Comportamiento de los aislamientos sólidos de transformadores de potencia en condiciones ambientales no controladas

Behavior of the solid isolations of power transformers under environmental not controlled conditions

Gustavo Jiménez-Araya[1], Gustavo Adolfo Gómez-Ramírez[2]

Fecha de recepción: 4 de setiembre de 2015
Fecha de aprobación: 11 de enero de 2016

Jiménez-Araya, G; Gómez-Ramírez, G. Comportamiento de los aislamientos sólidos de transformadores de potencia en condiciones ambientales no controladas. *Tecnología en Marcha*. Vol. 29, Nº 3. Pág 99-116.
DOI: http://dx.doi.org/tm.v29i3.2891

1 Ingeniero Área de Reparación ICE-LIMAT. Profesor Departamento de Electrónica, Colegio Universitario de Cartago. Costa Rica. Teléfono: (506) 2001 0924 Correo electrónico: gjimeneza@ice.go.cr

2 Ingeniero Laboratorio de Alta Tensión ICE-LIMAT. Costa Rica. Profesor Escuela de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Costa Rica. Profesor Escuela de Ingeniería Electromecánica, Tecnológico de Costa Rica. Teléfono: (506) 2550 9354. Correo electrónico: ggomez@itcr.ac.cr

CC BY ND NC

Palabras clave

Materiales dieléctricos; aislantes.

Resumen

Uno de los aspectos importantes en la vida útil de un transformador de potencia es la conservación de los aislamientos sólidos y líquidos, que deberán permanecer íntegros ante la presencia de humedad y contaminantes. Con el fin de preservar su integridad, se procura mantener la hermeticidad dentro del transformador. El objetivo principal de esta investigación fue estudiar y analizar el deterioro de los aislamientos sólidos en transformadores de potencia bajo condiciones ambientales no controladas. De esta manera, se busca comprobar, por medio de pruebas de resistencia al aislamiento e índice de polimerización, la existencia de algún tipo de deterioro en los materiales aislantes sólidos que fueron muestreados; así como dar un estimado del grado de deterioro porcentual del aislamiento sólido bajo condiciones de temperatura y humedad relativa no controladas. El problema fundamental es el deterioro de las propiedades dieléctricas y mecánicas del papel aislante y otros componentes sólidos en el tiempo. Esto hará que ante un cortocircuito, el papel aislante sea incapaz de soportar y se inicie una falla incipiente o peor aún, una falla permanente.

Keywords

Dielectrics materials; insulation.

Abstract

One of the important aspects in the useful life of a power transformer, is the conservation of the solid and liquid isolations. These will have to remain complete before the presence of dampness and pollutants. One tries to support the staunchness inside this one in order to preserve his integrity. The principal aim of this investigation is to study and to analyze the deterioration of the solid isolations in power transformers under environmental not controlled conditions. Hereby one wants to verify by means of the Isolation test and index of polymerization the existence of some type of deterioration in the insulating solid materials that were sampled. Likewise, gives the estimated one of the degree of percentage deterioration of the solid low isolation conditions of temperature and relative dampness not controlled. The fundamental problem of this one is the deterioration of the insulation properties and mechanical of the insulating paper in the time. This will do that before a short circuit, the insulating paper is unable to support and to be the beginning of a fault.

Introducción

Los procesos de reparación de máquinas eléctricas ya sean motores, generadores o transformadores, conllevan un tratamiento adecuado del manejo de los materiales dieléctricos sólidos, en la cual están construidas mayoritariamente dichas máquinas. Este tratamiento adecuado hará perpetuar el tiempo de vida de los equipos y de esta manera maximizar ganancias de ellos.

Al efectuar un mantenimiento mayor a un transformador de potencia, la parte activa (lugar dentro de la máquina eléctrica donde se sitúan aislamientos, bobinas y núcleo) puede mantenerse a

la intemperie gran cantidad de tiempo pues se requiera hacer inspecciones, reparaciones y cualquier otra labor dependiendo la necesidad.

Por esta razón, la parte activa de un transformador puede resultar comprometida y atacada por los enemigos de los aislamientos: la humedad relativa y las partículas sólidas. Esta es responsable de gran parte de las fallas en los transformadores de potencia pues el dieléctrico se ve comprometido en su integridad debido a agentes externos que son conductivos en presencia de grandes campos eléctricos.

En el caso de algunos mantenimientos mayores, los aislamientos se pueden exponer por días, semanas e incluso meses, dependiendo de la complejidad de la falla. Esta actividad conlleva un riesgo para la vida de los aislamientos y, por ende, la aceleración del envejecimiento prematuro de los materiales dieléctricos.

Transformador de potencia

Se denomina transformador a una máquina eléctrica (Hubert, 1991) que permite aumentar o disminuir la tensión en un circuito eléctrico de corriente alterna, manteniendo la frecuencia. La potencia que ingresa al equipo, en el caso de un transformador ideal, esto es, sin pérdidas, es igual a la que se obtiene a la salida.

Las máquinas reales presentan un pequeño porcentaje de pérdidas, dependiendo de su diseño, tamaño, etc. El devanado que se conecta a la fuente de energía se llama primario y, dependiendo del número de devanados, las otras bobinas pueden recibir el nombre de devanado secundario o devanado terciario respectivamente.

En la figura 1 se muestra un transformador de potencia.

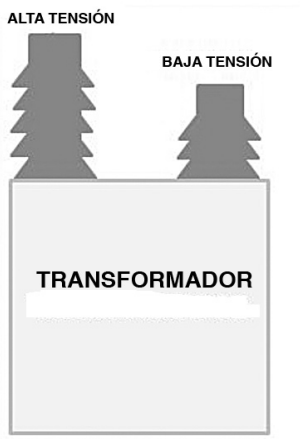


Figura 1. Transformador de potencia.

La parte activa del transformador es considerada el corazón de la máquina eléctrica, ya que es ahí donde se realiza la transformación de tensión y corrientes. En ella se tienen tres partes fundamentales: núcleo magnético, conductores eléctricos y materiales dieléctricos.

Núcleo magnético: En la fabricación de los núcleos para los transformadores de potencia se utilizan láminas de acero eléctrico, que están conformadas por una aleación de acero con aleaciones de silicio con bajos contenidos de carbón. Estas láminas deben estar recubiertas por un material aislante similar al barniz o las lacas transparentes, llamado *carlite*. En el mercado existen aceros con diferentes espesores y características, tanto en transformadores de potencia

como de distribución; por lo general se utilizan láminas de acero con aleaciones de silicio con grano orientado. Con la idea de reducir las pérdidas energéticas en los transformadores que producen ineficiencia en su operación, aparecen los materiales con acero amorfo, que se caracteriza por reducir las pérdidas hasta en un 25% con respecto a los materiales convencionales, debido a que tienen una composición cristalina.

Conductores eléctricos: Los conductores que se usan normalmente en las máquinas eléctricas deben tener alta conductividad, una adecuada resistencia mecánica, facilidad para soldar, ser dúctiles y maleables y el coeficiente de temperatura por resistencia eléctrica debe ser el menor posible. Los materiales que se usan comúnmente son cobre y aluminio, pero aún entre ellos existen diferencias.

Los calibres de los materiales conductores no siempre calzan con los requeridos en el momento del diseño, por lo que es necesario darles una tolerancia; generalmente se utiliza el inmediato superior. Para los casos en los que se requiere una intensidad de corrientes elevadas, lo más aconsejable es utilizar conductores en paralelo, ya que en el momento de construir la bobina con conductores con un área transversal mayor a fin de aumentar la capacidad de trasiego de corriente eléctrica.

Materiales dieléctricos: El diseño dieléctrico (Naidu & Kamaraju, 2009) de cualquier transformador consiste en determinar las características y dimensiones de cada uno de los aislamientos utilizados, de tal forma que aseguren una operación dieléctrica confiable. En este tópico interesan los siguientes aspectos:

- Espesor de cartón de entre bobinas al núcleo
- Ancho de los separadores de bobina a yugos; esto es importante pues este distanciamiento hace que el transformador supere la prueba dieléctricas de alta tensión como la prueba con el generador de impulsos. (simula descargas atmosféricas bajo condiciones controladas de laboratorio).
- Espesor del espacio entre las bobinas de alta y baja tensión
- Espesor del aislamiento entre capas
- Espesor y distancia entre fases
- Espesor del aislamiento de bobina a núcleo

Las estructuras aislantes que se usan en los transformadores se caracterizan por tener geometrías diversas y algunas veces irregulares. Por este motivo, la predicción del comportamiento dieléctrico de los aislamientos resulta muy complicada. Con el fin de investigar y analizar las características de un material dieléctrico, se debe considerar la siguiente figura, en la que se muestra un cubo de material con electrodos en la parte superior e inferior.

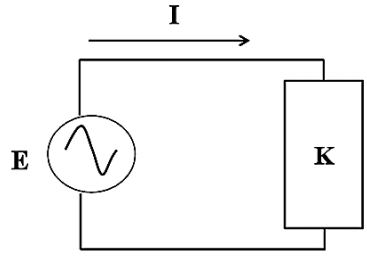


Figura 2. Dieléctrico en un capacitor de placas planas

Cuando se aplica una tensión C.A. entre los electrodos, circula una corriente por el circuito, aparentemente por el cubo. Esta corriente consiste en dos componentes, uno en fase con la tensión y otro adelantado 90º con respecto a la tensión. El segundo componente es capacitivo**.** De la figura 3 y 4 se deriva:

$$tan\delta = \frac{I_R}{I_C}$$

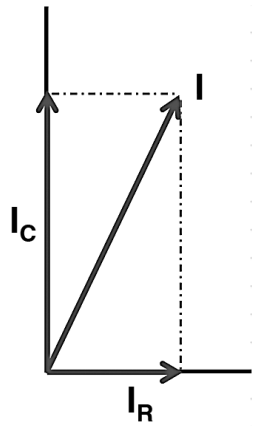


Figura 3. Corrientes componentes en un dieléctrico

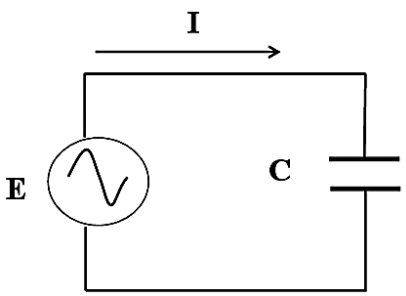


Figura 4. Circuito equivalente aproximado

que es aproximadamente igual al factor de potencia del aislamiento que es el cos θ, es decir:

$$fp = \cos\theta = tan\delta = \frac{I_R}{I_C}$$

En general, debido a que I_R es del orden del 1%, la impedancia equivalente al dieléctrico es prácticamente un capacitor y entonces

$$I = \frac{E}{Z} = j\omega C$$

Si se sustituye el material entre los electrodos, se encuentra que la corriente varía, esto es, la impedancia del circuito cambia. Si $Z = {}^{1}/_{j\omega C}$, la capacitancia del circuito puede determinarse

fácilmente. Se sabe que para un capacitor de placas paralelas la capacitancia depende tanto de su relación geométrica como de una constante dieléctrica, que es:

$$C = \frac{\varepsilon_o K A}{d}$$

donde:

C: capacitancia (faradios)

A: área de uno de los lados de las placas (m^2)

D: espesor dieléctrico (metros)

K: constante dieléctrica del espacio entre placas

ε_o: $8.85x10^{-12}$ f/m

El factor de potencia es un indicador de las pérdidas dieléctricas en el aislamiento. Los procesos de deterioro térmico y la absorción de humedad incrementan las pérdidas antes mencionadas. Una manera de medir estas pérdidas es analizando el progreso en el tiempo de dos valores: *el factor de disipación (tan* δ*) y el factor de potencia.*

Las pérdidas atribuidas al material dieléctrico se deben principalmente a que la mayoría de los materiales de aislamiento contienen moléculas polares que tienden a rotar o vibrar cuando un campo eléctrico C.D. es aplicado aumentando la corriente de absorción (IA); cuando se aplica un campo eléctrico alterno, entonces las moléculas oscilarán a una frecuencia de 60 veces por segundo.

Puesto que esto sucede en un medio sólido, la fricción producida contra las moléculas adyacentes aumenta la temperatura del aislamiento, la energía se disipa en forma de calor, por lo tanto, las pérdidas dieléctricas en un material son una propiedad intrínseca, de esta manera su medida no es un indicador de la calidad del aislamiento.

Cuando parte del aislamiento se expone a altas temperaturas, se produce una rotura de las cadenas de polímero. Si una molécula de oxígeno se adhiere al final de la cadena se produce un efecto de oxidación, cuya consecuencia es que el aislamiento tenga consistencia quebradiza.

La inclusión de oxígeno en las cadenas de polímero crea moléculas polares adicionales en el aislamiento, las cuales, al ser excitadas por el campo eléctrico alterno, producirán mayores pérdidas dieléctricas; lo mismo ocurre cuando los aislamientos se encuentran húmedos, porque las moléculas de agua son polares. De lo anterior se deduce que cuando las pérdidas dieléctricas aumentan a través del tiempo, ello puede significar un envejecimiento de los devanados o que estos estén húmedos.

Características de la ruptura de un material dieléctrico

La intensidad de campo eléctrico en un material dieléctrico no puede aumentarse indefinidamente. Si se excede de un cierto valor, ocurre una descarga eléctrica y entonces se dice que “rompió el arco”. La máxima intensidad de campo que un dieléctrico puede sostener antes de la ruptura se conoce como rigidez dieléctrica.

La rigidez dieléctrica depende de varios factores:

- *Espesor del material:* en general, la rigidez dieléctrica aumenta cuando el espesor del material aumenta.
- *Homogeneidad del material:* las sustancias extrañas normalmente debilitan el material. En líquidos, por ejemplo, los gases disueltos, la humedad y las partículas sólidas afectan la

rigidez dieléctrica; mientras que en los materiales sólidos cualquier imperfección puede ocasionar una concentración de campo eléctrico y por lo tanto una descarga eléctrica interna sumamente peligrosa para el dieléctrico.

- *Nivel de tensión y tiempo*: el tiempo de duración de las gradientes de alta tensión contribuye a determinar la rigidez dieléctrica. Entre más tiempo, menor rigidez. El tiempo es un factor menos importante en gases que en líquidos y sólidos.
- *Forma de los electrodos:* normalmente, si los electrodos son irregulares se obtiene un campo eléctrico resultante no uniforme.
- *Presión en gases:* la rigidez de los gases generalmente aumenta con la densidad molecular (presión/temperatura).

Cuando un transformador se alimenta a tensiones de baja frecuencia (60 Hz), los esfuerzos dieléctricos entre vueltas, capas o secciones pueden determinarse al suponer una distribución completamente uniforme a lo largo del devanado. Todo transformador se diseña para que pueda soportar tensiones de impulso equivalentes a descargas atmosféricas que pudieran incidir sobre el sistema eléctrico al que esté conectado. El comportamiento del transformador ante este tipo de fenómenos es diferente al comportamiento en baja frecuencia.

La palabra *dieléctrico* (Naidu & Kamaraju, 2009) denomina a los materiales que poseen valores bajos en conductividad o altos en resistividad inversamente hablando y, por ende, una buena constante dieléctrica. Es por ello que pueden ser utilizados como dieléctricos. Todos los materiales dieléctricos tienen características aislantes, pero no todos los materiales aislantes tienen características dieléctricas. Existen materiales dieléctricos *líquidos*, *gaseosos* y *sólidos*.

El dieléctrico líquido

El aceite dieléctrico debe tener buenas propiedades aislantes, las cuales dependen en su totalidad de qué tan libre de impurezas se encuentre. Estos aceites son cuidadosamente tratados en el momento de ser envasados. El líquido tiene una alta resistencia a la oxidación, lo que le permite funcionar por períodos prolongados de tiempo. Su viscosidad es muy baja, lo que facilita su penetración en la parte activa y la transferencia del calor.

El dieléctrico gaseoso

En los transformadores, los gases más utilizados son el aire y el nitrógeno. Estos transformadores generalmente son de construcción sellada. El aire y algunos gases tienen una elevada resistencia y las pérdidas dieléctricas son bajas. Algunos gases, como el hexafluoruro de azufre (SF6), se caracterizan por ser incoloros, no tóxicos, fisiológicamente inertes, no corrosivos y no inflamables, aunque sí son altamente contaminantes.

El dieléctrico sólido

Su función es mantener separados eléctricamente todos los elementos que conforman la parte activa del transformador; de acuerdo con el espesor de la bobina, se deberán utilizar los materiales dieléctricos indicados en el cuadro 1. A continuación, se describen algunos de los materiales dieléctricos sólidos utilizados en los trasformadores de potencia.

Papel aislante

Forma parte de los aislantes sólidos del transformador de potencia y se utiliza para brindar tanto rigidez dieléctrica como mecánica a los conductores. El papel fue uno de los primeros materiales aislantes utilizados y en la actualidad lo continúa siendo. En el cuadro 2 se incluyen algunos tipos de papel que se utilizan en los transformadores.

Cuadro 1. Descripción de materiales utilizados en transformadores de potencia

Tipo	Descripción
Aislamientos delgados pretensados	Estos cartones son rieles en forma de cola de milano, rieles rectangulares que sirven para separar las bobinas, las bobinas con el núcleo, las pantallas que separan las fases y también como vías de enfriamiento.
Aislamientos gruesos	Materiales de una gran resistencia mecánica, encargados de darle dimensiones y apriete a las bobinas; en caso de existir algún esfuerzo dinámico, deben tener la capacidad de soportarlo.
Papel aislante	Brindan rigidez dieléctrica y mecánica a los conductores.

Cuadro 2. Algunos tipos de papel utilizados como aislante en transformadores de potencia

Nombre	Descripción
Papel Manila	Este aislante es fabricado a partir de fibras de cáñamo.
Papel Prespan	Su fabricación es similar a la del papel Kraft, ya que está hecho de pasta química de madera.
Papel nomex	Material similar al Nylon, se utiliza mucho en motores que requieren soportar temperaturas de entre los 200 C° a 220 C°, pero también es muy usado en transformadores híbridos, ya que es muy flexible y tiene una gran resistencia mecánica. Su desventaja es su alto costo.
Papel Kraft	Papel fabricado con pasta química de madera; sus espesores rondan entre 0,05 mm y 0,5 mm. En el proceso de creación de este tipo de papel se pueden utilizar cualquier tipo de maderas.

Envejecimiento del papel: El envejecimiento es causado por la alteración en los polímeros del papel, esto quiere decir que son las rupturas entre las cadenas de celulosa, por lo tanto, el grado de polimerización disminuye y de la misma manera la resistencia mecánica.

Prueba de grado de polimerización (DP): En un transformador de potencia, la degradación del papel aislante que se encuentra en la parte activa es progresiva, ya que los valores en el grado de polimerización van disminuyendo con el tiempo. A causa de eso se producen gases como monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO2) y furanos, entre otros tipos de compuestos.

Para poder detectar los cambios en las condiciones de celulosa en el papel, se realiza la prueba de medición del grado de polimerización. Este método es considerado el más exacto en cuanto a aproximarse a los valores reales del papel aislante y, por ende, de la vida del transformador, ya que dependiendo del estado del aislante, así será la longevidad de esta máquina eléctrica. Para efectuar esta prueba es necesario extraer muestras de papel de las bobinas. En el cuadro 3 se presenta una escala de evaluación del índice de polimerización del papel según la clasificación del Consejo Internacional de Grandes Sistemas Eléctricos (CIGRE, 2007).

La despolimerización puede ser consecuencia de reacciones químicas que provocan la deg*radación de la celulosa. Estas reacciones pueden ser por hidrólisis, pirólisis u oxidación*. Los principales factores que contribuyen al envejecimiento de la celulosa en los transformadores de potencia son la *temperatura*, *la humedad y el oxígeno*. En el proceso de envejecimiento del papel, la degradación de la celulosa se debe a la hidrólisis y luego a la oxidación.

Cuadro 3. Rangos de envejecimiento del papel según el grado de polimerización

Grado de Polimerización	Estado del papel
Mayor de 1000	Prácticamente sin envejecer
999 a 601	Levemente envejecido
600 a 401	Envejecimiento medio
400 a 251	Acercándose a un envejecimiento crítico
250 a 151	Envejecimiento crítico
Menor de 150	Extremadamente envejecido

Fenómenos que contribuyen al envejecimiento del papel en un transformador de potencia

Envejecimiento del papel mediante oxidación: Esto ocurre debido a la presencia de oxígeno; se puede decir que es una forma de pirólisis, ya que sus productos finales son el agua y el dióxido de carbono.

Envejecimiento del papel por pirólisis: Ocurre cuando existen temperaturas altas que generan agua, monóxido de carbono y dióxido de carbono.

Envejecimiento del papel en función de la posición: La temperatura en la parte activa de un transformador es un agente crítico. Uno de los problemas es que no mantiene la simetría de calor en sus componentes y de esta manera deteriora algunas partes más que otras.

Pruebas dieléctricas básicas a materiales dieléctricos

Medición de la resistencia del aislamiento

La prueba de resistencia de aislamiento (IEC 60076-1, 1989) ha sido desarrollada para determinar el aislamiento eléctrico en los devanados individuales referidos a tierra o entre ellos. El conocimiento de la resistencia de aislamiento es un valor para el conocimiento del aislamiento propio del transformador o un material dieléctrico. Hoy día se utilizan diferentes métodos sofisticados para asegurar la calidad del sistema de aislamiento, tales como la medición por espectroscopía dieléctrica de baja frecuencia, la medición de corriente de polarización/despolarización en el dominio del tiempo y el espectro de retorno de tensión de polarización.

La resistencia del aislamiento comúnmente se mide en megaohms (MΩ). Las variaciones en la resistencia del aislamiento pueden ser causadas por numerosos factores, tales como: *diseño,*

temperatura, sequedad y limpieza de las partes internas, especialmente de los aisladores. La resistencia del aislamiento varía según la tensión aplicada.

El circuito de medición es muy simple y práctico. La prueba debe realizarse con todas las terminales cortocircuitadas. En la figura 5 se muestra el circuito de medición. Normalmente, los medidores de resistencia de aislamiento tienen la fuente de DC integrada y los hay disponibles para *0.5, 1, 2.5, 5 y 10 kV.*

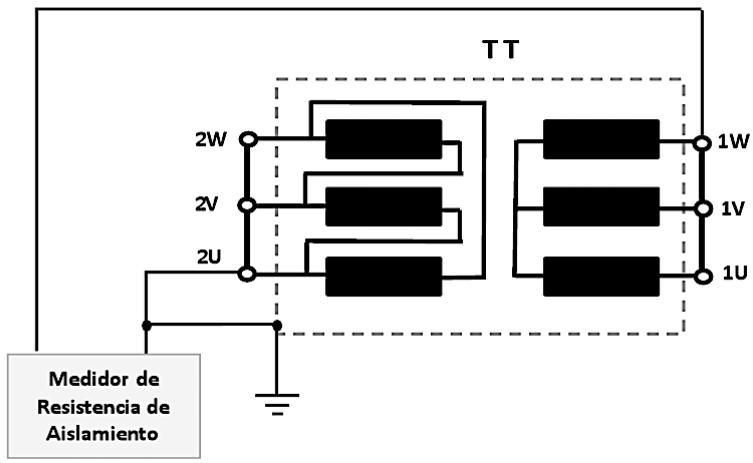


Figura 5. Circuito de medición de Resistencia de aislamiento

T T: transformador bajo prueba

La duración de la prueba puede ser de 1 minuto. Usualmente, las mediciones se toman después de 15 segundos o incluso hasta el minuto de medición. La relación entre los valores medidos después de 60 segundos (R_{60}) y los medidos después de 15 segundos (R_{15}) es aproximadamente de 1.3-3; este es un criterio importante de la condición de aislamiento. Siempre se deberá tomar el dato de temperatura y este valor deberá referenciarse a 20 °C.

De igual manera, se puede obtener el índice de polimerización (IP). El IP es el cociente entre la medición de aislamiento de 10 minutos y 1 minuto, respectivamente. Constituye una guía sobre la condición de aislamiento del transformador; para ello se consideran los siguientes criterios de aceptación:

- *Valor IP >1 significa que el transformador presenta buenas condiciones de aislamiento.*
- *Valor IP<1 significa que el transformador presenta condiciones insatisfactorias de aislamiento.*

Medición del factor de disipación (tan δ) de sistemas de aislamiento capacitivos

La prueba de factor de potencia del aislamiento (IEC 60076-1, 1989), similar a la prueba de resistencia del aislamiento, da una certeza del estado del aislamiento. *El significado de la prueba todavía está en discusión*. La experiencia ha dictado que el factor de potencia es una ayuda para asegurar la condición probable del aislamiento cuando si se usa con buen criterio técnico fundamentado.

La International Electrotechnical Commission (IEC, 1989) define el factor de potencia como la relación de la potencia activa absorbida al valor de la potencia reactiva. Esto corresponde

al tan δ. El Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE,) lo define diferente, pues lo considera como la relación de la potencia disipada en el aislamiento en Watts, con el producto del voltaje efectivo y la corriente en voltio-amperios (VA) cuando se prueba usando voltaje sinusoidal. El factor de potencia del aislamiento se expresa en forma porcentual. La medición del factor de potencia en fábricas es un valor comparativo y útil, pues es para asegurarse de la buena condición de los aislamientos internos del transformador. No se ha podido establecer un valor estándar de factor de potencia por las siguientes razones:

- *Hay una pequeña o ninguna relación entre el factor de potencia y la capacidad del transformador de soportar las pruebas dieléctricas prescritas.*
- *La variación del factor de potencia con la temperatura es errática pues no es correlacionable.*
- *El aceite dieléctrico y los materiales aislantes usados en transformadores resultan en grandes variaciones en el aislamiento del factor de potencia.*

Cuando el factor de potencia del aislamiento se mide a una temperatura de aislamiento (promedio de temperatura del aceite) sobre o menos 20 °C, deberá ser corregido a 20 °C. Ese factor de corrección dependerá de los materiales aislantes, su estructura y, por supuesto, la humedad.

Descripción de las muestras

Se realizó un muestreo de seis diferentes tipos de materiales aislantes sólidos de uso común en un proceso de reparación. A continuación, se describe de forma detallada su uso, dimensiones y tratamientos especiales para hacer las pruebas:

- *Madera:* La madera fue extraída de un transformador que se desechó porque no se disponía de dicho material nuevo para reparaciones. Para la prueba, las muestras se toman del mismo material y se preparan dos iguales, llamadas *madera A y madera B.*
- *Cartón pretensado de 60 mm:* Material laminado de cartón pretensado y unido con resinas hasta formar un espesor de 60 mm. Se encuentra disponible en diferentes espesores. Las muestras tomadas son para material usado *(pretensado C y pretensado D)* y nuevo *(pretensado A y pretensado B).*
- *Cartón pretensado de 1 mm:* Para diferenciarlo, a este material se le llamará solamente *cartón*. Las muestras se tomaron de los materiales nuevos disponibles y se escogió este ya que es de uso común en la reparación de transformadores.
- *Riel con figura de cola milano (6,5 x (15 x 20) mm):* Se tomó del material disponible nuevo y se le llama *Riel* en esta investigación.
- *Riel rectangular (3,5 x 38,5 mm):* Este material dieléctrico se utiliza para darle vías de enfriamiento y altura a las bobinas, comúnmente se le llama *calza.* Se utilizó material disponible nuevo para la reparación de transformadores.
- *Bobinas:* La *bobina A* se construyó con material de cobre almacenado que nunca había sido utilizado y la *bobina B* se elaboró con material de cobre de una bobina que se desechó. La idea de tener dos tipos de bobinas es emular una reparación bajo condiciones normales, es decir, cuando se extrae la parte activa de un transformador nuevo y otro usado.

Secado previo de los materiales dieléctricos

Con el propósito de comparar resultados, se obtienen dos muestras de cada material, una de las cuales es secada con el proceso de aceite caliente con alto vacío -tal y como se hace con un transformador de potencia en la vida real- y la otra al horno. A continuación, en el cuadro 4 se indican los materiales que fueron sometidos a los diferentes procesos de secado.

Cuadro 4. Proceso de secado para cada uno de los materiales en estudio

Materiales secados al vacío y aspersión de aceite	Materiales secados al horno
Madera A	Madera B
Pretensado A	Pretensado B
Pretensado C	Pretensado D
Cartón A	Cartón B
Calza A	Calza B
Riel A	Riel B
Bobinas A y B	

Aplicación de técnicas e instrumentación para los ensayos y pruebas

A los materiales tales como maderas, pretensados, cartones, calzas y rieles se les aplicó la *Resistencia del aislamiento* por 2400 horas, a 1000 voltios durante 60 segundos. Las bobinas se probaron de manera diferente a la anterior, ya que fueron sumergidas en aceite dieléctrico, para ello tuvieron que ser colocadas en un pequeño tanque destinado para tal fin y este proceso se realizó al principio y al final de las 14 semanas.

Resultados

Durante las 14 semanas que se mantuvieron las 12 muestras *(maderas, pretensados, cartón, calzas y rieles)* de materiales aislantes sólidos, se les practicaron 68 pruebas de resistencia de aislamiento, cuatro muestras de peso y cuatro de dimensiones; estas probetas estuvieron expuestas por 2400 horas en ambientes no controlados en condiciones similares a las de las intervenciones en los transformadores de potencia. A continuación se detalla cada uno de los materiales en experimento. *En promedio, siempre se midió 25* °C y un 61% de humedad relativa durante el muestreo. Se analiza por separado cada una de las muestras:

Maderas A y B: La madera A recibió un tratamiento de secado similar a un transformador de potencia, ya que fue sometida a alto vacío y aspersión de aceite; mientras que la madera B fue secada al horno. A pesar de ser el mismo material, *los valores obtenidos fueron distintos*. En la figura 6 se muestra el comportamiento en las 2400 horas de estar en exposición y los valores obtenidos mediante la prueba de resistencia al aislamiento.

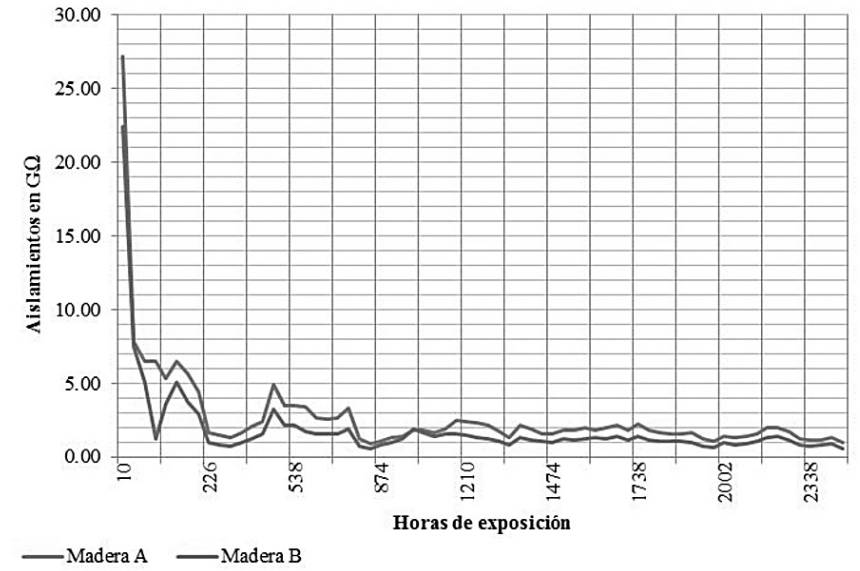


Figura 6. Comportamiento de las maderas A y B durante 2400 horas de exposición en ambientes no controlados

Pretensados A y B: El pretensado A tuvo un tratamiento de secado a alto vacío y aspersión de aceite, mientras el B fue secado al horno. En la figura 7 se observa el comportamiento en las 2400 horas y los valores obtenidos mediante la prueba de resistencia al aislamiento.

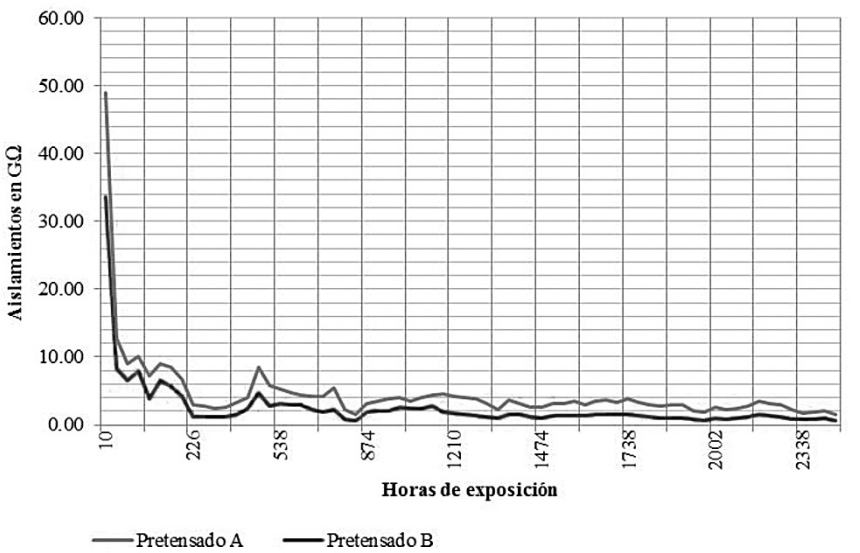


Figura 7. Comportamiento de los materiales pretensados A y B durante 2400 horas de exposición en ambientes no controlados

Pretensados C y D: El pretensado C tuvo un tratamiento de secado a alto vacío y aspersión de aceite, mientras el pretensado D fue secado al horno. En la figura 8 se observa el comportamiento en las 2400 horas y los valores obtenidos mediante la prueba de resistencia al aislamiento.

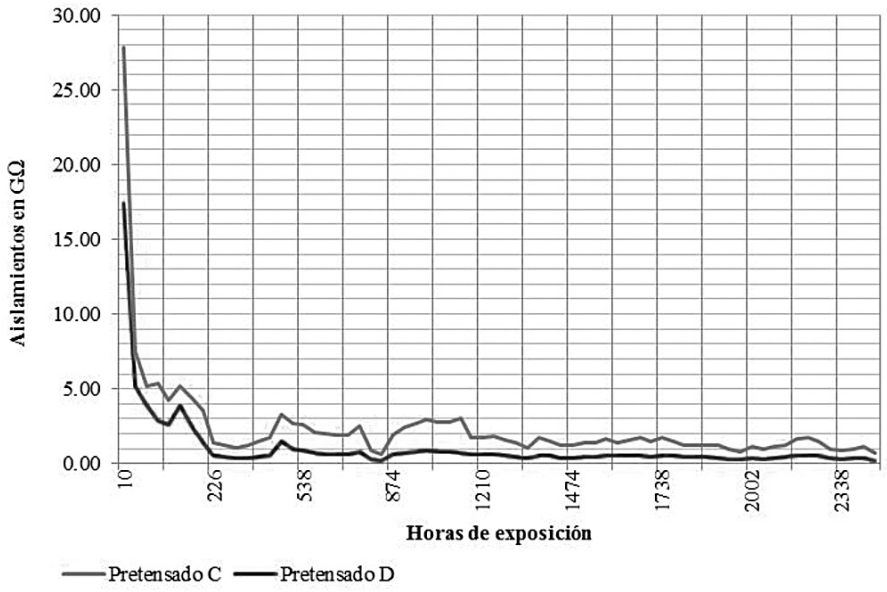


Figura 8. Comportamiento de los materiales pretensados C y D durante 2400 horas de exposición en ambientes no controlados

Cartones A y B: El cartón A es el que tuvo el mayor valor de resistencia pues recibió un tratamiento de secado a alto vacío y aspersión de aceite; el cartón B fue secado al horno. En la figura 9 se muestran los comportamientos en las 2400 horas de estar en exposición.

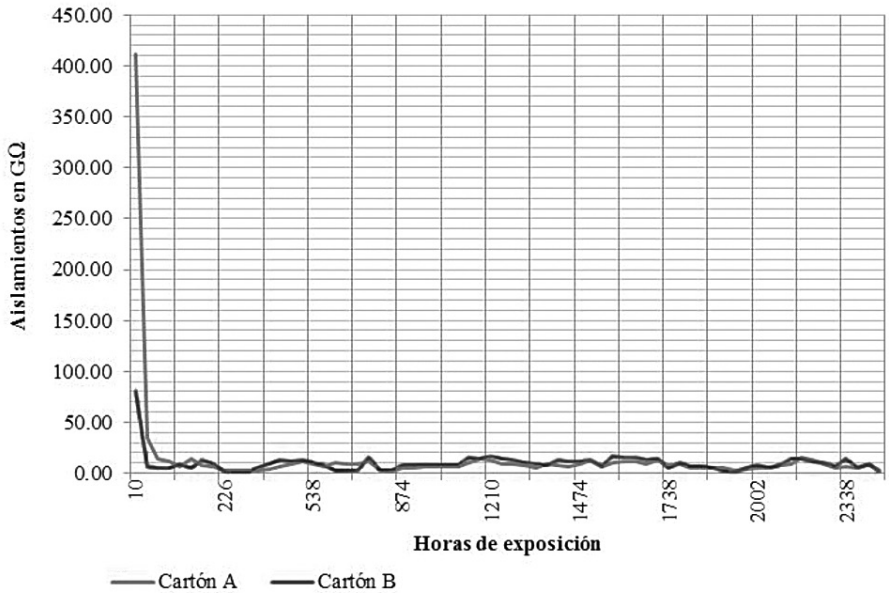


Figura 9. Comportamiento de los cartones A y B durante 2400 horas de exposición en ambientes no controlados

Calzas A y B: La calza A fue sometida a un proceso de secado a alto vacío y aspersión de aceite y la calza B al horno. En la figura 10 está el comportamiento en las 2400 horas de estar en exposición contra los valores obtenidos mediante la prueba de resistencia al aislamiento.

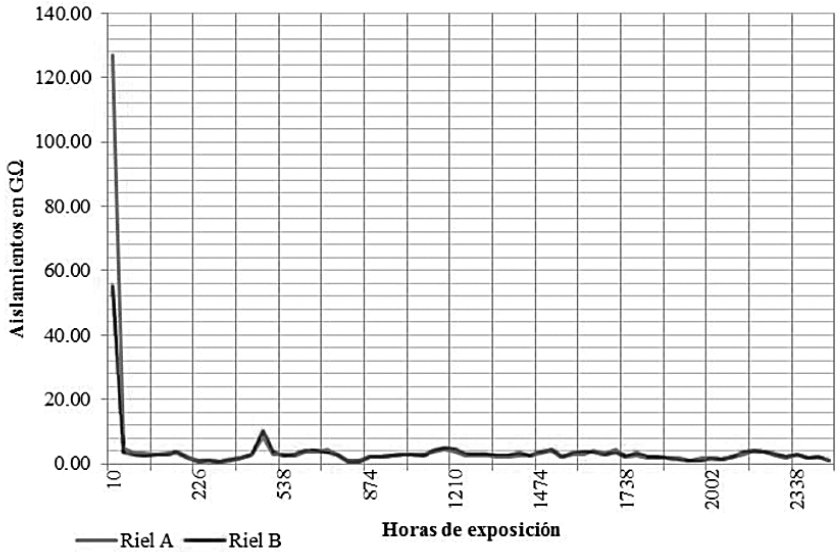


Figura 10. Comportamiento de los calzas A y B durante 2400 horas de exposición en ambientes no controlados

Rieles A y B: El riel A fue sometido a un proceso de secado a alto vacío y aspersión de aceite y el riel B fue secado al horno. En la figura 11 se representa el comportamiento en las 2400 horas de estar en exposición contra los valores obtenidos mediante la prueba de resistencia de aislamientos.

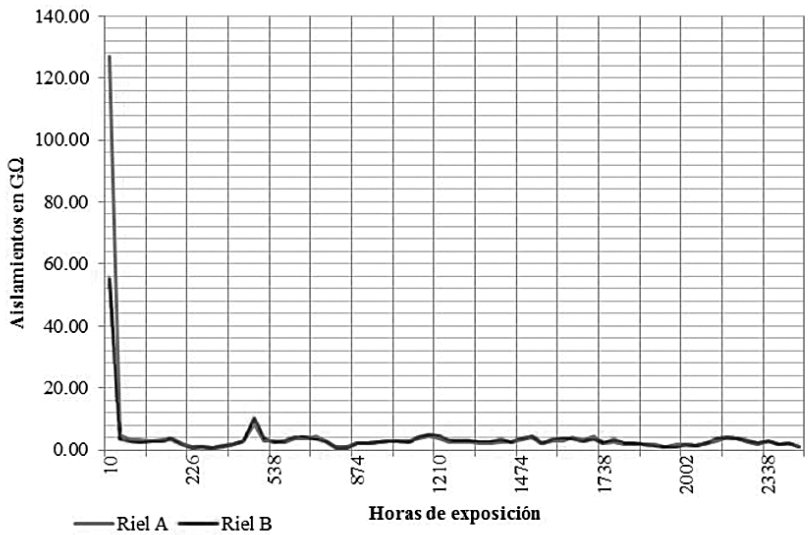


Figura 11. Comportamiento de los rieles A y B durante 2400 horas de exposición en ambientes no controlados

Todas las pruebas anteriores se hicieron a una temperatura promedio de 25 °C y 61% de humedad relativa durante 2400 horas de exposición (100 días). Para las bobinas a y b se observó un incremento de alrededor de 350 gramos de humedad en promedio para las dos. Igualmente, se observó una degradación del índice de polimerización para el caso de la bobina A de 680 a 521. No obstante, la bobina B pasó de 506 a 386 su índice de polimerización; esto representa una degradación importante de las propiedades mecánicas del papel.

Discusión final

Para los aislamientos sólidos, el tiempo crítico se da en las *primeras 24 horas de exposición*. En el cuadro 5 se muestran los resultados obtenidos. Debido a esto, las primeras 24 horas de exposición son las más críticas y nocivas para un aislamiento sólido.

Cuadro 5. Dato obtenidos en 24 horas de exposición de los aislamientos sólidos en ambientes no controlados

Material	Valor inicial resistencia al aislamiento (GΩ)	Resistencia al aislamiento (GΩ) después de 24 horas	% Disminución de aislamiento
Madera A	27,20	7.85	71,13 %
Madera B	22,40	7,45	66,74 %
Pretensado A	49,00	12,70	74,08 %
Pretensado B	33,60	8,35	75,14 %
Pretensado C	27,08	7,55	73,10 %
Pretensado D	17,40	5,20	70,11 %
Cartón A	412,00	34,60	91,60 %
Cartón B	81,00	5,95	92,65 %
Calza A	183,23	2,60	98,58 %
Calza B	48,51	2,44	94,97 %
Riel A	127,11	4,74	96,27 %
Riel B	55,30	3,70	93,31 %

Al finalizar esta etapa de pruebas que se llevó a cabo por un tiempo aproximado de 2400 horas (100 días), se observa una disminución considerable en los valores de resistencia del aislamiento. Esta reducción se puede observar en el cuadro 6.

Conclusiones

La prueba de resistencia del aislamiento se aplicó a los aislantes sólidos propuestos posteriormente al primer proceso de secado, y se observó una disminución de hasta un *70% con respecto a los valores iniciales* en la capacidad de aislamiento tanto para materiales gruesos como delgados respectivamente en las primeras *24 horas de exposición*. En todas las muestras analizadas se observó el mismo comportamiento.

Esta disminución de debió principalmente a la concentración de agua en los materiales dieléctricos sólidos muestreados, así como la presencia de contaminantes como polvos, vapores, humos entre otros. Debido a esto, se considera que este tiempo de exposición es los más perjudiciales para la parte activa de un transformador de potencia que se encuentre expuesto a la intemperie.

Cuadro 6. Valores de resistencia de aislamientos después de 2400 horas en ambientes no controlados

Material	Valor inicial de resistencia del aislamiento (GΩ)	Valor final de resistencia del aislamiento (GΩ)	% Disminución de resistencia del aislamiento
Madera A	27,20	0,94	96,54%
Madera B	22,40	0,56	97,52%
Pretensado A	49,00	1,52	96,86%
Pretensado B	33,60	0,60	98,65%
Pretensado C	27,08	0,69	97,53%
Pretensado D	17,40	0,23	98,23%
Cartón A	412,00	2,81	99,32%
Cartón B	81,00	2,06	97,45%
Calza A	183,23	0,80	99,56%
Calza B	48,51	0,70	98,56%
Riel A	127,11	1,06	99,17%
Riel B	55,30	1,08	98,05%

Otro aspecto relevante es que la conducción de electricidad en un material dieléctrico sólido muestra un comportamiento similar indistintamente si el material presenta espesores distintos debido a que esta corriente se da a nivel superficial a causa de la película de agua presente en el material.

Posteriormente al muestreo anterior y hasta los *100 días de ensayo (2400 horas)* se observa una tendencia a mantenerse en valores superiores al *90%* de la disminución de la capacidad dieléctrica. Se considera que en esta etapa los materiales se saturan y no tienen capacidad para absorber más humedad. Se presenta una disminución significativa del grado de polimerización, del *26,91%* y *58,10%* para la bobina A y la bobina B, respectivamente.

El aumento significativo en las dimensiones de las muestras de materiales dieléctricos fue observado tanto para la altura y el peso de las bobinas. Fue debido a la presencia de humedad en el medio ambiente y la facilidad misma que tienden los materiales a absorberla.

Se determina que no solo la humedad es un factor que contribuye al deterioro de los materiales dieléctricos, sino también factores como el ingreso de partículas sólidas, vapores y humos a las instalaciones y la manipulación por parte de personas ajenas a la actividad de la empresa.

Recomendaciones

El desarme y mantenimiento (estancia) de la parte activa de un transformador debe hacerse en un área con ambientes controlados tanto en temperatura como en humedad relativa. De no ser así, se debe minimizar el tiempo de exposición. Por lo tanto la instalación de extractores de vapores, humos y un ambiente controlado en variables de temperatura y humedad relativa sería sumamente importante para conservar los materiales dieléctricos sólidos.

Por último se deben establecer controles para el ingreso de personas ajenas al proceso de mantenimiento de transformadores. Estas personas deberán usar protección para minimizar la presencia en el medio ambiente de partículas sólidas, vapores y otros agentes contaminantes de los aislamientos sólidos.

Bibliografía

CIGRE (Consejo Internacional de Grandes Sistemas Eléctricos). (2007). *Ageing of cellulose in mineral-oil insulated transformers*. Paris: CIGRE.

Hubert, C.L. (1991). *Electric Machines*. Columbus, Ohio, USA: Merrill.

IEC 60076-1. (1989). *IEC 60076-1. High Voltage Test Techniques Part-1: General difinitions and test requierements*. Europa: International Electrotechnical Commission (IEC).

Naidu, M.S. & Kamaraju, V. (2009). *High Voltage Engineering*. New Delhi: Tata McGraw-Hill.