

PRUEBAS DIELECTRICAS A TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCION
SUMERGIDOS EN ACEITE DE ORIGEN VEGETAL

CARLOS FRANCISCO RIVEROS DAVALOS



UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
SANTIAGO DE CALI
2012

PRUEBAS DIELECTRICAS A TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCION
SUMERGIDOS EN ACEITE DE ORIGEN VEGETAL

CARLOS FRANCISCO RIVEROS DAVALOS

Proyecto de grado presentado ante el programa de pregrado
en Ingeniería Eléctrica como requisito para optar
al título de Ingeniero Electricista

Director

Diego Fernando Echeverry Ibarra
Profesor, Ingeniero Electricista, Doctor en Ingeniería

Director

Diego Fernando Navas
Profesor, Ingeniero Electricista



UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
SANTIAGO DE CALI
2012

Nota de aceptación:

Phd. Ferley Castro Aranda

Phd. Guillermo Aponte Mayor

Cali, 24 de Febrero de 2012

DEDICATORIA

Este trabajo de grado que representa un esfuerzo por superarme en mi vida personal, se lo dedico.

... a Dios que me da fortaleza espiritual en los momentos difíciles...

muy especialmente con todo mi amor a mis padres, quienes me han enseñado con su ejemplo a rebasar todas las barreras que la vida nos presenta, a querer ser mejor cada día, a entender que no hay nada imposible y que sólo hay que esmerarse y sacrificarse, si es necesario, para lograr las metas que nos planteamos. Mi triunfo es el de ustedes, ¡los amo!

A los docentes que me han acompañado durante el largo camino, brindándome siempre su orientación con profesionalismo ético en la adquisición de conocimientos y afianzando mi formación como estudiante universitario.

Dedico este trabajo de igual manera a mi tutor quien me ha orientado en todo momento en la realización de este proyecto que enmarca el último escalón hacia un futuro en donde sea partícipe en el mejoramiento del proceso de enseñanza y aprendizaje.

A los que nunca dudaron que lograría este triunfo: mis hermanas Martha, Patricia y Julieta. ... a mis sobrinos, espero que les sirva de ejemplo y motivación en su vida para lograr objetivos como este.

AGRADECIMIENTOS

El siguiente trabajo de grado es un esfuerzo en el cual, directa o indirectamente, participaron varias personas leyendo, opinando, corrigiendo, teniéndome paciencia, dando ánimo, acompañando en los momentos de crisis y en los momentos de felicidad.

Agradezco a mis directores de tesis, por su valiosa asesoría, quiero agradecer especialmente al ingeniero Diego Fernando Navas por todos los conocimientos que compartió conmigo y por su valioso tiempo dedicado a este trabajo de grado.

A mis padres que me acompañaron en esta aventura que significó este título y que, de forma incondicional me dieron su apoyo, este es un logro que quiero compartir con ustedes.

Agradezco a Dios por llenar mi vida de dicha y bendiciones.

CONTENIDO

	pág.
DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTOS.....	v
LISTA DE TABLAS.....	viii
LISTA DE FIGURAS.....	ix
RESUMEN.....	12
INTRODUCCIÓN.....	13
1. CONCEPTOS GENERALES SOBRE LOS DIELECTRICOS O AISLANTES	15
1.1 ACEITES DE ORIGEN MINERAL	15
1.2 ACEITES DE ORIGEN VEGETAL.....	16
1.3 CARACTERÍSTICAS DE LOS ACEITES DIELECTRICOS	18
1.3.1 Tensión de ruptura.	18
1.3.2 Viscosidad.	20
1.3.3 Contenido de agua.	20
1.3.4 Oxidación.....	21
1.3.4.1 Propiedad medioambiental.....	22
1.3.4.2 Seguridad contra incendios.	23
1.3.5 Comparación de propiedades entre aceite mineral y vegetal.....	23
1.4 RESUMEN.....	24
2. METODOLOGÍA DE TRABAJO.	26
2.1 TRANSFORMADORES BAJO ESTUDIO.....	27
2.2 LIQUIDOS AISLANTES BAJO ENSAYO.....	28
2.3 ENSAYOS ELÉCTRICOS A LOS TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCION Y MUESTRAS DE ACEITE	28
2.4 DESCRIPCIÓN DE LOS PROCEDIMIENTOS	29
2.4.1 Ensayos a transformadores.....	29
2.4.1.1 Resistencia de aislamiento.....	29
2.4.1.2 Resistencia de devanados.....	30
2.4.1.3 Relación de transformación.....	31
2.4.1.4 Ensayos de medición de pérdidas.....	31

2.4.1.5	Tensión tipo impulso atmosférico.	32
2.4.1.6	Tensión aplicada.	33
2.4.2	Ensayos dieléctricos muestras de aceite.	34
2.4.2.1	Tensión de ruptura usando electrodos tipo VDE.	34
2.4.2.2	Tensión tipo impulso atmosférico.	35
2.5	RESUMEN.	37
3.	RESULTADOS Y ANALISÍS DE DATOS	39
3.1	ENSAYOS ELECTRICOS A LOS TRANSFORMADORES	39
3.1.1	Impulso a transformadores.	40
3.1.1.1	Análisis.	44
3.1.2	Tensión aplicada a transformadores.	44
3.1.2.1	Análisis.	44
3.2	ENSAYOS ELÉCTRICOS A LAS MUESTRAS DE ACEITE.	45
3.2.1	Impulso a muestras de aceite.	45
3.2.1.1	Análisis.	54
3.2.2	Tensión de ruptura dieléctrica a muestras de aceite.	55
3.2.2.1	Análisis.	57
3.3	RESUMEN.	59
	CONCLUSIONES	64
	BIBLIOGRAFÍA	65

LISTA DE TABLAS

pág.

Tabla 1. Comparación entre líquidos refrigerantes	18
Tabla 2. Comparación de algunos valores para aceites minerales y fluidos de éster natural.....	24
Tabla 3. Relación de ensayos eléctricos a los transformadores	29
Tabla 4. Relación de ensayos eléctricos a las muestras de aceite	29
Tabla 5. Cuadro resumen de pruebas y/o experimentos realizados.	37
Tabla 6. Resultados de ensayos de rutina para transformador de 15 kVA	39
Tabla 7. Resultados de ensayos de rutina para transformador de 37,5 kVA	39
Tabla 8. Condiciones atmosféricas durante el ensayo.....	40
Tabla 9. Condiciones atmosféricas durante el ensayo.....	42
Tabla 10. Condiciones atmosféricas durante el ensayo para los transformadores de 37,5 kVA y 15 kVA	44
Tabla 11. Tensión aplicada en los transformadores 37,5 kVA y 15 kVA.....	44
Tabla 12. Condiciones atmosféricas durante el ensayo.....	45
Tabla 13. Datos obtenidos en la prueba.	45
Tabla 14. Cálculos, promedios y criterios estadísticos.	46
Tabla 15. Condiciones atmosféricas durante el ensayo.....	48
Tabla 16. Datos obtenidos en la prueba a 50 °C	48
Tabla 17. Cálculos, promedios y criterios estadísticos.	48
Tabla 18. Condiciones atmosféricas durante el ensayo.....	51
Tabla 19. Datos obtenidos en la prueba a 80 °C	51
Tabla 20. Cálculos, promedios y criterios estadísticos.	51
Tabla 21. Tensiones de ruptura promedio a las diferentes temperaturas	54
Tabla 22. Datos obtenidos en la prueba.	55
Tabla 23. Cálculos, promedios y criterios estadísticos.	56
Tabla 24. Datos promedios resultantes.	56

LISTA DE FIGURAS

pág.

Figura 1. <i>Tensión de ruptura dieléctrica en función del tiempo de vida útil del aceite.</i>	20
Figura 2. <i>Contenido relativo de agua en aceite mineral y envirotemp FR3.</i>	21
Figura 3. <i>Comparación de biodegradación de diferentes líquidos dieléctricos, evaluados en un periodo de 22 días a 250°C.</i>	22
Figura 4. <i>Metodología del proyecto.</i>	26
Figura 5. <i>Puntos de medición de temperatura en el transformador.</i>	27
Figura 6. <i>Transformadores bajo estudio y su implementación de los sensores.</i>	27
Figura 7. <i>Líquidos aislantes bajo ensayo.</i>	28
Figura 8. <i>Montaje ensayo resistencia de aislamiento.</i>	30
Figura 9. <i>Montaje ensayo resistencia de devanados.</i>	30
Figura 10. <i>Montaje ensayo relación de transformación.</i>	31
Figura 11. <i>Montaje ensayo pérdidas en vacío y corriente de excitación.</i>	32
Figura 12. <i>Montaje ensayo pérdidas bajo carga y tensión de corto circuito.</i>	32
Figura 13. <i>Montaje tensión tipo impulso en transformador.</i>	33
Figura 14. <i>Montaje tensión aplicada en transformador.</i>	34
Figura 15. <i>Montaje tensión de ruptura con electrodos tipo VDE.</i>	35
Figura 16. <i>Montaje tensión tipo impulso a muestra de aceite.</i>	36
Figura 17. <i>Pérdidas en vacío y con carga de los transformadores bajo estudio</i>	40
Figura 18. <i>Onda de impulso reducida y completa fase U, transformador sumergido en aceite mineral de 37,5 kVA.</i>	41
Figura 19. <i>Onda de impulso reducida y completa fase X, transformador sumergido en aceite mineral de 37,5 kVA.</i>	41
Figura 20. <i>Onda de impulso reducida y completa fase U, transformador sumergido en aceite vegetal de 37,5 kVA.</i>	41

Figura 21. Onda de impulso reducida y completa fase X, transformador sumergido en aceite vegetal de 37,5 kVA.	42
Figura 22. Onda de impulso reducida y completa fase U, transformador sumergido en aceite mineral de 15 kVA.	42
Figura 23. Onda de impulso reducida y completa fase X, transformador sumergido en aceite mineral de 15 kVA.	43
Figura 24. Onda de impulso reducida y completa fase U, transformador sumergido en aceite vegetal de 15 kVA.	43
Figura 25. Onda de impulso reducida y completa fase X, transformador sumergido en aceite vegetal de 15 kVA.	43
Figura 26. Oscilograma de tensión de ruptura de la muestra 1.	46
Figura 27. Oscilograma tensión de ruptura de la muestra 2.	47
Figura 28. Oscilograma tensión de ruptura de la muestra 3.	47
Figura 29. Oscilograma tensión de ruptura de la muestra 4.	47
Figura 30. Oscilograma tensión de ruptura de la muestra 5.	48
Figura 31. Oscilograma de tensión de ruptura de la muestra 1.	49
Figura 32. Oscilograma tensión de de la muestra 2.....	49
Figura 33. Oscilograma tensión de ruptura de la muestra 3.	50
Figura 34. Oscilograma tensión de ruptura de la muestra 4.	50
Figura 35. Oscilograma tensión de ruptura de la muestra 5.	50
Figura 36. Oscilograma de tensión ruptura de la muestra 1.	52
Figura 37. Oscilograma tensión de ruptura de la muestra 2.	52
Figura 38. Oscilograma tensión de ruptura de la muestra 3.	53
Figura 39. Oscilograma tensión de ruptura de la muestra 4.	53
Figura 40. Oscilograma tensión de ruptura de la muestra 5.	53
Figura 41. Tensiones de ruptura en la prueba a diferentes temperaturas	54
Figura 42. Diagrama comparativo de tensión de ruptura del aceite mineral y aceite vegetal a diferentes temperaturas.....	57
Figura 43. Saturación de agua para aceite mineral y envirotemp FR3.	58
Figura 44. Contenido relativo de agua en aceite mineral y envirotemp FR3.....	59

RESUMEN

El aceite de origen mineral es un material aislante importante en los transformadores que ha sido usado por más de 100 años. La aplicación del aceite mineral en estos equipos, puede ser potencialmente peligroso para el medio ambiente, ya que el aceite de origen mineral está constituido por una mezcla de hidrocarburos, por lo que presenta varias desventajas entre las que se encuentran que es poco biodegradable (en caso de un derrame puede contaminar el suelo y los cursos de agua), y tiene un bajo punto de inflamación comparado con otros aceites. Además, como su fuente de obtención es un recurso natural no renovable (petróleo), cabe pensar que eventualmente puede acabarse.

Desde los años noventa se ha avanzado en el desarrollo de líquidos dieléctricos de origen vegetal. Estos fluidos dieléctricos son una alternativa al aceite mineral, atrayente por algunas de sus propiedades, por ejemplo: su punto de combustión de 360°C, ser biodegradable, el alto retardo en la degradación del papel aislante, entre otras.

En la realización de este proyecto se estudió el comportamiento eléctrico de dos transformadores de distribución sumergidos en aceite de origen vegetal, comparando dicho comportamiento eléctrico con dos transformadores constructivamente iguales sumergidos en aceite mineral. Además, a lo largo del proyecto de grado se analizó la propiedad dieléctrica del aceite vegetal y se compara con la del aceite mineral. Las comparaciones se realizan luego de someter tanto a transformadores como muestras de aceite a ensayos eléctricos basados en procedimientos de las Normas Técnicas Colombianas y la INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS (IEEE).

Palabras claves: aceite mineral, aceite vegetal, ensayos eléctricos, propiedades dieléctricas, tensión de ruptura.

INTRODUCCIÓN

El rápido crecimiento por el uso de energía conlleva a un mejoramiento de los equipos del sistema de energía con un alto nivel de fiabilidad y seguridad. Una de las partes más importantes de los equipos eléctricos es el aislamiento también conocido como dieléctrico, el aislamiento se divide en: gases, líquidos, sólidos y de vacío. Los aislantes son ampliamente utilizados en los componentes de la red eléctrica tales como interruptores, transformadores, cables, condensadores, entre otros.

Los dieléctricos líquidos, en particular, se prefieren debido a su capacidad de tener auto recuperación a las situaciones donde ocurran descargas parciales o totales. La función de un líquido dieléctrico en los equipos es refrigerar y aislar. Los líquidos dieléctricos se utilizan generalmente en transformadores de distribución y potencia. Los transformadores son equipos fundamentales 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.

Los transformadores sumergidos en aceite, han empleado como medio aislante y refrigerante aceites derivados del petróleo (aceite mineral) desde mucho tiempo atrás hasta nuestros días. El aceite mineral a base de petróleo, por un lado, posee excelentes propiedades tales como su rigidez dieléctrica, viscosidad, de bajo costo frente a otras alternativas presentes en el mercado, y un comprobado buen desempeño en servicio durante cientos de años en uso. Por otro lado, el aceite mineral está constituido por una mezcla de hidrocarburos que lo hace poco biodegradable, donde derrames de este pueden ocasionar un impacto ambiental al medio ambiente (suelo y los cursos de agua), además su bajo punto de inflamación puede conducir a la generación de incendios, limitando su uso en espacios interiores.

El transformador es una máquina con un alto nivel de eficiencia, por lo que el mejoramiento que se le pueda realizar está relacionado principalmente con el desarrollo de materiales con mejores propiedades.

Hace poco tiempo, el cuidado del medio ambiente y el desarrollo de nuevas tecnologías limpias han cobrado importancia, por lo que se han introducido varios materiales aislantes líquidos que son por lo general de tipo orgánico, como por

ejemplo: aceite de soya, girasol, coco, oliva, palma. Incluso estos tipos de aceites han sido considerados como posibles alternativas del aceite mineral debido a sus ventajas en cuanto a seguridad y alta biodegradación. Muchas dudas aparecen a la hora de adoptar esta nueva tecnología, debido en parte por su poco tiempo en uso (aproximadamente doce años) y su alto costo de producción en comparación con otras alternativas en el mercado.

En este documento se realizó una revisión de las principales propiedades de los líquidos dieléctricos tanto de aceite mineral como vegetal. Se muestran los resultados de las pruebas eléctricas ejecutadas a los transformadores de distribución de dos capacidades diferentes y a las muestras de aceite mineral y vegetal, terminado con el análisis de los resultados obtenidos y las conclusiones que se llegaron con la realización de esta investigación. En este proyecto de grado, no se alcanzaron los objetivos planteados en el anteproyecto de grado referente a realizar el estudio dieléctrico para una de las marcas planteadas ni para el aceite dieléctrico vegetal usado ya que no se logró conciliar con las diferentes empresas para la donación de dichas muestras de aceite.

Este documento está organizado de la siguiente manera. Consta de cuatro capítulos, el primer capítulo contiene una introducción a los materiales aislantes, relacionando y comparando las características del aislante de origen mineral y vegetal.

El capítulo dos hace referencia al tema experimental. En el que se especifican los materiales empleados (aceites y transformadores), equipos usados, además de los ensayos eléctricos ejecutados a los transformadores y muestras de aceites tanto mineral como vegetal.

En el capítulo tres se hace referencia a los resultados obtenidos de cada una de las pruebas realizadas presentando un análisis de lo observado.

En el capítulo cuatro se mencionan las conclusiones generales en base al análisis de los resultados y la teoría revisada.

CAPÍTULO UNO

El aislante eléctrico es un material que ofrece una alta resistencia al paso de corriente eléctrica. Sin embargo, ellos no pueden soportar una tensión infinitamente alta. Cuando el voltaje aplicado a través del dieléctrico excede un valor crítico, el aislamiento puede dañarse

El presente capítulo contiene una introducción a los materiales aislantes, relacionando las características de los aislantes líquidos.

1. CONCEPTOS GENERALES SOBRE LOS DIELECTRICOS O AISLANTES

El aislante o dieléctrico es un material que se opone al flujo de corriente eléctrica, ofreciendo una alta resistencia al paso de ésta, sin embargo, no puede soportar una tensión infinitamente alta, ya que el aislamiento puede sufrir daños cuando el voltaje aplicado a través del dieléctrico excede un valor crítico. Los dieléctricos pueden ser de tres clases diferentes: gaseosos, líquidos ó sólidos¹.

Los dieléctricos gaseosos son los más sencillos y los que comúnmente se utilizan, tienen una conductividad eléctrica baja. Los materiales dieléctricos sólidos se utilizan en todo tipo de aparatos eléctricos y dispositivos, estos tienen mayor resistencia a la degradación en comparación con los gases y líquidos.

En cuanto a los dieléctricos líquidos, puede decirse que dadas sus propiedades inherentes son muy útiles como material aislante ya que pueden llenar el volumen completo a aislar, y a la vez es disipador del calor por convección.

1.1 ACEITES DE ORIGEN MINERAL

El aceite mineral es un aceite altamente refinado que es estable a altas temperaturas y tiene excelentes propiedades como aislante eléctrico. Se utiliza en transformadores, algunos tipos de interruptores de alto voltaje y disyuntores. Sus funciones consisten en aislar, suprimir la corona y arcos, y servir como un refrigerante.

En su aplicación a los transformadores, los aceites minerales deben aislar la parte activa del transformador, para evitar cualquier posibilidad de arco eléctrico y al mismo tiempo, deben actuar como agente refrigerante del transformador evacuando el calor debido a las pérdidas producidas en los devanados y en el núcleo del transformador por efecto joule, por corrientes parasitas, entre otras.

Los aceites aislantes minerales son productos que sufren degradación por los esfuerzos térmicos y eléctricos a los que están sometidos, generando productos de descomposición que son indicadores para evaluar la presencia de un problema o falla en los transformadores. Estos aceites reaccionan con el oxígeno,

¹BINITI MD AKIL, NurulFadillaAzwani. Comparison of electrical properties between new insulation oil with petroleum based mineral oil as liquid insulating material. Trabajo de grado ingeniero electricista. Malaysia. UniversitiTeknologi Malaysia. Facultad de ingeniería. Departamento de ingeniería eléctrica. Abril 2010. 8p.

oxidándose y formando productos cuyas características aceleran la degradación de los demás materiales y disminuyen la vida útil de los equipos.

Hay tres razones fundamentales por las cuales se deben tener alternativas a los aceites dieléctricos refrigerantes de origen mineral²:

- El aceite mineral de transformador es pobremente biodegradable y puede llegar a contaminar el suelo o las fuentes de agua si ocurren derrames del mismo. Esto es de especial cuidado ya que miles de transformadores se localizan en áreas pobladas y cerca de las fuentes de agua.
- Los productos derivados del petróleo, como los aceites dieléctricos para transformadores, dependen de fuentes no renovables, que además se requieren en el momento para otros usos como los combustibles.
- Un bajo punto de inflamación brinda una menor seguridad para la instalación de transformadores en interiores.

1.2 ACEITES DE ORIGEN VEGETAL

En la década de 1980, Cooper Power System, participó activamente en la exploración y el desarrollo de fluidos dieléctricos a base de ésteres, y en 1984 introdujo un nuevo éster “poliol éster” desarrollado principalmente como sustituto de los ASKAREL pero su costo y sus limitadas aplicaciones impulsaron a nuevas búsquedas de ésteres más rentables. Esto conllevó a la evaluación de un líquido refrigerante y dieléctrico natural (aceite vegetal), que tiene muchas de las ventajas de los ésteres sintéticos. La desventaja principal del éster natural es la susceptibilidad inherente a la oxidación y punto de fluidez muy alto (viscosidad)³.

En la década de 1990 se realizó una investigación masiva del éster natural, y se logró mejorar significativamente el flujo a baja temperatura. También con inhibidores de oxidación fue posible minimizar los problemas de estabilidad de oxidación. Aunque inicialmente los aceites vegetales fueron desarrollados para transformadores de distribución la aplicación en transformadores de potencia es cada vez más común.

Factores como los riesgos ambientales y de salud producidos en su momento por los PCB, sumados a la regulación de los productos petrolíferos, intensificaron el

² OOMMEN, T.V. Vegetable oils for liquid-filled transformers. En: IEEE, Electrical Insulations Magazine. Enero-Febrero, 2002. Vol. 18, p. 6-11.

³ MCSHANE, Patrick, et al. Natural Éster Dielectric Fluid Development Update. En: IEEE Power & Energy Society General Meeting. 2009. ISBN 978-1-4244-4241-6, p. 1

interés en los ésteres naturales debido a que no son tóxicos, son altamente biodegradables, pueden reacondicionarse o reciclarse y son producidos de una amplia disponibilidad de fuentes renovables.

La fuente más práctica de ésteres naturales son los aceites de semilla. En 1993 dos docenas de aceite de uso alimenticio y mezclas fueron evaluados. Algunos aceites contenían un alto porcentaje de ácidos grasos insaturados, lo cual reduce la viscosidad y mejora las propiedades a baja temperatura. Otros tenían un porcentaje más elevado de grasas saturadas, lo que mejoró la estabilidad de oxidación. Después de obtener un buen equilibrio, el paso siguiente fue mejorar la oxidación y el rendimiento en el punto de fluidez en 1994. Con esto se inició el proceso de selección de aditivos; Los aditivos que se encontraron no fueron tóxicos y biodegradables⁴.

Bajo un procedimiento de prueba se realizó en el año 1995 experimento de envejecimiento acelerado a gran escala. Los primeros prototipos de transformadores fueron instalados en 1996. Las pruebas de campo iniciaron en 1997 en los Estados Unidos por parte de las electrificadoras. Los primeros prototipos rellenos se dieron en 1998. Los transformadores con éster natural empezaron a ser producidos en 1999⁵.

Dada la viabilidad mostrada para su uso en transformadores, nuevos líquidos dieléctricos aislantes fueron desarrollados por Cooper y ABB en los años 1999 y 2000 respectivamente^{6,7}. Años más tarde, otros aceites basados en semillas fueron igualmente desarrollados como sustitutos para el aceite mineral⁸ hoy por hoy estos productos se distribuyen comercialmente. El desempeño de estos fluidos fue comparado con el de otros líquidos aislantes a través de pruebas de laboratorio basadas en métodos estándar.

En la actualidad, existen varios tipos de aceites biodegradables provenientes de diferentes fabricantes, algunos de los más empleados son: Envirotemp FR3, Midel 731, Biotrans 1000, BIOTEMP, Coconut Oil, ECO Fluid⁹.

⁴ Ibid., p 1.

⁵ MCSHANE, Patrick. LUKSICH, Jhon y MARTINS, M.N. Field experience with natural ester (vegetable oil) dielectric fluid - The First Decade EN: IV Workspot - CE A2 Transformador Conferencia (04: 29-30, noviembre: Recife, Brasil). Brazil: CIGRE, 2006. p. 1-8.

⁶ MCSHANE, Patrick. Vegetable-oil-based dielectric coolants. EN: IEEE Industry Applications Magazine. Mayo de 2002, Vol 8, No 3, p, 34-41.

⁷ OOMMEN, T.V., et al. A new vegetable oil based transformer fluid: development and verification. EN: Electrical Insulation and Dielectric Phenomena Conference. (15-18, Octubre), Vol 01, p. 308 – 312.

⁸ BADENT, R. HEMMER, M. y SCHWAB A. J. Inhibited rape-seed oil as substitute for minerals oils, EN: Electrical Insulation and Dielectric Phenomena Conference. (10, Diciembre) Karlsruhe, Germany. German: University of Karlsruhe 2002. p. 268-271.

⁹ LOPES OLIVEIRA, António Alfonso. Utilização de óleos biodegradáveis em transformadores de distribuição [Informe]: Projecto Seminário ou Trabalho Final de Curso / Faculdade de Engenharia; Universidade de Porto. - Porto: [s.n.], 2005. - pág. 90.

Una comparación general entre el líquido dieléctrico de aceite mineral y el éster natural puede visualizarse en la Tabla 1

Tabla 1. *Comparación entre líquidos refrigerantes*

REFRIGERANTE DIELECTRICO DE ORIGEN MINERAL	REFRIGERANTE DIELECTRICO DE ORIGEN VEGETAL
Hecho de derivados del petróleo	Producido de fuentes renovables
Punto de inflamación entre los 140°C y 160°C	Punto de inflamación mayor a los 300°C
Encendido por arcos eléctricos, y una vez encendidos, el fuego se propaga por si mismo	El alto punto de inflamación esencialmente elimina tanto el encendido por el arco y el quemado
Cuidados necesarios cuando suceden derrames por contaminación	Rápida y completa biodegradación, evita problemas ambientales asociados a los derrames

Con el objeto de especificar el desempeño de los fluidos dieléctricos de origen vegetal para su uso en transformadores de distribución y potencia, en los últimos años se han llevado a cabo trabajos de investigación^{10,11,12}. LIU y TÖRNKVIST¹³ realizaron un trabajo de investigación de los líquidos éster como alternativa para el aceite mineral, donde ejecutaron pruebas de tensión tipo impulso atmosférico de polaridad negativa y positiva a los fluidos bajo estudio, usando la configuración de electrodos punta-esfera a diferentes elongaciones (25 mm, 100 mm y 200 mm), enfocando su estudio a las tensiones de ruptura, efecto de la polaridad, la velocidad y aceleración de la pre-ruptura la cual se conoce como “streamer”. Ellos afirman que el voltaje de ruptura de los aceites vegetales ante impulsos de polaridad negativa fue más bajo que el del aceite mineral.

1.3 CARACTERISTICAS DE LOS ACEITES DIELECTRICOS

En general, el aislamiento líquido tiene tres tipos de características, que son: eléctricas, químicas y físicas. Las propiedades eléctricas incluyen tensión de ruptura, resistividad y permitividad. A continuación se explican cada una de ellas.

1.3.1 Tensión de ruptura¹⁴. Es la característica de un material dieléctrico que puede ser definida como la máxima tensión eléctrica que éste puede soportar sin

¹⁰ QIANG, Liu. WANG Zhongdong. Streamer Characteristic and Breakdown in Synthetic and Natural Ester Transformer Liquids under Standard Lightning Impulse Voltage. *EN: IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. Enero, 2011. vol. 18. ISBN 1070-9878, pp. 285-294.

¹¹ Duy, C.T, et all. Streamer Propagation and Breakdown in Natural Ester at high Voltage. *EN: IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. December, 2009. vol. 16. ISBN 1070-9878/09, p. 1.

¹² Duy, C.T, et all. Streamer propagation and breakdown in rape-seed oil at high voltage. (04:30, junio 03, Julio: Poitiers, francia). conference. poitiers.: IEEE, 2008.

¹³ LIU, Rongsheng, TÖRNKVIST, Christer. Ester Fluids as Alternative for Mineral Oil: The Difference in Streamer Velocity and LI Breakdown Voltage. *EN: Electrical Insulation and Dielectric Phenomena Conference* (1: 18-21, octubre: Vasteras, Sweden). Sweden: IEEE, 2009. p. 543-548.

¹⁴ MARULANDA, Agustín, et all. Study of the vegetal oil as a substitute for mineral oils in distribution transformer. *EN: IEEE*. 2008. ISBN/ISSN 978-1-4244-2218-0. p. 1-6

fallos. El campo eléctrico y la rigidez dieléctrica del material aislante son factores importantes en un sistema de alta tensión. Los factores que afectan a la rigidez dieléctrica son la densidad, la temperatura y la humedad.

La rigidez dieléctrica es inversamente proporcional a la temperatura de operación y la humedad. Los líquidos dieléctricos se contaminan fácilmente y pueden contener sólidos en suspensión y gases disueltos lo que hace que se afecte la característica dieléctrica del líquido.

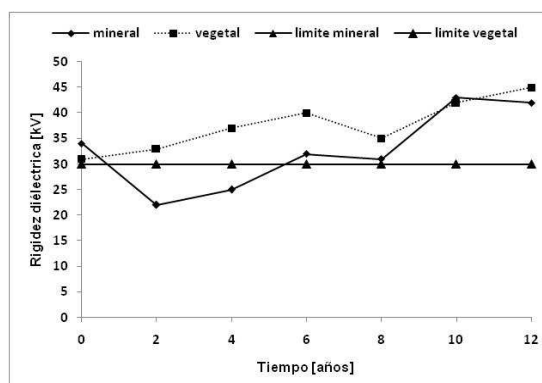
El valor de la rigidez dieléctrica depende exclusivamente del estado de pureza física del aceite; un valor bajo de rigidez dieléctrica puede indicar presencia de contaminantes en la muestra. Sin embargo, un valor elevado de rigidez dieléctrica no indica necesariamente la ausencia de todo contaminante.

La propiedad más importante del líquido para la función que va a cumplir en el transformador es la rigidez dieléctrica. La rigidez dieléctrica de los aceites vegetales debe ser tan buena como la del aceite mineral. En la Figura 1 se aprecia que el voltaje de ruptura cumple con los requisitos mínimos establecidos por la norma para el aceite mineral¹⁵ y para el aceite vegetal¹⁶, sin embargo, cabe destacar que la tensión de ruptura dieléctrica del aceite mineral toma valores superiores e inferiores al límite establecido, mientras que en el aceite vegetal, los niveles de tensión de ruptura dieléctrica aumentan con el pasar del tiempo. La vida útil del aceite vegetal es una fortaleza de este dieléctrico. Según datos del ensayo de envejecimiento, catorce horas de sobre carga representa un año de vida útil del transformador, mientras que para el transformador con aceite vegetal se llega a veinte horas. Analizando los resultados, se obtiene que la vida útil del transformador con aceite vegetal es 42,46 % superior a la del aceite mineral.

¹⁵INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. Guide for Loading Mineral-Oil Immersed Transformers. IEEE Std C57.91. 2002. p. 1-9.

¹⁶AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Specification for Natural (Vegetable Oil) Ester Fluids Used in Electrical Apparatus .ASTM D6871-03.USA West Conshohocken.2008. p 4.

Figura 1. Tensión de ruptura dieléctrica en función del tiempo de vida útil del aceite.



Fuente: *Study of the vegetal oil as a substitute for mineral oils in distribution transformer*¹⁷.

1.3.2 Viscosidad. La viscosidad del fluido (junto con la expansión térmica, conductividad térmica y capacidad calorífica) es una propiedad que ayuda a mejorar la refrigeración del transformador, permitiendo una conducción del calor más fácil hacia las paredes exteriores de la cuba del transformador, que están en contacto con el aire a temperatura ambiente. El aceite mineral es un aceite poco viscoso debido a que contiene compuestos más ligeros¹⁸. La viscosidad del aceite vegetal es más alta que el mineral, lo que es parcialmente compensado por otras propiedades térmicas. Según la ASTM-D3487¹⁹ la viscosidad del aceite mineral es de 12 (cST) y para el aceite vegetal de 50 (cST) a una temperatura de 40°C.²⁰

1.3.3 Contenido de agua. El contenido relativo de agua de los esteres naturales es diferente al aceite mineral. La Figura 2, muestra el contenido relativo de agua en función de la temperatura para los aceites minerales y vegetales. A temperatura ambiente, la saturación de agua en el aceite mineral es cerca de 60 mg/Kg²¹, mientras que para los aceites vegetales es de 1000 mg/Kg²². La rigidez dieléctrica comienza a disminuir cuando aumenta la saturación relativa a 40-50%. Haciendo uso de la saturación porcentual en lugar del contenido de agua absoluta

¹⁷Ibid., p 3.

¹⁸ Disponible en Laboratorio Fluidos Dieléctricos – TEKNIKER. Análisis de aceites dieléctricos y su significado.

¹⁹ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, Standard Specification for Mineral Insulating Oil Used in Electrical Apparatus. ASTM D3487-09. USA West Conshohocken. 2009. p. 5.

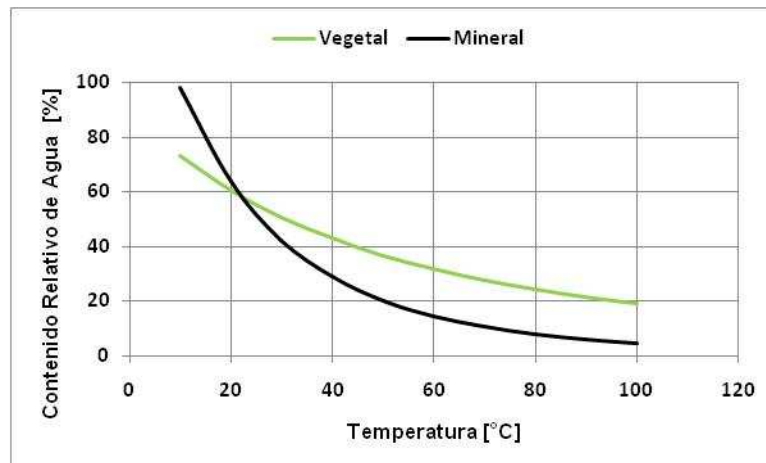
²⁰VOUKELATOS, John, et al. Natural éster (vegetable oil) dielectric fluid application in transformers. EN: cooper power system. p. 2, TABLA 1. 2 P.

²¹INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. Guide For Acceptance and Maintenance of Insulating Oil in Equipment. IEEE C57.106. USA, Piscataway. 2002. p. 1-27.

²²DOBLE INTERNATIONAL CLIENT CONFERENCE. (5, 2001, Boston, USA).Laboratory evaluation of several synthetic and agricultural-based dielectric liquids.

es posible realizar comparaciones directas entre los fluidos de aceite natural y el aceite mineral. La Figura 2 muestra dicha comparación.

Figura 2. *Contenido relativo de agua en aceite mineral y envirotemp FR3*



Fuente: *Natural Éster Dielectric Fluid Development*²³.

1.3.4 Oxidación. La oxidación de un aislante líquido, se traduce en un aumento de viscosidad y del contenido de ácidos. Como consecuencia de esto, los aislantes líquidos, que también actúan como refrigerantes, pueden hacer que los equipos eléctricos queden fuera de uso por obstrucción de los canales de circulación y deterioro en los devanados²⁴. El fenómeno de polimerización o aglomeración de varias moléculas en una sola, se presenta en aquellos aislantes líquidos de composición química inestable, generalmente aceites de origen vegetal, volviendo al líquido más viscoso y disminuyendo su poder refrigerante. Los fenómenos de oxidación y polimerización están provocados por la presencia de oxígeno, altas temperaturas de funcionamiento, arcos eléctricos seguidos por la ionización, formando sustancias asfálticas que disminuyen su rigidez dieléctrica y poder refrigerante.

Los fluidos de éster natural se oxidan de manera diferente que los minerales ya que los aceites de origen vegetal no generan lodos precipitados, si no que tienden a polimerizarse con el tiempo.

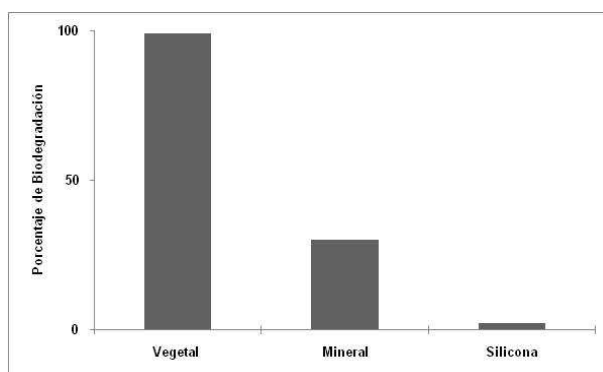
²³ MCSHANE, Patrick, et al. *Natural Éster Dielectric Fluid Development*. EN: Transmission conference & Exposition. Mayo 21-2006. Dallas. ISBN 0-7803-9193. p. 3.

²⁴ UNIVERSIDAD NACIONAL DE CORDOBA. Facultad de ciencias exactas, físicas y naturales. Aceites minerales, aislantes nuevos para transformadores y equipamiento de maniobra [online]. [citado 24 de marzo de 2011]. Disponible en internet: <http://www.efn.uncor.edu/departamentos/electrotecnia/cat/eyearchivos/apuntes/a_practico/Cap%202%20Pco.pdf>

Otras propiedades de los fluidos son útiles principalmente en el diagnóstico de transformadores, y tienen poco o ningún efecto sobre el funcionamiento del transformador. A continuación se mencionan.

1.3.4.1 Propiedad medioambiental. El aceite natural, es un fluido dieléctrico innovador y una alternativa para el aceite de origen mineral que es el comúnmente usado en transformadores de distribución. Los aceites naturales tienen propiedades medio ambientales mejores en comparación al aceite mineral. Por ejemplo: la rápida y completa biodegradación (ver Figura 3) además una degradación del papel aislante (Kraft) mucho menor que cuando se usa aceite mineral²⁵.

Figura 3. Comparación de biodegradación de diferentes líquidos dieléctricos, evaluados en un periodo de 22 días a 250°C.



Fuente: *Vegetable oils for liquid-filled transformers*²⁶.

Los aceites naturales son clasificados en la categoría más favorables de ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA)²⁷ como completamente biodegradable (“ultimately biodegradable”²⁸) y fácilmente biodegradable (“readily biodegradable”²⁹).

²⁵ VOUKELATOS, Op cit., p. 1

²⁶ OOMMEN, T.V., Op cit., p. 10

²⁷ MCSHANE, Patrick, Op cit., p. 1

²⁸ ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Aerobic Aquatic Degradation. EPA Publication 712-C-98-075. USA. January 1998. Office of Prevention, Pesticides, and Toxic Substances.

²⁹ -----, Ready Biodegradation. EPA Publication 712-C-98-076. USA. January 1998. Office of Prevention, Pesticides, and Toxic Substances.

1.3.4.2 Seguridad contra incendios. Los aceites vegetales fueron adicionados a la categoría de los fluidos dieléctricos menos inflamables. Los líquidos menos inflamables, a veces llamados fluidos con alto punto de ignición, se introdujeron a mediados de 1970 como una alternativa de los ASKARALES y para instalaciones que requieren de un alto grado de seguridad contra incendios³⁰.

Los fluidos menos inflamables viene en una variedad de tipos químico: primero están los de un alto peso molecular de hidrocarburos (HMWH siglas en ingles), y siliconas, seguidos en 1980 por fluidos sintéticos tales como: polialfaolefinas (PAO siglas en ingles) y poliéster (POE siglas en ingles). Estos últimos son más atractivos al medio ambiente, sin embargo su costo es relativamente alto estimulando así la búsqueda de alternativas más asequibles.

Los aceites vegetales (colza, soya, girasol) son químicamente similares a los POEs y comparten muchas de sus propiedades; por ejemplo los ésteres naturales tienen un alto punto de inflamación (360°C). Desde finales de los años de 1990 la aplicación de los aceites vegetales en los transformadores de distribución ha ido expandiéndose dadas sus características de poco inflamable³¹ en aplicaciones donde era comúnmente usado el aceite mineral.

1.3.5 Comparación de propiedades entre aceite mineral y vegetal.

Los aceites vegetales difieren químicamente de los productos derivados del petróleo ya que su contenido molecular son triglicéridos, y los de origen mineral (petróleo) están constituidos por una mezcla de hidrocarburos. Las diferencias en la composición química se manifiestan en las propiedades del fluido. La Tabla 2 muestra los límites de aceptación del aceite mineral y de aceites vegetales según "The American Society for Testing and Materials" (ASTM International) e ilustra las similitudes y diferencias.

³⁰VOUKELATOS, Op cit., p. 1.

³¹VOUKELATOS, Op cit., p. 1

Tabla 2. Comparación de algunos valores para aceites minerales y fluidos de éster natural.

Propiedades		ASTM Método	Aceite Mineral ASTM D3487 ³²	Aceite Natural ASTM D6871 ³³
ELÉCTRICA				
Rigidez dieléctrica (KV)		D1816(2mm gap)	≥ 35	≥ 35
Disipación (%)	25℃	D924	≤ 0,05	≤ 0,20
	100℃		≤ 0,30	≤ 4,0
QUÍMICA				
Contenido de Agua (mg/Kg)		D1533	≤ 35	≤ 200
acidez (mg KOH/g)		D974	≤ 0,03	≤ 0,6
FÍSICA				
Color		D1500	≤ 0,5	≤ 1,0
Examen Visual		D1524	Claro y Brillante	Claro y Brillante
Densidad Relativa		D1298	≤ 0,91	≤ 0,96
Punto de Inflamación (℃)		D92	≥ 145	≥ 275
Punto de Flameo (℃)		D92	-	≥ 300
Viscosidad (cSt)	100℃	D445	≤ 0,3	≤ 15
	40℃		≤ 12	≤ 50
Punto de Fluidez (℃)		D97	≤ -40	≤ -10
Tensión interfacial (dyne/cm)		D971	≥ 40	-

Fuente: Natural éster (vegetable oil) dielectric fluid application in transformers³⁴.

1.4 RESUMEN

En este capítulo se presentaron conceptos y la aplicación en transformadores de los aceites dieléctricos tanto minerales como vegetales. Se resaltaron las características principales de estos aceites dieléctricos pero profundizando en los fluidos dieléctricos naturales, utilizando como base, resultados de investigaciones realizadas. Se realizaron tablas y figuras comparativas para resaltar y aclarar los significados de dichos conceptos como son: rigidez dieléctrica, acidez, viscosidad, oxidación, entre otros.

³²AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Specification for Mineral Insulating Oil Used in Electrical Apparatus. ASTM D 3487-09.USA West Conshohocken. 2009. p. 5.

³³-----Standard Specification for Natural (Vegetable Oil) Éster Fluids Used in Electrical Apparatus. ASTM D6871-03.USA West Conshohocken. 2008. p. 4.

³⁴VOUKELATOS, John, et al. Op cit., p.2

CAPÍTULO DOS

Los procedimientos experimentales y la metodología de trabajo son fundamentales en el desarrollo de una investigación. Los mimos, al ser bien planteados, permiten obtener conclusiones con base la observación y el análisis.

En este capítulo se describe en detalle la metodología para realizar los ensayos en los transformadores y muestras de aceite, objeto de estudio.

.

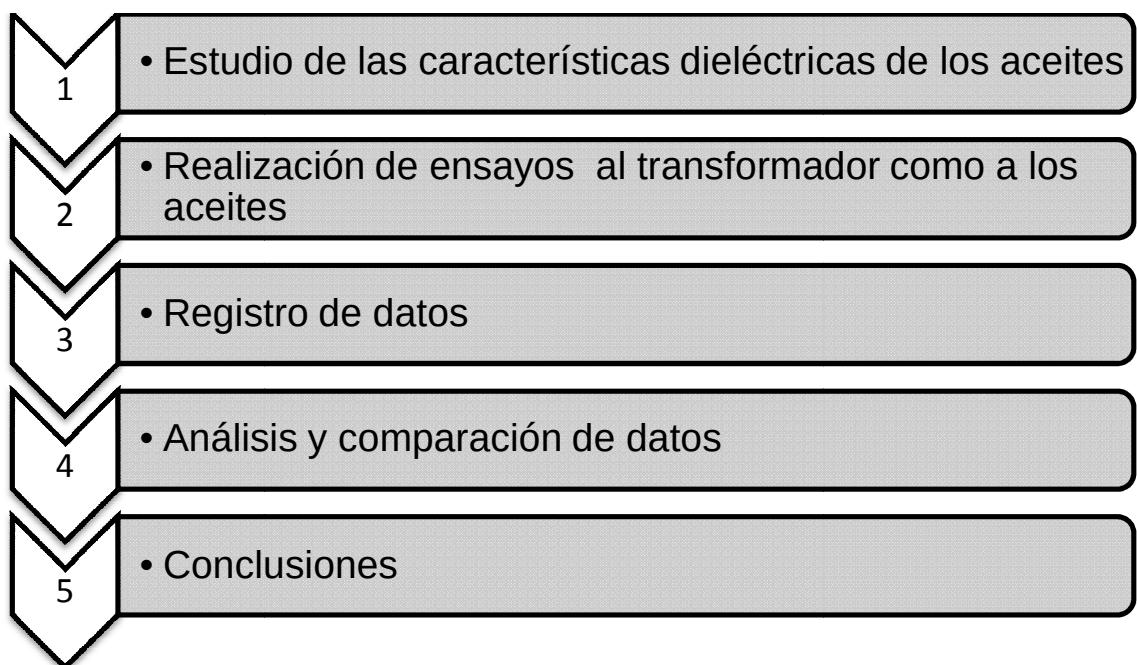
2. METODOLOGÍA DE TRABAJO.

Este trabajo de investigación se realizó por comparación. Se parte de los estudios realizados al aceite mineral, el cual ha sido ampliamente utilizado en transformadores y se busca determinar mediante ensayos (tanto a muestras de aceite mineral y vegetal como a transformadores sumergidos en ambos fluidos) el comportamiento dieléctrico de este nuevo fluido como posible alternativa del aceite mineral.

Se realizaron ensayos de rutina, tensión aplicada e impulso a cuatro transformadores de distribución (dos inmersos en aceite mineral y dos en vegetal) constructivamente iguales de dos capacidades diferentes. Además se realizaron pruebas de tensión de ruptura e impulso a los aceites de origen mineral y vegetal. Todos los resultados obtenidos fueron comparados entre sí.

Los resultados colectados durante el proceso se analizaron y las observaciones se hicieron con base en las diferencias obtenidas. En la Figura 4 se muestra un esquema resumen de la metodología empleada.

Figura 4. Metodología del proyecto.

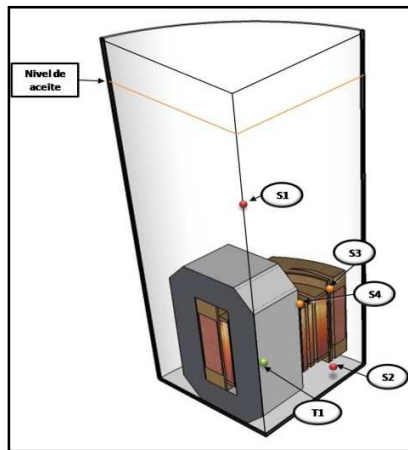


2.1 TRANSFORMADORES BAJO ESTUDIO

Se emplearon cuatro (4) transformadores de distribución monofásicos inmersos en aceite con capacidad de 37,5 kVA y 15 kVA con relación de tensión de 7620 V / 240 V. Para cada capacidad se tienen dos transformadores constructivamente iguales y cada uno contiene un tipo de fluido diferente ya sea de aceite mineral ó aceite vegetal.

Los transformadores cuentan en su interior con sensores de temperatura de fibra óptica y un termopar. En total se cuenta con cinco (5) puntos de medición de temperatura al interior de los transformadores. En la Figura 5 se detallan los puntos de medición. En la Figura 6 se muestran los transformadores bajo estudio.

Figura 5. *Puntos de medición de temperatura en el transformador.*



- S1 : Temperatura superior del aceite
- S2 : Temperatura inferior del aceite
- S3 : Temperatura devanado de alta tensión
- S4 : Temperatura devanado de baja tensión
- T1 : Temperatura en el núcleo

Figura 6. *Transformadores bajo estudio y su implementación de los sensores.*



2.2 LÍQUIDOS AISLANTES BAJO ENSAYO

En este estudio se emplearon dos tipos de aceites aislantes. Uno de ellos de origen mineral (aceite mineral LubTroil™³⁵) fabricado por LUB<>LINE® y el otro de origen vegetal (aceite vegetal Envirotemp® FR3™³⁶) fabricado por COOPER POWER SYSTEMS. En la Figura 7 se muestra una toma de los aceites empleados. Al lado izquierdo se muestra el aceite vegetal y al derecho el aceite mineral.

Figura 7. Líquidos aislantes bajo ensayo.



2.3 ENSAYOS ELÉCTRICOS A LOS TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCION Y MUESTRAS DE ACEITE

Los transformadores bajo ensayo fueron caracterizados eléctricamente para verificar sus igualdades constructivas, esta caracterización se realizó por medio de ensayos de rutina. Las muestras de aceite tanto vegetal como mineral se sometieron a ensayos eléctricos para comprobar las propiedades dieléctricas.

Se ilustra en la Tabla 3 y Tabla 4 los ensayos realizados a los transformadores de distribución y a las muestras de aceite tanto mineral como vegetal y los equipos utilizados en el Laboratorio de Alta Tensión de la Universidad del Valle.

³⁵ LUB<>LINE – Lubricantes & Aditivos. LubTroil™Electrical Transformer Oils [online]. Houston, Texas [citado 24 de noviembre de 2011]. Disponible en Internet: <<http://www.lubline.com/electrical-transformer-oils/>>

³⁶ COOPER POWER SYSTEM – Fluidos Dieléctricos. Fluido Dieléctrico Envirotemp FR3 [online]. Pewaukee, USA [citado 24 de noviembre de 2011]. Disponible en Internet: <http://www.cooperindustries.com/content/dam/public/powersystems/resources/library/900_Fluids/90020.pdf>

Tabla 3. *Relación de ensayos eléctricos a los transformadores*

Experimento	Método	Equipo
Resistencia de aislamiento	IEEE C57.12.90	Megóhmetro AEMC Mod. 5050
Resistencia de devanados	NTC 375 - 70	Microóhmetro AEMC Mod. 5600
Relación de transformación	NTC 471 - 74	DTR AEMC Mod. 8500
Pérdidas de vacío y corriente de excitación	NTC 1031- 98	• Fuente controlada de tensión trifásica STACO 35 A • Multímetro Fluke 12 • Dranetz Power Visa • Dranetz BMI Pinzas de corriente Mod TR2510
Pérdidas con carga y tensión de corto circuito	NTC 1005 – 03	• Fuente controlada de tensión trifásica STACO 35 A • Dranetz Power Visa • Dranetz BMI Pinzas de corriente Mod. TR2510
Tensión aplicada a transformador	NTC 837 - 97	• Transformador FOSTER B/WA 925 20 kVA. 500 V / 300000 V. • Multímetro true RMS Fluke 87 • Cronometro Casio
Impulso atmosférico a transformador	IEEE C.57.12.90	• Generador de Impulso FOSTER Transformers LTD A/WB 083 • Osciloscopio Industrial Fluke 124 • Multímetro true RMS Fluke 87

Tabla 4. *Relación de ensayos eléctricos a las muestras de aceite*

Experimento	Método	Equipo
Impulso atmosférico a muestra de aceite	NTC 3218 – 91	• Generador de Impulso FOSTER Transformers LTD A/WB 083 • Osciloscopio Industrial Fluke 124 • Multímetro true RMS Fluke 87 • Calibrador pie de rey Mitutoyo Ser 533 • Cronometro Casio
Rigidez dieléctrica a muestra de aceite	NTC 3225 - 91	• Equipo FOSTER tensión de prueba 0 - 60kV ac • Celda de prueba

2.4 DESCRIPCIÓN DE LOS PROCEDIMIENTOS

En este proyecto se realizaron una serie de ensayos con el propósito de determinar el comportamiento de los ésteres naturales como fluido dieléctrico.

2.4.1 Ensayos a transformadores. A continuación se describen los ensayos realizados a los transformadores.

2.4.1.1 Resistencia de aislamiento. Este ensayo proporciona una medida de resistencia de aislamiento entre los devanados de alta y baja, devanado de alta y tierra, y por último devanado de baja y tierra. La resistencia de aislamiento fue medida siguiendo el procedimiento descrito en el numeral 10.11.4 de la norma

IEEE C57.12.90³⁷. El conocimiento de la resistencia de aislamiento es de gran valor cuando se evalúa la condición del aislamiento del transformador. En la Figura 8 se muestra el montaje de la realización de este ensayo.

Figura 8. *Montaje ensayo resistencia de aislamiento.*



2.4.1.2 Resistencia de devanados. Este ensayo, proporciona un valor base para establecer las pérdidas con carga y provee una base para establecer mediante un método indirecto la temperatura promedio de los devanados. La resistencia de devanados fue medida siguiendo el procedimiento descrito en el numeral 2.2 de la norma NTC 375³⁸. En la Figura 9 se muestra el montaje de la realización de este ensayo al devanado de alta tensión.

Figura 9. *Montaje ensayo resistencia de devanados.*



³⁷INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS. IEEE Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers. New York.: C57.12.90, IEEE, 2010. 52p.

³⁸ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Transformadores – Medida de la resistencia de devanados. NTC 375. Bogotá D.C.: ICONTEC, 1970. 6 p.

2.4.1.3 Relación de transformación. La relación de transformación de un transformador es la relación entre el número de espiras del devanado de alta tensión y el número de espiras del devanado de baja tensión. La medida de relación de transformación es de interés principalmente cuando se van a conectar en paralelo dos o más transformadores. Esta prueba fue realizada mediante el método 4.1.3 de la norma NTC 471³⁹. En la Figura 10 se muestra el montaje de la realización de este ensayo.

Figura 10. *Montaje ensayo relación de transformación.*



2.4.1.4 Ensayos de medición de pérdidas. Estos tipos de pruebas son de vital importancia para determinar el comportamiento del transformador bajo estudio.

Las pérdidas en vacío y corriente de excitación fueron determinadas de acuerdo con el procedimiento indicado en el numeral 4 de la norma NTC 1031⁴⁰. Esta prueba se ejecutó teniendo el circuito secundario energizado con los terminales del primario abiertos. Las pérdidas bajo carga y tensión de cortocircuito fueron determinadas de acuerdo con el procedimiento descrito en el numeral 4 de la norma NTC 1005⁴¹, colocando en cortocircuito el devanado de baja tensión. En las Figura 11 y Figura 12 se puede observar el montaje de estas pruebas.

³⁹ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Transformadores - Relación de transformación. Verificación de la polaridad y relación de fase. NTC 471. Bogotá D.C.: ICONTEC, 1974. 9 p.

⁴⁰ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Transformadores - Ensayo para la determinación de pérdidas y corriente sin carga. NTC 1031. Bogotá D.C.: ICONTEC, 1998. 8 p.

⁴¹ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Transformadores - Determinación de la tensión de cortocircuito y pérdidas con carga. NTC 1005. Bogotá D.C.: ICONTEC, 2003. 14 p.

Figura 11. *Montaje ensayo pérdidas en vacío y corriente de excitación.*



Figura 12. *Montaje ensayo pérdidas bajo carga y tensión de corto circuito.*



2.4.1.5 Tensión tipo impulso atmosférico. Este ensayo tiene como objetivo determinar el nivel de aislamiento en los transformadores. Para los ensayos de impulso atmosférico, cada uno de los terminales del devanado de mayor tensión, U y X, del transformador de distribución fue probado con la siguiente secuencia de impulsos (un impulso al 100% del BIL con valor de 75kV, un impulso reducido entre el 50% y el 70% del BIL con valor de 47 kV), de polaridad negativa, con forma de onda de $1,2 \mu s / 50 \mu s$, conforme lo establece el

numeral 10.4.2.1 de la norma IEEE C57.12.90⁴². En la Figura 13 se ilustra el montaje para esta prueba.

Figura 13. *Montaje tensión tipo impulso en transformador.*



2.4.1.6 Tensión aplicada. Para los ensayos de tensión aplicada el devanado de alta tensión fue ensayado de acuerdo con el numeral 5.1 de la norma NTC 837⁴³, aplicando una tensión de 26 kV a sus terminales cortocircuitados, a una frecuencia de 60 Hz, durante 60 segundos, estando todos los terminales de los devanados de baja tensión cortocircuitados y aterrizados. Para el ensayo del devanado de baja tensión, se aplicó una tensión de 10 kV por 60 segundos a sus terminales cortocircuitados, a una frecuencia de 60 Hz, durante 60 segundos, estando todos los terminales de los devanados de alta tensión cortocircuitados y aterrizados. En la Figura 14 se muestra el montaje para esta prueba.

⁴²INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS. IEEE Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers. New York.: C57.12.90, IEEE, 2010. 45 p.

⁴³ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Transformadores ensayo dieléctrico. NTC 837. Bogotá D.C.: ICONTEC, 1997. 2 p.

Figura 14. *Montaje tensión aplicada en transformador.*



2.4.2 Ensayos dieléctricos sobre muestras de aceite. Estos ensayos tienen como objetivo determinar la tensión de ruptura dieléctrica de los aceites derivados del petróleo, en el que el aceite es un medio aislante y refrigerante. Este tipo de prueba se realizó a diferentes temperaturas.

El calentamiento de las muestras de aceite se realizó con una resistencia disipadora de calor. Esta resistencia se sumerge en la cuba de ensayo (tensión aplicada o impulso) y con las termocuplas se observó la temperatura a la cual se quiere llevar la muestra.

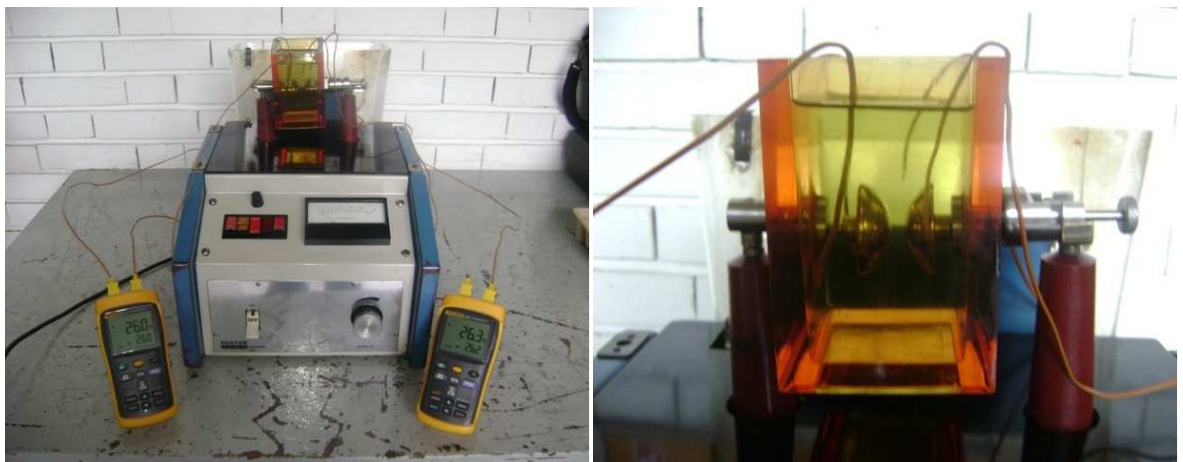
2.4.2.1 Tensión de ruptura usando electrodos tipo VDE. La tensión de ruptura dieléctrica de un líquido aislante es importante como una medida de la capacidad del líquido para soportar esfuerzos eléctricos sin presentar falla. Dicha tensión puede también indicar la presencia de agentes contaminantes tales como agua, suciedad, fibras húmedas de celulosa o partículas conductoras, las cuales podrán estar presentes en concentraciones significativas en el líquido, cuando se obtienen valores bajos de tensión de ruptura dieléctrica durante los ensayos.

El recipiente empleado para el ensayo tiene una forma aproximadamente cúbica, para lograr una separación entre los electrodos de 2,0 mm. Los electrodos empleados son de tipo VDE. Para este ensayo se utilizaron muestras a diferentes

temperaturas. El ensayo fue realizado siguiendo el procedimiento descrito en el numeral 10 de la NTC 3218⁴⁴.

El ensayo se inicio con el aceite mineral debido a que se tiene mayor información sobre las tensiones de ruptura de este líquido. El mismo procedimiento fue realizado con el aceite vegetal teniendo en cuenta las consideraciones propuestas por el fabricante⁴⁵ en cuanto al tiempo de reposo de la muestra antes del ensayo. En la Figura 15 se muestra el montaje para esta prueba.

Figura 15. *Montaje tensión de ruptura con electrodos tipo VDE.*



2.4.2.2 Tensión tipo impulso atmosférico. Los líquidos aislantes usados en aparatos de alta tensión se exponen a sobretensiones momentáneas o transitorias, causadas por descargas atmosféricas en áreas aledañas o por maniobras de conexión y desconexión en circuitos de alta tensión. Para la realización de este tipo de ensayo se usó la configuración punta-esfera con una separación de 25,4 mm entre electrodos. El ensayo fue realizado siguiendo el procedimiento descrito en el numeral 8 de la NTC 3225⁴⁶. El ensayo se realizó en primera instancia sobre el aceite mineral obteniendo resultados similares a los reportados por el fabricante. El mismo procedimiento se realizó con el aceite

⁴⁴ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Método de ensayo para determinar la tensión de ruptura dieléctrica en aceites aislantes derivados del petróleo usando electrodos del tipo VDE. NTC 3218. Bogotá D.C.: ICONTEC, 1991. 11 p.

⁴⁵ COOPER POWER SYSTEM. Fluido Envirotemp FR3 – Guía de Ensayos [online]. Pewaukee, USA [citado 24 de noviembre de 2011]. Disponible en Internet: < http://www.cooperindustries.com/content/dam/public/powersystems/resources/library/900_Fluids/R9002012S.pdf >

⁴⁶ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Método de ensayo para determinar la tensión de ruptura dieléctrica de los aceites aislantes derivados del petróleo sometidos a impulsos eléctricos. NTC 3225. Bogotá D.C.: ICONTEC, 1991. 13 p.

vegetal teniendo en cuenta las consideraciones propuestas por el fabricante⁴⁷ en cuanto al tiempo de reposo antes del ensayo. Para este ensayo también se emplearon muestras de aceite a diferentes temperaturas. En la Figura 16 se muestra el montaje para esta prueba

Figura 16. *Montaje tensión tipo impulso a muestra de aceite.*



- **Criterios de consistencia estadística.** Estos ensayos deben cumplir con unos criterios estadísticos debido a que son procedimientos repetitivos. La media y la desviación estándar se calculan como se indica en las ecuaciones (1) y (2):

- Media:

$$\bar{X} = \frac{1}{5} \sum_{x=i}^5 X_i \quad (1)$$

- Desviación estándar:

$$s = \sqrt{\frac{1}{5} \left(\sum_{x=i}^5 X_i^2 - 5\bar{X}^2 \right)} \quad (2)$$

Si la relación S/X es mayor que 0,1, es probable que la desviación estándar de las cinco tensiones de ruptura sea excesiva y por lo tanto el error de su promedio también sea excesivo.

Finalmente, se muestra a continuación en la Tabla 5 el resumen de las pruebas realizadas en este proyecto.

⁴⁷ COOPER POWER SYSTEM. Op, cit. p. 4.

Tabla 5. *Cuadro resumen de pruebas y/o experimentos realizados.*

<i>Componente</i>	<i>Prueba y/o experimento</i>	<i>Objeto</i>
Aceite	Tensión aplicada e impulso atmosférico	Verificación de propiedades dieléctricas.
Transformador	Rutina, tensión aplicada e impulso atmosférico	Verificación de las similitudes constructivas, y el aislamiento.

2.5 RESUMEN

En este capítulo se realizó una descripción de los ensayos dieléctricos que se efectuaron en los transformadores y muestras de aceite (mineral y vegetal). Así mismo se mencionan los equipos y materiales empleados. También se describen cada uno de los procedimientos de ensayo según el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (INCONTEC) e Institute Of Electrical And Electronic Engineers (IEEE).

CAPÍTULO TRES

El aceite mineral ha sido predominantemente utilizado como líquido aislante y refrigerante en la industria de los transformadores por más de 100 años. Sin embargo, con la preocupación de la seguridad contra incendios y el impacto al medio ambiente, líquidos alternativos tales como fluidos de éster natural son de gran interés.

En este capítulo se analiza, evalúa e interpretan los datos coleccionados en el proceso de realización de las prueba. Los resultados obtenidos se presentan en tablas, oscilogramas y en diagramas de barras para ilustrar y comparar los datos entre los transformadores y muestras de aceite de origen mineral y vegetal.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE DATOS

En este capítulo se registran y se da discusión a los resultados obtenidos con los ensayos realizados a los transformadores y muestras de aceite. Para todos los ensayos la base del análisis surge de la comparación de los resultados.

3.1 ENSAYOS ELÉCTRICOS A LOS TRANSFORMADORES

Se realizaron ensayos de rutina según los procedimientos descritos en el capítulo 2, con el objeto de garantizar que los transformadores utilizados en este proyecto eran constructivamente similares. Los resultados se ilustran en la Tabla 6 para el transformador de 15 kVA, y en la Tabla 7 para el transformador de 37,5 kVA. La incertidumbre en las mediciones de resistencia es del 0,64% y en la determinación de las pérdidas en vacío y bajo carga del 2,3% y 1,3% respectivamente.

Tabla 6. Resultados de ensayos de rutina para transformador de 15 kVA

Ensayo	Transformador Mineral				Transformador Vegetal			
	Pr1	Pr2	Pr3	Promedio	Pr1	Pr2	Pr3	Promedio
Pérdidas en vacío a 20°C [W]	63,55	64,40	63,81	63,92	67,72	62,60	63,40	62,89
Pérdidas bajo carga a 85°C [W]	184,70	191,00	186,40	187,25	185,90	184,00	187,00	185,48
Resistencia devanado de alta tensión a 85°C [Ω]	22,48	22,70	22,64	22,60	22,76	22,50	22,70	22,67
Resistencia devanado de baja tensión a 85°C [m Ω]	24,46	24,80	24,46	24,56	24,49	24,50	24,70	24,57

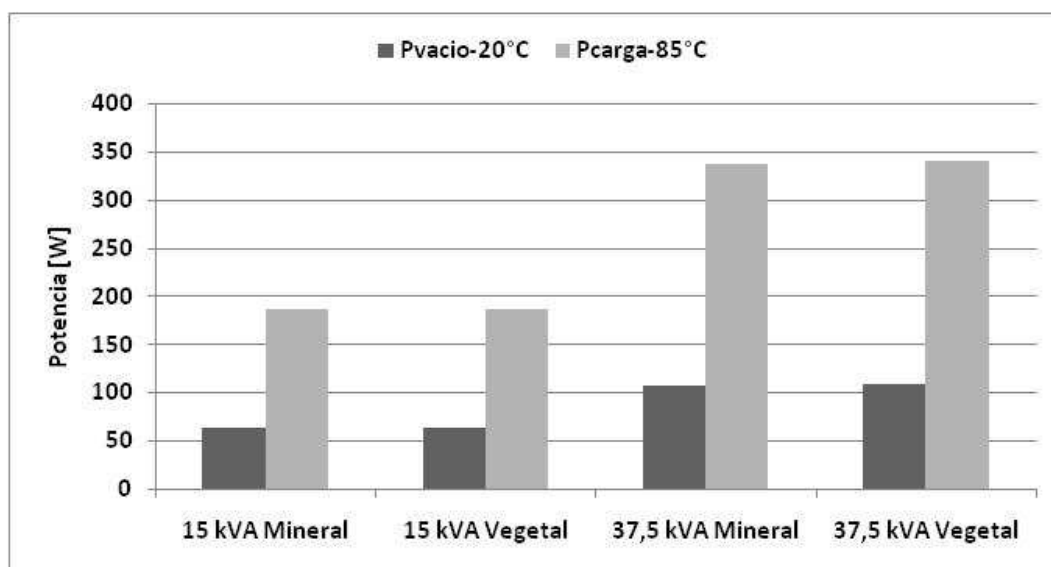
Tabla 7. Resultados de ensayos de rutina para transformador de 37,5 kVA

Ensayo	Transformador Mineral				Transformador Vegetal			
	Pr1	Pr2	Pr3	Promedio	Pr1	Pr2	Pr3	Promedio
Pérdidas en vacío a 20°C [W]	107,10	106,90	107,50	107,16	108,70	108,20	108,50	108,48
Pérdidas bajo carga a 85°C [W]	335,40	337,80	337,20	336,80	342,40	341,50	338,70	340,87
Resistencia devanado de alta tensión a 85°C [Ω]	8,00	7,90	8,00	7,97	8,00	8,00	8,00	8,00
Resistencia devanado de baja tensión a 85°C [m Ω]	50,38	50,29	50,37	50,35	49,90	50,00	50,01	49,97

En la Figura 17 se representa gráficamente los resultados obtenidos de los ensayos en pérdidas de vacío y bajo carga. Para los transformadores de una misma potencia se observa que los resultados obtenidos son muy cercanos entre si y cumplen con los valores establecidos según la Norma Técnica Colombiana.

Valores de pérdidas sin carga ($P_{\text{vacío}}$) de 70W y 135W para transformadores monofásicos de 15 kVA y 37,5 kVA respectivamente y valores de pérdidas bajo carga (P_{carga}) de 195W y 405W para transformadores monofásicos de 15 kVA y 37,5 kVA respectivamente, lo que confirma sus similitudes en la construcción.

Figura 17. *Perdidas en vacío y con carga de los transformadores bajo estudio*



3.1.1 Impulso a transformadores. A los transformadores sumergidos en aceite vegetal y mineral de ambas capacidades se les realizó el ensayo tal como se describió en el numeral...2.4.1.5... del capítulo 2. En la Tabla 8 se registran las condiciones atmosféricas en las que se ejecutó el ensayo tensión tipo impulso para los transformadores de 37,5 kVA.

Tabla 8. *Condiciones atmosféricas durante el ensayo*

	MINERAL	VEGETAL
Temperatura Ambiente	26°C	26,5°C
Humedad Relativa	64 %	65 %
Presión Barométrica	902 mb	902 mb

A continuación en la Figura 18 a la Figura 21 se presentan los oscilogramas resultantes de los impulsos aplicados a los transformadores sumergidos en aceite mineral y vegetal de 37,5 kVA, en las fases U y X. se aplicó una onda de 1,5 μs de frente y 40,2 μs de cola.

Figura 18. Onda de impulso reducida y completa fase U, transformador sumergido en aceite mineral de 37,5 kVA.

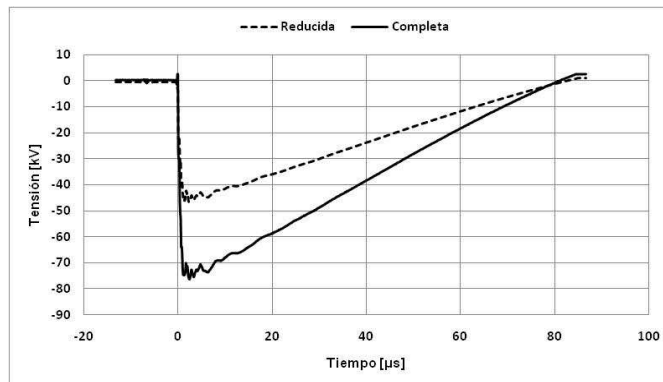


Figura 19. Onda de impulso reducida y completa fase X, transformador sumergido en aceite mineral de 37,5 kVA.

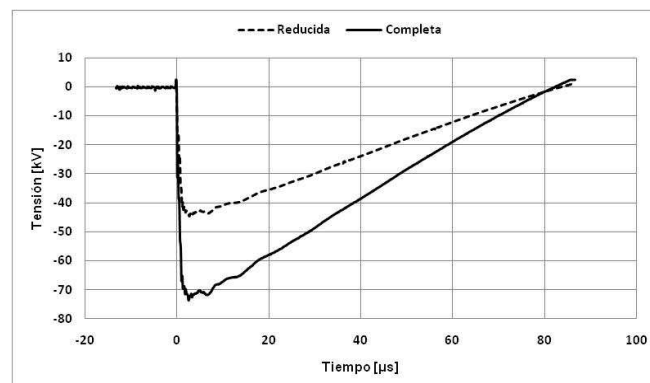


Figura 20. Onda de impulso reducida y completa fase U, transformador sumergido en aceite vegetal de 37,5 kVA.

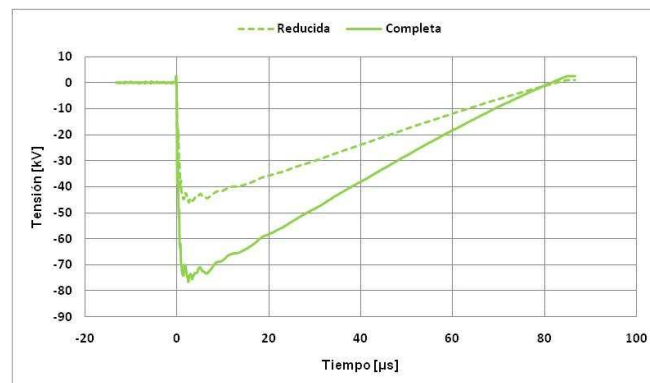
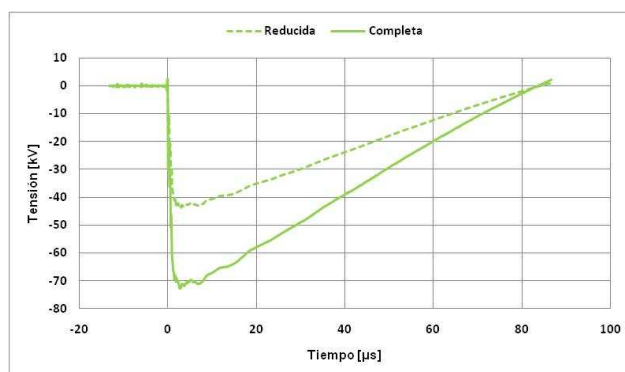


Figura 21. Onda de impulso reducida y completa fase X, transformador sumergido en aceite vegetal de 37,5 kVA.



En la Tabla 9 se registran las condiciones atmosféricas en las que se ejecutó el ensayo tensión tipo impulso para los transformadores de 15 kVA.

Tabla 9. Condiciones atmosféricas durante el ensayo

	MINERAL	VEGETAL
Temperatura Ambiente	25.5°C	25.5°C
Humedad Relativa	67 %	60 %
Presión Barométrica	902 mb	902 mb

A continuación en la Figura 22 a la Figura 25 se presentan los oscilogramas resultantes de los impulsos aplicados a los transformadores sumergidos en aceite mineral y vegetal de 15 kVA, en las fases U y X. se aplicó una onda de 1,0 μ s de frente y 52,8 μ s de cola.

Figura 22. Onda de impulso reducida y completa fase U, transformador sumergido en aceite mineral de 15 kVA.

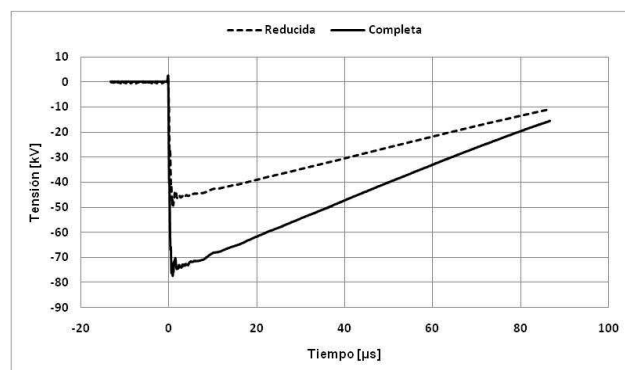


Figura 23. Onda de impulso reducida y completa fase X, transformador sumergido en aceite mineral de 15 kVA.

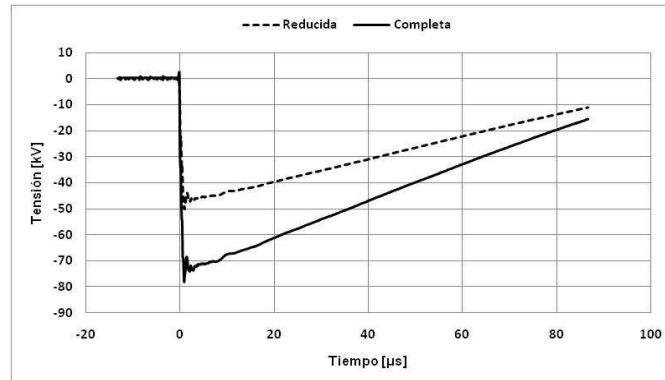


Figura 24. Onda de impulso reducida y completa fase U, transformador sumergido en aceite vegetal de 15 kVA.

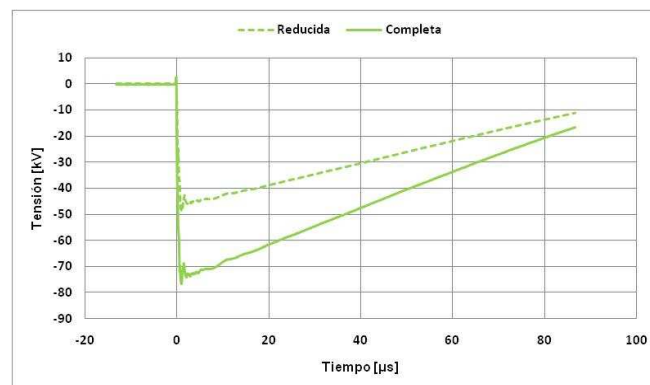
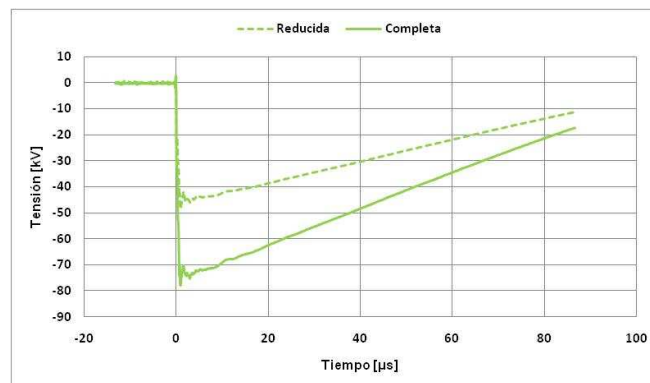


Figura 25. Onda de impulso reducida y completa fase X, transformador sumergido en aceite vegetal de 15 kVA.



3.1.1.1 Análisis. La realización de este tipo de prueba en los transformadores es de un alto valor de control de calidad y da una idea del estado de su aislamiento⁴⁸.

Teniendo en cuenta lo anterior se concluye que tanto para los transformadores de 37,5 kV y 15 kV sumergidos en aceite mineral y vegetal, la prueba de que el aislamiento ha resistido el ensayo, es la ausencia de diferencias notables entre los oscilogramas correspondientes a la tensión reducida y a la tensión plena de ensayo.

3.1.2 Tensión aplicada a transformadores. Este ensayo se realizó como se describió en el numeral...2.4.1.6... del capítulo 2, a los transformadores sumergidos en aceite vegetal y mineral de ambas capacidades. Las condiciones atmosféricas en la que se realizó la prueba se reportan en la Tabla 10. En la Tabla 11 se presentan las tensiones aplicadas a los transformadores para el devanado de alta tensión como para el de baja tensión.

Tabla 10. *Condiciones atmosféricas durante el ensayo para los transformadores de 37,5 kVA y 15 kVA*

	MINERAL	VEGETAL
<i>Temperatura Ambiente</i>	26,5°C	26,5°C
<i>Humedad Relativa</i>	64 %	65 %
<i>Presión Barométrica</i>	899 mb	899 mb

Tabla 11. *Tensión aplicada en los transformadores 37,5 kVA y 15 kVA.*

	Alta Tensión		Baja Tensión	
	Mineral	Vegetal	Mineral	Vegetal
<i>Tensión de Norma[kV]</i>	26	26	10	10
<i>Tensión Aplicada [kV]</i>	26	26	10	10
<i>Tiempo [s]</i>	60	60	60	60

3.1.2.1 Análisis. Como resultado se obtuvo que los transformadores bajo ensayo no presentaron ningún tipo de flameo ni perforación en su aislamiento, durante el tiempo de prueba.

⁴⁸TORRES, Alberto y TURLETTTO, Ezequiel. Ensayos de impulsos de origen atmosféricos en transformadores. Córdoba: Universidad Nacional de Córdoba. Facultad de Ciencias exactas Físicas y Naturales. Laboratorio de Alta Tensión. 2004. p.8.

3.2 ENSAYOS ELÉCTRICOS A LAS MUESTRAS DE ACEITE

3.2.1 Impulso a muestras de aceite. Este ensayo se realizó como se describió en el numeral...2.4.2.2... del capítulo 2, y se emplearon muestras a diferentes temperaturas (ambiente (26,5°C), 50°C, 80°C), manteniendo una separación de 1 pulgada entre los electrodos de configuración punta-esfera para analizar su comportamiento de rigidez dieléctrica. En la Tabla 12 se observa las condiciones atmosféricas en la que se realizó la prueba. En la Tabla 13 se presenta una comparación entre el aceite mineral y vegetal con los niveles tensión de ruptura dieléctrica, de las cinco muestras de aceite a temperatura ambiente (26,5°C).

Tabla 12. *Condiciones atmosféricas durante el ensayo.*

	MINERAL	VEGETAL
<i>Temperatura Ambiente</i>	26,5°C	26,5°C
<i>Humedad Relativa</i>	60 %	64 %
<i>Presión Barométrica</i>	903 mb	906 mb

Tabla 13. *Datos obtenidos en la prueba.*

<i>No de Muestra</i>	<i>Tensión de ruptura [kV]</i>		<i>Temperatura de la muestra [°C]</i>	
	MINERAL	VEGETAL	MINERAL	VEGETAL
1	131	119	26,5	26,5
2	151	117	26,5	26,5
3	158	120	26,5	26,5
4	148	119	26,5	26,5
5	147	108	26,5	26,5

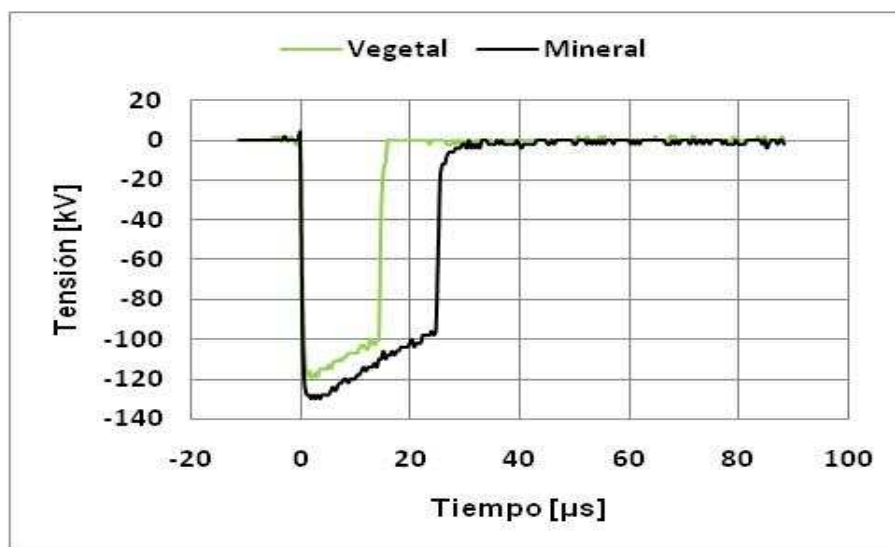
En la Tabla 14 se observan los cálculos de promedio y criterio estadístico de cada prueba de tensión tipo impulso cuando ocurre la ruptura dieléctrica. Los criterios estadísticos brinda la seguridad que los resultados obtenidos durante la prueba están entre los márgenes que indica la norma. Si la relación $s/\bar{x}$ es mayor que 0,1; puede indicar que la desviación estándar de las 5 rupturas es excesiva, y por tanto, el error probable de su promedio es excesivo. La incertidumbre de medición de tensión es 2,9%, la incertidumbre de medición de tiempo es 1,5%, a un nivel de confianza del 95%.

Tabla 14. Cálculos, promedios y criterios estadísticos.

	MINERAL	VEGETAL
Promedio [x]	147	117
Desviación [s]	9,9	4,9
s/x	0,06	0,04
Rango	27	12
% Rango Promedio	18,4	10,3

A continuación se presentan los oscilogramas obtenidos de los impulsos aplicados a las muestras de aceite mineral y vegetal. En la Figura 26 se ilustra el oscilograma de tensión de ruptura, para la muestra 1 de aceite.

Figura 26. Oscilograma de tensión de ruptura de la muestra 1.



En la Figura 27, Figura 28, Figura 29 y Figura 30 se observa los oscilogramas obtenidos de tensión de ruptura de las cuatro muestras restantes de aceite mineral y vegetal.

Figura 27. *Oscilograma tensión de ruptura de la muestra 2.*

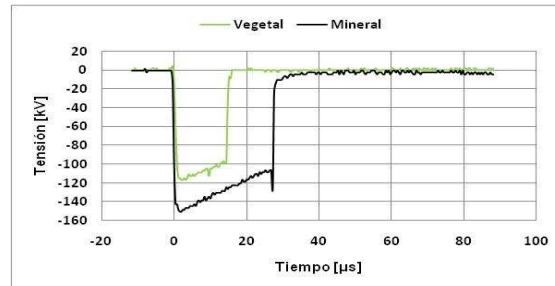


Figura 28. *Oscilograma tensión de ruptura de la muestra 3.*

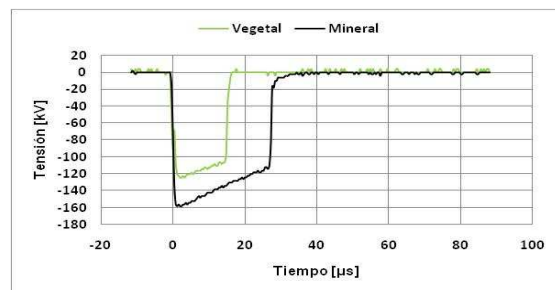


Figura 29. *Oscilograma tensión de ruptura de la muestra 4.*

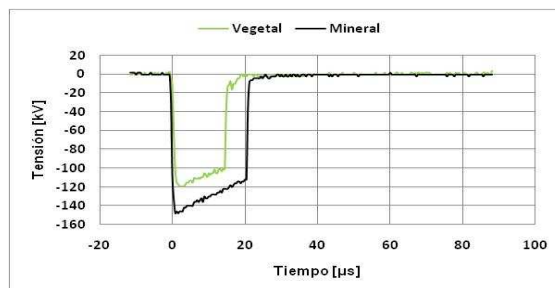
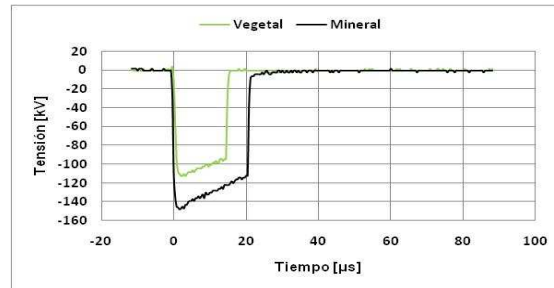


Figura 30. Oscilograma tensión de ruptura de la muestra 5.



En la Tabla 15 se observa las condiciones atmosféricas en la que se realizó la prueba. En la Tabla 16 se presenta los resultados obtenidos en la ejecución de esta prueba y en la Tabla 17 se observa los cálculos de promedio y criterio estadístico de las pruebas de tensión tipo impulso cuando ocurrió la ruptura dieléctrica a una temperatura de 50°C.

Tabla 15. Condiciones atmosféricas durante el ensayo.

	MINERAL	VEGETAL
<i>Temperatura Ambiente</i>	24,5°C	25°C
<i>Humedad Relativa</i>	72 %	69 %
<i>Presión Barométrica</i>	904 mb	907 mb

Tabla 16. Datos obtenidos en la prueba a 50 °C .

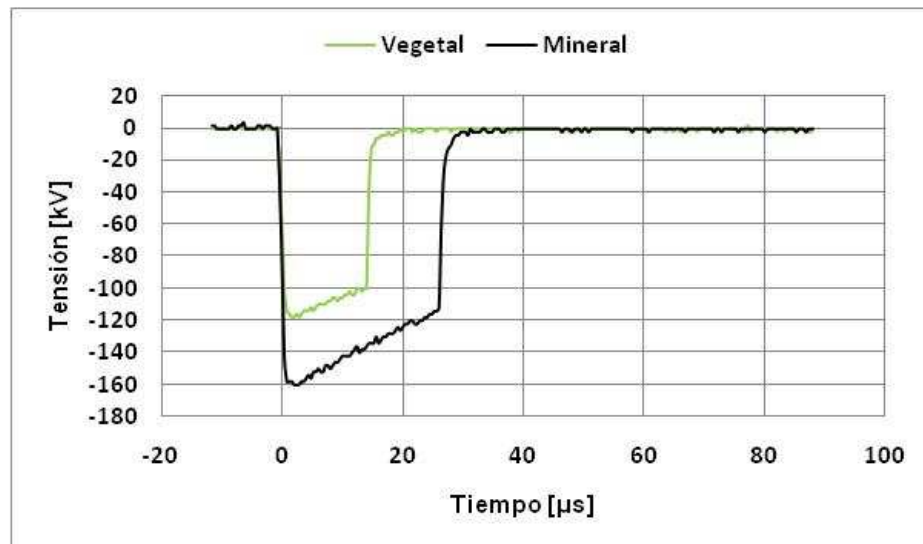
<i>No de muestra</i>	<i>Tensión de ruptura [kV]</i>		<i>Temperatura de la muestra [°C]</i>	
	MINERAL	VEGETAL	MINERAL	VEGETAL
1	161	118	51,0	51,2
2	161	120	50,0	49,5
3	163	117	49,8	49,0
4	161	119	50,5	50,0
5	165	120	49,5	49,0

Tabla 17. Cálculos, promedios y criterios estadísticos.

	MINERAL	VEGETAL
<i>Promedio [x]</i>	162	119
<i>Desviación [s]</i>	1,8	1,3
<i>s/x</i>	0,01	0,01
<i>Rango</i>	4	3
<i>% Rango Promedio</i>	2,5	2,5

En la Figura 31 muestran los oscilogramas de tensión de ruptura, para la primer muestra de aceite respectivamente.

Figura 31. *Oscilograma de tensión de ruptura de la muestra 1.*



En la Figura 32, Figura 33, Figura 34 y Figura 35 se observa los oscilogramas obtenidos de tensión de ruptura de las cuatro muestras restantes de aceite mineral y vegetal.

Figura 32. *Oscilograma tensión de de la muestra 2.*

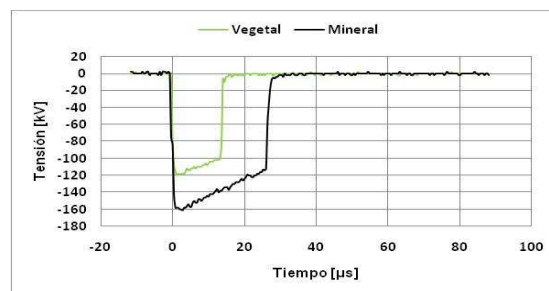


Figura 33. *Oscilograma tensión de ruptura de la muestra 3.*

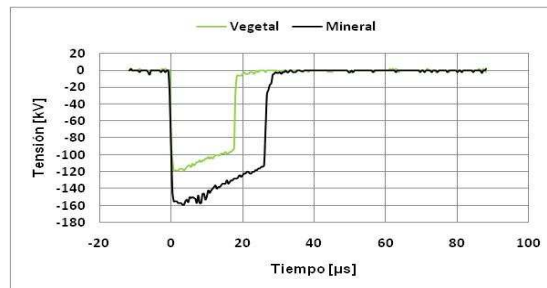


Figura 34. *Oscilograma tensión de ruptura de la muestra 4.*

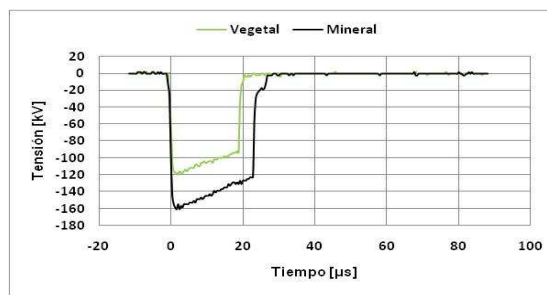
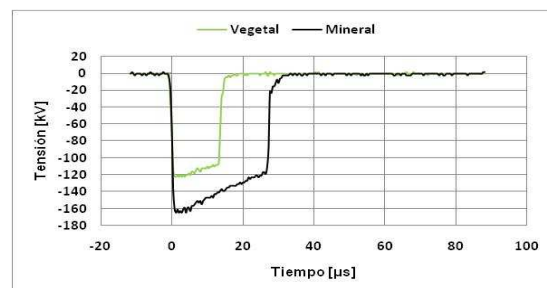


Figura 35. *Oscilograma tensión de ruptura de la muestra 5.*



En la Tabla 18 se observa las condiciones atmosféricas en la que se realizó la prueba. En la Tabla 19 se presenta los resultados obtenidos en la ejecución de esta prueba y en la Tabla 20 se observa los cálculos de promedio y criterio estadístico de las pruebas de tensión tipo impulso cuando ocurrió la ruptura dieléctrica a una temperatura de 80°C.

Tabla 18. Condiciones atmosféricas durante el ensayo.

	MINERAL	VEGETAL
<i>Temperatura Ambiente</i>	25°C	26,5°C
<i>Humedad Relativa</i>	57 %	63 %
<i>Presión Barométrica</i>	908 mb	906 mb

Tabla 19. Datos obtenidos en la prueba a 80 °C .

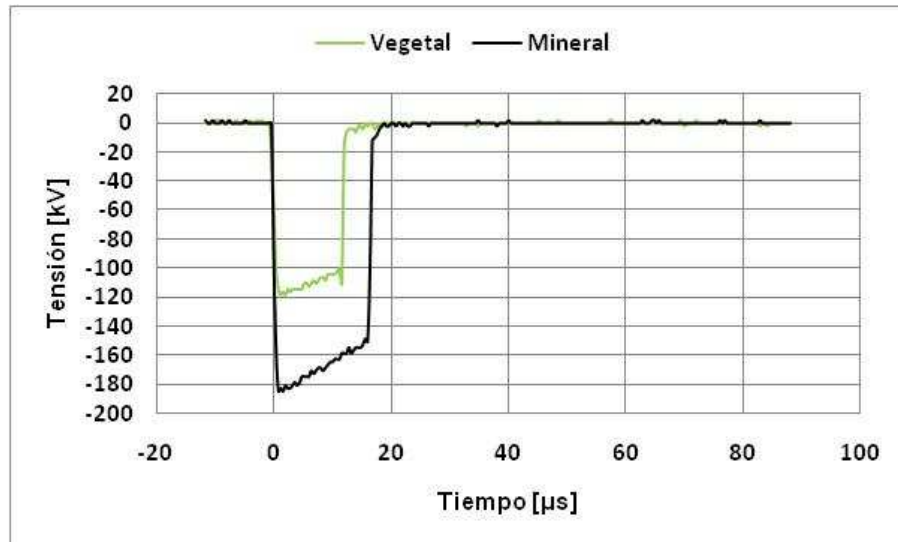
<i>No de muestra</i>	<i>Tensión de ruptura [kV]</i>		<i>Temperatura de la muestra [°C]</i>	
	MINERAL	VEGETAL	MINERAL	VEGETAL
1	182	119	81,0	80,2
2	197	120	80,5	79,7
3	199	118	81,0	81,0
4	200	108	81,0	80,0
5	199	120	80,5	79,5

Tabla 20. Cálculos, promedios y criterios estadísticos.

	MINERAL	VEGETAL
Promedio [x]	195	117
Desviación [s]	7,6	5,1
s/x	0,03	0,04
Rango	18	12
% Rango Promedio	9,2	10,3

En la Figura 36 muestran los oscilogramas de la tensión de ruptura, para la primer muestra de aceite respectivamente.

Figura 36. *Oscilograma de tensión ruptura de la muestra 1.*



En la Figura 37, Figura 38, Figura 39 y Figura 40 se observa los oscilogramas obtenidos de tensión de ruptura de las cuatro muestras restantes de aceite mineral y vegetal.

Figura 37. *Oscilograma tensión de ruptura de la muestra 2.*

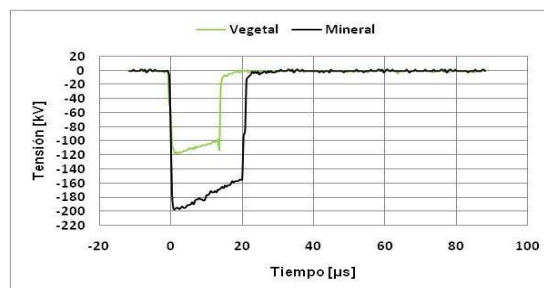


Figura 38. *Oscilograma tensión de ruptura de la muestra 3.*

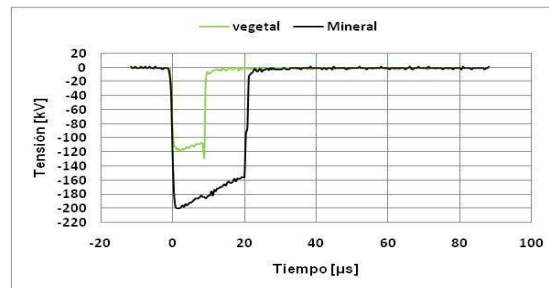


Figura 39. *Oscilograma tensión de ruptura de la muestra 4.*

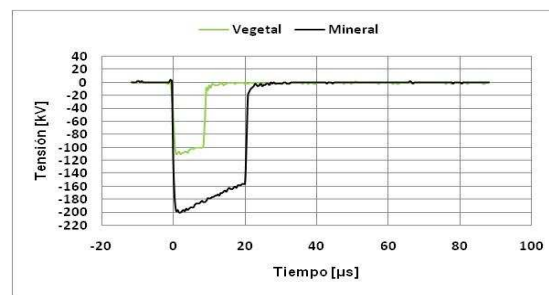
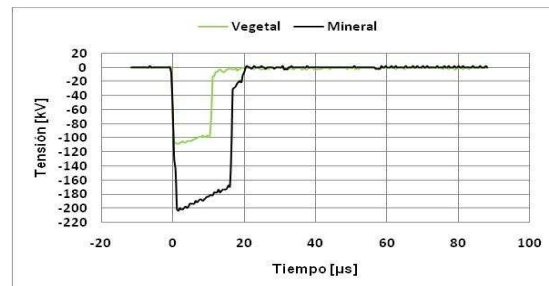


Figura 40. *Oscilograma tensión de ruptura de la muestra 5.*



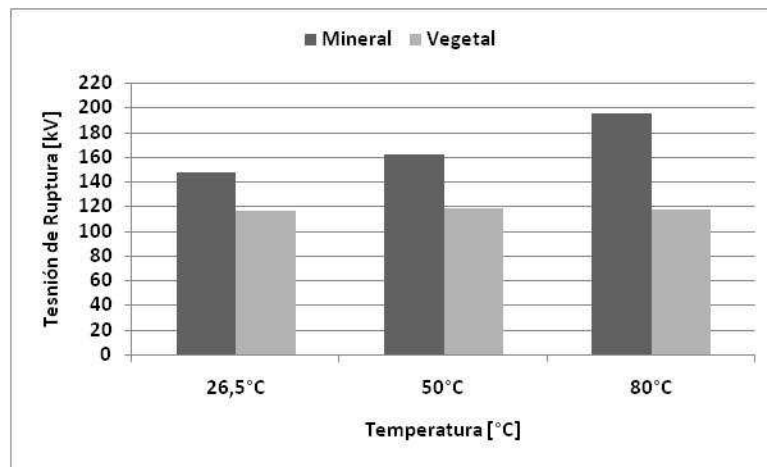
Los resultados obtenidos para las muestras a diferentes temperaturas (ambiente, 50°C y 80°C), son consistentes con los criterios estadísticos establecidos en las normatividades.

A continuación en la Tabla 21 se presenta un resumen con las rupturas promedio obtenidas de las diferentes temperaturas y en la Figura 41 se representa de forma grafica los resultados de la Tabla 21.

Tabla 21. Tensiones de ruptura promedio a las diferentes temperaturas

Temperatura	Mineral [kV]	Vegetal [kV]
Ambiente (26,5°C)	147	117
50°C	162	119
80°C	195	117

Figura 41. Tensiones de ruptura en la prueba a diferentes temperaturas



3.2.1.1 Análisis. Como resultado de esta prueba eléctrica se observan diferencias significativas en los los aceites vegetales y minerales probados. El aceite vegetal mantuvo constante la tensión de ruptura a medida que se incrementó la temperatura, en cambio el aceite mineral tiene un aumento de su tensión de ruptura al incremento de temperatura a la cual se probó la muestra y para los casos evaluados fue mayor que el del aceite vegetal. Resultados similares fueron reportados por LIU, Rongsheng, et al⁴⁹ que realizó un estudio de los líquidos éster como alternativa para el aceite mineral, donde afirman que el voltaje de ruptura de los aceites vegetales ante impulsos de polaridad negativa fue más bajo que el del aceite mineral.

En aceites minerales, una gran cantidad de datos se han acumulado durante años sobre las propiedades de pre-ruptura y ruptura de alta tensión. El estudio de pre-ruptura se conoce como “streamer”. Este es útil para comprender las variaciones

⁴⁹LIU, Rongsheng, TÖRNKVIST, Christer . Ester Fluids as Alternative for Mineral Oil: The Difference in Streamer Velocity and LI Breakdown Voltage. *EN: Electrical Insulation and Dielectric Phenomena Conference* (1: 18-21, octubre: Vasteras, Sweden). Sweden: IEEE, 2009. p. 543-548.

de voltaje de ruptura cuando las condiciones cambian. La caracterización de los “streamer” proporciona parámetros, además de las pruebas estándar tales como tensión tipo impulso y tensión de ruptura, lo que permite una mejor comparación de las propiedades del líquido⁵⁰.

El comportamiento de la tensión constante de ruptura del aceite vegetal puede explicarse debido a que según los resultados el aceite mineral en comparación con los esteres naturales muestran una propagación más fácil de “streamer” (independientemente de la temperatura de la muestra). La existencia más rápida de “streamer” en los esteres naturales induce una menor capacidad para resistir a sobretensiones a los transitorios de corta duración, como el impulso tipo rayo comúnmente usado para verificar los sistemas de alta tensión, que a su vez induce una menor tensión de ruptura en ambas polaridades (positiva y negativa). A partir de estos resultados, las propiedades de los “streamer” en el aceite vegetal son menos favorables para el aislamiento de alta tensión que en el aceite mineral^{51,52}.

3.2.2 Tensión de ruptura dieléctrica a muestras de aceite. Este ensayo se realizó como se describió en el numeral...2.4.2.1... del capítulo 2, y se emplearon muestras a diferentes temperaturas (ambiente (26,5°C), 40°C, 50°C, 60°C, 70°C), manteniendo una separación de 2mm entre los electrodos de tipo VDE, para analizar su comportamiento de rigidez dieléctrica. En la Tabla 22 se muestran los resultados obtenidos del ensayo para las cinco muestras de aceite mineral y vegetal con los niveles de tensión de ruptura dieléctrica.

Tabla 22. *Datos obtenidos en la prueba.*

Tensión a Tamb [kV]		Tensión a 40°C [kV]		Tensión a 50°C [kV]		Tensión a 60°C [kV]		Tensión A 70°C [Kv]	
MIN	VEG	MIN	VEG	MIN	VEG	MIN	VEG	MIN	VEG
13	25	20	27	23	34	25	33	36	37
14	27	21	29	25	32	25	37	29	35
14	22	24	32	24	34	29	32	32	35
13	26	26	31	27	29	29	30	29	40
13	24	22	32	28	35	23	35	35	39

⁵⁰Duy, C.T, et all. Streamer Propagation and Breakdown in Natural Ester at high Voltage. *EN*: IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. December, 2009. vol. 16. ISBN 1070-9878/09, p. 1.

⁵¹Ibid., p. 12.

⁵²Duy, C.T, et all. Streamer propagation and breakdown in rape-seed oil at high voltage. (04:30, junio 03, Julio: Poitiers, francia). conference. poitiers.: IEEE, 2008.

En la Tabla 23 se observan los cálculos de promedio y criterio estadístico de cada prueba de ruptura dieléctrica. Los criterios estadísticos dan la seguridad que los resultados obtenidos durante la prueba están entre los márgenes que nos indica la norma. Si la relación s/x es mayor que 0,1; puede indicar que la desviación estándar de las 5 rupturas es excesiva, y por tanto, el error probable de su promedio es excesivo. El rango de las cinco rupturas no debe ser más grande que el 92% del valor promedio de las rupturas. La incertidumbre de medición de tensión es 2,9%, la incertidumbre de medición de tiempo es 1,5%, a un nivel de confianza del 95%.

Tabla 23. Cálculos, promedios y criterios estadísticos.

	<i>Tamb</i>		40°C		50°C		60°C		70°C	
	MIN	VEG	MIN	VEG	MIN	VEG	MIN	VEG	MIN	VEG
<i>Promedio [x]</i>	13	25	23	30	25	33	26	33	32	37
<i>Desviación [s]</i>	0,5	1,9	2,4	2,2	2,1	2,3	2,7	2,7	3,3	2,3
<i>s/x</i>	0,04	0,07	0,10	0,07	0,08	0,07	0,10	0,08	0,10	0,06
<i>Rango</i>	1	5	6	5	5	6	6	7	7	5
<i>92% Rango Promedio</i>	12,32	22,81	20,79	27,7	23,36	30,17	24,10	30,72	29,62	34,22

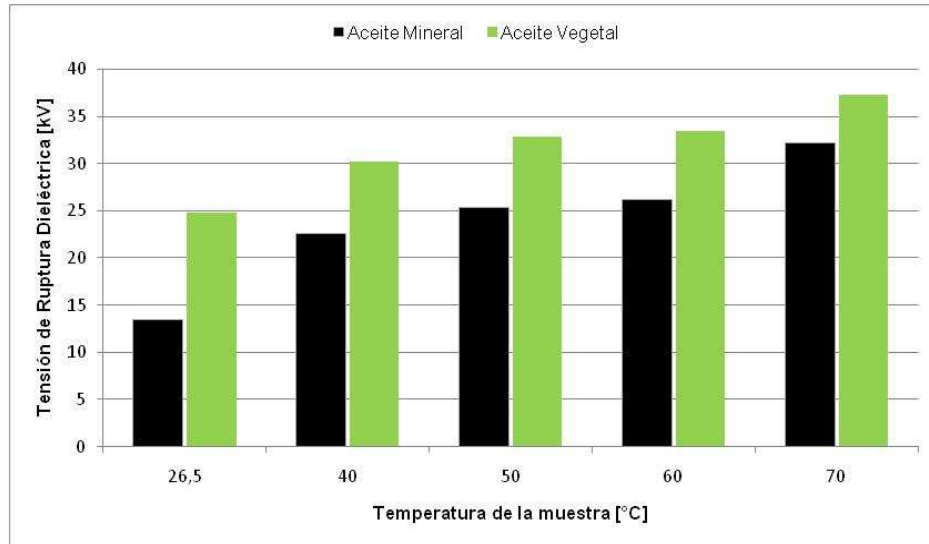
En la Tabla 24 se observa los promedios de las cinco medidas realizadas en las diferentes temperaturas realizadas a las muestras de aceite mineral y vegetal.

Tabla 24. Datos promedios resultantes.

	<i>Temperatura medida [°C]</i>		<i>Tensión de ruptura [kV]</i>	
	Mineral	Vegetal	Mineral	Vegetal
Ambiental	25,98	25,82	13,4	24,8
40°C	40,14	40,24	22,6	30,2
50°C	50,98	49,9	25,4	32,8
60°C	59,78	60,4	26,2	33,4
70°C	70,9	70,38	32,2	37,2

En la Figura 42 se ilustra de forma gráfica los resultados reportados en la Tabla 24.

Figura 42. Diagrama comparativo de tensión de ruptura del aceite mineral y aceite vegetal a diferentes temperaturas.



3.2.2.1 Análisis. Los resultados muestran que tanto el aceite mineral como vegetal tiene un comportamiento ascendente en la tensión de ruptura a medida que la temperatura se va elevando. Esto es causado por la disminución de contenido relativo de agua en los aceites. Es bien sabido que la tensión de ruptura de un líquido aislante es inversamente proporcional a su contenido relativo de agua⁵³. El contenido relativo de agua del aceite (wt_r) es la relación entre el contenido total de agua (wt_{abs}) y la saturación de agua del aceite (Wt) (ver ecuación 2), tal como se expresa en la ecuación (1).

- **Contenido relativo de agua.**

$$wt_r = \frac{wt_{abs}}{wt} \cdot 100\% \quad (1)$$

⁵³SUWARNO, I. Darma, Dielectric properties of mixtures between mineral oil and natural ester from palm oil, in International Symposium on Electrical Insulating Materials, Yokkaichi, Mie, Japan, pp. 514-517, 2008.

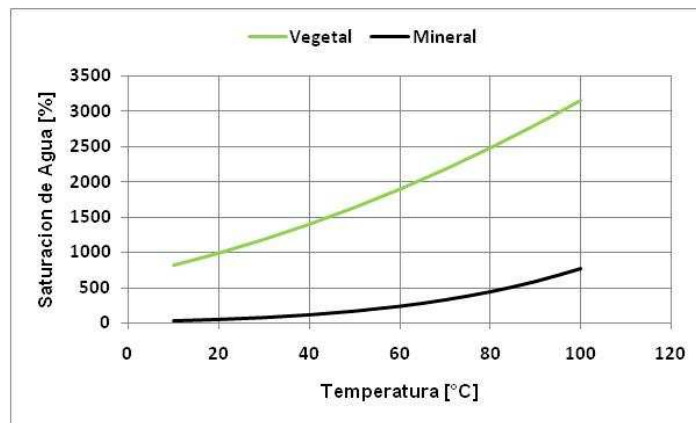
- **Saturación de agua en el aceite.**

$$wt = 10^{\left((A) - \left(\frac{B}{T+273}\right)\right)} \quad (2)$$

Los valores de A y B para líquido Envirottemp FR3 y aceite mineral es: 5,3318 y 684; 7,0895 y 1567 respectivamente⁵⁴.

En la Figura 43 se muestra la relación entre la saturación de agua y la temperatura para el aceite mineral y vegetal.

Figura 43. *Saturación de agua para aceite mineral y envirottemp FR3.*

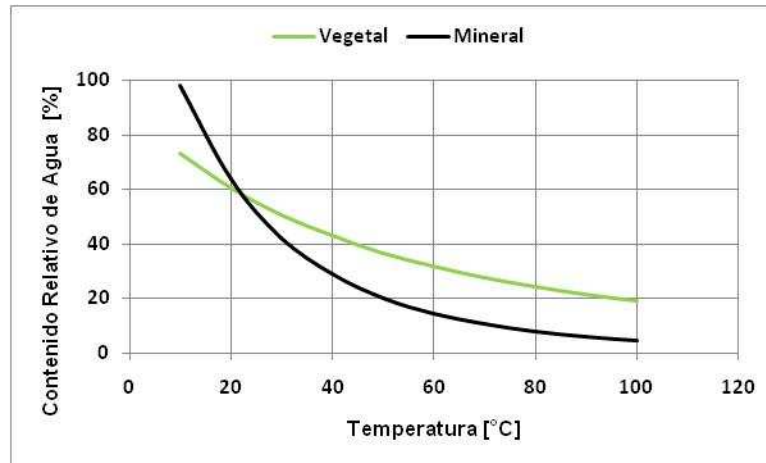


Encontrada la saturación de agua se procede a hallar el contenido relativo de agua del aceite, teniendo en cuenta que el contenido total de agua (wt_{abs}) para aceites dieléctricos de origen mineral es de 30-35 mg/kg, y para éster sintético y aceite vegetal contienen cerca de 500-600 mg/kg⁵⁵. Haciendo uso de estos valores en la Figura 44, se observa el comportamiento del contenido relativo de agua con respecto a la temperatura de la muestra.

⁵⁴ COOPER POWER SYSTEM FLUID ENVIROTEMP FR3Op cit., p. 4-5.

⁵⁵ DEPARTMENT OF TOXIC SUBSTANCES CONTROL y U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Environmental Technology Report - Cooper Power System Envirottemp FR3™ Vegetable Oil – Based Insulating Dielectric Fluid. EPA 600/R-02/042, Mayo. 2002, p. 44.

Figura 44. Contenido relativo de agua en aceite mineral y envirotemp FR3.



Como se observa en la Figura 44 el aumento de temperatura causa una reducción significativa en el contenido relativo de agua del aceite. En consecuencia la tensión de ruptura del aceite (mineral y vegetal) se elevó como se observó en la Figura 42. Una tendencia similar fue reportada por ABDUL, Rajab, et al⁵⁶, que realizaron una comparación de las tensiones de ruptura dieléctricas del aceite de origen vegetal con mineral y tipos de aislamiento sintético variando la temperatura. Sin embargo solo se realizan cambios significativos de tensión de ruptura cuando hay una variación de temperatura en los líquidos húmedos⁵⁷. En los resultados se observa que el aceite vegetal tiene la tensión de ruptura superior a la del aceite mineral, a pesar que el aceite vegetal tiene un mayor contenido relativo de agua.

3.3 RESUMEN

En éste capítulo, se presentaron los resultados obtenidos de la pruebas eléctricas realizadas a los transformadores y aceites. Los transformadores sumergidos tanto en aceite de origen mineral como vegetal no presentan mayor diferencia entre los resultados obtenidos en los ensayos de norma.

Los resultados en los ensayos realizados al aceite se observan diferencias significativas entre los aceites de origen vegetal y mineral. Se observó que para la prueba de tensión aplicada con electrodos tipo VDE, el aceite de origen mineral tiene una tensión de ruptura menor que el del aceite vegetal, siendo el mineral con

⁵⁶ABDUL, Rajab, et al. A Comparison of Dielectric Properties of Palm Oil with Mineral and Synthetic Types Insulating Liquid under Temperature Variation. *EN: ITB J. Eng. Sci.* 2011.Vol. 43, No.3 ISBN 191-208, p. 196.

⁵⁷Salam, Mazen Abdel, et al., High-Voltage Engineering, Theory and Practice, Marcel Dekker, Inc., New York, 2000.

menor contenido relativo de agua dándole una ventaja al aceite vegetal. En la realización de la prueba de tensión tipo impulso atmosférico se ve una clara diferencia entre los aceites, debido a que los aceites de origen vegetal son más propensos a tener una iniciación de ruptura más pronta, lo que lo hace que no soporte sobre tensiones de corta duración dándole una tensión de ruptura menor que el aceite mineral.

CONCLUSIONES

La revisión de la bibliografía fue de gran importancia debido a que se encontraron aspectos relevantes para el análisis en este trabajo de grado, como la relación del aumento de la temperatura con la disminución del contenido relativo de agua en el aceite, además del fenómeno presentado en los aceites vegetales cuando están sometidos a una sobre tensión de corta duración.

En la realización del ensayo de tensión tipo impulso atmosférico sobre los transformadores objeto de estudio, no se presentó diferencia alguna entre los oscilogramas de tensión reducida y la tensión plena de ensayo. En el ensayo de tensión aplicada a los transformadores en estudio no se presentó ningún tipo de flameo ni variaciones de tensión, por lo que el uso del aceite vegetal en estos equipos no generó una diferencia significativa en cuanto al aislamiento.

En la ejecución de la prueba de tensión tipo impulso atmosférico al aceite, se obtuvieron diferencias significativas entre las muestras de aceite de origen vegetal y mineral usados en este proyecto. El aceite vegetal mantuvo una tensión de ruptura constante para cada temperatura a la cual se probó la muestra, en cambio el aceite mineral incrementó su tensión de ruptura al aumentar la temperatura, siendo mayor el nivel de tensión que en el aceite vegetal, para los casos evaluados. El contraste de tensiones de ruptura se debe a que los esteres de origen natural presentan una propagación más fácil de "streamer", ocasionando en ellos una capacidad menor para resistir los transitorios de sobretensión de corta duración, como el impulso tipo rayo, induciendo a que ocurran ruptura a tensiones más bajas.

Con la realización del ensayo de tensión de ruptura dieléctrica a muestras de aceite usando electrodos tipo VDE, se observó que la tensión de ruptura aumentó conforme se aumentó la temperatura del aceite bajo prueba. Esto es debido a que el contenido relativo de agua disminuye en las muestra de aceite. Para un mismo nivel de temperatura evaluada, el aceite de origen vegetal posee una tensión de ruptura más alta. Esto es una ventaja ya que el éster natural posee un contenido relativo de agua mayor que los aceites minerales.

BIBLIOGRAFÍA

ABDUL, Rajab, et al. A Comparison of Dielectric Properties of Palm Oil with Mineral and Synthetic Types Insulating Liquid under Temperature Variation. EN: ITB J. Eng. Sci. 2011.Vol. 43, No.3 ISBN 191-208, p. 196.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, Standard Specification for Natural (Vegetable Oil) Éster Fluids Used in Electrical Apparatus. ASTM D6871-03.USA West Conshohocken. 2008. p. 4.

----- . Standard Specification for Mineral Insulating Oil Used in Electrical Apparatus. ASTM D 3487-00.USA West Conshohocken. 2009. p. 5.

BADENT, R. HEMMER, M. y SCHWAB A. J. Inhibited rape-seed oil as substitute for minerals oils, EN: Electrical Insulation and Dielectric Phenomena Conference. (10,Diciembre8 Karlsruhe,German). German: University of Karlsruhe 2002. p. 268-271.

BINITI MD AKIL, Nurul Fadilla Azwani. Comparison of electrical properties between new insulation oil with petroleum based mineral oil as liquid insulating material. Trabajo de grado ingeniero electricista. Malaysia. Universiti Teknologi Malaysia. Facultad de ingeniería. Departamento de ingeniería eléctrica. Abril 2010. 8p.

COOPER POWER SYSTEM – Fluidos Dieléctricos. Fluido Dieléctrico Envirotemp FR3 [online]. Pewaukee, USA [citado 24 de noviembre de 2011]. Disponible en Internet:http://www.cooperindustries.com/content/dam/public/powersystems/resources/library/900_Fluids/90020.pdf>

----- . Fluido Envirotemp FR3 – Guía de Ensayos [online]. Pewaukee, USA [citado 24 de noviembre de 2011]. Disponible en Internet:<http://www.cooperindustries.com/content/dam/public/powersystems/resources/library/900_Fluids/R9002012S.pdf>

DEPARTMENT OF TOXIC SUBTANCES CONTROL y U.S ENVIROMENTAL PROTECCION AGENCY. Environmental Technology Report - Cooper Power System Envirotemp FR3TM Vegetable Oil – Based Insulating Dielectric Fluid. EPA 600/R-02/042, Mayo. 2002, p. 44.

Disponible en Laboratorio Fluidos Dieléctricos – TEKNIKER. Análisis de aceites dieléctricos y su significado.

DOBLE INTERNATIONAL CLIENT CONFERENCE. (5, 2001, Boston, USA). Laboratory evaluation of several synthetic and agricultural-based dielectric liquids.

Duy, C.T, et all. Streamer Propagation and Breakdown in Natural Ester at high Voltage. EN: IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. December, 2009. vol. 16. ISBN 1070-9878/09, p. 1.

Duy, C.T, et all. Streamer propagation and breakdown in rape-seed oil at high voltage. (04:30, junio 03, Julio: Poitiers, Francia). Conference. poitiers.: IEEE, 2008.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Aerobic Aquatic Degradation.EPA Publication 712-C-98-075.USA. January 1998.Office of Prevention, Pesticides, and Toxic Substances.

-----Ready Biodegradation.EPA Publication 712-C-98-076.USA. January 1998.Office of Prevention, Pesticides, and Toxic Substances.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS. IEEE Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers. New York.: C57.12.90, IEEE, 2010. 52p.

-----Guide For Acceptance and Maintenance of Insulating Oil in Equipment. IEEE C57.106. USA, Piscataway. 2002. p. 1-27.

-----Guide for Loading Mineral-Oil Immersed Transformers. IEEE Std C57.91. 1995. p. 1-9.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Método de ensayo para determinar la tensión de ruptura dieléctrica en aceites aislantes derivados del petróleo usando electrodos del tipo VDE. NTC 3218. Bogotá D.C.: ICONTEC, 1991. 11 p.

-----Método de ensayo para determinar la tensión de ruptura dieléctrica de los aceites aislantes derivados del petróleo sometidos a impulsos eléctricos. NTC 3225. Bogotá D.C.: ICONTEC, 1991. 13 p.

------. Transformadores – Medida de la resistencia de devanados. NTC 375. NTC 375. Bogotá D.C.: ICONTEC, 1970. 6 p.

------. Transformadores - Relación de transformación. Verificación de la polaridad y relación de fase. NTC 471. Bogotá D.C.: ICONTEC, 1974. 9 p.

------. Transformadores - Ensayo para la determinación de pérdidas y corriente sin carga. NTC 1031. Bogotá D.C.: ICONTEC, 1998. 8 p.

------. Transformadores - Determinación de la tensión de cortocircuito y pérdidas con carga. NTC 1005. Bogotá D.C.: ICONTEC, 2003. 14 p.

------. Transformadores ensayo dieléctrico. NTC 837. Bogotá D.C.: ICONTEC, 1997. 2 p.

LIU, Rongsheng, TÖRNKVIST, Christer. Ester Fluids as Alternative for Mineral Oil: The Difference in Streamer Velocity and LI Breakdown Voltage. EN: Electrical Insulation and Dielectric Phenomena Conference (1: 18-21, octubre: Vasteras, Sweden). Sweden: IEEE, 2009. p. 543-548.

LOPES OLIVEIRA, António Alfonso. Utilizacao de óleos biodegradaveis em transforamores de distribuicao [Informe] : Projecto Seminário ou Trabalho Final de Curso / Faculdade de Engenharia ; Universidade de Porto. - Porto : [s.n.], 2005. - pág. 90.

LUB<>LINE – Lubricantes & Aditivos. LubTroil™Electrical Transformer Oils [online]. Houston, Texas [citado 24 de noviembre de 2011]. Disponible en Internet:<<http://www.lubline.com/electrical-transformer-oils/>>

MARULANDA, Agustín, et al. Study of the vegetal oil as a substitute for mineral oils in distribution transformer. EN: IEEE. 2008. ISBN/ISSN 978-1-4244-2218-0. p. 1-6.

MCSHANE, Patrick. LUKSICH, Jhon y MARTINS, M.N.Field experience with natural ester (vegetable oil) dielectric fluid - The First Decade EN: IV Workspot - CE A2 TransformadorConferencia (04: 29-30, noviembre: Recife, Brasil). Brazil: CIGRE, 2006. p. 1-8.

MCSHANE, Patrick, et al. Natural Éster Dielectric Fluid Development Update. EN: IEEE Power & Energy Society General Meeting. 2009. ISBN 978-1-4244-4241-6, p. 1.

------. Natural Éster Dielectric Fluid Development. EN: Transmission conference & Exposition. Mayo 21-2006. Dallas. ISBN 0-7803-9193. p. 3.

------. Vegetable-oil-based dielectric coolants, EN: IEEE Industry Applications Magazine. Mayo de 2002, Vol 8, No 3, p, 34-41.

OOMMEN, T.V. Vegetable oils for liquid-filled transformers. En: IEEE, Electrical Insulations Magazine. Enero-Febrero, 2002. Vol. 18, p. 6-11.

OOMMEN, T.V., et all. A new vegetable oil based transformer fluid: development and verification EN: Electrical Insulation and Dielectric Phenomena Conference. (15-18, Octubre), Vol 01, p. 308 – 312.

QIANG, Liu. WANG Zhongdong. Streamer Characteristic and Breakdown in Synthetic and Natural Ester Transformer Liquids under Standard Lightning Impulse Voltage. EN: IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. Enero, 2011. vol. 18. ISBN 1070-9878, pp. 285-294.

Salam, Mazen Abdel, et al., High-Voltage Engineering, Theory and Practice, Marcel Dekker, Inc., New York, 2000.

SUWARNO, I. Darma, *Dielectric properties of mixtures between mineral oil and natural ester from palm oil*, in International Symposium on Electrical Insulating Materials, Yokkaichi, Mie, Japan, pp. 514-517, 2008.

TORRES, Alberto y TURLETTO, Ezequiel. Ensayos de impulsos de origen atmosféricos en transformadores. Córdoba: Universidad Nacional de Córdoba. Facultad de Ciencias exactas Físicas y Naturales. Laboratorio de Alta Tensión. 2004. p.8.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CORDOBA. Facultad de ciencias exactas, físicas y naturales. Aceites minerales, aislantes nuevos para transformadores y equipamiento de maniobra [online]. [Citado 24 de marzo de 2011]. Disponible en internet: <http://www.efn.uncor.edu/departamentos/electrotecnia/cat/eyearchivos/apuntes/a_practico/Cap%202%20Pco.pdf>

VOUKELATOS, John, et al. Natural éster (vegetable oil) dielectric fluid application in transformers. EN: Cooper Power System. p. 2, TABLA 1.