

UNIVERSIDAD DE CUENCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



ANALISIS DE COMPORTAMIENTO DE MEDIOS DIELECTRICOS ANTE LAS
ALTAS TENSIONES ELÉCTRICAS

TESIS DE GRADO
Previa a la obtención de Título de:
INGENIERO ELÉCTRICO

AUTORES:
Milton Favian Saguay Tacuri
Ramiro Augusto Torres Cuenca

DIRECTOR:
Ing. Hernando Merchán Manzano

Cuenca – Ecuador
2011



RESUMEN

En sistemas de alta tensión, todos los equipos e instalaciones eléctricas son sometidos a sobretensiones, que afectan su aislamiento y provocan un fallo o daño. Siendo la sobretensión una sollicitación variable en el tiempo, cuyo valor máximo es muy superior al valor pico de la tensión nominal del sistema en el que se origina, esta sobretensión puede ser originada por falla, por una maniobra o una descarga atmosférica. El estudio es fundamental para determinar el nivel de aislamiento que se debe seleccionar, para los equipos de alta tensión de un sistema.

Conociendo las características técnicas y el comportamiento de los elementos dieléctricos como gas, aceite, cerámicos, frente a todo tipo de sobretensiones, se podrá tener una selección y ubicación adecuada de los distintos medios de protección.

Las nuevas técnicas de alta tensión, para la transmisión de energía eléctrica de forma confiable, segura, hacen que cada día los fabricantes de dispositivos eléctricos de alta tensión, busquen nuevas alternativas de aislamiento usando elementos dieléctricos que brinden mayor eficacia, seguridad, control ambiental.

Las normas técnicas nacionales, INEN, y las normas internacionales ASTM, con sus respectivas actualizaciones, brindan de forma confiable, las especificaciones técnicas, las características para la elaboración de pruebas de rigidez dieléctrica y otras de importante conocimiento.

En este documento se desarrolla la metodología de ensayos de elementos dieléctricos en laboratorio aplicando altas tensiones.

El estudio de las características y propiedades aislantes de los materiales dieléctricos es tan importante como las propiedades conductoras. En los materiales dieléctricos, son varios los índices que cuantifican y califican para el buen diseño de compuestos aislantes, estos son: resistividad, constante dieléctrica, rigidez dieléctrica, factores de pérdida y calidad entre los principales, otras propiedades que no dejan de ser importantes son las de resistencia mecánica, resistencia térmica y contra la degradación.

El control ambiental, la recuperación, la regeneración y controlar la degradación de los diferentes materiales dieléctricos usados en sistemas de alta tensión, son esenciales para el buen funcionamiento de los dispositivos de aislamiento y tener una vida útil muy larga, tanto para el equipo como para el elemento dieléctrico, y por lo tanto que las pérdidas económicas, no sean muy altas.



ABSTRACT

In high voltage systems, all electrical equipment and installations are subjected to over voltage, which affects its insulation and cause failure or damage. Being the over-voltage a solicitation variable in time, the maximum value is well above the peak value of nominal voltage the system in which it originated, this over-voltage can be caused by a fault, by a maneuver or a lightning strike. The study is essential to determine the isolation level to be selected for the high voltage equipment in a system.

Knowing the technical characteristics and behavior of the dielectric elements such as gas, oil, ceramics, against all types of over voltage, it may be a selection and proper placement of the various means of protection.

The new techniques of high voltage for transmission of electricity reliably and safely, make every day the manufacturers of high voltage electrical devices, look for new alternatives for insulation using dielectric elements that provide greater efficiency, safety, environmental control.

The national technical standards, INEN, and ASTM standards, with their updates, provide a reliable, technical specification, features for making dielectric tests and other important knowledge.

This document is developed test methodology of dielectric elements in laboratory applying high voltages.

The study of the characteristics and insulating properties of the dielectric materials is as important as the conductive properties. In dielectric materials, there are several indices that quantify and qualify for the proper design of composite insulators, these are: resistivity, dielectric constant, dielectric strength, loss factors and quality among the main, other properties that continue to be important are the mechanical strength, heat resistance and degradation.

The environmental control, recovery, regeneration and control degradation of different dielectric materials used in high voltage systems, are essential for the proper functioning of the isolation devices and have a long useful life for both the team and the dielectric element, and therefore economic losses, are not very high.

INDICE

INTRODUCCIÓN.....	19
CAPITULO 1.....	20
PROPIEDADES Y CARACTERISTICAS DE LOS MATERIALES DIELECTRICOS	20
1.1 INTRODUCCIÓN	20
1.2 MATERIALES DIELECTRICOS	20
1.2.1 DIELECTRICOS GASEOSOS	20
1.2.2 DIELECTRICOS LIQUIDOS.....	20
1.2.3 DIELECTRICOS SOLIDOS.....	21
1.3 PROPIEDADES ELEMENTALES DE LOS DIELECTRICOS	22
1.3.1 PROPIEDADES ELÉCTRICAS.....	22
1.3.2 PROPIEDADES FÍSICAS	22
1.3.3 PROPIEDADES MECÁNICAS.....	22
1.3.4 PROPIEDADES QUÍMICAS.....	23
1.3.5 PROPIEDADES TÉRMICAS.....	23
1.4 TECNOLOGÍA DE MATERIALES	23
1.4.1 RESISTENCIA	23
1.4.2 RESISTIVIDAD DEL DIELECTRICO	23
1.4.3 CONSTANTE DIELECTRICA	24
1.4.4 PÉRDIDAS DIELECTRICAS.....	25
1.4.5 FACTOR DE PÉRDIDAS DIELECTRICAS.....	26
1.4.6. RIGIDEZ DIELECTRICA	27
1.4.7 RESISTENCIA SUPERFICIAL.....	29
1.4.8 ABSORCIÓN ELÉCTRICA.....	29
1.4.9 CONDUCTANCIA DE AISLAMIENTO	29
1.4.10 EFECTO CORONA	30
1.5 CARACTERISTICAS DE MATERIALES DIELECTRICOS EN ALTAS TENSIONES	30
1.5.1 POLARIZACIÓN.....	30
1.5.2 CONDUCCIÓN.....	31
1.5.3 GENERACIÓN DE CALOR DEBIDO A PÉRDIDAS DE ENERGÍA.....	31
1.5.3.1 PÉRDIDAS POR EFECTO JOULE	31
1.5.4 RUPTURA DIELECTRICA	31
CAPITULO 2.....	32
MATERIALES DIELECTRICOS PARA ALTAS TENSIONES.....	32

2.1 AISLANTES SÓLIDOS.....	32
2.1.1 AISLADORES DE PORCELANA, VIDRIO, POLIMERICOS.	32
2.1.2 VENTAJAS DE LOS AISLADORES	33
2.1.2.1 AISLADORES DE PORCELANA.	33
2.1.2.2 AISLADORES DE VIDRIO	33
2.1.2.3 AISLADOR POLIMERICO.....	34
2.1.3 PRUEBAS DE RUTINA EN MATERIALES SÓLIDOS.....	34
2.2 LÍQUIDOS DIELECTRICOS.....	34
2.2.1 ACEITES MINERALES.	35
2.2.2 CARACTERÍSTICAS TÍPICAS SEGÚN NORMA ASTM D- 3487 - TIPO I, ACEITE NO INHIBIDO.....	36
2.2.3 CARACTERÍSTICAS TÍPICAS SEGÚN NORMA ASTM D- 3487 - TIPO II, ACEITE INHIBIDO.....	37
2.2.4 PRUEBAS EN MATERIALES LÍQUIDOS.	38
2.3 GASES DIELECTRICOS.	38
2.3.1 AIRE	38
2.3.1.1 PROPIEDADES DEL AIRE	39
2.3.2 DIOXIDO DE CARBONO	39
2.3.2.1 PROPIEDADES DEL DIOXIDO DE CARBONO CO ₂	40
2.3.3 NITRÓGENO.....	40
2.3.3.1 PROPIEDADES DEL NITRÓGENO N ₂	40
2.3.4 HEXAFLORURO DE AZUFRE.....	41
2.3.4.1 PROPIEDADES DEL HEXAFLORURO DE AZUFRE (SF ₆).	41
2.3.4.2 VENTAJAS DEL HEXAFLORURO DE AZUFRE (SF ₆).	41
2.3.5 VACIO	42
2.3.6 PRUEBAS EN MATERIALES GASEOSOS.....	42
CAPITULO 3.....	43
USO, DEGRADACIÓN, REUTILIZACIÓN Y MANEJO AMBIENTAL PARA MATERIALES DIELECTRICOS.....	43
3.1 INTRODUCCIÓN	43
3.2 ACEITES DIELECTRICOS	44
3.2.1 USO DE ACEITE DIELECTRICO EN LAS ALTAS TENSIONES.....	44
3.2.1.1 APLICACIONES.....	44
3.2.1.2 PRESENTACIÓN	44
3.2.2 MANEJO DE ACEITE DIELECTRICO EN DISPOSITIVOS DE ALTA TENSION	44
3.2.2.1 PRECAUCIONES EN EL ALMACENAMIENTO	44

3.2.2.2 PRECAUCIONES DURANTE EL LLENADO	45
3.2.2.3 MANTENIMIENTO DEL ACEITE AISLANTE	45
3.2.3 DEGRADACIÓN DE ACEITES DIELECTRICOS	45
3.2.3.1 SÍNTOMAS DE DEGRADACIÓN DEL ACEITE	47
3.2.3.2 DISPOSICIÓN FINAL DEL ACEITE DIELECTRICO USADO.	47
3.2.4 IMPACTOS AMBIENTALES	47
3.2.4.1 RIESGOS PARA LA SALUD Y EL MEDIO AMBIENTE	47
3.2.4.2 RIESGOS PARA EL SER HUMANO	48
3.2.4.3 RIESGOS PARA EL AIRE	48
3.2.4.4 RIESGOS PARA EL AGUA.....	48
3.2.4.5 RIESGOS PARA EL SUELO.....	48
3.2.5 REGENARACIÓN Y RECICLAJE	48
3.2.5.1 TRATAMIENTOS AL ACEITE DIELECTRICO	48
3.2.5.2 PROCESO DE REGENERACIÓN DE TERMO-VACÍO	49
3.2.5.3 TRATAMIENTO DE REGENERACIÓN CON TIERRA FULLER.	49
3.3 GAS DIELECTRICO.....	50
3.3.1 USO DE GAS DIELECTRICO SF ₆ EN ALTA TENSIÓN	50
3.3.1.1 APLICACIONES	50
3.3.1.2 PRESENTACIÓN	50
3.3.2 MANEJO DEL GAS SF ₆ EN DISPOSITIVOS DE ALTA TENSIÓN.....	50
3.3.2.1 ALMACENAMIENTO.....	51
3.3.2.2 TRANSPORTE	51
3.3.3 DEGRADACIÓN DE HEXAFLUORURO DE AZUFRE SF ₆	51
3.3.4 IMPACTOS AMBIENTALES DE GAS SF ₆	52
3.3.4.1 PELIGRO DEL GAS SF ₆	52
3.3.5 REGENERACIÓN Y RECICLAJE	52
3.3.5.1 REGENERACIÓN DE GAS SF ₆	52
3.3.5.1.1 RECUPERACIÓN: REGENERACIÓN DEL SF ₆ PARA PRODUCIR GAS NUEVO DE ACUERDO CON NORMA IEC 60376	53
3.3.5.2 REUTILIZACIÓN DEL SF ₆	53
3.3.5.2.1 INSPECCIÓN DEL SF ₆ : RECUPERACIÓN Y REUTILIZACIÓN "IN SITU"	54
3.3.5.3 RECICLAJE DE GAS SF ₆	54
3.3.5.4 DESTRUCCIÓN DE GAS SF ₆	54
3.4 CERÁMICOS, POLÍMEROS, VIDRIO DIELECTRICO	55
3.4.1 USOS GENERALES	55
3.4.1.1 APLICACIÓN.....	55

3.4.2 MANEJO DE CERÁMICA ELÉCTRICA	56
3.4.2.1 ACABADO.....	56
3.4.2.2 MARCADO.....	56
3.4.2.3 EMBALAJE.....	56
3.4.3 DEGRADACIÓN DE CERÁMICOS, POLÍMEROS Y VIDRIO DIELECTRICO	57
3.4.3.1 OXIDACIÓN	57
3.4.3.2 ENVEJECIMIENTO DE UN AISLADOR DE PORCELANA POR ACCIÓN TÉRMICA.....	57
3.4.4 IMPACTOS AMBIENTALES DE CERÁMICOS, CRISTALES DIELECTRICOS	58
3.4.5 REGENERACIÓN Y RECICLAJE	58
3.4.5.1 RECICLAJE DE CERÁMICA Y VIDRIO DIELECTRICO	58
3.4.5.2 DISPOSICIÓN FINAL DEL MATERIAL	59
CAPITULO 4.....	60
ENSAYOS Y PRUEBAS DE LABORATORIO BAJO DISTINTOS TIPOS DE TENSIONES Y CORRIENTES ELÉCTRICAS PARA DIELECTRICOS SOMETIDOS A ALTAS TENSIONES ELÉCTRICAS.....	60
4.1 PRUEBAS EN MATERIALES DIELECTRICOS SÓLIDOS.	60
4.1.1 PRUEBA EN AISLADORES.....	60
4.1.1.1 ASTM D 3426. MÉTODO DE PRUEBA ESTÁNDAR PARA TENSIÓN DE RUPTURA DIELECTRICA Y RIGIDEZ DIELECTRICA DE LOS MATERIALES SÓLIDOS DE AISLAMIENTO ELÉCTRICO CON ONDAS DE IMPULSO.	60
4.1.1.2 ASTM D 149. MÉTODO DE PRUEBA ESTÁNDAR DE VOLTAJE DE RUPTURA DIELECTRICA Y RIGIDEZ DIELECTRICA EN MATERIALES SÓLIDOS DE AISLAMIENTO ELÉCTRICO A FRECUENCIA DE RED INDUSTRIAL.....	60
4.1.2 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS GENERALES DE AISLADOR CLASE ANSI Y VALORES DE TENSIONES DE FLAMEO SEGÚN ENSAYO DE LABORATORIO	61
4.2 PRUEBA EN MATERIAL DIELECTRICO LÍQUIDO.	66
4.2.1 PRUEBA EN ACEITES.	66
4.2.1.1 RIGIDEZ DIELECTRICA EN AISLANTES LÍQUIDOS.....	66
4.2.1.2 ASTM D-877. MÉTODO DE PRUEBA PARA TENSIÓN DE RUPTURA DIELECTRICA DE AISLANTES LÍQUIDOS	66
4.2.1.3 ASTM D-1816. MÉTODO DE PRUEBA PARA TENSIÓN DE RUPTURA DIELECTRICA DE LOS ACEITES AISLANTES DE ORIGEN PETROLÍFEROS.....	67
4.2.2 DETERMINACIÓN DE RIGIDEZ DIELECTRICA EN ACEITE DIELECTRICO	67
4.2.3 RESULTADO OBTENIDOS DE LAS PRUEBAS.....	68
4.2.4 VERIFICACIÓN DE RESULTADOS CON LAS NORMAS ASTM.	69
4.3 PRUEBAS EN MATERIALES DIELECTRICOS GASEOSOS.	70
4.3.1 GASES AISLANTES.	70

4.3.1.1 ASTM D-2477. MÉTODO DE PRUEBA ESTÁNDAR PARA DETERMINAR EL VOLTAJE DE RUPTURA Y RIGIDEZ DIELECTRICA DE GASES AISLANTES A FRECUENCIAS DE ENERGÍA INDUSTRIAL	70
4.3.1.2 MUESTREO	71
4.3.2 RESULTADOS DE ENSAYO EN GASES AISLANTES	71
CAPITULO 5.....	74
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	74
5.1 CONCLUSIONES.....	74
5.1.1 ACEITES AISLANTES	74
5.1.2 GASES AISLANTES	76
5.1.3 AISLADORES	77
5.2 RECOMENDACIONES	78
5.2.1 ACEITES AISLANTES	78
5.2.2 GAS AISLANTE	79
5.2.3 AISLADORES DE PORCELANA, VIDRIO.....	81
BIBLIOGRAFÍA.....	83
REFERENCIAS	84
ANEXO A.....	86
ANEXO B.....	87
ANEXO C	88
ANEXO D	89
ANEXO E.....	90
ANEXO F.....	91

Yo, Milton Favian Saguay Tacuri, reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de Ingeniero Eléctrico. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

Milton Favian Saguay Tacuri.
CI: 010404914-3

Yo, Milton Favian Saguay Tacuri, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Milton Favian Saguay Tacuri.
CI: 010404914-3

Yo, Ramiro Augusto Torres Cuenca, reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de Ingeniero Eléctrico. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

Ramiro Augusto Torres Cuenca.
CI: 010450395-8

Yo, Ramiro Augusto Torres Cuenca, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Ramiro Augusto Torres Cuenca.
CI: 010450395-8

Certifico que el presente trabajo de investigación, ha sido elaborado bajo mi dirección.

Ing. Hernando Merchán Manzano.



DEDICATORIA

La realización de este documento de investigación, está dirigida a todas las personas que de cierta forma nos han dado su apoyo y confianza, de una forma incondicional, sin que esperen ser reconocidos, a nuestros padres, hermanos, y demás que han estado con nosotros desde el inicio, para ellos dedicamos todo nuestro amor y esfuerzo, plasmado en este trabajo de investigación.

Los Autores



AGRADECIMIENTO

La vida nos ha enseñado, que cuando se desea ser o hacer algo importante, se tiene que poner el mayor esfuerzo, la mayor responsabilidad y respeto, en lo que se hace, para poder luego ser agradecido con las personas que de alguna manera han estado presentes de una forma u otra, en el camino emprendido. Por ello quiero agradecer a mi madre por prestarme su apoyo incondicional, en todos los aspectos de mi vida, a mis hermanos, mis amigos, profesores y a todos aquellos que contribuyeron con un granito de arena a la formación moral, intelectual de esta persona, que solo tiene agradecimiento infinito para cada una de ellas.

Gracias por ser parte de mi vida, y gracias a ti mamá.

Ramiro Torres Cuenca.

AGRADECIMIENTO

El verdadero amigo es aquel que está conmigo en cualquier circunstancia de mi vida, sin importar, si le he fallado o no, a ese amigo fiel que nos observa desde el cielo, gracias Jesús, gracias a mi padre por estar con mano firme y de apoyo, a mi madre por su amor de cada día y por las incontables veces que me ha brindado su regazo, a mis hermanos, cómplices de toda mi vida.

Milton Saguay Tacuri



OBJETIVOS

- Analizar el comportamiento de medios dieléctricos ante las altas tensiones eléctricas.
- Analizar los materiales dieléctricos usados en equipos eléctricos para altas tensiones.
- Analizar las normas internacionales para el desarrollo de pruebas y ensayos en materiales dieléctricos.
- Analizar los estándares exigidos por el estado ecuatoriano, para materiales dieléctricos en el sector eléctrico.
- Realizar ensayos en laboratorio de alta tensión, con el fin de evaluar materiales dieléctricos como; líquidos, gases, sólidos.
- Verificación y evaluación de resultados obtenidos tras la práctica de ensayos en laboratorio para materiales dieléctricos, según las normas nacionales e internacionales.
- Verificar el comportamiento de dieléctricos ante las altas tensiones eléctricas, su degradación, contaminación, reciclaje, disposición final.

PALABRAS CLAVES:

ASTM; Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (American Society for Testing and Materials).

ANSI; Instituto Nacional Americano de Estándares (American National Standards Institute).

IEEE; Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (Institute of Electrical and Electronic Engineers).

IEC; Comisión Electrotécnica Internacional (International Electrotechnical Commission)

NEMA; Asociación Nacional de Fabricantes Eléctricos (National Electrical Manufacturers Association).

EPA; Agencia de Protección Ambiental (Environmental Protection Agency).

MEER; Ministerio de Electricidad y Energía Renovable.



INTRODUCCIÓN

En la actualidad, entre el 40% y 45% de las fuentes mundiales de energía primaria son consumidas para generar energía eléctrica y casi toda es transmitida y distribuida mediante sistemas de tensión alterna, por lo que es importante diseñar y operar sistemas eléctricos que, no sólo tengan la máxima eficiencia, sino que, además tengan un alto grado de seguridad y confiabilidad.

Un sistema eléctrico de potencia SEP, destinado a la generación, transmisión y distribución de la energía, en el que los equipos de protección, deben estar correctamente configurados y dimensionados con el material dieléctrico apropiado, los mismos que deben satisfacer las exigencias técnicas, físicas y eléctricas que las normas nacionales e internacionales establecen.

El correcto diseño y funcionamiento de los múltiples materiales dieléctricos, empleados en los distintos dispositivos eléctricos de alta tensión, depende de la capacidad de soportar las distintas sollicitaciones de exigencias, ya sean climáticas, térmicas, mecánicas o eléctricas, las mismas que estarán presentes durante la vida útil del material.

Si un sistema eléctrico cada día aumenta en capacidad, este sistema necesita ser más robusto, y los equipos de protección que están interconectados en él, obligatoriamente deben satisfacer mayores exigencias, por lo que, los materiales dieléctricos usados en estos equipos deben ser elaborados con distintas combinaciones, y desarrolladas con la más alta tecnología, así en el momento en que ocurriese una falla, los materiales dieléctricos usados en los mismos, ayuden a despejar esta falla, ayudando así, a la continuidad de suministro de energía, sin que cause daños irreversibles a operarios y equipos eléctricos, teniendo un mínimo de pérdidas económicas.



CAPITULO 1

PROPIEDADES Y CARACTERISTICAS DE LOS MATERIALES DIELECTRICOS

1.1 INTRODUCCIÓN

Los aislantes eléctricos o dieléctricos, son aquellos materiales que presentan una gran resistencia al movimiento de electrones, cuando el material está en presencia de un campo eléctrico, estos pueden ser sólidos, líquidos o gaseosos.

De acuerdo a su estado natural, la resistencia dieléctrica generalmente se incrementa con la densidad del material, así se puede notar que los dieléctricos sólidos tienen más resistencia dieléctrica que los gases. Esta misma tendencia se observa en las pérdidas dieléctricas y en la permitividad.

1.2 MATERIALES DIELECTRICOS

Los dieléctricos son materiales, no metálicos, con una alta resistividad, por lo que la circulación de corriente de fuga o de paso a través de ellos es muy débil, el nivel de aislamiento no es siempre absoluto. El nivel de conducción que el material puede tolerar, determina si se puede emplear o no como aislador.

1.2.1 DIELECTRICOS GASEOSOS

Estos materiales en estado gaseoso, tienen como objetivo principal, prevenir las descargas eléctricas o extinguirlas rápidamente.

El gas es utilizado como aislante eléctrico en aplicaciones de alta tensión, un gas dieléctrico excelente debe tener alta resistencia, alta estabilidad térmica e inercia química, no deben ser inflamables, deben tener baja toxicidad, bajo punto de ebullición, buenas propiedades de transferencia de calor, y bajo costo. El gas dieléctrico más común es el aire, debido a su presencia en el ambiente.

Algunos de los gases que se utilizan como aislamiento en equipos de alta y baja tensión son: el aire, nitrógeno (N_2), hexafluoruro de azufre (SF_6), dióxido de carbono CO_2 , entre los más conocidos y utilizados.

La tensión de ruptura de los gases es aproximadamente proporcional a su densidad. El valor de la tensión de ruptura también aumenta con la presión del gas, pero limitada debido a su licuefacción.

1.2.2 DIELECTRICOS LIQUIDOS

El líquido contenido en la mayoría de los equipos eléctricos de alta tensión es un subproducto de la destilación del petróleo que se denomina aceite aislante. El aceite mineral como medio aislante y refrigerante, es el más usado para



transformadores de potencia y en interruptores, por lo que se ha desarrollado nuevas tecnologías para la refinación, adaptándose a las necesidades específicas de los equipos de acuerdo a la finalidad y diseño de estos.

Estos están formados básicamente por carbono e hidrógeno, entre los más conocidos están los parafínicos, nafténicos y aromáticos. Las moléculas nafténicas, definen la calidad del aceite, y sus propiedades dieléctricas son mejores, por tener mayor solubilidad. Las moléculas aromáticas, conocidas como benceno, se distinguen de los demás en su estructura química, y en sus propiedades físico-químicas en comparación con las moléculas nafténicas y parafínicas.

Los valores de la resistencia de ruptura están más influenciados por la humedad y el contenido de las partículas contaminantes, que por su estructura molecular.

1.2.3 DIELECTRICOS SÓLIDOS

Los dieléctricos sólidos pueden poseer una polarización permanente dentro de ellos, aun cuando no se aplique un campo eléctrico externo, y presentan una mayor resistencia al paso de la corriente.

Los materiales aislantes sólidos se clasifican en: sólidos orgánicos e inorgánicos.

Sólidos orgánicos:

- Polietileno (PE).
- Etileno-propileno rubber (EPR).
- Polipropileno
- Politetrafluoroetileno (PTFE).
- Poliésteres.
- Polyimides (kapton) y Polyamides (Nylon).
- Policarbonatos.
- Resinas epoxy.
- Goma de silicona.

Sólidos inorgánicos:

- Alúmina (Al_2O_3).
- Titanio de bario (BaTiO_3).
- Porcelana.
- Oxido de Magnesio (MgO).
- Cristales de grado eléctrico (SiO_2 , Si_2O_3 y P_2O_3).
- Mica (moscovita) $\text{KAl}_2(\text{OH})_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}$.
- Oxido de silicio. SiO_2 .



1.3 PROPIEDADES ELEMENTALES DE LOS DIELECTRICOS

Todo material dieléctrico, para su desempeño práctico, debe reunir, condiciones agrupadas en un conjunto de propiedades y características, las mismas pueden ser evaluadas mediante ensayos regidos por varias normas. De esta manera la elección de los materiales dieléctricos para cada necesidad específica, se hace de acuerdo al conocimiento cuantitativo de sus propiedades.

Los elementos dieléctricos dependiendo de su naturaleza poseen propiedades singulares, las mismas que se pueden destacar como:

- Propiedades eléctricas.
- Propiedades físicas.
- Propiedades mecánicas.
- Propiedades químicas.
- Propiedades térmicas.

1.3.1 PROPIEDADES ELÉCTRICAS

Las propiedades eléctricas de los materiales dieléctricos dependen, de su forma de construcción, del material utilizado para su elaboración, del volumen considerado y de la longitud total, por lo que su resistividad, conductancia de aislamiento, rigidez dieléctrica, constante dieléctrica, resistencia superficial, absorción eléctrica, pérdidas dieléctricas, factor de pérdidas, efecto corona entre otros, deberán ser las adecuadas y precisas para un buen funcionamiento.

1.3.2 PROPIEDADES FÍSICAS

Considerando la resistencia óhmica volumétrica del elemento dieléctrico, esta puede ser disminuida por la presencia agua, gases disueltos, suciedad, polvo, aceites contaminantes, en su interior, o en la superficie.

En gases como el aire o el nitrógeno, cuando no están ionizados tienen una resistencia de aislación infinita, la resistencia sin embargo disminuye con el aumento de la temperatura.

1.3.3 PROPIEDADES MECÁNICAS

El material dieléctrico debe tener las suficientes cualidades y propiedades mecánicas, para cumplir con el propósito, para el cual fue creado, entre sus propiedades se destaca: resistencia mecánica a la tracción, compresión, choques térmicos, dureza, flexibilidad, fluidez, facilidad de manipulación, entre los más destacados.

1.3.4 PROPIEDADES QUÍMICAS

Las propiedades químicas deben asegurarle estabilidad en su composición, es decir suficiente resistencia a los ácidos, a los álcalis, aceites, a la luz solar, al oxígeno, y a las reacciones químicas.

1.3.5 PROPIEDADES TÉRMICAS

Un elemento dieléctrico debe reunir buenas propiedades térmicas, como la resistencia al cambio brusco de la temperatura sin ablandarse o quebrarse, calor específico, punto de fusión, de ebullición y de congelamiento, estas últimas para el caso que el dieléctrico a usarse sea un aceite.

1.4 TECNOLOGÍA DE MATERIALES

Los elementos dieléctricos son de gran importancia ya que ayudan a una conducción de la corriente eléctrica de forma confiable, óptima, segura, con mínima cantidad de pérdidas, por lo que es necesario conocer todas sus propiedades y características.

1.4.1 RESISTENCIA

La resistencia varía directamente con la longitud del material e inversamente con el área del mismo y se mide en ohm o mega-ohm siendo su expresión:

$$R = \rho * \frac{L}{S}$$

Dónde:

ρ es la resistividad del material considerado.

L es la longitud del material.

S es la superficie del material.

1.4.2 RESISTIVIDAD DEL DIELECTRICO

Cuando se somete un dieléctrico a una tensión continua, el paso de la corriente a través de sí mismo, se establece por medio de las pocas cargas libres presentes en el material. En los dieléctricos, la temperatura y las impurezas pueden modificar las cargas libres presentes y el valor de la corriente que circula.

La resistividad varía mucho según las condiciones del ensayo y es fácil que se presenten variaciones importantes con pequeñas modificaciones en la composición del material, además disminuye con el aumento de la temperatura y con la humedad.

La resistividad de algunos materiales utilizados como aislantes, se presentan en la tabla 1.1

MATERIAL	CONDICIONES	RESISTIVIDAD $\Omega \cdot m$
Aceite de transformador	Líquido (20°C-25°C)	1×10^{16}
Baquelita	(20°C-25°C)	5.1×10^{10}
Caucho	Silicona	1×10^{11}
Celuloide	(20°C-25°C)	2.1×10^{10}
Cuarzo	(20°C-25°C)	$1.1 \times 10^{19} - 7.5 \times 10^{17}$
Ebonita	(20°C-25°C)	1.5×10^{15}
Madera	Sólido (20°C-25°C)	$4.1 \times 10^{10} - 1 \times 10^{11}$
Mármol	(20°C-25°C)	1.1×10^{10}
Mica	Mineral (20°C-25°C)	$2.1 \times 10^{17} - 1 \times 10^{11}$
Neopreno	(20°C-25°C)	1×10^{10}
Nylon	Poliamidas	1×10^{10}
Papel	Impregnado (20°C)	1×10^7
Polietileno	(20°C-25°C)	1×10^{16}
Porcelana	(20°C-25°C)	$7 \times 10^{12} - 1 \times 10^{20}$
PVC	(20°C-25°C)	$10^{13} - 10^{13}$
Teflón		1×10^{13}
Vidrio	(20°C-25°C)	5.1×10^{14}
LDPE & HDPE (polietileno reticulado)	-----	1×10^{14}

TABLA 1.1. Valores de resistividad de materiales dieléctricos.

Fuente: Técnicas de alta tensión, Ing. Hans Von Beeren, Enciclopedia práctica de electricidad aplicada, Editorial Labor S.A. [6] Enciclopedia CEAC de Electricidad. Instalaciones eléctricas/cables subterráneos. J Ramírez Vázquez. Editorial CEAC. pág. 525-541.

1.4.3 CONSTANTE DIELECTRICA

La constante dieléctrica o permitividad relativa representa la cantidad de energía electrostática que puede ser almacenada por unidad de volumen y por unidad de gradiente de potencial, y es una propiedad característica de cada material. Cuanto mayor es la permitividad del material, más fuertemente se polariza y son mayores los efectos eléctricos.

- Constante dieléctrica del vacío $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$.
- Constante dieléctrica absoluta del medio $\epsilon = \epsilon_r * \epsilon_0$, donde ϵ_r es la constante dieléctrica relativa o permitividad.



MATERIAL	CONDICIONES	CONSTANTE DIELECTRICA (ϵ_r)
Aceite de transformador	líquido, 20°C	2 - 2.24
Aire (seco)	gas, 0°C, 1atm	1.00059 - 1.0006
Baquelita	sólido, 20°C	4.9 - 10
Cuarzo	cristal, 20°C	4.27 - 4.34
Ebonita	-----	3
Glicerina	-----	50
Hielo	-----	75
Madera	seca	2.4 - 4
Mármol	sólido, 20°C	8
Metanol	alcohol metílico	33
Mica	mineral 20°C	2.5 - 8.7
Neopreno	sólido, 20°C	4.1 - 8
Nitrobenceno	-----	35
Nylon	-----	3.4 - 5
Papel	impregnado	3.7 - 7
Polietileno	sólido, 20°C	2.20 - 2.3
Porcelana	sólido, 20°C	5.0 - 7
PVC	solido	1.1 - 8
Silicio	pureza 99%	12
Teflón	-----	2 - 2.1
Tetracloruro de carbono	-----	2.2
Vacio	por definición	1
Vidrio	y variaciones	4 - 16
XLPE(polietileno reticulado)	sólido, 20°C	2.5 - 3

TABLA 1.2. Valores de constante dieléctrica o permitividad relativa ϵ_r de materiales dieléctricos

Fuente: Técnicas de alta tensión, Ing. Hans Von Beeren, Enciclopedia práctica de electricidad aplicada, Editorial Labor S.A. [6] Enciclopedia CEAC de Electricidad. Instalaciones eléctricas/ cables subterráneos. J Ramírez Vázquez. Editorial CEAC. pág. 525 – 541.

1.4.4 PÉRDIDAS DIELECTRICAS

Las pérdidas eléctricas ocurren cuando se aplica una tensión alterna a un dieléctrico, presentándose los siguientes fenómenos:

- Se presentará una circulación de corriente que cumplirá la ley de Ohm, el valor de esta corriente dependerá de la resistividad del dieléctrico en las condiciones de trabajo. Su paso producirá calentamiento por efecto Joule.
- Se presentará una corriente de desplazamiento, adelantada $\pi/2$ radianes en el plano de Gauss respecto a la tensión aplicada. La magnitud de esta corriente dependerá de la constante dieléctrica del material. Esta corriente no calentará el dieléctrico por ser de desplazamiento.

c) Las masas polares vibrarán siguiendo la excitación a la que están sometidas. Este fenómeno producirá un calentamiento en el material que reflejará el proceso energético que ocurre en su interior.

1.4.5 FACTOR DE PÉRDIDAS DIELECTRICAS

La resistividad eléctrica del material y la constante dieléctrica están relacionadas por el factor de perdidas dieléctricas ($\tan \delta$), el cual permite determinar la pérdida de potencia en un dieléctrico, la cual generalmente se presenta en forma de calor, además está en función de la frecuencia y de la naturaleza del dieléctrico.

La corriente de fuga I_R del dieléctrico está en fase con la tensión V , esta forma un ángulo δ (de pérdidas) con la corriente reactiva I_C desfasada 90° de la tensión V , correspondiente a un condensador ideal sin pérdidas.

Se expresa por:

$$\tan \delta = \frac{1}{2\pi f C R_p} \quad \tan \delta = \frac{I_R}{I_C} \quad (1)$$

$$W_R = V \times I \times \tan \delta \quad ; \quad \tan \delta = \frac{W_R}{V \times I} \quad (2)$$

W_R = pérdidas de energía de un condensador

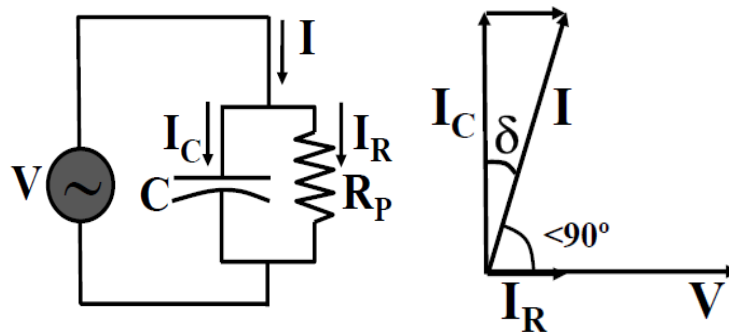


Fig. 1.1. Circuito equivalente de un material dieléctrico ideal, ángulo de desfase de corrientes voltaje.



MATERIAL	CONDICIONES	FACTOR DE PERDIDAS $\text{tg}(\delta)$
Aceite de transformador	líquido, 25 °C	0.08
Alúmina		$0.2 \times 10^{-3} - 10 \times 10^{-3}$
Caucho		0.05 - 0.1
Cartón presspán		1.5×10^{-4}
Elastómeros	sintéticos	0.2 - 0.04
Goma		0.02
Mica		$0.1 - 0.3 \times 10^{-3}$
Nylon		0.03 - 0.05
Neopreno	sólido, 20°C 50hz	0.04 - 0.15
Papel	impregnado	0.0025 - 0.0045
Polietileno	sólido, 20°C	$4 \times 10^{-4} - 1 \times 10^{-3}$
Polipropileno		$2 \times 10^{-4} - 3 \times 10^{-4}$
Poliuretano		12×10^{-3}
Porcelana	sólido, 20°C	$15 \times 10^{-3} - 35 \times 10^{-3}$
PVC	20°C 50hz	$30 \times 10^{-3} - 4 \times 10^{-3}$
Resinas epoxicas		0.02 - 0.04
Siliconas		0.01 - 0.02
Teflón		2×10^{-4}
Vidrio	y sus variaciones	$8 - 20 \times 10^{-3}$
XLPE(polietileno reticulado)	sólido, 20°C 50hz	1×10^{-2}

TABLA 1.3. Valores de factor de pérdidas o $\text{tg}(\delta)$ para material dieléctrico.

Fuente: Técnicas de alta tensión, Ing. Hans Von Beeren, Enciclopedia práctica de electricidad aplicada, Editorial Labor S.A. [6] Enciclopedia CEAC de Electricidad. Instalaciones eléctricas/cables subterráneos. J Ramírez Vázquez. Editorial CEAC. pág. 525 – 541.

1.4.6. RIGIDEZ DIELECTRICA

La rigidez dieléctrica de un material es conocida, como el máximo gradiente de potencial que puede soportar el mismo, sin que llegue a producirse una corriente disruptiva, antes de que se produzca su destrucción por perforación, sin que llegue a una degradación física de sus propiedades aislantes. Su valor se expresa en (KV/mm).

En un dieléctrico líquido y/o gaseoso el material se auto-cicatriza, ocurriendo en su interior un fenómeno de vaporización, produciéndose una regeneración parcial hasta que otro proceso de ruptura ocurra.

Las características de ruptura de los gases se representan en las curvas de Paschen, en donde se traza la tensión de ruptura en función de la presión p y de la distancia de los electrodos d .

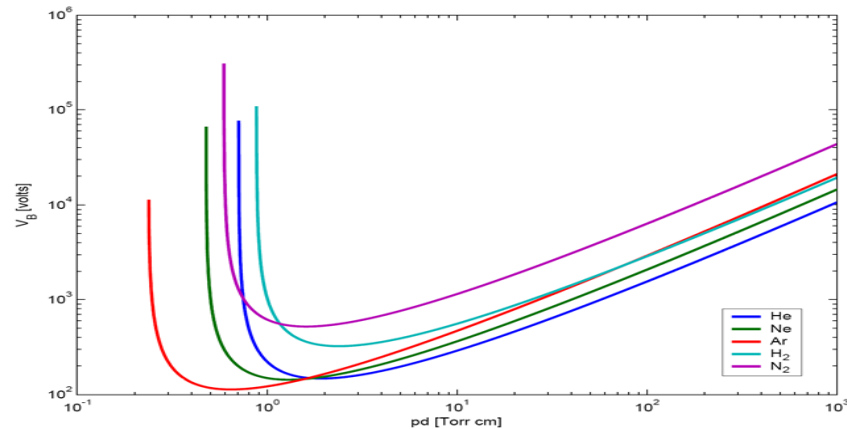


Fig. 1.2. Curvas ideales de Paschen para tensión de ruptura en gases dieléctricos.

MATERIAL	CONDICIONES	RIGIDEZ DIELECTRICA (kV/mm)
Aceite de transformador	Líquido, 20 °C	15- 200
Aire (seco)	0 °C, 1 atm	3
Baquelita		12 - 25
Cuarzo	Cristal, 20 °C	15 - 30
Caucho	Siliconas	18 - 30
Gas SF6	20 °C 1 atm	7.93 - 8.9
Goma		20 - 30
Mica		10 - 200
Neopreno	Sólido, 20°C	20 - 25
Nylon (poliamidas)	20 °C	25
Papel	Impregnado	15 - 200
Polietileno	Sólido, 20°C	30 - 42
Polímeros		50 - 900
Polipropileno		30 - 35
Poliuretano		20 - 25
Porcelana	Sólido, 20°C	5.7 - 38
PVC	Aislamiento 20°C	15 - 40
Siliconas		50 - 65
Teflón		30 - 60
Vidrio		10 - 48
XLPE(polietileno reticulado)	Sólido, 20°C	15

TABLA 1.4. Valores de tensión de ruptura en materiales dieléctricos

Fuente: Técnicas de alta tensión, Ing. Hans Von Beeren, Enciclopedia práctica de electricidad aplicada, Editorial Labor S.A. [6] Enciclopedia CEAC de Electricidad. Instalaciones eléctricas/ cables subterráneos. J Ramírez Vázquez. Editorial CEAC. pág. 525 – 541.



La ruptura dieléctrica en los líquidos se ve afectada por:

- Impurezas electrolíticas.
- Por el contenido de agua y oxígeno.
- Partículas macroscópicas que pueden formar un puente entre los electrodos y favorecer la rotura de aislamiento.
- Área y el espesor de la muestra, debido al incremento de la incidencia de los ensayos sobre grandes volúmenes.
- Incremento ligero de la viscosidad.

1.4.7 RESISTENCIA SUPERFICIAL

En la mayoría de los materiales, la corriente puede circular por la superficie del dieléctrico en lugar de hacerlo a través de la masa. Este fenómeno no tiene ninguna relación con la resistividad propia del dieléctrico, sino que depende y se mide por la resistencia superficial. Este valor influye mucho de la calidad de la superficie y la presencia del polvo, humedad, etc.

1.4.8 ABSORCIÓN ELÉCTRICA

Cuando se aplica una tensión a un dieléctrico, se presenta una absorción de carga eléctrica, es preciso que se tenga en consideración al efectuar las mediciones de resistencia, ya que la presencia de esta corriente puede alterar los valores obtenidos.

1.4.9 CONDUCTANCIA DE AISLAMIENTO

Se define la conductancia G , como la inversa de la resistencia de pérdidas del aislamiento y viene expresada por:

$$G = \frac{I_R}{V_O} = \frac{I_C \operatorname{tg} \delta}{V_O} = \frac{\omega C V_O \operatorname{tg} \delta}{V_O} = \omega C \operatorname{tg} \delta = \omega C_O \epsilon_r \operatorname{tg} \delta \quad [\text{Siemens/Km}]$$

$\omega = 2\pi f$ = velocidad angular

C_O = capacidad considerando el vacío como medio dieléctrico.

ϵ_r = constante dieléctrica relativa

$\operatorname{tg} \delta$ = tangente de pérdidas



1.4.10 EFECTO CORONA

Si el campo eléctrico en un punto sobrepasa el valor de la tensión disruptiva del material presente, se producirá una ionización con creación de cargas libres por destrucción de moléculas equilibradas eléctricamente, esto ocurrirá en la cercanía de la superficie del material, presentándose como un halo luminoso, este fenómeno es conocido como efecto corona. Puede ocurrir entonces, que el valor del campo eléctrico sólo se presente en determinados lugares, o sea por concentración de campo debido a un diseño incorrecto, o bien por la presencia de distinto valor de “épsilon ϵ ”.

1.5 CARACTERISTICAS DE MATERIALES DIELECTRICOS EN ALTAS TENSIONES

Independientemente de su naturaleza física o química, los dieléctricos bajo la acción de un campo eléctrico presentan los siguientes fenómenos:

- Polarización.
- Conducción.
- Generación de calor debido a las pérdidas de energía en su interior.
- Ruptura eléctrica para campos eléctricos superiores al crítico.

Dado que los materiales dieléctricos son aislantes imperfectos, y que cuando se les aplica una diferencia de potencial se tiene la presencia de una corriente de fuga formada por:

- Corriente de capacidad.
- Corriente de conducción.
- Corriente de absorción.

1.5.1 POLARIZACIÓN

El campo electrostático creado por distribuciones de cargas puntuales o en conductores, es libre y en presencia de un campo eléctrico las cargas se pueden mover sin restricciones. En los dieléctricos la carga está sujeta por importantes fuerzas de cohesión y frente a un campo eléctrico, su movilidad es muy limitada.

Para el caso de un átomo de hidrogeno, en estado normal, los centros de masa de las cargas positiva y negativa coinciden, y el átomo no genera campo eléctrico apreciable. Si se coloca el átomo en presencia de un campo externo sus cargas son atraídas en sentidos opuestos y tienden a separarse. Esta separación se ve contrarrestada por las fuerzas de cohesión atómica y finalmente se llega a una situación de equilibrio con una distancia d entre los centros de masa de ambas cargas. El átomo produce un campo eléctrico, que se denomina *inducido*. El fenómeno de la separación limitada de carga se denomina *polarización* del material y el átomo se convierte en un dipolo.

1.5.2 CONDUCCIÓN

La conducción en un material dieléctrico se da cuando, la polarización aumenta con la intensidad del campo externo, y si el campo sigue aumentando, llega un momento en que las fuerzas de cohesión no pueden mantener juntas las cargas y el átomo se *ioniza* por desprendimiento de electrones. Estos electrones se aceleran en presencia del campo, constituyendo una corriente eléctrica, esta corriente puede ser muy intensa y destructiva, ya que en presencia de campos intensos los electrones se aceleran a energías muy altas y experimentan una colisión con un elemento neutro, arrancando más electrones, lo que lleva a un *efecto avalancha*. Este fenómeno se conoce como *ruptura dieléctrica*, y depende del tipo y estado del material, que tolera un campo máximo antes de la ruptura.

1.5.3 GENERACIÓN DE CALOR DEBIDO A PÉRDIDAS DE ENERGÍA

1.5.3.1 PÉRDIDAS POR EFECTO JOULE

Cuando un aislante y/o material dieléctrico se somete a tensión eléctrica, es atravesado por una corriente de fuga, que depende de la tensión aplicada y de la resistencia del material. Al presentarse esta corriente el dieléctrico sufre el efecto Joule que se traduce en una pérdida de energía en forma de calor, expresada por:

$$W = I^2 \cdot R \cdot t$$

Dónde:

R es la resistencia del material aislante.

I corriente de fuga.

t el tiempo en segundos.

Esta pérdida es muy pequeña y tiene importancia, sí el aislante se calienta, disminuyendo rápidamente la resistencia de aislamiento.

1.5.4 RUPTURA DIELECTRICA

El campo de ruptura E_r es la intensidad de campo eléctrico que hace que un material dieléctrico se convierta en conductor. La ruptura dieléctrica es seguida por la circulación de una corriente eléctrica a través de la región conductora formada.

Si la conducción se produce en un gas ionizado, esta conducción posterior a la ruptura se conoce como arco o chispa.



CAPITULO 2

MATERIALES DIELECTRICOS PARA ALTAS TENSIONES.

En esta sección se presentan, algunos elementos dieléctricos usados en equipos y dispositivos de alta tensión, que son de gran interés en la Ingeniería Eléctrica.

2.1 AISLANTES SÓLIDOS.

2.1.1 AISLADORES DE PORCELANA, VIDRIO, POLIMERICOS.

- Los aisladores de porcelana, deben fabricarse por procesos húmedos, toda la superficie expuesta de estos, debe cubrirse con un vitrificado de tipo compresión duro, liso, brillante e impermeable a la humedad, tal que le permita, por medio del lavado natural de las aguas lluvias, mantenerse fácilmente libre de suciedades ocasionadas por la contaminación ambiental. La superficie total del aislador deberá estar esmaltada, excepto en sus partes metálicas, la superficie total deberá estar libre de imperfecciones, no tiene que presentar porosidades, debe ser de alta resistencia dieléctrica, elevada resistencia mecánica, químicamente inerte y elevado punto de fusión.
- En caso de aisladores de vidrio, el material deberá ser templado o recocido, el vidrio utilizado en la fabricación de aisladores será de preferencia, tipo sodio-calcio, homogéneo e incoloro.
- Los aisladores poliméricos serán livianos, resistentes a los actos de vandalismo e inmunes a daños causados por agua, rayos ultravioletas o radiación solar. Los aisladores deben presentar aletas de diseño aerodinámico, que faciliten su auto limpieza por el viento y lluvia. Se preferirán aquellos aisladores que sean de goma de silicona de alta performance. No se aceptarán polímeros de EPDM (Ethylene Pylene Termolyner) o combinaciones con silicona. El material polimérico utilizado debe poseer un nivel de tracking a lo menos de 3,5kV según IEC 60587 ó ASTM D-2303.



Prueba	Símbolo	Porcelana	Unidades	Especificaciones según la norma IEC-672
Porosidad aparente	Pa	0	%	0
Densidad en bruto	Da	2,3	g/cm ³	2,2 min.
Resistencia a la flexión	R _t R _g	80 a 90 100 a 120	N/mm ² N/mm ²	50 min. 60 min.
Capacidad de calor específico	C _{p 30-100}	850	J/kg	750-900
Conductividad térmica	C _{t 30-100}	1,4	w/mk	1-2,5
Resistencia al choque térmico	T	155	K	150 min.
Rigidez dieléctrica	E _d	22	kV/mm	20 min
Tensión de aguante	Ua	32	kV	30 min
Permitividad relativa	ε _r	6	---	6-7
Factor de disipación	Tan δ	0,02	---	0,025 máx.
Resistencia volumétrica	Rv	10 ¹³	Cm	10 ¹¹ min.

Tabla 2.1 Características técnicas de la porcelana eléctrica.

Fuente: Técnicas de alta tensión, Ing. Hans Von Beeren, Enciclopedia práctica de electricidad aplicada, Editorial Labor S.A. [6] Enciclopedia CEAC de Electricidad. Instalaciones eléctricas/ cables subterráneos. J Ramírez Vázquez. Editorial CEAC.

2.1.2 VENTAJAS DE LOS AISLADORES

2.1.2.1 AISLADORES DE PORCELANA.

- Porosidad cero, es decir, completamente impermeable.
- Alta resistencia dieléctrica.
- Alta resistencia mecánica.
- Alta resistencia a la intemperie.
- Resistencia a los ácidos.
- Resistencia a los álcalis.
- Resistencia a la acción de los rayos ultravioleta.
- Estabilidad electroquímica.
- Químicamente inerte.

2.1.2.2 AISLADORES DE VIDRIO

- Requieren de un templado especial a mayor temperatura, para limitar las tensiones internas del vidrio.
- Mayor resistencia a los golpes.
- Fácil visualización ante daño permanente cuando falla, se nota a simple vista la falta de la campana aislante en una línea de transmisión.
- Mayor fortaleza para sujeción de conductor, debido al incremento del volumen del vidrio.
- Mayor resistencia a la tracción que los de porcelana.



2.1.2.3 AISLADOR POLIMERICO

- Núcleo dieléctrico resistente, de fibra de vidrio.
- Recubrimiento polimérico aislante del núcleo.
- Las campanas serán suaves y libres de imperfecciones
- Más livianos.
- El aislador es de una sola pieza, de polietileno de alta densidad.
- Proporcionan firme retención bajo condiciones de corto circuito.

2.1.3 PRUEBAS DE RUTINA EN MATERIALES SÓLIDOS.

- Prueba de resistencia de aislamiento
- Prueba de factor de potencia del aislamiento.
- Tensión de flameo usando ondas de pulso ASTM D3426-97, ANSI C29.1.
- Tensión de flameo usando tensión alterna a frecuencia industrial ASTM D149, ANSI C29.1
- Conductividad ASTM C 408-88.
- Características de perdidas AC y permitividad constante dieléctrica ASTM D 150-98, ASTM D 2520.
- Fuerza dieléctrica ASTM D 116.

2.2 LÍQUIDOS DIELECTRICOS

Los líquidos dieléctricos proveen aislamiento eléctrico y refrigeración, estos se pueden recuperar con un proceso adecuado, pero la influencia de los contaminantes es mayor que en los gases.

Las propiedades del aceite dieléctrico son:

- ✓ Rigidez dieléctrica alta para resistir el incremento de demanda que se presenten en el servicio.
- ✓ Viscosidad adecuada para asegurar la circulación por convección y facilitar la transferencia de calor.
- ✓ Punto de escurrimiento bajo, que asegure la fluidez del aceite a bajas temperaturas.
- ✓ Buena estabilidad a la oxidación, que asegure una vida útil (entre 20 – 30 años).

Los aceites dieléctricos son refinados, para proveer a los equipos las funciones de enfriamiento y/o disipación del calor generado en la operación de la unidad, además de proporcionar el suficiente aislamiento eléctrico para prevenir la formación de arcos eléctricos entre conductores con alta diferencia de potencial.



2.2.1 ACEITES MINERALES.

Usados en aparatos eléctricos de alta tensión, son hidrocarburos líquidos refinados del crudo del petróleo. Los constituyentes aromáticos son deseados debido a sus propiedades de absorción del gas y de las características de oxidación.

Su factor de disipación aumenta apreciablemente a altas temperaturas cuando la viscosidad es reducida. Los aceites se deterioran en servicio debido a la oxidación y a la absorción de humedad.

A continuación se citan algunos de estos materiales.

- ✓ Alquil benzenos.
- ✓ Polibutenos.
- ✓ Bifeniles policlorados (PCB).
- ✓ Hidrocarburos Alifáticos Halogenados.
- ✓ Fluorcarbonos.
- ✓ Líquidos de Silicona.

El aceite dieléctrico con bases minerales nafténicas, están bajo las normas internacionales ASTM-3487 e IEC-296, tanto para aceites Inhibidos como para aceites No Inhibidos.

Estos son excelentes aislantes dieléctricos debido a su bajo nivel de humedad y partículas que permite al aceite obtener un óptimo comportamiento eléctrico. Bajo los efectos del estrés eléctrico, este producto es capaz de absorber los gases que se generan en el sistema, así como proteger el equipo cuando se ve sometido a condiciones de carga bajo impulso.

Estos productos están diseñados para resistir la acción de oxígeno y los catalizadores metálicos, lo cual impide la formación de compuestos que afectan el factor de potencia y aumenta la acidez del producto en uso.



2.2.2 CARACTERÍSTICAS TÍPICAS SEGÚN NORMA ASTM D- 3487 - TIPO I, ACEITE NO INHIBIDO.

Propiedades	Limites	Norma NTE	Norma ASTM
Física:			
Punto de inflamación °C, mínimo	145	INEN 1496	D 0092
Color máximo	0,5	INEN 808	D 1500
Punto de fluidez °C, max	-40	INEN 1982	D 0097
Viscosidad cinemática mm ² /s (sCt)			
a 40°C, max	12	INEN 810	D0445
a 100°C, max	3		
Aspecto visual	Claro y brillante		D1524
Densidad relativa	0.91		D1298
Químicas:			
Estabilidad a la oxidación 72hr:			
Lodos, % masa	0,15 max		D 2440
Acidez total mg de KOH/g	0,50 max		
Estabilidad a la oxidación 164hr:			
Lodos, % masa	0,30 max		D 2440
Acidez total mg de KOH/g	0,60 max		
Estabilidad a la oxidación, minutos	195 min		D 2112
Contenido de agua, máx. ppm	35		D 1533
Contenido de inhibidor de oxidación % masa	No detectable		D 2668
Contenido de PCB	No detectable		D 4059
Eléctricas:			
Tensión de ruptura dieléctrica, mínimo KV, electrodos de disco, electrodos VDE	30 mínimo	IEC 156	D 1816, D 877
Tensión de ruptura dieléctrica de impulso 25 °C, Kv	145 mínimo		D3300
Tangente del ángulo de perdidas A 90°C, máximo	0,005		D 924

Tabla 2.2 Valores Característicos de los aceites aislantes.

Fuente: Norma Internacional ASTM. Especificación estándar para aceite minerales usados en aparatos eléctricos, designación: D3487-00 TIPO I



2.2.3 CARACTERÍSTICAS TÍPICAS SEGÚN NORMA ASTM D- 3487 - TIPO II, ACEITE INHIBIDO.

Propiedades	Limites	Norma NTE	Norma ASTM
Física:			
Punto de inflamación °C, mínimo	145	INEN 1496	D 0092
Color máximo	0,5	INEN 808	D 1500
Punto de fluidez °C, max	-40	INEN 1982	D 0097
Viscosidad cinemática mm ² /s (sCt)			
a 40°C, max	12	INEN 810	D0445
a 100°C, max	3		
Aspecto visual	Claro y brillante		D1524
Densidad relativa	0.91		D1298
Químicas:			
Estabilidad a la oxidación 72hr:			
Lodos, % masa	0,10 max		D 2440
Acidez total mg de KOH/g	0,30 max		
Estabilidad a la oxidación 164hr:			
Lodos, % masa	0,20 max		D 2440
Acidez total mg de KOH/g	0,40 max		
Estabilidad a la oxidación, minutos	195 min		D 2112
Contenido de agua, máx. ppm	35		D 1533
Contenido de inhibidor de oxidación % masa	No detectable		D 2668
Contenido de PCB	No detectable		D 4059
Eléctricas:			
Tensión de ruptura dieléctrica, mínimo KV, electrodos de disco, electrocodos VDE	30 min	IEC 156	D 1816, D 877
Tensión de ruptura dieléctrica de impulso 25 °C, Kv	145 min		D3300
Tangente del ángulo de pérdidas A 90°C, máximo	0,005		D 924

Tabla 2.3 Valores Característicos de los aceites aislantes.

Fuente: Norma Internacional ASTM. Especificación estándar para aceite minerales usados en aparatos eléctricos, designación: D3487-00 TIPO II.

2.2.4 PRUEBAS EN MATERIALES LÍQUIDOS.

- Prueba de rigidez dieléctrica ASTM D 1816, D877
- Prueba de número de neutralización.
- Prueba de tensión inter-facial ASTM D 971.
- Prueba de color.
- Prueba de contenido de agua.
- Prueba de densidad relativa.
- Prueba de factor de potencia ASTM D 924

2.3 GASES DIELECTRICOS.

Algunos materiales gaseosos son aislantes y que en presencia de campos eléctricos elevados pueden convertirse en materiales conductores, esta condición de conducción es conocida como descarga.

El aislante gaseoso de más amplio uso es el aire, y se encuentran en sistemas de transmisión de alta, media y baja tensión.

Además existen otros gases de distintas características y propiedades eléctricas, que cumplen de manera diferente con su propósito. Estos elementos gaseosos naturales o elementos con combinaciones químicas exactas, son usados para aislar dispositivos eléctricos encapsulados.

Gases de uso común en ingeniería de alta tensión:

- ✓ Dióxido de carbono (CO_2).
- ✓ Nitrógeno (N_2).
- ✓ Hexafloruro de azufre (SF_6).
- ✓ Aire.

El oxígeno en el aire y el flúor en el hexafloruro de azufre, son importantes porque atrapan fácilmente electrones libres, que son los agentes que inician una ruptura dieléctrica.

2.3.1 AIRE

El aire (seco) es un aislante y los elementos que lo componen también pueden ser considerados de la misma forma. La composición porcentual del aire es:



Nitrógeno	78 %
Oxígeno	20.99 %
Argón	0.9325 %
Gas Carbónico	0.03 %
Hidrógeno	0.01 %
Neón, Helio, Criptón, Xenón	< 0.01%

Tabla 2.4 Elementos gaseosos que se encuentran en el aire.

2.3.1.1 PROPIEDADES DEL AIRE

- Peso Molecular: 28.95 g/mol
- Punto de fusión (Punto de congelación incipiente): -213.4 °C.
- Fase líquida
 - Densidad del líquido (1.013 bar en el punto de ebullición) : 875 kg/m³
 - Punto de ebullición: -194.5 °C
 - Calor latente de vaporización (1.013 bar): 198.7 kJ/kg
- Punto Crítico
 - Temperatura Crítica: -140.5 °C
 - Presión Crítica: 37.71 bar.
 - Conductividad Térmica (1.013 bar y 0 °C (32 °F)): 23.94 mW/(mK).

2.3.2 DIOXIDO DE CARBONO

El dióxido de carbono es un gas, resultante de la combinación de dos cuerpos simples:

- ✓ El carbono.
- ✓ El oxígeno.

El CO₂ es un gas de olor ligeramente picante, incoloro y más pesado que el aire, no es esencial para la vida, se solidifica a temperatura de -78,5°C, formando nieve carbónica. Los gases que son aplicables para equipos de potencia eléctrica, benignos para el medioambiente son requeridos por tener un mínimo de toxicidad, bajo efecto de calentamiento global, bajo daño de capa de ozono y permanecer gaseoso a bajas temperaturas, esas son las propiedades que tienen los gases como CO₂, H₂, N₂, O₂, y sus mezclas.

El CO₂ es requerido por tener adecuado aislamiento, capacidad de extinguir el arco eléctrico, estabilidad química, no es inflamable, no explota. El CO₂ puede ser usado en equipos de potencia, puesto que, la cantidad que se usa en estos, así como su contaminación, es despreciable comparando con las emisiones globales.



2.3.2.1 PROPIEDADES DEL DIOXIDO DE CARBONO CO₂.

- Peso Molecular: 44.01 g/mol
- Fase Sólida
 - Calor latente de fusión (1,013 bares): 196.104 kJ/kg.
 - Densidad del sólido: 1562 kg/m³
- Punto Crítico
 - Temperatura Crítica: 31 °C.
 - Presión Crítica: 73.825 bar.
 - Densidad Crítica: 464 kg/m³.
 - Conductividad Térmica (1.013 bar y 0 °C (32 °F)) : 14.65 mW/(mK)

2.3.3 NITRÓGENO

Es un gas inerte con numerosas aplicaciones industriales, puede licuarse enfriándolo a -196°C. El nitrógeno bajo la forma gaseosa es neutro, incoloro, inerte y no permite la vida.

Es usado como gas portador, para la protección total contra impurezas y oxidación en semiconductores y procesos de soldadura. En su forma fría y líquida, N₂ es usado como un medio de enfriamiento de dispositivos eléctricos en las pruebas ambientales.

2.3.3.1 PROPIEDADES DEL NITRÓGENO N₂

- Peso Molecular: 28.0134 g/mol.
- Punto de fusión : -210 °C
- Fase líquida
 - Densidad del líquido (1.013 bar en el punto de ebullición) : 808.607 kg/m³
 - Punto de ebullición (1.013 bar): -195.9 °C.
 - Calor latente de vaporización (1.013 bar): 198.38 kJ/kg.
- Punto Crítico
 - Temperatura Crítica: -147 °C.
 - Presión Crítica: 33.999 bar.
 - Densidad Crítica: 314.03 kg/m³.
 - Conductividad Térmica (1.013 bar y 0 °C): 24 mW/(mK)

2.3.4 HEXAFLORURO DE AZUFRE

El Hexafloruro de Azufre SF_6 , es un gas inerte, no es tóxico, no tiene color, inodoro, insípido, y no inflamable. Tiene una densidad de 6.07 g/l a 20°C, es un gas artificial utilizado en los equipos eléctricos de alta y media tensión, el gas es 5 veces más pesado que el aire.

Es químicamente muy estable por lo que a temperatura ambiente no reacciona con ninguna otra sustancia, su gran estabilidad se basa en el arreglo simétrico de sus seis átomos de Flúor en torno a su átomo de Azufre central.

Es esta estabilidad precisamente lo que vuelve a este gas muy útil en la industria como excelente aislante eléctrico y puede apagar un arco eléctrico en forma efectiva debido a su alta capacidad calórica y sus propiedades electronegativas, estas propiedades, hacen posible construir equipos muy compactos, que utilizan menos materiales, seguros y con una vida útil muy extensa.

El gas SF_6 es 100 veces mejor que el aire para interrumpir arcos eléctricos y supera en 2.5 veces su habilidad aislante a la misma presión.

2.3.4.1 PROPIEDADES DEL HEXAFLORURO DE AZUFRE (SF_6).

- Peso Molecular : 146.05 g/mol
- Fase Sólida
Calor latente de fusión (1,013 bar, en el punto triple) : 39.75 kJ/kg
- Fase líquida
Densidad del líquido (en el punto triple) : 1880 kg/m³
Punto de ebullición: -63.9 °C
Presión de vapor (a 21 °C): 21.5 bar
- Punto Crítico
Temperatura Crítica: 45.5 °C
Presión Crítica: 37.59 bar.
Conductividad Térmica (1.013 bar y 0 °C) : 12.058 mW/(mK).

2.3.4.2 VENTAJAS DEL HEXAFLORURO DE AZUFRE (SF_6).

- El no ser tóxico.
- El alto grado de su tasa de recombinación, después de disociarse bajo el efecto de descargas elevadas.
- Su baja temperatura de licuefacción, que permite el funcionamiento de los aparatos a pleno rendimiento en los climas más fríos.



2.3.5 VACIO

La interrupción de corriente en el vacío se consideraba una técnica de conmutación 'ideal', sin embargo, las dificultades prácticas hicieron que se ignorase por mucho tiempo, pero en la actualidad es una gran solución en equipos de alta tensión. Uno de los problemas fundamentales era la fabricación de un contenedor aislante adecuado que permaneciera herméticamente sellado.

Los contactos deben mostrar una gran resistencia a la erosión del arco, además el material de contacto debe ser poco propenso a la soldadura durante las operaciones de apertura y de cierre. El material compuesto por cobre y cromo es el más apropiado y el que mejor satisface las necesidades básicas.

El mecanismo de formación de portadores de carga proporciona a un interruptor de vacío la capacidad inherente de extinguir automáticamente arcos de corriente de valores bajos a medios, cuando la corriente pasa por el valor cero. Sin embargo, una interrupción satisfactoria de las corrientes de cortocircuito requiere adoptar medidas adicionales de diseño.

2.3.6 PRUEBAS EN MATERIALES GASEOSOS

- Rigidez dieléctrica para gases aislantes ASTM D 2477
- Determinación de impurezas por cromatografía del gas ASTM D 2685.



CAPITULO 3

USO, DEGRADACIÓN, REUTILIZACIÓN Y MANEJO AMBIENTAL PARA MATERIALES DIELECTRICOS

3.1 INTRODUCCIÓN

Los materiales dieléctricos para altas tensiones sufren diferentes grados de daños y de envejecimiento al trabajar y cumplir con su propósito bajo condiciones normales de funcionamiento.

El grado de envejecimiento depende de la magnitud del estrés eléctrico, térmico y mecánico al que esté sujeto el material. Además tiene mucha influencia la composición y estructura molecular del material dieléctrico, así como el medio ambiente, el entorno físico, químico y de radiación en el que debe funcionar.

El envejecimiento al estrés eléctrico depende principalmente de variables como:

- Valor medio y valor máximo de tensión y corriente aplicado.
- Frecuencia (Hz).
- Grado de repetición de impulsos superpuestos.
- Transitorios de sobretensión.

Para el estrés térmico, depende de las variables:

- Valor superior e inferior de la temperatura ambiente.
- Gradiente de temperatura en el material dieléctrico y
- Máxima temperatura permitida para su óptimo funcionamiento.

Para el estrés mecánico las variables que influyen son:

- Torsión.
- Compresión.
- Tensión.
- Doblado del material.

El material dieléctrico tendrá un grado de envejecimiento diferente si todas las sollicitaciones de estrés (eléctrico, mecánico y térmico) actúan simultáneamente.



3.2 ACEITES DIELECTRICOS

3.2.1 USO DE ACEITE DIELECTRICO EN LAS ALTAS TENSIONES

3.2.1.1 APLICACIONES

- Transformadores de potencia y de distribución.
- Condensadores.
- Convertidores
- Interruptores de potencia.
- Bobinas de arranque en automotores.
- Máquinas herramientas para electroerosión.

Todos estos equipos pueden o no estar ubicados al aire libre y expuesto a bajas temperaturas.

3.2.1.2 PRESENTACIÓN

- Granel: Carro-tanques, en cisternas, carro-tanques.
- Tambor: Envases metálicos nuevos de 200 – 1000 litros, 55 galones con atmósfera de gas inerte.

3.2.2 MANEJO DE ACEITE DIELECTRICO EN DISPOSITIVOS DE ALTA TENSION

Es primordial tener un máximo de precauciones tanto en la manipulación, envasado, almacenamiento del aceite como durante su traslado a los equipos. Además, se requiere un máximo cuidado en la toma de las muestra de aceites usados, pues cualquier contaminación, puede llevar a diagnósticos y resultados erróneos sobre la condición del aceite.

3.2.2.1 PRECAUCIONES EN EL ALMACENAMIENTO

- Limpiar los carros-tanque y envases, para el almacenamiento y el transporte de aceites.
- No deben ser llenados durante tiempo lluvioso o en ambientes donde la humedad sea muy alta.
- Los aceites deben ser almacenados bajo techo donde no estén expuestos a la inclemencia del tiempo.
- Los tanques deben ubicarse a un nivel superior al del piso y colocarlos en posición vertical, pero volteados, para que la presión sobre la tapa impida el ingreso de aire o agua a través de ésta.
- El almacén de los aceites contaminados con PCB debe ser exclusivo, delimitándolos y señalizándolos, donde sólo puede acceder el personal formado y autorizado para el manejo de PCB.



- Los recipientes que estén almacenados con aceite para su posterior desecho deben estar señalizados, además deben ser herméticos y en un material que no se degrade por el aceite.

3.2.2.2 PRECAUCIONES DURANTE EL LLENADO

- En equipos eléctricos, los interiores deben ser inspeccionados para verificar que estén limpios y secos, para eliminar el aire y la humedad se ponen al vacío, o se cargan con gas seco e inerte antes de llenarlos con aceite.
- Realizar un ligero calentamiento del aceite antes de verterlo, el aceite se debe filtrar durante la transferencia desde un tanque al equipo eléctrico.

3.2.2.3 MANTENIMIENTO DEL ACEITE AISLANTE

- Equilibrar adecuadamente los transformadores logrará que el aceite cubra la totalidad de las partes del interior de los mismos.
- Colocar filtros adecuados en los transformadores, de forma que evite la entrada de humedad, polvo y otras partículas.
- Revisar la junta de tapas, pasa-cables, mirilla, para evitar el acceso de suciedad o la pérdida de aceite.
- Realizar pruebas, y/o análisis periódicos para tomar acciones de mantenimiento antes de que la excesiva degradación del aceite lo haga irreparable, e incluso dañe el interior del equipo eléctrico.
- El uso de equipos de purificación y regeneración de aceite aislante permite devolver las características funcionales mínimas para continuar usándolo, antes de que la contaminación del aceite provoque depósitos de lodos en el interior.

3.2.3 DEGRADACIÓN DE ACEITES DIELECTRICOS

Los aceites para servicio en equipos eléctricos de alta tensión están sometidos a diversas condiciones de operación y expuestos a la presencia de elementos que conllevan al deterioro gradual de sus propiedades.

El envejecimiento y oxidación del aceite es acelerado por:

- La naturaleza o composición del aceite.
- La cantidad de oxígeno.
- El nivel de temperatura sometido durante el servicio, originada por: sobrecargas, cortocircuitos no liberados por las protecciones, defectos de la construcción de la máquina, etc.
- La presencia de agua disuelta en el aceite.

- Los metales presentes en las partes activas (cobres y acero) actúan como catalizadores acelerando el proceso.
- Los gradientes de campo eléctrico excesivos.
- Corrosión de la carcasa y/o del núcleo del equipo eléctrico.

El análisis periódico del aceite y la determinación del índice de acidez, permiten evaluar el avance del proceso de envejecimiento. Dependiendo del tipo de hidrocarburos empleados en la fabricación del aceite, éste presentará mejores o peores propiedades tanto refrigerantes como de estabilidad química, así como de oxidación.

El nivel de temperatura es un factor muy importante en la rapidez de oxidación del aceite, mientras más alta la temperatura, más rápida será la degradación del aceite ‡.

NUMERO DE NEUTRALIZACION vs TEMPERATURA	
TEMPERATURA DE OPERACIÓN DEL EQUIPO	VIDA ÚTIL DEL ACEITE DIELECTRICO EN AÑOS‡
60 °C	20.00
70 °C	10.00
80 °C	5.00
90 °C	2.50
100 °C	1.25
110 °C	7 meses

Tabla 3.1 Tiempo de vida útil de un aceite dieléctrico.



Fig. 3.1. Curva de oxidación de aceite dieléctrico.

Fuente: tutorial de lubricación Shell, modulo 9/ transformadores.

‡ Tiempo estimado para que el número de neutralización del aceite alcance una acidez equivalente a 0.25 mg KOH/g (hidróxido de potasio por mili-gramo de sustancia para neutralizar un gramo de aceite).



La gráfica muestra la diferencia entre las curvas de oxidación de un aceite no inhibido y otro inhibido. Los inhibidores de oxidación mantienen la acidez del aceite a un nivel más bajo que los aceites sin inhibidor. Si se agota el aditivo antioxidante en el aceite inhibido la reacción de oxidación se acelera y por tanto la curva toma forma exponencial con una pendiente mayor que la del aceite no inhibido.

3.2.3.1 SÍNTOMAS DE DEGRADACIÓN DEL ACEITE

- ✓ Cambio de color: oscurecimiento.
- ✓ Formación de sustancias polares.
- ✓ Formación de ácidos.
- ✓ Olor.
- ✓ Generación de lodos

3.2.3.2 DISPOSICIÓN FINAL DEL ACEITE DIELECTRICO USADO.

El aceite puede fácilmente recuperar sus condiciones originales cuando se somete a un proceso adecuado de filtración con arcilla, seguido de secado al vacío.

Mediante procesos periódicos de tratamiento, un aceite dieléctrico de buena calidad, puede utilizarse por un período entre 20 a 25 años. Cuando ya el aceite dieléctrico no puede ser restituido a sus condiciones de operatividad, se recomienda que se utilice como combustible en Calderas.

3.2.4 IMPACTOS AMBIENTALES

La contaminación que produce el aceite depositado y sus vapores expulsados en un ambiente cerrado, son muy peligrosos, por lo que, los depósitos de aceites dieléctricos deben tener un eficaz sistema de ventilación para arrastrar la contaminación que pudiera producirse. Esta ventilación debe ser sin reciclado y con garantías que no contamina el medio ambiente de las zonas cercanas. Los lugares de almacenamiento deben estar provistos de un sistema anti-incendio adecuado al producto depositado.

3.2.4.1 RIESGOS PARA LA SALUD Y EL MEDIO AMBIENTE

Los compuestos orgánicos presentes en las bases de los aceites vírgenes, los aditivos que contienen y los contaminantes que acumulan durante su uso hacen que estos residuos contengan sustancias perjudiciales para el ser humano y el medio ambiente.

3.2.4.2 RIESGOS PARA EL SER HUMANO

La exposición prolongada y repetida a gases de compuestos orgánicos, aromáticos, metales pesados, y otras sustancias presentes en los aceites usados, que son arrojados a la atmosfera, son muy dañinos que provocan afecciones sobre el sistema respiratorio debido a su carácter irritante y tóxico. Se recomienda mantenerlos lejos del contacto con la piel, ojos y evitar la ingestión o la inhalación de vapores.

En la proximidad de los depósitos deben existir duchas de emergencia y equipo para lavar los ojos para poder tomar las medidas de primeros auxilios establecidas.

3.2.4.3 RIESGOS PARA EL AIRE

La eliminación mediante combustión incontrolada origina graves problemas de contaminación atmosférica producida por gases de combustión tóxica provenientes de compuestos de cloro, fósforo y azufre, y por productos presentes en los aceites usados.

3.2.4.4 RIESGOS PARA EL AGUA

Los aceites usados generan finas películas impermeables en la superficie de los cursos del agua y debido a su insolubilidad impiden el paso de oxígeno a través de ella, la contaminación puede inhabilitar cursos de agua usados como fuente de agua potable.

3.2.4.5 RIESGOS PARA EL SUELO

Los hidrocarburos saturados no biodegradables que componen el aceite dieléctrico usado en contacto con el suelo destruyen el humus vegetal, y la fertilidad del suelo, contaminando las aguas superficiales y subterráneas.

3.2.5 REGENARACIÓN Y RECICLAJE

3.2.5.1 TRATAMIENTOS AL ACEITE DIELECTRICO

Cuando los aceites dieléctricos han llegado a un punto donde se encuentran fuera de sus especificaciones, y deja de cumplir sus funciones con eficacia, es necesario iniciar un tratamiento que le devuelva al aceite todos sus parámetros originales, y así extender la vida útil del equipo.



3.2.5.2 PROCESO DE REGENERACIÓN DE TERMO-VACÍO

Este procedimiento preventivo se recomienda cuando el Índice de Calidad se encuentra entre 600 - 1.500, se recomienda para secado y desgasificación de los aceites dieléctricos, es usado cuando tienen un nivel bajo de rigidez dieléctrica o un contenido elevado de humedad. Es un proceso físico, que se realiza utilizando filtros de termo-vacío, permitiendo secar el aceite a temperaturas no mayores a 65°C, que nos ayuda a evitar la degradación por oxidación. El aceite se limpia totalmente para ser utilizado en la misma aplicación, con un porcentaje de vida casi igual al que tenía al iniciar el proceso.

3.2.5.3 TRATAMIENTO DE REGENERACIÓN CON TIERRA FULLER.

La Tierra Fuller es una arcilla adsorbente con base en silicatos de aluminio hidratado, mediante procesos de incineración se obtiene un producto de gran utilidad que se comporta como sustancia adsorbente de partículas ácidas. Con la regeneración se absorben los productos de degradación disueltos en el aceite, por lo que se recomienda para aceites dieléctricos que poseen un índice de calidad inferior a 500. El tratamiento es económico y de fácil realización, porque el aceite circula a través de tierras adsorbentes, que retienen los compuestos producidos por los procesos de oxidación.

La regeneración tiene por objeto obtener la limpieza total de un equipo eléctrico hasta dejarlo libre de contaminantes ácidos, y en segundo lugar la recuperación del aceite.

Existen dos métodos de adsorción por medio de tierra fuller:

- El método de contacto.
- El método de percolación.

El método de contacto consiste en mezclar el aceite con tierra fuller en polvo, bajo condiciones de tiempo y temperatura controladas, luego de completarse la adsorción, la tierra es separada del aceite purificado.

En el método de percolación, el aceite es pasado a través de una columna de tierra fuller, el cual puede ser de tipo cartucho o de tipo torre. La percolación de tipo torre es similar al método con cartuchos con la diferencia de que el aceite es pasado por tierra fuller verticalmente y no horizontalmente.

Una vez que la tierra fuller se encuentra saturada, es retirada de los tanques de remoción de lodos de la unidad de tratamiento y es almacenada, luego de almacenar, ésta debe ser trasladada a una compañía que posea un horno de producción de cemento, en donde se efectúa el tratamiento de estos residuos para darles una disposición final y segura sin generar ningún tipo de residuo adicional.



3.3 GAS DIELECTRICO

3.3.1 USO DE GAS DIELECTRICO SF₆ EN ALTA TENSIÓN

3.3.1.1 APLICACIONES

- Interruptores de media y alta tensión, usados como medio de extinción de arco.
- Seccionadores.
- Reconectores.
- Transformadores, usados como aislamiento.
- Subestaciones aisladas en gas GIS.
- Interruptores automáticos (interruptores de hexafloruro de azufre), conmutadores.
- Guías de ondas de radar.

Todas estas aplicaciones son sistemas cerrados, muy seguros, sin posibilidades de filtraciones.

3.3.1.2 PRESENTACIÓN

- Cilindros, tanques específicos para el transporte y envasado.



Fig. 3.2 Contenedores de gas dieléctrico SF₆.

Cortesía: Agencia de Protección Ambiental. EPA.

3.3.2 MANEJO DEL GAS SF₆ EN DISPOSITIVOS DE ALTA TENSIÓN

El SF₆ es un gas muy estable, pero se puede descomponer a causa de descargas eléctricas con un alto contenido de energía, esta acción forma subproductos sólidos y gaseosos, sin embargo las descomposiciones gaseosas se

mantienen en niveles bajos y pueden ser eliminadas con sustancias absorbentes como la alúmina. Los descompuestos sólidos son básicamente fluoruros en forma de un polvo gris muy fino. En grandes concentraciones, estos subproductos son corrosivos y venenosos por lo que existen procedimientos especiales para tratar estos casos.

Los equipos que utilizan el SF_6 son seguros, y no liberan gas a la atmósfera, todos deben ser monitoreados en forma permanente y cualquier fuga debe ser rápidamente detectada y corregida.

Si el equipo debe ser abierto, el gas debe ser re-comprimido en un tanque y luego de un proceso de filtrado, puede ser reutilizado. Existen diversos equipos que permiten la manipulación del SF_6 , ya sea en subestaciones encapsuladas GIS o en interruptores.

3.3.2.1 ALMACENAMIENTO

Almacenar en un área fresca, seca, bien ventilada, lejos de los lugares de tráfico vehicular y de las salidas de emergencia, no permitir, que en el lugar la temperatura exceda $52^{\circ}C$. Los cilindros serán colocados parados y bien asegurados para evitar que se caigan o se golpeen.

Las tapas protectoras de las válvulas deben estar bien colocadas, no se debe arrastrar, deslizar o hacer rodar los cilindros, sino utilizar auto-elevadores para desplazarlos.

No calentar los cilindros, para incrementar la velocidad de descarga, utilizar una válvula de control o de retención para evitar riesgos de retroceso de flujo al interior del cilindro. La carga de cilindros de gas comprimido debe ser efectuada por el fabricante o bien se debe contar con su debido consentimiento.

3.3.2.2 TRANSPORTE

Al transportar verificar que los cilindros se encuentren en posición vertical, nunca transportar los cilindros en baúles de vehículos, compartimientos cerrados, cabinas de camiones o en compartimientos de pasajeros, los cilindros deben estar asegurados en plataformas o en vehículos abiertos tipo pick up.

3.3.3 DEGRADACIÓN DE HEXAFLUORURO DE AZUFRE SF_6 .

La degradación del SF_6 puede darse por la adición de vapor de agua, aire u otros gases producto de la descomposición del propio SF_6 .

El análisis de fallas debida a la presencia de agua, ya sea líquida, sólida o como vapor, no puede ser determinada después de una falla de arqueo, sólo la revisión y medición periódica del contenido de humedad es la única forma de concluir sobre la presencia de cantidades de agua que provocan la falla.

El aire mezclado en concentraciones mayores al 20% puede reducir significativamente la rigidez del SF_6 .

3.3.4 IMPACTOS AMBIENTALES DE GAS SF_6

3.3.4.1 PELIGRO DEL GAS SF_6

Se trata de un gas que, en caso de escapar a la atmósfera contribuye notablemente al efecto invernadero, ya que la molécula de SF_6 es muy reflectante, por su gran densidad, por ello se toman las precauciones necesarias para evitar que esto suceda.

Se debe utilizar un equipo de recuperación de gas tanto en taller como en campo, para evitar posibles escapes, de igual modo, se debe contar con una instrucción medioambiental para el correcto uso de este compuesto.

En su forma pura no es tóxico, ni tampoco peligroso al ser inhalado, sin embargo dado que es casi seis veces más pesado que el aire y en ambientes cerrados, desplaza al oxígeno existiendo riesgo de sofocación para las personas.

La gran estabilidad de este gas implica que permanecerá por un largo tiempo en la atmosfera antes de ser degradado.

Los gases que afectan la capa de ozono contienen cloro, el SF_6 no contiene cloro en su fórmula y en consecuencia no daña la capa de ozono.

3.3.5 REGENERACIÓN Y RECICLAJE

3.3.5.1 REGENERACIÓN DE GAS SF_6

El SF_6 nuevo y sin utilizar debe cumplir las condiciones especificadas en IEC 60376. Una vez que ha sido extraído de un equipo eléctrico, el gas SF_6 debe cumplir los requisitos de calidad expresados en IEC 60480 para poder ser reutilizado de nuevo en un equipo.

Para permitir que el gas sea incorporado al proceso de reutilización debe cumplir las condiciones de calidad especificadas en IEC 62271-303, por ejemplo la especificación de reutilización del fabricante del gas. Dentro de la misma, el gas usado puede ser considerado como un producto o materia prima para la producción de nuevo SF_6 y puede ser devuelto al fabricante del gas.

Impurezas o grupos de impurezas		Concentración máximas de impurezas permitidas			
		Gas de servicio		Gas reciclable o reutilizable	Gas nuevo
		Tanque vivo	GIS y tanque nuevo		
Aire Oxígeno O ₂ y Nitrógeno N ₂	% V % m	3	3	2	0,25 0,05
Tetrafluoruro de Carbón CF ₄	% V % m	incluido en el contenido de aire	incluido en el contenido de aire	incluido en el contenido de aire	0,1 0,05
Humedad H ₂ O (punto de rocío a presión atmosférica)	ppmv ppmm °C	600 74 -25	300 37 -32	200 25 -36	120 15 -42
Acidez expresada como ácido fluorídrico HF	ppmv ppmm	NA*	NA	NA*	1,8 0,3
Fluoruro hidrolisables expresados como HF	ppmm	NA*	NA*	NA*	1
Aceites	ppmm	10	10	10	10
Total de gases reactivos indicados por la presencia de SO ₂ + SOF ₂	ppmv	2000 (o 500 SO ₂ + SOF ₂)	2000 (o 500 SO ₂ + SOF ₂)	50 (o 12 SO ₂ + SOF ₂)	NA

Tabla 3.2 Resumen de criterios de aceptación para gas SF₆ en servicio, reciclable y nuevo.

3.3.5.1.1 RECUPERACIÓN: REGENERACIÓN DEL SF₆ PARA PRODUCIR GAS NUEVO DE ACUERDO CON NORMA IEC 60376

Si el SF₆ usado no cumple las condiciones del operador o las de la norma IEC 60480, y además, no es posible purificar el gas in situ, éste es enviado directamente al fabricante del gas para ser regenerado, esto, si la proporción de gas inerte es demasiado elevada o si se detectan altas concentraciones de CF₄ y sub-productos tóxicos.

Para el proceso de regeneración empleado en la práctica, el producto suministrado debe cumplir ciertas condiciones expuestas en la norma IEC 62271-303 o en la especificación de reutilización.

3.3.5.2 REUTILIZACIÓN DEL SF₆

El SF₆ usado puede ser regenerado y purificado in situ, utilizando los instrumentos apropiados. Si la regeneración y purificación no fueran posibles, el SF₆ obtenido durante el servicio o la retirada de un interruptor con aislamiento en gas, puede ser incorporado en etapas intermedias del ciclo cerrado para ahorrar recursos y energía. Desde una perspectiva medioambiental, esto es necesario para limitar la liberación de SF₆ a la atmósfera.



La reutilización del SF_6 , es un sistema de circuito cerrado de reciclaje, que trata de prevenir las emisiones, tanto como sea posible durante el servicio y retiro del equipo. Para su posterior reutilización, es necesario evaluar la calidad del mismo, tomando muestras suficientes del gas, para su análisis en un laboratorio, según los resultados de esos análisis, se decide regenerar el gas y purificarlo in situ o regenerar el gas en nuevo SF_6 de acuerdo a la norma IEC 60376.

3.3.5.2.1 INSPECCIÓN DEL SF_6 : RECUPERACIÓN Y REUTILIZACIÓN “IN SITU”

Las impurezas como polvo, humedad, aire, aceite y componentes de SO_2 , forman parte del proceso normal de envejecimiento del gas y son causados como resultado de su operación, mismas que se puede eliminar in situ. Los sub-productos sólidos pueden ser eliminados utilizando filtros sólidos, y la humedad mediante el empleo de alúmina o tamices moleculares, y los sub-productos gaseosos empleando carbón activo y zeolitas.

Para poder ser reutilizado, el SF_6 debe reunir los requisitos del operador y de la IEC aplicable, si el material tratado reúne esos requisitos, el compartimento en servicio puede ser rellenado directamente mediante un sistema de evacuación y llenado. Este es el procedimiento normal a seguir durante el montaje o inspección del equipo. La calidad del producto nuevo, tal y como se define en la norma IEC 60376, no se consigue con la regeneración y purificación del gas.

3.3.5.3 RECICLAJE DE GAS SF_6

Para el reciclaje, es mejor medir la calidad del SF_6 antes de realizar cualquier tipo de manipulación, ya sea para rellenar un equipo como para extraer el gas de un equipo en servicio. Además, los procesos de manipulación deben ser realizados con los equipos e instrumentos apropiados, diseñados para tal efecto y utilizados por personal calificado.

El principal problema es la contaminación del SF_6 durante su manipulación. Los compresores deben estar libres de aceite y los conectores y acoplamientos deben soportar vacío y asegurar la estanqueidad en todo momento.

3.3.5.4 DESTRUCCIÓN DE GAS SF_6

La rigidez dieléctrica del SF_6 en casi todas las aplicaciones, es directamente proporcional a la densidad del gas, cuando éste empieza a licuarse, al pasar a su estado líquido, su densidad baja y puede presentarse una falla.

Si la inspección del SF_6 revela que el gas no reúne los requisitos de IEC 62271-303 o la especificación de reutilización, y no puede entonces ser reutilizado o regenerado en gas nuevo, éste ha de ser puesto a disposición de una instalación química autorizada de incineración de residuos.



El SF_6 puede ser destruido calentándolo con caliza en un horno de altas temperaturas, con este proceso el gas se transforma en dos subproductos llamados yeso y flúor, mismos que por su composición natural, son no tóxicos y completamente inofensivos para el medio ambiente.

3.4 CERÁMICOS, POLÍMEROS, VIDRIO DIELECTRICO

3.4.1 USOS GENERALES

Los cerámicos, polímeros y vidrios, son formados por mezclas de arcillas y otros componentes, los cuales son sometidos a un proceso de cocción y a una determinada temperatura pueden llegar a la fusión. Tienen características especiales y son objeto de aplicaciones diversas en la industria eléctrica, pudiéndose emplear en sistemas de aislamiento eléctrico de alta y baja tensión como elementos resistentes de separación y sujeción.

3.4.1.1 APLICACIÓN

- Líneas de transmisión de baja, media, alta tensión.
- Seccionadores tipo cuchilla.
- Aisladores de porcelana, polímeros y vidrio.
- Pararrayos.
- Interruptor fusibles.
- Transformadores, interruptores de aceite.
- Condensadores.
- Para sujetar rígidamente las barras de los dispositivos de distribución.
- Reconectores y Descargadores.
- Bushing de porcelana, aislador grey line post.



Fig. 3.3. Aisladores de porcelana, poliméricos, vidrio.

Cortesía: Gamma, aisladores corona,

3.4.2 MANEJO DE AISLADORES

Los aisladores deberán fabricarse de porcelana procesada en húmedo, la cual presentará una resistencia a la compresión doce veces superior a la resistencia de tensión. Para prevenir fracturas y perforaciones eléctricas a largo plazo, la cabeza de porcelana de los aisladores, será diseñada en forma recta y con tecnología de arenado.

Las partes metálicas, serán hechas de hierro maleable o de acero fundido, galvanizado en caliente de acuerdo a la especificación ASTM A153. El material entre la porcelana y las partes metálicas será cemento tipo PORTLAND, invariable en volumen ante los cambios de temperatura, envejecimiento, y de alto esfuerzo compresivo.

Los pasadores de acero forjado, galvanizados por inmersión en caliente de acuerdo con los requerimientos de la norma ASTM A153-82.

Los pines de alambre procesado en frío de cualquiera de los siguientes materiales: bronce, aluminio, latón o acero inoxidable.

3.4.2.1 ACABADO.

Todo el herraje del aislador deberá tener superficies lisas y aristas redondeadas para minimizar las fuentes de radio-interferencia y efecto corona.

3.4.2.2 MARCADO.

Cada aislador deberá presentar el símbolo de identificación del fabricante, la clase ANSI, el año de su fabricación, su resistencia electromecánica. Estas marcas deberán ser legibles, durables y no dañar la integridad física del aislador.

3.4.2.3 EMBALAJE.

Los aisladores serán empacados individualmente en cajas de madera u otro material, lo suficientemente resistentes y con la apropiada protección, de modo que se protejan las campanas del aislador, en el manejo y transporte.

Cada caja, deberá ser marcada con el número de aisladores, número de orden de compra, número de catálogo, descripción del contenido, y el nombre del fabricante.



Fig. 3.4 Embalaje y almacenamiento de aisladores de vidrio.

3.4.3 DEGRADACIÓN DE CERÁMICOS, POLÍMEROS Y VIDRIO DIELECTRICO

La cerámica eléctrica no sufre reacciones químicas, con los cambios de temperatura naturales durante su trabajo, por no poseer materiales orgánicos y por estar diseñada para soportar condiciones extremas. Una forma de comprobar la gran estabilidad química de la porcelana eléctrica frente a los cambios de temperatura es la prueba llamada "choque térmico".

Los factores que afectan fuertemente la velocidad de las reacciones químicas en los aislantes son la presencia de aire y de humedad.

3.4.3.1 OXIDACIÓN

Algunos materiales, en presencia del aire, y especialmente en presencia de ozono, sufren reacciones de oxidación, con la consecuente alteración de sus propiedades mecánicas y eléctricas, es el caso de los aisladores cerámicos, poliméricos, la reacción de oxidación es acelerada si el material se encuentra expuesto a la acción de radiaciones electromagnéticas, por la luz solar.

3.4.3.2 ENVEJECIMIENTO DE UN AISLADOR POR ACCIÓN TÉRMICA

El envejecimiento por acción térmica en un aislador es un proceso químico que implica la descomposición o modificación del material a tal grado que este ya no puede funcionar adecuadamente en su función de aislante.

Estos efectos son usualmente acelerados por aumento de la temperatura y estas características se usan para efectuar pruebas aceleradas a la falla o a un grado de deterioro considerado peligroso. Tales pruebas se efectúan a temperaturas considerablemente mayores que las de operación normal.



3.4.4 IMPACTOS AMBIENTALES DE CERÁMICOS, CRISTALES DIELECTRICOS

Los cristales no tienden a contaminar, solo aquellos que son extraídos de la industria minera, ya que la extracción de minerales requiere, la deforestación de las áreas donde se encuentra el mineral. Entre las consecuencias más graves tenemos la contaminación del aire, aguas y el suelo por las máquinas y las técnicas empleadas para su extracción. También contribuye a la contaminación del aire mediante los gases tóxicos generados por las máquinas excavadoras y otros gases nocivos que surgen por las explosiones que rompen las rocas. Los residuos explosivos que se dispersan empobrecen los suelos, perjudicando así, el desarrollo de la vida.

Las actividades mineras pueden originar problemas muy graves de tipo ambiental, social, económico y político. La explotación de las canteras produce excavaciones que afectan el paisaje, la estructura y configuración del terreno ocasionando deforestación, pérdida de la capa productiva del suelo y erosión.

3.4.5 REGENERACIÓN Y RECICLAJE

3.4.5.1 RECICLAJE DE CERÁMICA Y VIDRIO DIELECTRICO

Las pérdidas o roturas de aisladores generadas durante su proceso de fabricación, son recicladas para el proceso de preparación de la pasta de porcelana, para su posterior utilización, puesto que la cerámica y vidrio usados para fines eléctricos, son materiales reutilizables y 100% reciclables.

Para fabricar una nueva pieza se utiliza material reciclado en un 90%, por lo que se puede ahorrar hasta un 75% de la energía que se necesitaría si se utiliza materia prima virgen.

El lavado de aisladores de vidrio produce un cierto impacto ambiental, ya que para limpiar se utilizan tenso activos que van a parar a las aguas residuales, por lo que, se recomienda usar modernos sistemas de lavado en circuito cerrado que reducen mucho el consumo de agua y hacen más fácil el manejo de aguas residuales.

El vidrio reutilizable tiene más ventajas respecto al resto de materiales, porque necesita poca materia prima, genera pocos residuos y emisiones contaminantes a lo largo de todo su ciclo de vida, y tiene un consumo energético bajo.



3.4.5.2 DISPOSICIÓN FINAL DEL MATERIAL

Los aisladores que sean desmontados de las líneas de distribución o de transmisión, pueden ser utilizados como relleno sanitario o someterlos a procesos de trituración y molienda para ser utilizados como material de relleno o en morteros como relleno de construcción, en vista de las características de alta estabilidad que presenta la porcelana.

Para el caso de aisladores que contengan partes metálicas, se les debe separar el herraje de la porcelana, a la porcelana se le puede dar el uso antes descrito y los herrajes se pueden utilizar como chatarra en procesos de fundición de hierro.



CAPITULO 4

ENSAYOS Y PRUEBAS DE LABORATORIO BAJO DISTINTOS TIPOS DE TENSIONES Y CORRIENTES ELÉCTRICAS PARA DIELECTRICOS SOMETIDOS A ALTAS TENSIONES ELÉCTRICAS

4.1 PRUEBAS EN MATERIALES DIELECTRICOS SÓLIDOS.

4.1.1 PRUEBA EN AISLADORES.

4.1.1.1 ASTM D 3426. MÉTODO DE PRUEBA ESTÁNDAR PARA TENSIÓN DE RUPTURA DIELECTRICA Y RIGIDEZ DIELECTRICA DE LOS MATERIALES SÓLIDOS DE AISLAMIENTO ELÉCTRICO CON ONDAS DE IMPULSO.

Este método de ensayo cubre la determinación de la rigidez dieléctrica de los materiales sólidos de aislamiento eléctrico, bajo condiciones simuladas de impulso tipo rayo, ya sea usando electrodos simples o modelos funcionales. Los procedimientos se dan para las pruebas estándar de impulsos de $1,2 \mu\text{s}$ por $50 \mu\text{s}$ de onda completa. Para obtener esta onda de impulso particular se necesita un generador de impulso, capaz de aplicar a la muestra de la prueba un estándar de $1,2 \mu\text{s}$ por $50 \mu\text{s}$ de onda de cualquier polaridad positiva o negativa. La tensión máxima y la capacidad de almacenamiento de energía debe ser suficiente para proporcionar las ondas de choque de la forma adecuada a cualquier muestra para analizar hasta la tensión de ruptura se produzca

4.1.1.2 ASTM D 149. MÉTODO DE PRUEBA ESTÁNDAR DE VOLTAJE DE RUPTURA DIELECTRICA Y RIGIDEZ DIELECTRICA EN MATERIALES SÓLIDOS DE AISLAMIENTO ELÉCTRICO A FRECUENCIA DE RED INDUSTRIAL

Este método de prueba cubre la determinación de la rigidez dieléctrica de los materiales sólidos de aislamiento eléctrico a frecuencia industrial, bajo determinadas condiciones. A menos que se especifique lo contrario, las pruebas se harán a 60 Hz. Se puede realizar a diferentes temperaturas, y en cualquier medio adecuado, incluso alrededor de líquidos o gases.

La tensión alterna, con una frecuencia industrial de 60 Hz se aplica a una muestra de prueba. La tensión se incrementa de cero o de un nivel muy por debajo de la tensión de ruptura, hasta que la falla dieléctrica de la muestra de ensayo se produzca.



4.1.2 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS GENERALES DE AISLADOR CLASE ANSI Y VALORES DE TENSIONES DE FLAMEO SEGÚN ENSAYO DE LABORATORIO

Las especificaciones técnicas para aisladores clase ANSI están establecidas por el Ministerio de Electricidad y Energía Renovable.

El valor de la tensión de flameo se determina como el promedio de cinco valores de la tensión de flameo aplicada a cada uno de los aisladores. El valor promedio obtenido se corregirá en función de las condiciones atmosféricas al momento del ensayo, como indica la NORMA ANSI C29.1

AISLADOR ESPIGA (PIN), DE PORCELANA, CLASE ANSI 56-1, 25 KV	
	
DESCRIPCIÓN	ESPECIFICACIÓN
MATERIAL	Porcelana procesada en húmedo
Norma de fabricación	ANSI C29.6 – 1996
Clase	ANSI 56-1
Norma del esmaltado	ANSI 70
VALORES ELECTRICOS	
Tensión máxima de operación	25 Kv
Tensión de flameo de baja frecuencia en seco	95 Kv
Tensión de flameo de baja frecuencia en húmedo	60 Kv
Tensión de flameo crítico al impulso positivo	150 Kv
Tensión de flameo crítico al impulso negativo	190 Kv

TABLA 4.1 Especificaciones técnicas generales de aislador CLASE ANSI 56-1
Fuente: Sumario de especificaciones técnicas generales/aisladores. Ministerio de electricidad y energía renovables. www.meer.gov.ec

AISLADOR ANSI 56-1			AISLADOR ANSI 56-1		
TENSION DE FLAMEO A BAJA FRECUENCIA			TENSION DE FLAMEO AL IMPULSO		
MEDIDAS	SECO	HUMEDO	MEDIDAS	POSITIVO	NEGATIVO
KV1	90	55	KV1	--	--
KV2	93	58	KV2	--	--
KV3	94	55	KV3	--	--
PROMEDIO [kV]	92	56	PROMEDIO [kV]	--	--

Tabla 4.2 valores de tensión de flameo a baja frecuencia y flameo crítico a impulso positivo y negativo.

Referencia: NORMAS ASTM D 3426, ASTM D 149, ANSI C29.1



AISLADOR ESPIGA (PIN), DE PORCELANA, CLASE ANSI 55-5, 15 KV



DESCRIPCIÓN	ESPECIFICACIÓN
MATERIAL	Porcelana procesada en húmedo
Norma de fabricación	ANSI C29.5 - 1984
Clase	ANSI 55-5
Norma del esmaltado	ANSI 70
VALORES ELECTRICOS	
Tensión máxima de operación	15 kV
Tensión de flameo de baja frecuencia en seco	85 kV
Tensión de flameo de baja frecuencia en húmedo	45 Kv
Tensión de flameo crítico al impulso positivo	140 kV
Tensión de flameo crítico al impulso negativo	170 kV

TABLA 4.3 Especificaciones técnicas generales de aislador CLASE ANSI 55-5

Fuente: Sumario de especificaciones técnicas generales/aisladores. Ministerio de electricidad y energía renovables. www.meer.gov.ec

AISLADOR ANSI 55-5		
TENSION DE FLAMEO A BAJA FRECUENCIA		
MEDIDAS	SECO	HUMEDO
KV1	82	41
KV2	80	46
KV3	75	45
PROMEDIO [kV]	79	44

AISLADOR ANSI 55-5		
TENSION DE FLAMEO AL IMPULSO		
MEDIDAS	POSITIVO	NEGATIVO
KV1	120	121
KV2	115	119
KV3	122	117
PROMEDIO [kV]	119	119

Tabla 4.4 valores de tensión de flameo a baja frecuencia y flameo crítico a impulso positivo y negativo.

Referencia: NORMAS ASTM D 3426, ASTM D 149, ANSI C29.2



AISLADOR ROLLO, DE PORCELANA, CLASE ANSI 53-2 0,25 KV



DESCRIPCIÓN	ESPECIFICACIÓN
MATERIAL	Porcelana procesada en húmedo
Norma de fabricación	ANSI C29.3 – 1986
Clase	ANSI 53-2
Norma del esmaltado	ANSI 70
VALORES ELECTRICOS	
Tensión máxima de operación	2 kV
Tensión de flameo de baja frecuencia en seco	25 kV
Flameo de baja frecuencia en húmedo, vertical.	12 Kv
Flameo de baja frecuencia en húmedo, horizontal.	15 kV

TABLA 4.5 Especificaciones técnicas generales de aislador CLASE ANSI 53-2

Fuente: Sumario de especificaciones técnicas generales/aisladores. Ministerio de electricidad y energía renovables. www.meer.gov.ec

AISLADOR ANSI 53-2			
TENSION DE FLAMEO A BAJA FRECUENCIA			
MEDIDAS	SECO	HUMEDO HORIZONTAL	HUMEDO VERTICAL
KV1	22	14	10
KV2	22	15	12
KV3	24	14	13
PROMEDIO [kV]	22	14	12

AISLADOR ANSI 53-2		
TENSION DE FLAMEO AL IMPULSO		
MEDIDAS	POSITIVO	NEGATIVO
KV1	--	--
KV2	--	--
KV3	--	--
PROMEDIO [kV]	--	--

Tabla 4.6 valores de tensión de flameo a baja frecuencia y flameo crítico a impulso positivo y negativo.

Referencia: NORMAS ASTM D 3426, ASTM D 149, ANSI C29.2



AISLADOR DE SUSPENSIÓN, DE PORCELANA, CLASE ANSI 52-1, 15 KV



DESCRIPCIÓN	ESPECIFICACIÓN
MATERIAL	Porcelana procesada en húmedo
Norma de fabricación	ANSI C29.2 – 1992
Clase	ANSI 52-1
Norma del esmaltado	ANSI 70
VALORES ELECTRICOS	
Tensión máxima de operación	15 Kv
Tensión de flameo de baja frecuencia en seco	60 kV
Tensión de flameo de baja frecuencia en húmedo	30 Kv
Tensión de flameo crítico al impulso positivo	100 kV
Tensión de flameo crítico al impulso negativo	100 kV

TABLA 4.7 Especificaciones técnicas generales de aislador CLASE ANSI 52-1

Fuente: Sumario de especificaciones técnicas generales/aisladores. Ministerio de electricidad y energía renovables. www.meer.gov.ec

AISLADOR ANSI 52-1		
TENSION DE FLAMEO A BAJA FRECUENCIA		
MEDIDAS	SECO	HUMEDO
KV1	51	35
KV2	57	29
KV3	58	27
PROMEDIO [kV]	55	30

AISLADOR ANSI 52-1		
TENSION DE FLAMEO AL IMPULSO		
MEDIDAS	POSITIVO	NEGATIVO
KV1	90	90
KV2	85	95
KV3	82	88
PROMEDIO [kV]	86	91

Tabla 4.8 valores de tensión de flameo a baja frecuencia y flameo crítico a impulso positivo y negativo.

Referencia: NORMAS ASTM D 3426, ASTM D 149, ANSI C29.2



AISLADOR DE SUSPENSIÓN, DE PORCELANA, CLASE ANSI 54-3



DESCRIPCIÓN	ESPECIFICACIÓN
MATERIAL	Porcelana procesada en húmedo
Norma de fabricación	ANSI C29.2 – 1989
Clase	ANSI 54-3
Norma del esmaltado	ANSI 70
VALORES ELECTRICOS	
Tensión máxima de operación	2 Kv
Tensión de flameo de baja frecuencia en seco	35 kV
Tensión de flameo de baja frecuencia en húmedo	18 Kv
Tensión de flameo crítico al impulso positivo	100 kV
Tensión de flameo crítico al impulso negativo	100 kV

TABLA 4.9 Especificaciones técnicas generales de aislador CLASE ANSI 54-3

Fuente: Sumario de especificaciones técnicas generales/aisladores. Ministerio de electricidad y energía renovables. www.meer.gov.ec

AISLADOR ANSI 54-3			AISLADOR ANSI 53-3		
TENSION DE FLAMEO A BAJA FRECUENCIA			TENSION DE FLAMEO AL IMPULSO		
MEDIDAS	SECO	HUMEDO	MEDIDAS	POSITIVO	NEGATIVO
KV1	36	18	KV1	100.3	105
KV2	34	20	KV2	90	89
KV3	34	18	KV3	95	97
PROMEDIO [kV]	35	19	PROMEDIO [kV]	95	97

Tabla 4.10 valores de tensión de flameo a baja frecuencia y flameo crítico a impulso positivo y negativo.

Referencia: NORMAS ASTM D 3426, ASTM D 149, ANSI C29.2.



4.2 PRUEBA EN MATERIAL DIELECTRICO LÍQUIDO.

Estas pruebas tiene por objetivo, medir la rigidez dieléctrica en una muestra de aceite dieléctrico, según lo recomendado por la normas internacionales ASTM D 877, ASTM D 1816, además analizar cómo es afectado el factor de $\tan(\delta)$ del material líquido aislante como establece la norma ASTM D 924.

4.2.1 PRUEBA EN ACEITE.

4.2.1.1 RIGIDEZ DIELECTRICA EN AISLANTES LÍQUIDOS

La tensión de ruptura dieléctrica de un líquido aislante es la medida de la capacidad del líquido para soportar la tensión eléctrica sin fallas. Sirve para indicar la presencia de agentes contaminantes como el agua, la suciedad, fibras de celulosa, o la formación de partículas en el líquido, todos estos pueden estar presentes en concentraciones significativas. Sin embargo, un valor elevado de la tensión de ruptura dieléctrica no indica necesariamente la ausencia de todos los contaminantes, sino indica que las concentraciones de los contaminantes que están presentes en el líquido entre los electrodos, no son lo suficientemente grandes para afectar a la tensión de ruptura media del líquido durante la prueba.

4.2.1.2 ASTM D-877. MÉTODO DE PRUEBA PARA TENSIÓN DE RUPTURA DIELECTRICA DE AISLANTES LÍQUIDOS

Este método utiliza un recipiente con electrodos de caras planas, separados una distancia de 2.5 mm, además el valor de tensión de prueba deberá tener una tasa de crecimiento de 3 kV/seg. $\pm 20\%$.

La norma ASTM D-877, es recomendada para probar aceites en servicio o nuevos sin tratamiento previo, a la energización.



Fig.4.1 Electrodos de caras planas usadas en ensayo de ruptura para aceite dieléctrico



4.2.1.3 ASTM D-1816. MÉTODO DE PRUEBA PARA TENSIÓN DE RUPTURA DIELECTRICA DE LOS ACEITES AISLANTES DE ORIGEN PETROLÍFEROS.

Este método de prueba es aplicado en aceites derivados del petróleo comúnmente usados en cables, transformadores, interruptores en aceite, y aparatos similares como medio de aislamiento y refrigeración. Esta norma es más sensible a los nocivos efectos de la humedad en un líquido aislante. Consiste en utilizar un recipiente con electrodos de caras semiesféricas, con una separación de 0.04 pulgadas (1mm) o 0.08 pulgadas (2mm), la tensión de prueba deberá tener un aumento de 0.5 kV/seg \pm 20%.

La norma sirve para probar aceites contenidos en equipos nuevos y aceites que están siendo procesados previos a la energización del equipo.

4.2.2 DETERMINACIÓN DE RIGIDEZ DIELECTRICA EN ACEITE DIELECTRICO

En este método de ensayo se desarrolla el procedimiento establecido por la norma ASTM D 877, para determinar el voltaje de ruptura dieléctrica de la muestra de aislante líquido. La prueba de ruptura utiliza voltaje de corriente alterna en el rango de frecuencia de 45 a 65 Hz. Este método de prueba se utiliza para juzgar si la tensión de ruptura de líquidos aislantes es la proporcionada por el fabricante, tales muestras especifican que nunca han sido filtrados o secados.

La sensibilidad es una de las limitaciones del procedimiento, ya que disminuye, por la cantidad de contaminantes presentes en una muestra líquida, cuando se aplican tensiones de prueba.

Cuando se desea determinar el voltaje de ruptura dieléctrica de un líquido, hacer cinco o diez rupturas en un vaso de prueba llenado con aceite aislante, con intervalos de 1-min entre cada ensayo de ruptura. La media se considerará como el voltaje de ruptura dieléctrica de la muestra.



Fig. 4.2 Envase de prueba llenado con líquido aislante usado y nuevo.

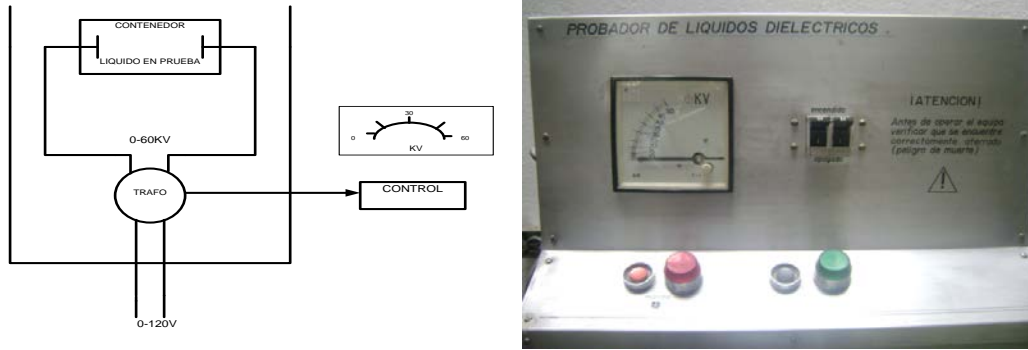


Fig. 4.3 Diagrama eléctrico para prueba de rigidez dieléctrica en aceites y equipo utilizado. Probador de líquidos dieléctricos, de laboratorio de alta tensión de la Escuela de Ingeniería Eléctrica.

4.2.3 RESULTADO OBTENIDOS DE LAS PRUEBAS

NORMA: ASTM D 877 METODO A							
TIPO: Aceite Mineral, tipo II INHIBIDO							
TEMP: 18 °C							
No contiene partículas de agua.							
Aceite usado muestra 1							
# Medición	1	2	3	4	5	6	Promedio
kV	16	15	20	22	23	18	19.6
Aceite usado muestra 2							
# Medición	1	2	3	4	5	6	Promedio
kV	17	18	20	22	21	18	19.8
Aceite relativamente nuevo muestra 3							
# Medición	1	2	3	4	5	6	Promedio
kV	26	24	19	21	28	19	22.2
Aceite nuevo muestra 4							
# Medición	1	2	3	4	5	6	Promedio
kV	23	25	26	24	23	27	25
Aceite nuevo muestra 5							
# Medición	1	2	3	4	5	6	Promedio
kV	32	35	34	33	35	33	34
Aceite nuevo muestra 6							
# Medición	1	2	3	4	5	6	Promedio
kV	32	32	33	31	32	31	32

Tabla 4.11. Valores de nivel de disrupción dieléctrica en aceites aislante.

Referencia: NORMA ASTM D 877 Disrupción dieléctrica en aceites aislantes, ASTM D 3487 Especificación estándar para aceites aislantes usados en aparatos eléctricos.



4.2.4 VERIFICACIÓN DE RESULTADOS CON LAS NORMAS ASTM.

Las pruebas realizadas a un líquido aislante, deben cumplir con ciertas normas, para que sea aceptado como un líquido aislante de buenas características, los niveles de tensión de rigidez dieléctrica obtenidos en el laboratorio, deben estar entre los siguientes niveles de tensión.

Nivel de tensión de ruptura	Estado de líquido aislante
mayor a 30 KV	Buen estado
entre 20-30 KV	Merece mejoramiento
menor a 19 KV	Mal estado (eliminar)

Tabla 4.12. Nivel de tensión de disrupción.

Referencia: Norma ASTM D-877 Disrupción dieléctrica en aceites aislantes, ASTM D 3487
Especificación estándar para aceites aislantes usados en aparatos eléctricos.

Los niveles de tensión de ruptura, establecidos para aceites dieléctricos aseguran que el líquido puede o no necesitar recuperación mediante secado, filtrado o cualquier otro método conocido y recomendado.



4.3 PRUEBAS EN MATERIALES DIELECTRICOS GASEOSOS.

La prueba se basa en el estudio experimental del comportamiento de los gases aislantes frente a altos voltajes, y la comprobación experimental de la Ley de Paschen. Se realizó pruebas de rigidez dieléctrica con una muestra de gas de nitrógeno y una muestra de aire seco en una cámara de presión para descarga. Se experimentó en un rango de presiones comprendidas entre 0.2 y 5 bar

4.3.1 GASES AISLANTES.

Además del aire existen otros gases que presentan propiedades aislantes superiores, cuyo uso se justifica por poseer una buena regeneración después de la descarga, además no son tóxicos y son relativamente económicos. El SF₆, CO₂, N₂ han permitido el diseño y construcción de sistemas encapsulados que ahorran notablemente el espacio disponible. Estos gases son electronegativos, es decir son ávidos de electrones, característica que permite el control de pre-descarga y de descargas en general.

Densidad del aire	1,18 kg/m ³ (a 25 °C)
Densidad del nitrógeno N ₂	1,2506 kg/m ³ (a 25 °C)
Densidad del SF ₆	6,164 kg/m ³ (a 20 °C, 1 atm)

Tabla. 4.13 Densidad de gases aislantes.

4.3.1.1 ASTM D-2477. MÉTODO DE PRUEBA ESTÁNDAR PARA DETERMINAR EL VOLTAJE DE RUPTURA Y RIGIDEZ DIELECTRICA DE GASES AISLANTES A FRECUENCIAS DE ENERGÍA INDUSTRIAL.

Este método de prueba cubre la determinación de la constante dieléctrica, tensión de ruptura y rigidez dieléctrica de gases aislantes, utilizados en transformadores, interruptores, cables y aparatos similares como medio aislante. Este método de ensayo utiliza electrodos planos o esféricos que proporcionan un campo casi uniforme en el área de descarga de energía eléctrica.

El método utiliza una cámara de presión para gas, compuesta por un cilindro de vidrio, completamente sellada, con electrodos esféricos. La tasa de aumento de tensión será de 0.5 kV / s \pm 20%.



4.3.1.2 MUESTREO

Obtener una muestra de gas aislante desde un cilindro de gas a presión, con una válvula reguladora para introducir el gas a la cámara, de modo que el flujo de gas a presión en la cámara pueda ser controlada. La muestra de gas y la cámara tienen que estar a temperatura ambiente antes de que el gas sea introducido en la cámara.



Fig.4.4 Cámara de presión y circuito de conexión para pruebas de rigidez dieléctrica en gases aislantes.

4.3.2 RESULTADOS DE ENSAYO EN GASES AISLANTES

Para realizar pruebas de rigidez dieléctrica en gas aislante, es necesario realizar el llenado de la cámara de prueba de la siguiente manera:

- ✓ Evacuar la cámara a una presión menor de 133 kPa (1 torr).
- ✓ Llenar la cámara con el gas de prueba a la presión atmosférica o ligeramente por encima.
- ✓ Nuevamente evacuar la cámara a una presión menor de 133 kPa (1 torr).
- ✓ Llenar la celda con el gas de prueba a la presión indicada de 5 bares (3750 torr) o a presión atmosférica y utilizar el factor de corrección para la tensión de ruptura si es necesario.
- ✓ Aplicar la tensión aumentando desde cero a un ritmo de aproximadamente 1/2 kV / s hasta que se produzca la ruptura como indica el funcionamiento del equipo.
- ✓ Hacer cinco pruebas y obtener el promedio correspondiente.
- ✓ Registre el voltaje de ruptura.
- ✓ Para poner a prueba una segunda muestra, repetir la purga y llenado como se realizó previamente.



TEMP: 21°C DISTANCIA: 1cm FREC: 60 Hz		GAS: AIRE SECO	GAS: NITROGENO
PRESION DE GAS		TENSIÓN DE DISRUPCIÓN	TENSIÓN DE DISRUPCIÓN
BAR N/cm ²	TORRICELIS (mmHg)	kV	kV
5,00	3750	61,31	67,32
4,80	3600	60,71	62,51
4,60	3450	58,30	59,50
4,40	3300	55,90	56,50
4,20	3150	54,09	55,30
4,00	3000	52,29	54,09
3,80	2850	49,29	52,89
3,60	2700	48,08	48,68
3,40	2550	46,28	47,48
3,20	2400	45,08	46,28
3,00	2250	43,27	43,88
2,80	2100	41,47	41,47
2,60	1950	39,07	40,27
2,40	1800	36,66	39,07
2,20	1650	36,06	37,87
2,00	1500	34,86	36,66
1,80	1350	32,46	34,26
1,60	1200	31,86	32,46
1,40	1050	30,05	27,05
1,20	900	26,45	25,84
1,00	750	25,84	25,24
0,80	600	22,24	24,04
0,60	450	19,83	21,64
0,40	300	16,23	21,04
0,20	150	14,42	14,42

Tabla 4.5 Valores de tensión de disrupción en gases aislantes.

Referencia: Norma ASTM D 2477 Tensión de ruptura dieléctrica y resistencia dieléctrica de gases de efecto aislante en las frecuencias de energía comercial.

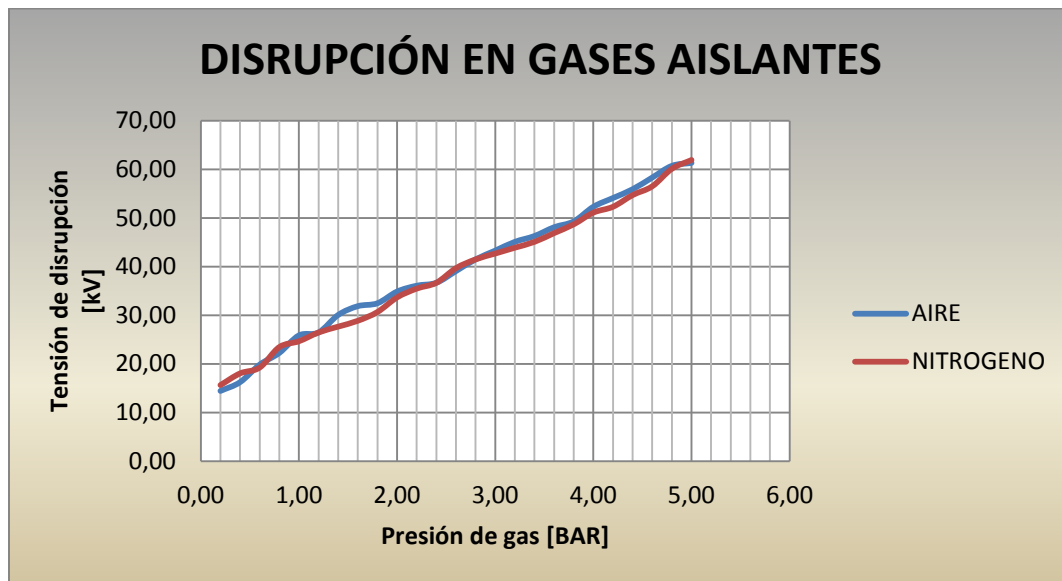


Fig. 4.5 Curva de disrupción de gases aislantes.

Referencia: Según Norma ASTM D 2477 Tensión de ruptura dieléctrica y resistencia dieléctrica de gases de efecto aislante en las frecuencias de energía comercial.



CAPITULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

5.1.1 ACEITES AISLANTES

Se realizaron cinco mediciones y se obtuvo el promedio a cada muestra de aceite, para lo que se contó, con dos muestras de aceite usado (muestra 1 y 2), uno aparentemente nuevo (muestra 3), y tres muestras de aceite nuevo (muestra 4,5 y 6), obteniendo los siguientes resultados:

Muestra 1:

- ✓ Se obtuvo un nivel de tensión de ruptura promedio de 19,6kV. No satisface las exigencias requeridas por la norma.

Muestra 2:

- ✓ Se obtuvo un nivel de tensión de ruptura promedio de 19,8kV. No satisface las exigencias requeridas por la norma.

Muestra 3:

- ✓ Se obtuvo un nivel de tensión de ruptura promedio de 22,2kV. No satisface las exigencias requeridas por la norma.

Muestra 4:

- ✓ Se obtuvo un nivel de tensión de ruptura promedio de 25kV. No satisface las exigencias requeridas por la norma.

Muestra 5:

- ✓ Se obtuvo un nivel de tensión de ruptura promedio de 34kV. Misma que satisface la exigencia de la norma.

Muestra 6:

- ✓ Se obtuvo un nivel de tensión de ruptura promedio de 32kV. Misma que satisface la exigencia de la norma. Esta medición se realizó, a la misma muestra 5, sin dejar reposar el aceite entre mediciones, por lo que claramente observamos un cambio en la tensión, por lo que necesariamente se debe regir a lo que dice la normas.



- ✓ El agua puede penetrar un recipiente a través de la más mínima abertura, o mediante el proceso normal de respiración causado por la expansión y contracción del aire en el recipiente.
- ✓ La coloración de un aceite dieléctrico es un identificador confiable para saber que un aceite necesita recuperación, sin conocer cualquier otra característica eléctrica de dicho aceite, siempre y cuando el aceite este completamente seco.
- ✓ La vida útil de un aceite dieléctrico es aproximadamente 10 años, cuando trabaja a temperatura entre 60 °C y 70 °C en cualquier equipo eléctrico de alta tensión.
- ✓ El envejecimiento del líquido aislante está en función del tiempo, de la temperatura, el contenido de humedad y el contenido de oxígeno. Con la tecnología para la conservación de aceite, se puede minimizar los niveles de humedad, y de oxígeno que contribuyen con el deterioro del aislamiento, dejando a la temperatura del aislamiento como único parámetro de control.
- ✓ Para determinar el estado del aceite en un equipo eléctrico de alta tensión, se utiliza comparaciones con estándares nacionales e internacionales de límites máximos y mínimos. Con estos valores, se calcula el índice de calidad, el cual nos permite estimar el tiempo vida de servicio del aceite dieléctrico.
- ✓ El factor de disipación o factor de potencia puede ser útil como un medio de control de calidad, y como una indicación de los cambios en la calidad.
- ✓ Si se cambian los aceites con índices de calidad bajos, de los dispositivos de alta tensión, y no se regeneran, causa que:
 - El aceite nuevo que entra, se deteriora al actuar como solvente de los productos de oxidación impregnados en su interior.
 - Hay la oportunidad de no dar un tratamiento ambiental al aceite malo que se retira del equipo.
 - El aceite malo es recuperable y por tanto es dinero que se está perdiendo.
- ✓ El proceso de recuperación de aceites aislantes con tierras fuller ayuda con la absorción de ácidos que deterioran las condiciones físicas, químicas del aceite aislante.
- ✓ La aplicación de tierra fuller ayuda con la remoción de lodo, con esto se tiene la certeza de que se puede aumentar los años de vida útil de estos equipos.



5.1.2 GASES AISLANTES

- ✓ Una mayor tensión de ruptura en un gas, significa que el equipo que este utiliza, va a tener una mejor vida útil, que otro que tenga como aislante un gas con una tensión de ruptura menor.
- ✓ El nivel de tensión de disrupción del aire y el nitrógeno, en las mismas condiciones de presión, varía 1kV aproximadamente, como se puede apreciar en los datos obtenidos, por lo que se puede recomendar utilizar el nitrógeno como material aislante y refrigerante frente al aire.
- ✓ La tensión de ruptura y rigidez dieléctrica de un gas aislante en un campo uniforme depende principalmente de la estructura molecular del gas.
- ✓ Un flujo de corriente prolongado en el momento de prueba de la ruptura dieléctrica, causa la contaminación en el gas y daño de los electrodos, lo que afecta a los resultados de una prueba de ensayo.
- ✓ La humedad de un gas aislante es muy importante, ya que si el valor de H_2O en ppm dentro de un equipo eléctrico, supera los niveles establecidos por lo fabricantes, obligatoriamente el gas necesita ser recuperado.
- ✓ La presión de un gas aislante dentro de un equipo de alta tensión es muy importante, ya que, a la mínima variación de presión dentro del equipo producido por una fuga cambia notablemente el valor de la tensión de ruptura, esta variación de presión pueden causar que el equipo de alta tensión no proporcione la aislación para la que fue diseñada y fabricada.
- ✓ Un gas para fines de aislamiento eléctrico, mientras mayor sea su densidad molecular, mayor prestación tendrá para extinguir un arco eléctrico provocado en un interruptor u otro equipo de desconexión eléctrica de alta tensión.
- ✓ Los equipos de interrupción para cualquier nivel de tensión deberán ser de veloz rearme de las propiedades dieléctricas del medio de extinción.
- ✓ Tanto en los equipos eléctricos de SF_6 como los de vacío pueden ser considerados como exentos de mantenimiento, estos cumplen los requisitos de clase B establecidos en la norma IEC 60056, la cual indica que: “Un interruptor automático de clase B está diseñado para que las piezas interruptoras no necesiten mantenimiento durante la vida útil prevista para el mismo, únicamente el resto de las piezas necesitarán mantenimiento, que será mínimo”.



5.1.3 AISLADORES

- ✓ Para ensayos de prueba en aisladores de porcelana y vidrio, se deben realizar de tal forma que la limpieza y secado de cada elemento sea la mejor, así los resultados son los mejores, y se puede hacer una buena evaluación.
- ✓ Los aisladores de porcelana y vidrio que estén en mal estado sin importar el grado de daño, no califican para realizar ensayos, estos malos elementos deben ser descartados y llevados para su respectivo reciclaje o desecho.
- ✓ Los aisladores de porcelana que han sufrido daños en su superficie, no alcanzan el nivel de tensión de flameo en AC o al impulso, ya que de cierta forma han perdido parte de sus características eléctricas, mecánicas, las mismas que afectan considerablemente en los resultados esperados.
- ✓ Los niveles de tensión de flameo y de impulso obtenido en los ensayos practicados a los aisladores de porcelana, son inferiores a los establecidos por el Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, ya que después de hacer la prueba visual a cada elemento, estos tienen defectos estructurales visibles, debido al mal mantenimiento dado en laboratorio, previo a las pruebas, pero esto no descarta que pueden ser usados para el propósito prescrito.
- ✓ Los niveles de tensión para las pruebas de flameo al impulso positivo y negativo son muy elevados, por lo que el aislamiento usado en laboratorio no satisfacen las demandas de las pruebas.
- ✓ Los aisladores que se usan en la industria eléctrica ecuatoriana, son en su mayoría importados, el estado ecuatoriano debería contar con fábricas exclusiva de aisladores.
- ✓ En el ensayo de tensión alterna a frecuencia industrial aplicada a cada muestra de aislador, se le aplica una tensión, que en ningún caso deberá ser menor al 90 % de la tensión de flameo obtenida en el ensayo a frecuencia industrial en seco. Se les aplica durante 30 minutos la tensión de prueba, con esta tensión no deben ocurrir perforaciones, descargas parciales, flameo, ni exceder los 20°C de la temperatura del cuerpo del aislador medido inmediatamente después del ensayo, con esta prueba se puede asegurar que el aislador probado puede seguir operando sin que sea reemplazado, y terminar con su ciclo de operación establecido.
- ✓ Los aisladores de vidrio templado o recocido tienen un proceso de envejecimiento bajo y alta resistencia dieléctrica y mecánica.
- ✓ En aisladores poliméricos el valor de tensión que produce un efecto corona se determinara en 4 ensayos con un mínimo y un máximo, sin llegar a la ruptura



dieléctrica, y el menor valor de las tensiones medidas se considerará como el valor de la tensión de extinción del efecto corona. El elemento bajo prueba se considerará aprobado si la tensión de extinción es mayor o igual al 110% de la tensión nominal fase-tierra correspondiente.

5.2 RECOMENDACIONES

5.2.1 ACEITES AISLANTES

- ✓ El agua, el polvo presente en el ambiente, afectan a las propiedades eléctricas de los aceites aislantes. Por esa razón se deben hacer pruebas rutinarias en laboratorio para analizar aceites dieléctricos y verificar que estén secos y limpios.
- ✓ Para evitar una posible contaminación, la transferencia del aceite, se debe hacer a recipientes que cumplan con los requisitos para almacenar aceite dieléctrico, y que no solo deben estar limpios y secos, sino que estén dedicados exclusivamente al servicio de almacenamiento de aceites aislantes.
- ✓ Un requisito que debe cumplir un buen aceite es el contenido de agua en un bajo nivel (menor a 35 ppm) y de otros compuestos contaminantes para evitar la degradación acelerada del aceite.
- ✓ La presencia del aire causa la oxidación, todos estos contaminantes son responsable de la formación de lodos e incrementan las pérdidas dieléctricas.
- ✓ El transporte de un líquido aislante es muy importante y debe hacerse en envases como recomienda la norma y de igual manera para el transporte.
- ✓ La prueba y comprobación del tono de color de un aceite dieléctrico, no siempre es una ayuda para determinar la calidad del líquido, es necesario realizar pruebas adicionales para comprobar que el aceite no contiene humedad o impurezas.
- ✓ La limpieza de los instrumentos de laboratorio previo a la ejecución de los ensayos en líquidos aislantes es de mucha importancia, además realizar la limpieza como recomienda la norma vigente, sin excepción de equipos.
- ✓ El nivel de llenado de aceite dieléctrico en el recipiente de vidrio para la prueba correspondiente debe ser tal que cubra en su totalidad los electrodos planos, el cual, el nivel del espejo del aceite esté a aproximadamente 2 cm sobre la parte superior de los electrodos.



- ✓ Antes de cada ensayo, revisar que el líquido aislante no contenga partículas de polvo, lodos, agua, para establecer las condiciones del líquido para el ensayo.
- ✓ Para el ensayo de prueba de rigidez dieléctrica de un aceite, es muy importante dejar reposar el líquido después del ensayo según lo recomendado, además remover las burbujas de aire entre los electrodos planos.
- ✓ Para el cambio de aceite de prueba, realizar la limpieza del recipiente, sin que queden en su interior pelusas, aceite viejo, polvo, agua, y cualquier otra partícula que pueda dañar la muestra nueva de aceite.
- ✓ Según norma y reglamento si el aceite dieléctrico se entrega a granel, los primeros 10 a 12 galones, que se saquen del fondo de un compartimento o tanque, deben eliminarse, esta es la porción que puede contener agua y su eliminación es una buena inversión para mantener la calidad.
- ✓ Es conveniente efectuar análisis al aceite con una frecuencia determinada por las condiciones propias del servicio.
- ✓ Tener cuidado para que los recipientes no sufran golpes, choques u otros desgastes durante el almacenamiento o transporte, además tener igual o mayor cuidado en la descarga del producto.
- ✓ Tener cuidado al transportar el líquido aislante, no permitir que entre en contacto con el medio ambiente, ya que es afectado significativamente en los resultados esperados después de los ensayos.
- ✓ La cámara de prueba para aceites debe ser totalmente impermeable, para tener una buena rutina de ensayos.

5.2.2 GAS AISLANTE

- ✓ En la realización de los ensayos de pruebas, para determinar la rigidez dieléctrica en gases como el aire, verificar que el gas contenga una humedad menor al 100%, o que se sepa que es gas seco.
- ✓ No se debe hacer escapar gas como el nitrógeno en lugares cerrados, ya que este gas realiza un desplazamiento de las partículas de oxígeno y pueden causar asfixia.
- ✓ Verificar que tanto válvulas como mangueras de presión estén en perfectas condiciones, y que no existan fugas en ningún momento y por ninguna circunstancia.



- ✓ Procurar que, para obtener la muestra de gas desde el cilindro de gas hasta el equipo a través de una válvula reguladora de presión, tanto la muestra como la cámara de prueba deben estar a temperatura ambiente.
- ✓ Verificar que la válvula de cierre y apertura de la cámara de presión para prueba de rigidez dieléctrica, este completamente cerrada, para que la cámara no pierda su presión cuando se esté realizando los ensayos pertinentes.
- ✓ Realizar el llenado y vaciado de gas en la cámara de presión como dicta la norma específica para la realización de las pruebas de rigidez dieléctrica.
- ✓ Se recomienda limpiar la cámara de presión con excepción de los electrodos, además se recomienda realizar el lavado de los electrodos con jabón o detergente y luego enjuague con agua destilada o desmineralizada.
- ✓ Limpiar la cámara de presión cuando sea necesario para eliminar los productos de descomposición detectables, formado por el arco de ruptura, o cuando se realicen ensayos de pruebas con distintos gases.
- ✓ Según la norma recomendada, realizar la limpieza de los electrodos con un paño de azafrán y nafta.
- ✓ El manejo del gas aislante se realiza con sistemas de filtros, compresores, bombas de vacío, así se puede garantizar que los ensayos practicados en cada muestra están bien elaborados.
- ✓ Los modernos interruptores de SF₆ y de vacío están sellados permanentemente, por lo que tienen sistemas sofisticados de diagnóstico, para medir la presión del gas o el grado de vacío.
- ✓ Para el almacenamiento de gases aislantes utilizar un sistema de inventario con fecha de ingreso y egreso de las unidades, para evitar que cilindros llenos queden almacenados durante períodos excesivamente largos.
- ✓ Para gases dieléctricos usados en la industria eléctrica de alta tensión, el protocolo de Kyoto exige desde el año 2009 que toda manipulación de estos gases aislantes, sea reportada y realizada por personal certificado.
- ✓ El personal que maneja el gas SF₆ debe tener mejores prácticas y mejores normas de seguridad para evitar la asfixia en lugares cerrados.



5.2.3 AISLADORES DE PORCELANA, VIDRIO.

- ✓ Para los ensayos de laboratorio verificar siempre que los instrumentos de conexión, medida, y elementos para prueba estén en excelentes condiciones, y que sean las apropiadas, caso contrario no realizar las pruebas establecidas.
- ✓ Para la ejecución de pruebas de flameo revisar con detenimiento la norma establecida ANSI C29.1, caso contrario no ejecutarlas.
- ✓ Los niveles de tensión que se están manejando en las pruebas de flameo a frecuencia industrial y de impulso son muy altas, por lo que se deben tomar las precauciones, como dicta las normas de seguridad.
- ✓ Los laboratorios para pruebas en altas tensiones deben contar con la infraestructura, equipos de medición, equipos de conexión necesarios y estar totalmente acondicionadas, para brindar resultados de ensayos, que se puedan usar para fines prácticos, en la industria eléctrica ecuatoriana.
- ✓ Antes de iniciar con los ensayos establecidos, como indican las normas IEEE std 4, IEC 61109, ANSI C29.1, ANSI C 29.2, ANSI C29.6, ASTM D 3426, ASTM D 149 y demás que convengan, los aisladores separados deben estar limpios, secos y en equilibrio térmico con el medio ambiente.
- ✓ Los ensayos realizados a los aisladores de porcelana y vidrio templado o de vidrio recocido deben ser mecánicos, químicos, eléctricos.
- ✓ En los aisladores de porcelana bajo ensayos de prueba, mientras más pruebas se les realice, el valor de tensión de disrupción disminuye por el efecto de ionización del aire circundante, por esa razón se debe tomar un tiempo de guarda para realizar la siguiente prueba.
- ✓ Cuando se presente un daño en un aislador, por fenómenos naturales, eléctricos, mecánicos, se recomienda remplazar el aislador, bien sea que presente o no daño visible.
- ✓ Cuando una cadena de aisladores ha sufrido daños, tales como una excesiva corriente de fuga, se recomienda que se remplace todos los aisladores de la cadena y no aquellos aparentemente afectados.
- ✓ En casos de extrema necesidad, se podrían efectuar pruebas mecánicas y/o eléctricas para comprobar las características de los aisladores aparentemente no afectados.



- ✓ En el caso de aisladores que se han desmontado de las líneas se debe proceder según lo recomendado a efectuar inicialmente una inspección visual con el fin de separar aquellos aisladores que presenten grietas, fisuras, desbordes, separándolos como piezas defectuosas.
- ✓ Con los aisladores que no presenten deterioros superficiales, se tiene que proceder a efectuar inicialmente pruebas mecánicas de rutina y luego pruebas eléctricas de rutina, con el fin de verificar sus características electromecánicas. En caso de que los resultados de ambas pruebas sean satisfactorios, los aisladores desmontados deben tomarse como un lote y tienen que ser sometidos a pruebas de conformidad con norma según Norma ANSI C29.1-88, para poderlos reutilizarlos.
- ✓ Para aisladores, el ensayo de prueba para determinar la tensión de flameo a frecuencia industrial en seco, deberá ejecutarse sobre tres aisladores de cada tipo, y determinar el valor promedio de tensión de flameo, aplicando cinco veces la tensión. El valor obtenido será corregido con base en las condiciones atmosféricas estándar, según la norma ANSI C 29.1, IEC 60060-1. Los impulsos de tensión se aplicarán incrementados desde cero y linealmente en un lapso de un minuto.

✓ Seguridad:

Siempre debe considerarse la seguridad de la red eléctrica, del equipo que se usa y del personal que realiza la prueba, puesto que se trabajará con altos niveles de energía que resultan peligrosos para el operador del equipo, las medidas de protección deben comprender para el caso de un cortocircuito que pueda dañar a la red o a los equipos. Como especifica en las normas ASTM D-3426 "Tensión de ruptura dieléctrica para material de aislamiento sólido", ANSI C29.1 "Pruebas de altas tensiones en aisladores" y IEC 60243-3 especifican que los materiales en prueba se llevarán al caso límite de ruptura dieléctrica lo que puede ocasionar fuego, por eso se hace necesario contar con los equipos adecuados para afrontar estos casos.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Ing. MERCHÁN MANZANO HERNANDO, Manual de laboratorio de alta tensión. Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Cuenca.
- [2] VON BEEREN HANS, Técnicas de alta tensión, La escuela del técnico electricista, Enciclopedia práctica de electricidad aplicada, Editorial Labor S.A.
- [3] ROTH ARNOLD, Técnicas de Alta Tensión, Editorial Labor, S.A, Labor 1966
- [4] MENA ALFREDO, CURSO DE ALTA TENSION, EPN, 1973).
- [5] FERNÁNDEZ JUAN C, Electromagnetismo - Departamento de Física – Facultad de Ingeniería Universidad de Buenos Aires. [http:// www.fi.uba.ar](http://www.fi.uba.ar)
- [6] VÁZQUEZ JOSÉ RAMÍREZ. Enciclopedia CEAC de electricidad, Instalaciones Eléctricas Generales/cables subterráneos. Ediciones CEAC, S.A. España
- [7] UNIVERSIDAD IBEROAMERICANA. México D.F. Constante dieléctrica relativa. Departamento de Física y Matemáticas. México.
- [8] IEEE. Std4`-1978. Pruebas estándar para pruebas en altas tensiones.
- [9] AGENCIA DE PROTECCIÓN AMBIENTAL EPA. Conferencia internacional sobre SF6 y el medio ambiente: estrategias de reducción de emisiones. 2002. <http://www.epa.gov/highgwp1/sf6/2002>.
- [10] KUFFEL, HIGH VOLTAGE ENGENIERING, Pergamon Press.
- [11] ASEA BROWN BOVERI, S.A. Declaración Medioambiental año 2010, Departamento de Calidad y Medio Ambiente.
- [12] HICKERY D.L & MOORE P.J High-speed Imaging of AC Corona for Voltage Measurement International Symposium of High Voltage Engineering, 2007
- [13] NIEMEYER LUTZ, Guía para mezcla de gas sf6, aplicación y manejo en equipos eléctricos de potencia, ABB Corporate Research Centre.



REFERENCIAS

- [1] ASTM D 2864-02 Standard Terminology Relating to Electrical Insulating Liquids and Gases.
- [2] ANSI C29.1-88 Método de prueba para aisladores eléctricos de potencia
- [3] ASTM D 3487-00 Standard Specification for Mineral Insulating Oil Used in Electrical Apparatus.
- [4] ASTM D 877-00 Dielectric Breakdown Voltage of Insulating Liquids Using Disk Electrodes.
- [5] ASTM D 3426-97 Dielectric Breakdown Voltage and Dielectric Strength of Solid Electrical Insulating Materials Using Impulse Waves.
- [6] ASTM D 2472-00 Standard Specification for Sulfur Hexafluoride.
- [7] ASTM D 2477-00 Dielectric Breakdown Voltage and Dielectric Strength of Insulating Gases at Commercial Power Frequencies.
- [8] ASTM F-356-91 Standard Specification for Beryllia Ceramics for Electronic and Electrical Applications.
- [9] ASTM D 3426-97 Dielectric Breakdown Voltage and Dielectric Strength of Solid Electrical Insulating Materials Using Impulse Waves.
- [10] NTE INEN 2 125:98 Transformadores. Pruebas del dieléctrico.
- [11] NTE INEN 2 133:98 Transformadores. Aceites aislantes para transformadores e interruptores. Requisitos.
- [12] [http:// www.repsolypf.com](http://www.repsolypf.com). Circulares técnicas.
- [13] <http://www.chevronlubricants.com/trnsfrmroiluninhbitd/ee/pdsv>. Aceite de eficiente rendimiento para transformadores.
- [14] <http://www.brushwellman.com/brush>. Productos cerámicos.
- [15] <http://www.exportquim.com/aceites para transformadores>.
- [16] <http://www.abb.com/global/boabb/boabb011.nsf/Sectos-MAM-V3-Marcelo.pdf>
- [17] http://www.epa.gov/electricpower-sf6/documents/conf06_glaubitiz_ploger.pdf
- [18] http://www.epa.gov/electricpower-sf6/documents/conf09_stokes.pdf.



- [19] http://www.epa.gov/electricpower-sf6/documents/conf00_lo_paper.pdf
- [20] http://www.epa.gov/highgwp/electricpowersf6/documents/conf04_montillet_barbier.pdf
- [21] <http://encyclopedia.airliquide.com/encyclopedia.asp>.
- [22] CIGRE WG 23-02, "Guide for SF6 gas mixtures," CIGRE technical brochure 163, August 2000, available via. <http://www.cigre-sc23.org/publications>.
- [23] CIGRE WG 23-03, "Handling of SF6 and its decomposition products in gas insulated switchgear (GIS)," ELECTRA 136, June 1991, 69-89 (part 1) and 137 (August 1991), 81-105 (part 2).
- [24] Investigación fundamental sobre interruptores aislados en gas SF6 adoptando gas CO2 y sus mezclas.



ANEXO A

NORMAS ASTM PARA PRUEBAS DE RUTINA EN ACEITES DIELECTRICOS

ENSAYOS RUTINARIOS

PRUEBAS DE LABORATORIO	NORMA ASTM
Determinación de tensión de ruptura usando electrodos esféricos	D 1816
Determinación de tensión de ruptura usando electrodos de discos	D 877
Determinación del número de neutralización	D 974
Determinación de agua en aceite método de karl fisher	D 4928
Determinación de factor de potencia y constante dieléctrica	D 924
Determinación de la tensión interfacial	D 971
Determinación del color	D 1500
Determinación del contenido humedad	D 1533
Análisis de gases disueltos cromatografico de gases disueltos	D 3612
Determinación del punto de inflamación para aceites minerales	D 5222
Determinación de la gravedad especifica	D 1298
Muestreo de líquidos aislantes para prueba de gases y determinación de contenido de agua	D 3613

ENSAYOS ESPECIALES

PRUEBAS DE LABORATORIO	NORMA ASTM
Determinación del punto de anilina	D 611
Resistencia especifica (resistividad)	D 1169
Determinación de compuestos de azufre	D 1275
Estabilidad de oxidación	D 2112
Determinación del punto de inflamación por copa abierta	D 92
Determinación de punto de inflamación por copa cerrada	D 93-02
Determinación del contenido de inhibidor	D 2668
Determinación de la viscosidad dinámica y cinemática	D 445

ANEXO B

RESUMEN DE NORMAS ASTM PARA PRUEBAS DE RUTINA EN:

DIELÉCTRICOS SOLIDOS

PRUEBAS DE LABORATORIO	NORMA ASTM
Estandar americano para aisladores de potencia, método de ensayo	ANSI C 29.1-88
Tensión de ruptura dieléctrica y rigidez dieléctrica de materiales sólidos de aislamiento eléctrico con ondas de impulso.	D 3426-97
Tensión de ruptura dieléctrica y rigidez dieléctrica de materiales sólidos de aislamiento eléctrico en frecuencia industrial.	D 149-97
coeficiente de expansión térmica	E 228-95
Conductividad	C 408-88
calor específico	C 351-92B
Características de pérdidas AC y permitividad, constante dieléctrica	D 150-98 D 2520
Resistencia DC o conductancia volumétrica	D 257
Método de prueba para material cerámico vitrificado para aplicaciones eléctricas	D 116
Densidad	C 373
Dureza	E 18-96
Promedio de tamaño de grano	E 112-96
Impenetrabilidad de líquido	E165-95
Fuerza de flexibilidad	F 417-78
Módulo de elasticidad	C 623-92
Relación de Poisson	C 565-93
Fuerza de compresión	C 773-88
Prueba de grosor de aislación eléctrica en solidos	D 374



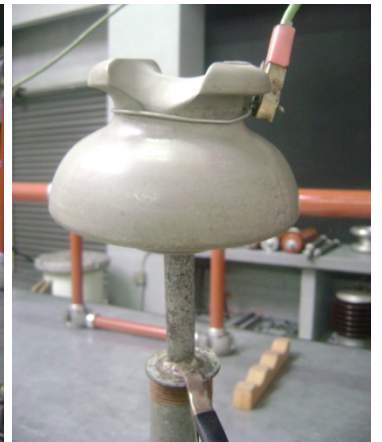
ANEXO C

COMPORTAMIENTO DEL DIELECTRICO DE AISLADORES

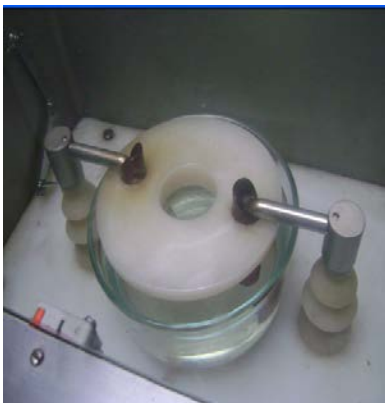
COMPORTAMIENTO RESIDUAL DEL DIELECTRICO DAÑADO EN AISLADORES			
	VIDRIO TEMPLADO	PORCELANA	POLÍMEROS
MECÁNICO	RESIDUAL ARIIBA DEL 80% DEL VALOR NOMINAL	PUEDE SER IGUAL O PRÓXIMO A 0% DEL VALOR NOMINAL	PUEDE SER IGUAL O PRÓXIMO A 0% DEL VALOR NOMINAL
ELÉCTRICO	ARCO EXTERNO A LA UNIDAD REMANESCIENTE	ARCO INTERNO CON RIESGO DE EXPLOSIÓN	NO PUEDE SER PREVISTO, DEPENDE DE LA VARIEDAD DE CASOS Y SITUACIONES
RIESGO DE EVOLUCIÓN CRITICA	NINGÚNO	ALTO	ALTO
OPERACIÓN DE MANTENIMIENTO	NO URGENTE	URGENTE	URGENTE

ANEXO D

RUTINA DE ENSAYOS EN AISLADORES DE PORCELANA CLASE ANSI, PARA DETERMINAR TENSIÓN DE FLAMEO.



ANEXO E RUTINA DE ENSAYO EN ACEITES, PARA DETERMINAR RIGIDEZ DIELÉCTRICA.



ANEXO F

RUTINA DE ENSAYO EN DIELECTRICOS GASEOSOS NITROGENO, AIRE SECO.

