ANÁLISIS Y APLICACIÓN DE LOS MATERIALES AISLANTES LÍQUIDOS, GASEOSOS Y SÓLIDOS EN EQUIPOS ELÉCTRICOS DE ALTA TENSIÓN

Carlos Villegas[1], Juan Gallo[2]
Centro de Investigación Científica y Tecnológica [1]
Escuela Superior Politécnica del Litoral - ESPOL[1]
Km. 30½ Vía Perimetral, Guayaquil, Ecuador
Teléfono: +593 4 269773-4, Fax: + 593 4 2269776,
ingcvillegasg@hotmail.com[1]

Resumen

Cada equipo de alta tensión instalado en las subestaciones eléctricas que conforman el Sistema Nacional de Transmisión (SNT), cumple una función específica de importancia dentro del mismo. De tal forma que podríamos decir, que gran parte de la confiabilidad de este sistema, depende de las condiciones en que tales equipos se encuentren, si estos han sido correctamente instalados, si desde su recepción en campo han sido adecuadamente sometidos a análisis internos a través de ensayos tanto eléctricos como dieléctricos, y si en consecuencia se ha cumplido estrictamente con los periodos de mantenimiento preventivos recomendados por el propio fabricante.
Los ensayos dieléctricos, son los métodos aplicados para evaluar las condiciones actuales en las que se encuentra el sistema de aislamiento de un equipo. El término sistema de aislamiento, se refiere al subconjunto total de materiales aislantes en sus diferentes estados (sólidos, líquidos y gaseosos) que se involucran en la construcción de un equipo eléctrico, con la finalidad de interactuar entre sí y brindar una barrera de aislamiento entre sus partes conductoras y entre estas con respecto a la masa sólidamente aterrizada del mismo.
Es a partir de estas definiciones, que nace la necesidad de conocer el análisis y la aplicación de los distintos materiales aislantes en los equipos eléctricos de alta tensión, es decir: cuáles son sus características, como se encuentran dispuestos internamente en el equipo, cual es su función, que problemas atentan contra su vida útil, cuales son los métodos aplicados por el fabricante para su evaluación en la producción, cuales son los métodos que permiten realizar un seguimiento de sus condiciones en campo y finalmente, que métodos permiten su reacondicionamiento y/o recuperación si fuera posible.

Palabras Claves: *Equipos de Alta Tensión, Ensayos dieléctricos, Sistema de Aislamiento*

Summary

Each High Voltage Equipment in Electrical Substations that are part of de National Transmission System, have a specific function inside of this. However, we can say, a great part of system confiability depends of the equipments condition, if these have been correctly assembled, if since its field reception they have been submitted to internal analysis using electrics and dielectric tests, and if the prevented maintenance period has been strictly accomplished in the period recommended by the manufacturer.
The dielectric tests are the methods used to assess current conditions, this is very useful because we can know how bad is the insulation system of equipment. The term isolation system refers to the subset of insulating materials in different states (solid, liquid and gas) that are involved in the construction of an electrical equipment, with the purpose of interacting with each other and provide an insulating barrier between conductive parts and between the conductive parts and the mass very well landed.
It is from these definitions that comes the need for analysis and application of different insulating materials in high voltage electrical equipment, ie: what are their characteristics, how are they internally disposed in the equipment, which is its function, problems that threaten their life, what are the methods applied by the manufacturer for evaluation on the production, which are the methods that are very useful to track their condition in the field and finally, methods that allow for refurbishment and / or recovery if possible.

Keywords: high voltage equipment, dielectric tests, the insulation system

Guayaquil, 16 de Febrero /2009

Ing. Juan Gallo Galarza
Director de Tesis

1. Introducción

El constante crecimiento de los sistemas eléctricos de potencia debido al aumento de los centros de consumo de energía eléctrica, ha originado en cadena la construcción de grandes centrales de generación, líneas de transmisión de largas distancias y estaciones de servicio para manejo de elevadas tensiones. Tal situación, ha incidido directamente en la necesidad de fabricar equipos de mayor capacidad para alta tensión, siendo su estructura constructiva cada vez más compleja, de mayor volumen y de especial cuidado.

El manejo de elevadas tensiones en la estructura constructiva de un equipo, implica consecuentemente el aumento del volumen de material aislante a usarse, con el fin de mantener en sus propios canales las partes conductoras internas y soportar adecuadamente las diferencias de potencial creadas entre varias de sus secciones, brindando el distanciamiento mínimo de seguridad requerido cuando en servicio. Se podría decir que más del 50% de la estructura constructiva de un equipo se encuentra compuesta de materiales aislantes.

Los diferentes materiales aislantes dispuestos en un equipo conforman lo que se llama su sistema de aislamiento. El funcionamiento adecuado de este sistema depende de los continuos análisis periódicos que apliquemos y de las adecuadas acciones preventivas que tomemos.

La aplicación de métodos con el fin de evaluar ciertos parámetros característicos del sistema de aislamiento, es lo que se conoce como ensayos dieléctricos. Es decir, el análisis y diagnóstico del estado del sistema de aislamiento de un equipo se efectúa mediante ensayos dieléctricos, que según sea su finalidad, pueden ser desarrollados tanto en fábrica como en campo.

2. Conceptos Básicos

Materiales Aislantes ó Dieléctricos: Son sustancias que poseen baja conductividad eléctrica y por tanto, significativa resistencia al paso de la corriente en presencia de un campo eléctrico externo. No existen electrones libres que se puedan desplazar en los materiales aislantes; todos se encuentran ligados a sus átomos. Por eso, cuando se aplica un campo eléctrico externo a un dieléctrico, su comportamiento es muy distinto al de los conductores. Existen de dos tipos básicos, Polar y No Polar.

Se conoce como **material aislante Polar**, a aquel dieléctrico que está constituido de moléculas polares y su mecanismo de polarización se da mediante la orientación de dipolos permanentes.

Se conoce como **material aislante No Polar**, a aquel dieléctrico que está constituido de moléculas no polares y su mecanismo de polarización se da mediante polarización de moléculas no polares.

Estos últimos son preferibles para la aplicación en equipos de alta tensión, dado que al poseer moléculas donde sus centros de cargas (positivas y negativas) son coincidentes, no se crean dipolos permanentes con tendencia al giro ante la presencia de un campo eléctrico, lo cual es sinónimo de pérdidas dieléctricas elevadas por variación de frecuencia y temperatura. Ante la acción de un campo, las cargas presentes en las moléculas de los materiales aislantes solo tienden a orientarse y no presentan variación brusca.

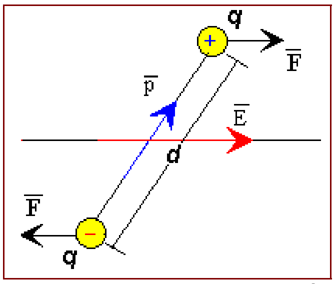


Figura 1. Dipolo en un campo eléctrico

Los materiales aislantes involucrados en un equipo de alta tensión, se presentan en los tres estados fundamentales: sólidos, líquidos y gaseosos. Sus propiedades básicas, que por lo general son los parámetros a evaluar con los diferentes ensayos aplicados tanto en fábrica como en campo, son las siguientes:

a) **Eléctricas** (Resistencia de Aislamiento, Rigidez Dieléctrica, Constante Dieléctrica, Factor de Pérdidas Dieléctricas)
b) **Mecánicas** (Resistencia a la Tracción, Resistencia a la Compresión, Resistencia a la Flexión, Resistencia al Choque, Límite Elástico, Maquinabilidad)
c) **Físico-Químicas** (Peso Específico, Porosidad, Higroscopicidad, Conductividad Térmica, Calor Específico, Temperatura de Seguridad, Inflamabilidad, Resistencia a los Ácidos y a los Álcalis.

3. Materiales aislantes involucrados en los principales equipos de alta tensión de las Subestaciones de Transmisión Eléctrica

3.1 Finalidad

Permitir aislar eléctricamente las partes conductoras de un equipo de alta tensión entre sí y estas mismas respecto a tierra o la masa metálica que lo conforma, para modificar en gran proporción el campo eléctrico y mantener el flujo de corriente en sus propios canales.

3.2 Transformadores de Potencia

El arrollamiento de bajo voltaje, que es el más cercano al núcleo, está enrollado alrededor de un cilindro de **micarta**, el cual le permite un aislamiento eficiente con respecto a masa. El aislamiento entre arrollamientos de alto y bajo voltaje, consiste de tubos o cilindros sólidos aislantes limitadores de **cartón prensado "pressboard"**; entre los cuales existen espacios desnudos con el propósito de permitir la libre circulación del aceite dentro, alrededor del núcleo y la estructura de las bobinas. Los conductores de las bobinas están aislados con varias capas de **papel Kraft o manila**. El aislamiento entre bobinas o capas, lo constituye generalmente espaciadores en forma de anillos de cartón prensado **"pressboard", presspan o baquelita**. El aislamiento entre el arrollamiento de alto voltaje con respecto a masa, localizado en sus extremos, consiste de arandelas laminadas de **papel de base fenólica y cartón prensado "pressboard"**.

Todos estos materiales aislantes sólidos se encuentran impregnados e inmersos en **aceite mineral aislante**, el cual además de cumplir la función básica de aislar los arrollamientos en su totalidad, actúan como medio refrigerante ayudando en la transferencia de calor originado por las pérdidas en las partes activas, para el medio ambiente.

3.3 Transformadores de Instrumentación

Todos los elementos internos de los transformadores de instrumentación, están contenidos dentro de una cámara aislante de **porcelana de alúmina** vitrificada. El aislamiento principal entre los arrollamientos y las partes puestas a potencial de tierra, es hecho de varias capas de **papel Kraft**. Como soporte y fijación de las partes interiores, se emplean apoyos de **madera**.

El conjunto cámara de porcelana y tanque de acero del transformador es llenado totalmente de **aceite mineral aislante** (en muchas ocasiones con granos de cuarzo), cuyas características y afinidad con otros aislantes sólidos como el papel y la madera, brindan un excepcional sistema de aislamiento al equipo.

3.4 Seccionadores de Potencia

El aislamiento principal de los seccionadores de alta tensión radica sólo en las columnas aisladoras de sus polos, las mismas que actúan como ejes de las cuchillas y a la vez brindan una distancia de aislamiento necesaria con respecto a la estructura base soporte que se encuentra a potencial de tierra. Dichas columnas también conocidas como aisladores de núcleo sólido (por no tener cavidades y espacios de aire en su estructura), son fabricadas de **porcelana de alúmina o porcelana de sílice**, siendo la primera la más utilizada.

3.5 Interruptores de Potencia

• A Gran volumen de aceite

El **aceite mineral** es considerado como el principal material aislante involucrado en su estructura constructiva, dado a que cumple la doble función de aislar las partes internas vivas y actuar como medio eficaz de extinción del arco voltaico de interrupción.

Las cámaras de interrupción que encierran ambos contactos estacionarios y parte del ensamblaje de interrupción del arco, comprende de un tubo aislante de **papel laminado con resinas fenólicas o enrollado de filamento de vidrio**.

Existe un revestimiento interno del tanque metálico (sólidamente aterrizado), compuesto de una película fina aislante de **papel o fibra procesada**, cuya función principal es evitar que las partículas de conducción en el aceite, formen una trayectoria directa a tierra desde la parte más baja de los bushing's.

Para la operación de apertura o cierre del interruptor, existe una varilla de material aislante que direcciona el movimiento de los contactos móviles, la cual es fabricada de **madera laminada con resinas fenólicas**.

• A Gas SF_6

Este tipo de interruptor emplea como aislamiento principal el **gas Hexafluoruro de Azufre (SF_6)**, y al igual que el aceite aislante cumple las dos funciones primordiales de aislar completamente las partes internas vivas y actuar como medio eficaz de extinción del arco de interrupción.

Poseen bushing´s o manguitos tipo huecos de **porcelana de alúmina**, internamente llenos con el mismo **gas SF_6** del equipo.

Existen aisladores de soporte construidos **de fibra de vidrio**, cuya función principal es mantener fija la cámara de interrupción y brindar la distancia de aislamiento necesaria con referencia al tanque del interruptor sólidamente aterrizado.

Para la operación de apertura o cierre, se dispone de una varilla de **fibra de vidrio** que direcciona el cilindro propulsor del mecanismo de interrupción. Por otro lado, los contactos móviles del cilindro puffer, cuentan con toberas de **teflón aislante** cuya función principal es la de encerrar el arco durante su extinción con el gas SF_6 empujado a presión mediante el pistón.

3.6 Equipos Encapsulados

El **gas hexafluoruro de azufre (SF_6)** es utilizado como el aislamiento principal de la totalidad del equipo encapsulado, encontrándose a presión dentro de cada uno de sus compartimentos. Las barras conductoras y demás partes vivas del equipo GIS son soportadas por **aisladores de resina epoxídica moldeada** fijados a la cubierta metálica, cuya resistencia dieléctrica al voltaje del equipo entre fases y entre estas con respecto a tierra, permite brindar una buena distancia de aislamiento, incluso cuando la presión de gas SF_6 haya disminuido y se encuentre cerca de la presión atmosférica.

4. Factores de la contaminación y/o degradación del aislamiento en los equipos eléctricos de alta tensión

4.1 Factores de la contaminación y/o degradación del aislamiento en los Transformadores de Potencia

Los principales agentes de la degradación del aislamiento sólido de un transformador de potencia son: la humedad, la temperatura y la reacción química promovida por ambos en presencia del oxígeno.

La humedad es uno de los mayores enemigos del aislamiento celulósico, más del 90% del agua ingresada en el transformador se sitúa en el papel y sólo menos de un 10% se encuentra en el aceite. Pequeñas cantidades de agua en el aislamiento sólido provocan considerable reducción de su resistencia mecánica y aumento del factor de potencia. En razón de su débil estabilidad térmica, la humedad en combinación con el **sobrecalentamiento**, degenera el sistema de aislamiento sólido, reduciendo la resistencia mecánica mucho antes que la resistencia de aislamiento y la rigidez dieléctrica del aceite. El **oxígeno** disuelto en el aceite aislante, infiere directamente sobre el papel para acelerar su envejecimiento. Los productos de la oxidación del aceite actúan, igualmente, en la degradación del papel.

Un aceite es considerado **"contaminado"** cuando contenga humedad u otros componentes extraños que NO sean producto de su oxidación. El agua puede existir en el aceite en tres estados: disuelta (en solución), no disuelta (en suspensión o en emulsión) o libre (depositada). El agua en estado libre disminuye acentuadamente rigidez dieléctrica del aceite y permite la transferencia de este excedente para la celulosa, mientras que el agua no disuelta acelera la formación de compuestos polares que van a intervenir en su oxidación. El agua disuelta en el aceite no es tan nociva.

La oxidación del aceite mineral aislante es sinónimo de lo que se conoce como "**deterioración o envejecimiento"** del aceite. Los principales factores que provocan la oxidación del aceite en un transformador en servicio son: la temperatura relativamente elevada, la presencia de oxígeno y el contacto con varios materiales de construcción. El principal efecto de la deterioración del aceite, es la formación de productos de óxidos sólidos (lodos) que tienden a depositarse sobre las bobinas y en sus estrechos canales de refrigeración. Como consecuencia se generará sobrecalentamiento que podrá acabar en un rápido envejecimiento de los aislantes sólidos involucrados.

Producto de la deterioración del aislamiento del transformador, el aceite puede contener disueltos gases combustibles y no combustibles. Entre los combustibles se cuentan: monóxido de carbono (CO), hidrógeno (H_2), metano (CH_4), etano (C_2H_6), etileno (C_2H_4) y acetileno (C_2H_2). Los no combustibles que pueden ser encontrados son: oxígeno (O_2), nitrógeno (N2) y dióxido de carbono (CO_2).

4.2 Factores de la contaminación y/o degradación del aislamiento en los Interruptores de Potencia

- **Interruptores en Aceite**

Al igual que en el transformador de potencia, las partes aislantes sólidas de este tipo de interruptor se ven afectadas por el ingreso de humedad, siendo los problemas más comunes los cambios irregulares que se dan en su estructura o forma y el establecimiento de caminos preferenciales para las corrientes de descarga.

La polución del aceite dado al carbón producido por el arco de ruptura, aunque no afecta a sus cualidades desde el punto de vista de extinción del arco, si reduce sus propiedades dieléctricas, ensucia los contactos, los diferentes órganos y aislantes sumergidos en el.

Las partículas de carbón reducen la rigidez dieléctrica si ellas permanecen suspendidas en el aceite en apreciables cantidades, bajo normales circunstancias; no obstante, el carbón se aglomera y asienta en el fondo del tanque; la humedad ayuda a esta aglomeración y asentamiento.

- **Interruptores a Gas SF_6**

Las descargas eléctricas tienden a descomponer el gas en una intensidad proporcional a la energía de las mismas. Sobre la influencia del arco de ruptura, el SF_6 se descompone en sus elementos atómicos conforme la siguiente ecuación:

$$SF_6 \leftrightarrow S + 6F$$

Disminuyendo la temperatura, la reacción se da rápidamente en la dirección opuesta, recomponiendo el SF_6. La restauración del gas sería total si no hubiese reacciones secundarias entre el gas descompuesto el agua y otras sustancias coexisten al mismo tiempo, quedando materias residuales gaseosas, llamados productos de descomposición. Si la recombinación ocurre en presencia de metales, se pueden formar fluoruros metálicos en forma de polvos.

Los productos de descomposición gaseosos que se encuentran más frecuentemente en el gas SF_6 usado son: HF (Fluoruro de Hidrógeno), SO_2 (Dióxido de Azufre), SOF_2 (Fluoruro de Tionilo), SO_2F_2 (Difluoruro de Sulfurilo) y SF_4 (Tetrafluoruro de azufre). Además, partículas sólidas de descomposición pueden presentarse en el gas SF_6 descompuesto, tales como: WO_3 (Trióxido de Wolframio) y CuF_2 (Difluoruro de Cobre).

4.3 Factores de la contaminación de los bushing´s y aisladores en general

Los bushing’s y aisladores en general, a pesar de cumplir similar función básica de brindar al ambiente una distancia segura de aislamiento entre puntos energizados y tierra, poseen una importante diferencia en cuanto a su funcionalidad.

Los bushings en servicio son recorridos en su interior por una corriente eléctrica, la cual crea un campo magnético que aporta en la fijación de partículas y óxidos metálicos en la superficie de la porcelana. En tanto que, los aisladores no son recorridos por alguna corriente eléctrica y no están sujetos a este tipo de fenómeno. Esta característica contribuye considerablemente a los efectos de la contaminación radicada especialmente en la superficie exterior de la porcelana expuesta al ambiente, que es por donde se crean los caminos preferenciales de descargas.

Los agentes contaminantes del ambiente pueden ser inorgánicos y orgánicos, siendo los primeros considerados como los principales agentes de la contaminación de bushing’s y aisladores. Dichos agentes inorgánicos, pueden ser: cenizas, partículas de carbón y metálicas, sales inorgánicas (cloruro de sodio, sulfato de sodio, cloruro de magnesio), ácidos, polvo de cemento, polvo de arcilla, polvo de piedra calcárea, arena, fertilizantes y otros.

Cuando se combinan con el agua, las sales minerales liberan iones y el electrolito formado es propicio para conducir la corriente superficial. Los polvos de cemento, arcilla y piedra calcárea, y los fertilizantes orgánicos no son conductores, pero pueden ser hidrofílicos y mantener húmeda la superficie del aislador. Si la humedad es elevada, pueden pasar de no conductores a conductores y crear la situación crítica de descarga superficial.

5. Ensayos Dieléctricos y su aplicación en el control del Sistema de Aislamiento de los equipos de alta tensión

5.1 Definición

Se define como **ensayos dieléctricos**, al conjunto de mediciones y verificaciones que se efectúan para determinar las características del sistema de aislamiento de un equipo. El término “sistema de aislamiento” se refiere al subconjunto total de materiales aislantes que se involucran en la construcción de un equipo eléctrico, con la finalidad de interactuar entre sí y brindar una barrera de aislamiento entre sus partes conductoras y entre estas con respecto a la masa sólidamente aterrizada.

Someter los materiales aislantes de los equipos de alta tensión a determinados ensayos dieléctricos, es demostrar si ellos son aptos para soportar los requisitos especificados. De esta forma, se tiene una cierta garantía de que los materiales eléctricos de alta tensión podrán operar satisfactoriamente en las condiciones reales del sistema, simuladas durante los ensayos.

5.2 Clasificación

1) En cuanto al tipo de tensión utilizada
   a. Tensión AC (Sinusoidal)
   b. Tensión DC
   c. Tensión de Sobrevoltaje
2) En cuanto a la finalidad u objetivo
   a. Ensayos de aceptación
      - Ensayo de aceptación en fábrica
      - Ensayo de aceptación en campo
   b. Ensayos de mantenimiento (periódicos)
   c. Ensayos después de una falla
3) En cuanto a las condiciones ambientales
   a. Ensayos en ambiente seco
   b. Ensayos sobre lluvia artificial
   c. Ensayos de polución artificial
4) En cuanto al nivel de solicitación dieléctrica
   a. Ensayos destructivos
   b. Ensayos no destructivos

5.3 Ensayos AC

- **Ensayo para la Determinación del Factor de Potencia y/o Factor de Disipación**

El espécimen de aislamiento para este análisis, debe ser representado por un solo capacitor combinado con un resistor, por lo general en paralelo:

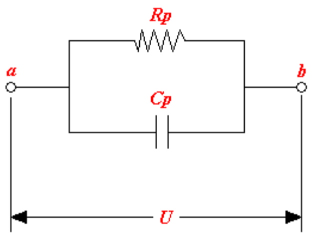
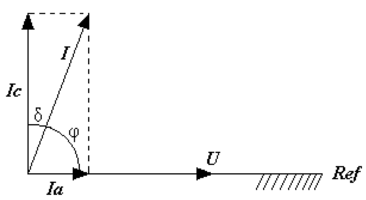


Figura 2. Representación espécimen bajo ensayo

Donde:
Cp: Capacitancia fundamental del espécimen
Rp: Pérdidas en Watts disipadas en el aislamiento cuando un voltaje es aplicado
U: La diferencia de potencial aplicada durante el ensayo

El principio de aplicación de este ensayo en un espécimen de aislamiento real, se traduce en el análisis del siguiente diagrama fasorial:



$$tg(\delta) = \frac{Ia}{Ic}$$

La magnitud $\mathbf{I_a/I_c}$ conocida como "la tangente de delta" (tg(δ)) se denomina **"Factor de Pérdidas del aislamiento"** o **"Factor de Disipación",** y es el parámetro a evaluar con este ensayo.

El ángulo **δ** formado entre **I** e $\mathbf{I_c}$ es llamado el **ángulo de pérdidas dieléctricas**. Para ángulos **δ** pequeños, se cumple que: **cos(φ) = tg(δ)** Por tanto, el **cos(φ)** también puede utilizarse para calificar las condiciones del aislamiento y se lo denomina el **"Factor de Potencia del aislamiento"**.

Existen instrumentos que según su diseño de fabricación, permiten o la determinación del **Factor de Potencia**, o la determinación del **Factor de Pérdidas** en el aislamiento. No obstante, presentan las siguientes similitudes:

1) Ambos determinan adicionalmente la **Capacitancia** (en **µF**) y las **pérdidas** (en Watts) en el aislamiento bajo análisis.
2) Ambos aplican los mismos **modos de ensayo** para el análisis.
   a) Modo **UST** (**U**ngrounded **S**pecimen **T**est)
   b) Modo **GST** (**G**rounded **S**pecimen **T**est)
      - GSTground
      - GSTguard

Existen factores que influyen en las lecturas del instrumento y que debemos tomar en cuenta:

- La Temperatura del aislamiento bajo ensayo durante su análisis.
- La influencia de la inducción adyacente al equipo en análisis (en campo), durante las mediciones realizadas con el instrumento.

- **Ensayo para la Medición de Descargas Parciales**

Las descargas parciales es un fenómeno que está constituido por descargas con poca energía localizadas exclusivamente en el dieléctrico, que no provocan su perforación completa, pero pueden conllevarlo a su deterioración. Los centros de localización de tales descargas, son principalmente pequeñas burbujas gaseosas en el dieléctrico tanto sólido como líquido, en los cuales el gradiente de potencial puede superar la rigidez dieléctrica, provocando el surgimiento de pequeñas descargas localizadas.

El principio de aplicación de este ensayo, se traduce en el análisis de los siguientes circuitos que detallan el antes y el durante la generación de la descarga parcial:

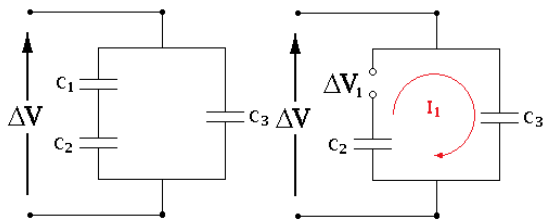


Figura 3. Representación de una descarga parcial

Donde:
C1: Capacitancia de la burbuja donde se produce la descarga parcial
C2: Capacitancia del aislante en la región de la burbuja en serie con C1.
C3: Capacitancia del resto del dieléctrico
ΔV: Tensión aplicada al dieléctrico

A partir del análisis del circuito generado durante la descarga, se obtiene la siguiente expresión:

$$q \cong \frac{C_2}{C_1} \cdot q_1$$

Donde:
q: Carga aparente transferida durante la descarga
q1: Carga real transferida durante la descarga

Desde el punto de vista eléctrico sería interesante conocer la carga real transferida (q1) durante la descarga parcial del condensador C1. Sin embargo, esta no puede ser medida, debido a que las mediciones solamente pueden ser realizadas en los terminales del capacitor C. Por tanto, en términos de ensayo podemos trabajar apenas con la carga aparente (q), siendo esta el parámetro básico de medición de los instrumentos de ensayo aplicados. Su medida se da en **pC**.

- **Ensayo para evaluar la Rigidez Dieléctrica de un aislamiento**

Este ensayo mide la tensión máxima que un material aislante puede soportar sin ser perforado por la corriente eléctrica. Su valor se expresa por la relación entre la tensión máxima que puede apreciarse sin que el aislamiento se perfore ΔV (llamada tensión de perforación) y el espesor de la pieza aislante, por eso sus unidades de medida se dan en kV/mm.

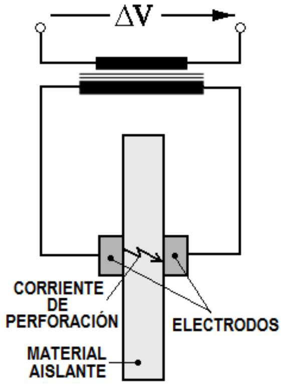


Figura 4. Representación espécimen bajo ensayo

En campo, la evaluación de la rigidez dieléctrica se ve limitada solo al análisis de una muestra de material aislante en estado líquido, por ser esta, la única en permitir su extracción de un equipo de alta tensión que normalmente se encuentra en servicio.

5.4 Ensayos DC

- **Ensayo para la medición de la Resistencia de Aislamiento**

La medición de la resistencia de aislamiento del conjunto de materiales aislantes de un equipo de alta tensión, consiste en la medición de la resistencia que opone el paso de la corriente eléctrica a través de él, medida en la dirección en que deba asegurarse el aislamiento, durante un tiempo dado de aplicación de tensión de corriente continua.

Al aplicar tensión de corriente continua al aislamiento de un equipo, entre dos puntos de ensayo, este quedará sometido a una diferencia de potencial originando un campo eléctrico. De esta forma, el espécimen de aislamiento para este análisis, debe ser representado por el siguiente circuito paralelo:

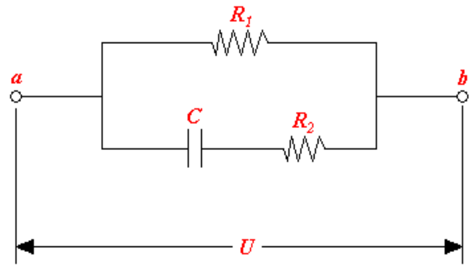


Figura 5. Representación espécimen bajo ensayo

Donde:
R1: Resistencia eléctrica a la corriente de fuga
R2: Resistencia eléctrica representando las pérdidas por absorción
C: Capacitancia del dieléctrico
U: La diferencia de potencial aplicado

La corriente total que circula por el espécimen de aislamiento durante el ensayo, posee tres componentes distintivas que son:

1) La componente de carga capacitiva
2) La componente de dispersión o de fuga
3) La componente de absorción dieléctrica

Estas componentes se comportan de la siguiente manera:

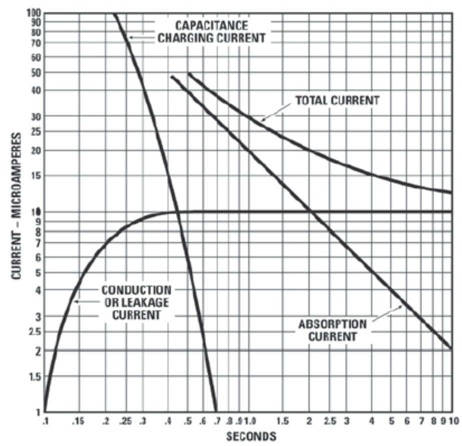


Figura 6. Componentes de la corriente de ensayo

El instrumento utilizado para la medición de la resistencia de aislamiento de un equipo de alta tensión, es conocido como MEGOHMMETRO, debido a que los valores de resistencia de aislamiento medidos por el mismo se dan en su mayoría en magnitud de **megaohms**. Se acostumbra a llamar a este instrumento también con el nombre de MEGGER, siendo esta la marca registrada de uno de sus mayores fabricantes a nivel mundial.

5.5 Ensayos Dieléctricos aplicados en los Transformadores de Potencia y de Instrumentación

<u>Ensayos de Campo</u>

a) Medida de la Resistencia de Aislamiento
b) Determinación del Factor de Potencia y/o Factor de Disipación del aislamiento. Medición de la Capacitancia y las pérdidas en el aislamiento.
c) Ensayos Eléctricos, Físico-Químicos y Cromatográficos del aceite mineral aislante (No aplicable para el caso de Transformadores de Instrumentación)

<u>Ensayos de Fábrica</u>

a) Todos los ensayos dieléctricos aplicados en campo
b) Determinación de la presencia de Descargas Parciales
c) Ensayo de Tensión Aplicada
d) Ensayo de Tensión Inducida
e) Ensayo de Impulso de Tensión

5.6 Ensayos Dieléctricos aplicados en los Seccionadores de Potencia

<u>Ensayos de Campo</u>

a) Medida de la Resistencia de Aislamiento

<u>Ensayos de Fábrica</u>

a) Determinación del Voltaje Crítico de Contorneo (Critical Flashover)
b) Determinación del voltaje de Ruptura dieléctrica (withstands)

5.7 Ensayos Dieléctricos aplicados en los Interruptores de Potencia

<u>Ensayos de Campo</u>

a) Medida de la Resistencia de Aislamiento
b) Determinación del Factor de Potencia y/o Factor de Disipación del aislamiento. Medición de la Capacitancia y las pérdidas en el aislamiento.

<u>Ensayos de Fábrica</u>

a) Todos los ensayos dieléctricos aplicados en campo
b) Ensayo de Tensión Aplicada
c) Ensayo de Impulso de Tensión

5.8 Ensayos Dieléctricos aplicados en los Equipos Encapsulados

<u>Ensayos de Campo</u>

a) Medida de la Resistencia de Aislamiento

<u>Ensayos de Fábrica</u>

a) Ensayo de Impulso de Tensión
b) Ensayo de Descargas Parciales
c) Ensayo de Resonancia AC con frecuencia variable

6. Métodos utilizados para la preservación del Sistema de Aislamiento de los principales equipos de alta tensión

6.1 Métodos utilizados para la preservación del sistema de aislamiento de los Transformadores de Potencia

- **Tratamiento del aceite aislante**

Las alteraciones de las propiedades físico-químicas que el aceite sufre durante su uso, pueden ser restauradas a través de métodos adecuados de tratamiento, logrando que finalmente este líquido aislante vuelva a condiciones iguales e inclusive mejores que las iníciales. Estos métodos de tratamiento son los siguientes:

a) Reacondicionamiento del aceite aislante
b) Recuperación o Regeneración del aceite aislante

<u>Reacondicionamiento del aceite aislante</u>

Este proceso de tratamiento se lo aplica al aceite contaminado, con el propósito de remover por medios mecánicos la humedad, gases y las partículas sólidas en suspensión, manteniendo o incrementando su rigidez dieléctrica. Existen tres métodos para efectuar el reacondicionamiento de líquidos aislantes y estos son: **la filtración**, **la centrifugación** y la **deshidratación al vacío (termovacío)**.

<u>Recuperación o Regeneración del aceite aislante</u>

Este proceso de tratamiento se lo aplica al aceite deteriorado, con el propósito de eliminar por medios químicos (actividad catalítica), de adsorción y filtración, los productos de la oxidación, contaminantes ácidos y en estado coloidal. Existen varios métodos para efectuar la recuperación del aceite aislante y estos son: **por percolación**, **por contacto con arcilla activada** y **por tratamiento químico con ácido sulfúrico y trifosfato de sodio**.

- **Secado interno del Transformador**

Todos los métodos de secado interno de transformadores apuntan hacia un objetivo común: remover el agua libre y atrapada en la celulosa. El parámetro cuantitativo más indicativo del contenido de agua de un sistema de aislamiento, es la presión parcial de vapor de agua, la cual, por la ley universal de los gases, es directamente proporcional a la masa de dicho vapor de agua.

El secado de transformadores puede efectuarse con el empleo de los siguientes métodos: **criogénico**, **de circulación de aire caliente**, **de circulación de**

aceite caliente, **de aplicación de alto vacío**, **de aspersión con aceite caliente (hot-spray)** y **de calentamiento con corriente eléctrica en los arrollamientos**.

6.2 Métodos utilizados para la preservación del sistema de aislamiento de los Equipos Encapsulados

- **Tratamiento del Gas SF6**

Las Este método consiste en el empleo de filtros tanto para secado como para retención de **partículas de descomposición**, los cuales se disponen dentro del circuito de extracción, almacenaje y recarga de gas SF_6 de una maquina móvil de tratamiento en campo.

Los productos de descomposición gaseosos que se encuentran más frecuentemente en el gas SF_6 usado son: HF (Fluoruro de Hidrógeno), SO_2 (Dióxido de Azufre), SOF_2 (Fluoruro de Tionilo), SO_2F_2 (Difluoruro de Sulfurilo) y SF_4 (Tetrafluoruro de azufre). Además, partículas sólidas de descomposición pueden presentarse en el gas SF_6 descompuesto, tales como: WO3 (Trióxido de Wolframio) y CuF_2 (Difluoruro de Cobre).

- **Secado interno del Equipo Encapsulado**

El único método aquí establecido, sólo se basa en la aplicación de **alto vacío**. Consiste en conectar en serie directamente al compartimento del equipo encapsulado, una bomba que permita aplicar alto vacío (de 10^{-3} a 10^{-7} Torr), a la temperatura ambiente y durante el tiempo que sea necesario hasta lograr la extracción de la humedad a los límites establecidos.

7. Conclusiones

Es necesario conocer previamente la estructura constructiva interna de un equipo de alta tensión, para poder identificar las respectivas secciones de aislamiento que requieren ser analizadas con los diferentes ensayos dieléctricos existentes. El poseer un amplio conocimiento sobre las propiedades y características de los distintos materiales aislantes involucrados en la construcción de un equipo de alta tensión, facilita la interpretación de los resultados obtenidos en los diferentes ensayos dieléctricos aplicados, permitiendo en lo posible detectar la localización de algún problema presente.

Se ha determinado mediante investigaciones realizadas, que la humedad es uno de los factores que incide significativamente en la contaminación y/o degradación de los materiales aislantes sólidos y líquidos presentes en un equipo de alta tensión. Además, el aceite mineral hasta cierto punto de deterioración, es el único material aislante que puede recuperar sus características dieléctricas, mediante la aplicación de métodos especiales de tratamiento.

8. Agradecimientos

A los catedráticos de la Escuela Superior Politécnica del Litoral - ESPOL, por sus enseñanzas brindadas, sanas críticas y continuo empuje a la investigación. A mi padre, el Ing. Alberto Villegas Prado, por haberme incentivado en el desarrollo de este trabajo investigativo. A mi Director de Tesis, el Ing. Juan Gallo Galarza, quien con su experiencia académica y vastos conocimientos sobre el tema, ha dedicado su preciado tiempo en la orientación de este trabajo.

9. Referencias

[1] Sabino, Carlos A., *Cómo hacer una tesis y elaborar todo tipo de escritos*, Ed. Lumen / HVmanitas, Argentina, 1998

[2] Roth, Arnold, *Técnica de la alta tensión*, Ed. Labor S.A, Barcelona, 1966

[3] Ramírez Vásquez, José, *Materiales Electrotécnicos*, Ed. CEAC, Barcelona, 1977

[4] Von Hippel, Arthur R., *Dielectric Materials and Applications*, Ed. The Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts, 1954

[5] Colombo, Roberto, *Disyuntores de alta tensão*, Ed. Siemens S.A São Paulo e Livraria Nobel S.A, São Paulo, 1986

[6] Ramírez Vásquez, José, *Estaciones de transformación y distribución – Protección de sistemas eléctricos*, Ed. CEAC, España, 1972

[7] Milasch, Milan, *Manutencão de transformadores em líquido isolante*, Ed. Edgard Blucher Ltda., São Paulo, 1983

[8] Doble Engineering Company, *Doble test procedure manual*, Ed. Doble Engineering Company, Massachusetts, 2000

[9] Mitsubishi Electric Corporation, *Test Techniques of GIS/GCB*, Ed. Mitsubishi Electric Corporation, Japón, 1980

[10] Trench Electric, Manual de Transformadores de Tensión Capacitivos, Trench Electric, Junio, 1983

[11] Mitsubishi Electric Corporation, *Manual de Instrucciones Disyuntores en aceite tipo 70-GTE-20A*, Ed. Mitsubishi Electric Corporation, Japón,1980

[12] Gallo, Martínez Ernesto, Diagnóstico y *Mantenimiento de Transformadores en campo*, Ed. Asociación Colombiana de Ingenieros, Bogotá,2005

[13] DILO, *Manual de instrucciones de empleo para Unidad de Tratamiento de gas SF6 B057R01*, Ed. DILO Armaturen und Anlagen GmbH, Alemania,2005.