/v2009/iCP550/p775/s1&Agg=doi>>. (cited 20 October 2011).
- LIU, Q. y WANG, Z. Streamer characteristic and breakdown in synthetic and natural éster transformer liquids under standard lightning impulse voltage. *IEEE Transactions on*

- Dielectrics and Electrical Insulation* [publicación en línea]. 2011, núm. 18, pp. 285-294. <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5704520>>. [Citado 18-10-2011].
- LOPES OLIVEIRA, A. A. *Utilização de óleos biodegradáveis em transformadores de distribuição* [publicación en línea]. Porto, 2005. <http://paginas.fe.up.pt/~ee99254/images/Relatorio_PSTFC_final.pdf>.
- LUCIANE, T. *Estudo do envelhecimento acelerado de óleo vegetal isolante em escala laboratorial*. s. d., 2008.
- LUKSICH, J. *Loading Guide A and B Factors for Envirotemp FR3 Fluid and Thermally Upgraded Kraft Insulation*. s. d., 2003.
- MAK, J. et ál. Transformador de distribuição de maior vida útil e menor agressividade ambiental. En *IV Workspot - CE A2 Transformador*, pp. 1-8. Recife (PE): Cigré Brasil, 2006.
- MARCHESAN, T. B. y FANCHIN, A. J. Natural éster fluid: The transformer design perspective. En *2010 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America (T&D-LA)* [documento en línea]. Sao Paulo: IEEE, 2010, pp. 329-333. <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5762902> [Consultado: 15-10-2011].
- MARULANDA, A. R.; ARTIGAS, M. A.; GAVIDIA, A.; LABARCA, F. y PAZ, N. Study of the vegetal oil as a substitute for mineral oils in distribution transformer. En *2008 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America*, 2008, pp. 1-6. <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4641781>> [Consultado 20-10-2011].
- MCSHANE, C. P.; LUKSICH, J. y MARTINS, M. N. Field experience with natural ester (vegetable oil) dielectric fluid - the first decade. En *IV Workspot - CE A2 Transformador*. 2006, vol. 18, pp. 1-10.
- MCSHANE, C. P. Vegetable-oil-based dielectric coolants. *IEEE Industry Applications Magazine* [documento en línea]. 2002, núm. 8, pp. 34-41. <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=999611>> [Consultado: 17-01-2011].
- MCSHANE, C. P. New dielectric coolant concepts for distribution and power transformers. En *Conference Record of 1999 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference (Cat. No.99CH36338)* [documento en línea]. 1999, pp. 55-62. <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=779345>> [Consultado: 19-10-2011].
- MCSHANE, C. P. et ál. Aging of paper insulation in natural éster dielectric fluid. En *2001 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Developing New Perspectives (Cat. No.01CH37294)* [documento en línea]. 2002, vol. 2, pp. 675-679. <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=971319>> [Consultado: 21-10-2011].
- MCSHANE, P. C. *Vegetable oil based dielectric coolant*. s. d., 1999.
- MINERÍA CHILENA. Cooper Power System y Cargill Industrias Oils y Lubricants extiende alianza por Envirotemp FR#. *Electronoticias* [documento en línea]. 2005. <<http://www.editec.cl/electricidad/noticias/ano2005/0103051.htm>>.

- OOMMEN, T. V. Vegetable oils for liquid-filled transformers. *IEEE Electrical Insulation Magazine* [documento en línea]. 2002a, núm. 18, pp. 6-11. <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=981322>> [Consultado: 17-01-2011].
- OOMMEN, T. V. Vegetable oils for liquid-filled transformers. *IEEE Electrical Insulation Magazine* [documento en línea]. 2002b, núm. 18, pp. 6-11. <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=981322>> [Consultado: 21-10-2011].
- OOMMEN, T. V.; CLAIBORNE, C. C.; WALSH, E. J. y BAKER, J. P. A new vegetable oil based transformer fluid: development and verification. En *2000 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (Cat. No.00CH37132)* [documento en línea]. 2000, vol. 1, pp. 308-312. <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=885288>> [Consultado 17-01-2011].
- OOMMEN, T. V.; CLAIBORNE, C. C. y MULLEN, J. T. Biodegradable electrical insulation fluids. En *Proceedings: Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing and Coil Winding Conference* [documento en línea]. Rosemont (IL): IEEE, 1997, pp. 465-468. <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=651191>>. [Consultado: 16-01-2011].
- OOMMEN, T. V.; CLAIBORNE, C. C. y WALSH, E. J. Introduction of a new fully biodegradable dielectric fluid. En *1998 IEEE Annual Textile, Fiber and Film Industry Technical Conference (Cat. No.98CH36246)* [documento en línea]. 1998, núms. 3/1-3/4. <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=679223>> [Consultado: 17-01-2011].
- OOMMEN, T. V. y CLAIBORNE, C. C. *Electrical transformers containing electrical insulation fluids comprising high oleic acid compositions*. s. d., 1999.
- PERRIER, C.; MARUGAN, M. y SARAVOLAC, M. DGA comparison between éster and mineral oils. *Liquids (ICDL)* [documento en línea]. 2011, pp. 1-4. <http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6015411> [Consultado: 21-10-2011].
- PERRIER, C. y BEROUAL, A. Experimental Investigations on Mineral and Ester Oils for Power Transformers. En *Conference Record of the 2008 IEEE International Symposium on Electrical Insulation* [documento en línea]. Vancouver, BC: IEEE, 2008, pp. 178-181. <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4570305>> [Consultado: 27-10-2010].
- ROA, J. Transformadores de distribución inmersos en líquidos biodegradables. *Mundo Eléctrico*. 2011, pp. 120-124.
- SIEMENS. Primer transformador de energía amigable con el medio ambiente. *Mundo Eléctrico*. 2010, p. 1.
- SIQUEIRA FRANCH, V. *Avaliação da compatibilidade de óleos vegetais isolantes com materiais internos do transformador*. s. d., 2010.
- SMITH, S. D. y BEASTER, B. L. Design and test experience with natural ester fluid for power transformers update. En *2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting* [do-

- cumento en línea]. 2009, pp. 1-3. <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5275168>> [Consultado: 21-10-2011].
- STOCCO, M. B. C. Avaliação do potencial de aplicação de óleos vegetais como fluidos isolantes em transformadores de distribuição da rede elétrica. *Annals of Physics* [documento en línea]. 2009, núm. 54, p. 129. <<http://www.pipe.ufpr.br/portal/defesas/dissertacao/165.pdf>>. [Consultado: 27-10-2010].
- THOTTATHIL, V.; OOMMEN, C. y CLAIBORNE, C. High oleic acid oil compositions and methods of making and electrical insulation fluids and devices comprising the same. *ABB Technology*. 2004 May. US 20040089855 (28 worldwide citation).
- TRANSFORMERS COMMITTEE IEC. *Power Transformers – Part 14: Design and application of liquid-immersed power transformers using high-temperature insulation materials*. 2 Ed. IEC/TS, 2009.
- TRANSFORMERS COMMITTEE IEEE. *Draft standard for the design, testing and application of liquid-immersed distribution, power and regulating transformers using high-temperature insulation systems and operating at elevated temperatures*, 2010.
- TRANSFORMERS COMMITTEE IEEE. *IEEE Std C57.147™-2008, IEEE Guide for Acceptance and Maintenance of Natural Éster Fluids in Transformers*. 2008.
- UHREN, W. *Aplicação de óleo vegetal como meio isolante em equipamentos elétricos, em substituição ao óleo mineral* [documento en línea]. 2007. <<http://www.prodetc-pr.com.br/trabalhos/09TCCWilsonUhren.pdf>>.
- UNIDAD DE COMPRAS EPM. *Pliego de condiciones y especificaciones técnicas para compraventa de 30 transformadores de distribución sumergidos en aceite vegetal para el sistema de distribución de energía de las Empresas Públicas de Medellín E.S.P. Medellín*, 2011, pp. 1-99.
- WESTERN AREA POWER ADMINISTRATION. *Maintenance of Liquid Insulation*. s. l., 1990.
- WILHELM, H. M.; Luciane, T. y Uhren, W. Produção e uso de óleos vegetais isolantes no setor elétrico. *Revista Engenbaria*. 2009, pp. 121-124.
- WRUSS, G. *Environmentally-friendly Distribution Transformers*. s. d., 2008.
- YANG, L.; LIAO, R.; CAIXIN, S. y ZHU, M. Influence of vegetable oil on the thermal aging of transformer paper and its mechanism. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* [document en línea]. 2011, núm. 18, pp. 692-700. <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5931054>> [Consultado: 15-10-2011].