

**INSTRUCTIVOS PARA PRUEBAS TAN δ BAJO LA TECNOLOGÍA VLF
(VERY LOW FREQUENCY) Y PRUEBAS HIPOT EN DC Y VLF, PARA
CABLES ELÉCTRICOS DE MT (MEDIA TENSIÓN), MÁQUINAS
ROTATIVAS Y TRANSFORMADORES, CON BASE EN ALGUNAS
NORMAS IEEE.**



**JOHN FREDY BAUTISTA REYES
JORGE TULIO VILLEGAS CRUZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2011**

INSTRUCTIVOS PARA PRUEBAS TAN δ BAJO LA TECNOLOGÍA VLF (VERY LOW FREQUENCY) Y PRUEBAS HIPOT EN DC Y VLF, PARA CABLES ELÉCTRICOS DE MT (MEDIA TENSIÓN), MÁQUINAS ROTATIVAS Y TRANSFORMADORES, CON BASE EN ALGUNAS NORMAS IEEE.



**John Fredy Bautista Reyes
Jorge Tulio Villegas Cruz**

**TESIS DE GRADO EN LA MODALIDAD INVESTIGACIÓN PARA
OPTAR AL TÍTULO DE INGENIEROS ELECTRICISTAS**

***Director, Profesor*
Ingeniero José Alejandro Amaya Palacio. MIE
Codirector, Profesor
Ingeniero Julio César Chacón Velasco. MPE**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICIONES
BUCARAMANGA
2011**

Dedicatoria

A los dos seres más importantes en mi vida, con corazones inmarcitrables, dos seres que desde que me dieron la vida hasta hoy y hasta siempre, no hacen otra cosa que darme apoyo, respaldo para derribar obstáculos, enemigos, cargas o problemas a las dos personas más generosas que he conocido, quienes con paciencia me ha impulsado a llegar a meta, pues siempre me han enseñado solo una ruta en la vida, una vía donde solo se avanza, a ti Doña Gloria madre mía y a ti padre, quienes siempre ha impulsado mi inquietud por aprender.

George

A mis padres, Jesus y Candelaria las dos personas más importantes en mi vida, las cuales a pesar de las dificultades y los mal entendidos, siempre han estado ahí para apoyarme y darme fuerzas de seguir adelante y lograr conseguir los objetivos que me he trazado en mi vida.

John Fredy

AGRADECIMIENTOS

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

Agradezco a los profesores José Alejandro Amaya y Julio Cesar Chacón por haber confiado en mi persona, por la paciencia y por la dirección de este trabajo, a los demás profesores que hicieron parte de mi formación profesional.

Gracias también a mis padres, mi hermana por su apoyo, a mis tíos, primos y mis queridos compañeros, que me apoyaron y me permitieron entrar en su vida durante años de convivir dentro y fuera del salón de clase. Samuel, José Luis, Lugo, German, Jorge, Marwin, Lennis, Sergio, Pacho, Deyny, Ricardo, Grass, gracias.

A William Flórez, mi amigo que me brindó sus conocimientos y su apoyo y la posibilidad de crecer como persona.

A Yudy Viviana, que a pesar de la distancia siempre estuvo atenta para saber cómo iba mi proceso, desde un principio hasta el día hoy sigues dándome ánimo para terminar este proceso.

A los ingenieros Jorge Urquijo y Alexander Pinzón, por la oportunidad que me brindaron para llevar a la práctica los conceptos adquiridos durante mi estadía en la academia, y por el aporte entregado a esta tesis de grado.

John Fredy

AGRADECIMIENTOS

A mi padre, a mi madre, a mis hermanos en especial a Johana, a mi tía Lau, mi abuela Lola, también al resto de mi familia por sus buenos deseos para conmigo, a muchos amigos que han pasado por mi vida sin antes no dejar una enseñanza, en especial a Juan Carlos Silva quien me ha enseñado a transformar el rencor en ideas positivas, otros amigos que no puedo olvidar son Deiny, Marelvís, Erica x 2, Samanta, Yury, Yormith, Mayo, shaggy, Manolin, Sergio chori, chepito, Marwin, Topis, Sam, pacho, Lennis, Wilson, Diegol, Ricardo, Escamilla, Vetas, Bautista, Lazaro, kinny, Boyaco, Capi, Vlacho, Vargas en fin tendría que escribir dos libros nombrando personas que me han enseñado algo bueno o malo.

A dos grandes profesionales de ingeniería, dos excelentes docentes, dos geniales amigos, a mis directores de proyecto José Alejandro Amaya Palacio y Julio César Chacón Velasco, quienes siempre guiaron este barco que estaba a punto del naufragio, llevándolo a tierra firme, convirtiendo las preguntas en pisadas sobre la arena, dejando huella, gracias a sus consejos hoy pude cumplir una promesa hecha mucho antes de subir a bordo.

A una persona cuyo amor por esta carrera y por la temática de este trabajo de grado me alentó a seguir insistiendo en llegar a puerto, gracias Doctor Rúgeles, solo me basta verlo hablando de temas que exigen no solo nuestra mayor concentración sino un esfuerzo imaginativo para recrear en nuestras mentes eventos que para muchos son una prueba de fe pero al igual que la esta se debe primero creer.

A tres profesores que más que profesores son maestros Gerardo Latorre, quien salvo mi vida académicamente hablando y a dos más que recordare no solo por sus clases si no por sus sonrisas y la pasión con la que abordan los temas de sus asignaturas Julio Gelvez y Gabriel Ordoñez.

George

CONTENIDO

	Pág
INTRODUCCIÓN	- 19 -
OBJETIVOS	- 20 -
OBJETIVO GENERAL	- 20 -
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	- 20 -
1 PRUEBAS A EQUIPOS ELÉCTRICOS.	- 21 -
1.1 PRUEBAS HIPOT.	- 21 -
1.2 PRUEBAS TAN δ .	- 25 -
1.3 APLICACIÓN DE PRUEBAS HIPOT.	- 31 -
1.3.1 Pruebas hipot a cables de potencia	- 31 -
1.3.2 Pruebas Hipot a máquinas rotativas.	- 36 -
1.3.3 Pruebas Hipot a transformadores de potencia.	- 39 -
1.4 APLICACIÓN DE PRUEBAS TAN δ .	- 39 -
1.4.1 Pruebas Tan δ a cables de potencia.	- 40 -
1.4.2 Pruebas Tan δ a máquinas rotativas.	- 41 -
1.4.3 Pruebas Tan δ a Transformadores.	- 44 -
2 DESCRIPCION DE LOS INSTRUCTIVOS DE PRUEBA.	- 50 -
3 ANÁLISIS DE RESULTADOS	- 58 -
3.1 RESULTADO DE LA PRUEBA A CABLES DE MT.	- 59 -
3.1.1 Resultado de la prueba hipot DC a cables de MT.	- 59 -
3.1.2 Resultado de la prueba hipot VLF a cables de MT.	- 62 -
3.2 RESULTADO DE LA PRUEBA A MÁQUINAS ROTATIVAS.	- 64 -
3.2.1 Resultado de la prueba Tan δ VLF a máquinas rotativas.	- 65 -

3.3	RESULTADO DE LA PRUEBA A TRANSFORMADORES.	- 66 -
3.3.1	Resultado de la prueba Tan δ VLF a transformadores.	- 67 -
4	CONCLUSIONES	- 68 -
5	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.	- 70 -
6	ANEXOS	- 72 -

LISTA DE TABLAS

	Pág.
TABLA 1: VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE USAR PRUEBAS DC Y VLF.	- 23 -
TABLA 2: ALCANCE DE LAS PRUEBAS HIPOT Y TAN Δ .	- 30 -
TABLA 3: TENSIONES DE PRUEBA HIPOT DC.	- 33 -
TABLA 4: TENSIONES DE PRUEBA HIPOT VLF-ONDA COSENO RECTANGULAR.	- 34 -
TABLA 5: TENSIONES DE PRUEBA HIPOT VLF-ONDA SINUSOIDAL.	- 34 -
TABLA 6: TIEMPOS PARA PRUEBA HIPOT DC.	- 35 -
TABLA 7: TIEMPOS PARA PRUEBA HIPOT VLF.	- 36 -
TABLA 8: TENSIONES PARA PRUEBA HIPOT.	- 38 -

LISTA DE FIGURAS

	Pág
FIGURA 1: CIRCUITO EQUIVALENTE PARALELO DE UN AISLAMIENTO.	- 27 -
FIGURA 2: DIAGRAMA FASORIAL DEL CIRCUITO PARALELO DE UN AISLAMIENTO.	- 27 -
FIGURA 3: CIRCUITO EQUIVALENTE SERIE DE UN AISLAMIENTO.	- 27 -
FIGURA 4: DIAGRAMA FASORIAL DEL CIRCUITO SERIE DE UN AISLAMIENTO.	- 28 -
FIGURA 5: ESQUEMA DE MEDICIÓN DE LA TAN Δ .	- 29 -
FIGURA 6: ANÁLISIS GRAFICO PARA TAN Δ .	- 30 -
FIGURA 7: DIAGRAMA DE CONEXIÓN PARA HIPOT A CABLES DE POTENCIA.	- 32 -
FIGURA 8: DIAGRAMA DE CONEXIÓN PARA PUEBAS HIPOT A MÁQUINAS ROTATIVAS.	- 37 -
FIGURA 9: DIAGRAMA DE CONEXIÓN PARA PRUEBAS TAN Δ A CABLES ELÉCTRICOS DE MT.	- 40 -
FIGURA 10: DIAGRAMA DE CONEXIÓN PARA PRUEBAS TAN Δ A MÁQUINAS ROTATIVAS.	- 42 -
FIGURA 11: DIAGRAMA DE CONEXIÓN DE PUENTES PARA LOS DEVANADOS DEL TRANSFORMADOR.	- 45 -
FIGURA 12: DIAGRAMA DE CONEXIÓN PARA PRUEBAS TAN Δ A TRANSFORMADORES EN LA ETAPA 1.	- 45 -
FIGURA 13: DIAGRAMA DE CONEXIÓN PARA PRUEBAS TAN Δ A TRANSFORMADORES EN LA ETAPA 2, CON SISTEMA DE PUESTA A TIERRA.	- 46 -
FIGURA 14: DIAGRAMA DE CONEXIÓN PARA PRUEBAS TAN Δ A TRANSFORMADORES EN LA ETAPA 2, CON LA CARCASA.	- 47 -

FIGURA 15: DIAGRAMA DE CONEXIÓN PARA PRUEBAS TAN Δ A
TRANSFORMADORES EN LA ETAPA 3, CON SISTEMA DE PUESTA A TIERRA. - 47 -

FIGURA 16: DIAGRAMA DE CONEXIÓN PARA PRUEBAS TAN Δ A
TRANSFORMADORES EN LA ETAPA 3, CON LA CARCASA. - 48 -

LISTAS DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Clasificación De Las Pruebas.	- 72 -
Anexo B. Instructivo De Pruebas A Cables De Mt.	- 86 -
Anexo C. Instructivo De Pruebas A Máquinas Rotativas	- 114 -
Anexo D. Instructivo De Pruebas A Transformadores	- 133 -

GLOSARIO

ASTM: American Society for Testing and Materials (Sociedad Americana para pruebas y materiales).

CEM: Centro Español de Metrología.

CIGRE: Conseil International des Grands Réseaux Électriques.

DC: Direct Current (Corriente directa).

EPR: Ethylene Propylene Rubber (Caucho de Etileno Propileno).

EPP: Elementos de Protección Personal.

E³T: Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones.

HI-POT: High Potencial (alto potencial).

HV: High Voltage (alta tensión).

ICEA: Insulated Cable Engineering Association.

IEEE: Institute of Electrical and electronics Engineer (Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica).

ING: Ingeniero.

MT: Media Tensión.

MIE: Magíster en Ingeniería Electrónica.

MPE: Magíster en Potencia Eléctrica.

NPL: National Physical Laboratory.

OEA: Organización de Estados Americanos.

RETIE: Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas.

SIM: Sistema Interamericano de Metrología.

TAN δ : Tangente Delta o factor de pérdidas.

UIS: Universidad Industrial de Santander.

U₀: Tensión nominal.

VLF: Very Low Frequency (muy baja frecuencia).

XLPE: Cross Linked Polyethylene (Polietileno de enlaces cruzados).

RESUMEN

TITULO: INSTRUCTIVOS PARA PRUEBAS TAN δ BAJO LA TECNOLOGÍA VLF (VERY LOW FREQUENCY) Y PRUEBAS HIPOT EN DC Y VLF, PARA CABLES ELÉCTRICOS DE MT (MEDIA TENSIÓN), MÁQUINAS ROTATIVAS Y TRANSFORMADORES, CON BASE EN ALGUNAS NORMAS IEEE.*

AUTORES: JOHN FREDY BAUTISTA REYES
JORGE TULIO VILLEGAS CRUZ**

PALABRAS CLAVES: Pruebas eléctricas, fuentes inyectoras de media tensión, Pruebas Hipot, Pruebas Tan δ , tecnología DC y VLF, cables eléctricos de MT, máquinas rotativas y transformadores eléctricos.

CONTENIDO: la resistencia de aislamiento y la tangente delta son reconocidas como algunos de los parámetros principales para diagnóstico de condición del aislamiento de los diferentes equipos eléctricos, por ser directamente afectados por el deterioro de la aislación. Este trabajo de grado presentará un instructivo de prueba para monitoreo off-line de la resistencia de aislamiento y la tangente delta en cables eléctricos de MT, máquinas rotativas y transformadores eléctricos, además de la experiencia con su utilización en campo por parte de los autores de este trabajo de grado.

Este trabajo de grado se presenta en cinco capítulos y cuatro anexos.

En el primer capítulo aborda las dos pruebas de aislamiento propuestas por esta investigación explicando los criterios de selección para cada uno de los elementos bajo prueba, presentando diagramas de conexión, niveles de tensión aplicados, duración de las pruebas y datos esenciales para los reportes finales.

El segundo capítulo permite que el usuario del producto final de esta investigación, reconozca cada una de las partes que contiene y así pueda realizar las pruebas con éxito y sea capaz de diligenciar las listas de chequeo y protocolos de prueba.

El tercer capítulo hará mención a las pruebas llevadas a cabo por los autores de esta investigación, las cuales permitieron hacer una realimentación de las teorías.

En el cuarto capítulo se enuncian las conclusiones de tipo técnico que arrojó este trabajo de grado.

En el quinto capítulo podrá el lector encontrar las referencias bibliográficas que han sido consultadas a lo largo de esta investigación.

El anexo A realiza una clasificación de las diferentes pruebas eléctricas, estructurado desde lo global hacia lo particular.

Los anexos B, C y D son el resultado final de esta investigación, los cuales pueden ser separados del trabajo total, para ser transportados a los sitios de prueba.

* Trabajo de grado

** Facultad de físico mecánicas, escuela de ingeniería eléctrica ,electrónica y telecomunicaciones, Director José A..Amaya. Codirector. Julio C Chacón

ABSTRACT

TITLE: TESTING INSTRUCTION $\tan \delta$ UNDER THE TECHNOLOGY VLF (VERY LOW FREQUENCY) AND TESTS HIPOT IN DC AND VLF FOR ELECTRIC CABLE MT (MEDIUM VOLTAGE), ROTATING MACHINERY AND TRANSFORMERS, BASED ON SOME STANDARDS IEEE.*

AUTHOR: JOHN REYES BAUTISTA FREDY
JORGE TULIO VILLEGAS CRUZ**

KEY WORDS: electrical tests, injection sources Medium Voltage, Hipot Testing, Testing $\tan \delta$, DC and VLF technology, electrical cables MT, rotating machines and transformers.

CONTENT: insulation resistance and tangent delta are recognized as some of the main parameters for diagnosis of insulation condition of the various electrical equipment, being directly affected by the deterioration of the insulation. This work will present an instructional level testing for off-line monitoring of insulation resistance and the tangent delta MV power cables, rotating machines and transformers, as well as experience with field use by authors this paper grade.

This graduate work is presented in five chapters and four annexes.

The first chapter addresses the two isolation tests proposed by this research explaining the selection criteria for each of the elements under test, showing wiring diagrams, applied voltage levels, duration of testing and data essential to the final reports.

The second section allows the user to the final product of this research, recognize each of the parties it contains and so can perform the tests successfully and able to fill out checklists and testing protocols.

The third chapter shall refer to tests carried out by the authors of this research, which led to a feedback of the theories.

In the fourth chapter sets out the findings of a technical nature that courage is locked grade.

In the fifth chapter the reader can find references that have been consulted throughout this investigation.

Annex A makes a classification of the various electrical tests, structured from the global to the particular.

Annexes B, C and D are the end result of this research, which can be separated from the total work to be transported to the test sites.

* Degree work

** Faculty of physical mechanical, school of electrical engineering, electronics and telecommunications, Manager Jose A.. Amaya. Co. Julio C Chacón

INTRODUCCIÓN

Gracias al prestigio con el que cuentan los estudiantes y egresados de la UIS, la E3T y puntualmente de Ingeniería eléctrica ante el sector industrial, las solicitudes de estudiantes en práctica, al igual que las ofertas laborales son múltiples, pero no se puede desconocer el hecho de que las empresas del sector también exigen experiencia laboral, con la cual un recién egresado no cuenta y lo más preocupante es que sus habilidades para saber hacer son pocas.

Por esta razón es importancia generar este tipo de trabajos de grado, que sirven como soporte no solo teórico sino técnico, implementando prácticas para fortalecer las labores que deba desempeñar o supervisar el Ingeniero electricista UIS, más si su interés es laborar en el sector del mantenimiento eléctrico.

Este documento ha sido elaborado para que sirva de base de capacitación a personal en pruebas eléctricas con inyectores de alta tensión y está redactado en español para facilitar su seguimiento, sin embargo el supervisor o el personal encargados de la instalación, verificación o mantenimiento de cables eléctricos de MT, transformadores eléctricos o máquinas rotativas deben estar en capacidad de leer y entender todos los documentos originales, ya que dichos documentos son la fuente de referencia de éste (ver referencias bibliográficas).

La información descrita en esta investigación permite realizar un seguimiento detallado del progreso de la prueba y garantizar la calidad de la misma.

Este manual de procedimientos no pretende exigir que se realice la prueba, ya sea en el momento de la instalación o posteriormente de forma periódica para el mantenimiento.

La información en este documento está sujeta a cambios sin notificación previa, y enuncia solamente los pasos básicos a seguir antes y durante las pruebas en campo Tan Delta en VLF y Pruebas en campo Hipot en DC o VLF, a cables eléctricos de MT, Transformadores eléctricos y máquinas rotativas.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Documentar un procedimiento a manera de instructivo que sirva de base teórico-práctica, para realizar pruebas TAN δ en VLF y pruebas HIPOT tanto en DC como en VLF, a cables eléctricos de MT, máquinas rotativas y transformadores, basados en los requerimientos estipulados en algunas normas IEEE.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Recopilar y describir las características de las pruebas HIPOT y TAN δ a cables eléctricos de MT, máquinas rotativas y transformadores, utilizando inyector de tensión de tecnología DC y VLF, basados en las normas IEEE.
- Elaborar una lista de chequeo y el protocolo para las pruebas HIPOT y pruebas TAN δ , que aplique para la tecnología DC y/o VLF, tanto a cables eléctricos de MT, Transformadores o máquinas rotativas de acuerdo a las exigencias de normas IEEE.
- Documentar los procedimientos para ejecutar las pruebas HIPOT y TAN δ a cables eléctricos de MT, máquinas rotativas y transformadores basados en la normativa.
- Realizar las pruebas TAN δ en VLF y las pruebas HIPOT tanto en DC como en VLF, acatando la lista de chequeo, recolectando los datos necesarios por los protocolos y siguiendo rigurosamente el instructivo elaborado, presentando un informe con los resultados obtenidos y las conclusiones correspondientes.

1 PRUEBAS A EQUIPOS ELÉCTRICOS.

Ante la demanda de energía eléctrica cada vez mayor, se incrementa la necesidad y la importancia de mantener un servicio ininterrumpido y de buena calidad al consumidor, lo cual implica redoblar esfuerzos a la hora de evitar fallas en el sistema, monitoreando los elementos que lo componen, para detectar anomalías, analizarlas y repararlas con la mayor brevedad posible.

Si bien la finalidad de este documento es presentar guías mediante las cuales un estudiante o empleado, ya sea en calidad de Ingeniero, Tecnólogo o Técnico electricista, pueda ejecutar en campo pruebas TAN δ en VLF y pruebas Hipot en DC o VLF, a cables eléctricos de Media Tensión, transformadores y máquinas rotativas, es importante que la persona encargada de la ejecución de pruebas tenga en cuenta que existen otras pruebas que pueden reforzar el estudio o esclarecer las dudas que puedan surgir durante el análisis de los resultados de las pruebas que a este documento le competen.

1.1 PRUEBAS HIPOT.

Hipot es la abreviación de High Potencial (alta tensión o alto potencial), tradicionalmente el término Hipot se le ha otorgado a los equipos que realizan las pruebas de sobretensión (de igual manera como tradicionalmente se le da el nombre de Megger a las pruebas de resistencia de aislamiento). Se recuerda que a medida que la tensión de prueba es incrementada también aumenta la corriente de fuga, ya que los materiales dieléctricos tienen una componente resistiva, este exceso de corriente podría causar daños en los equipos bajo prueba u ocasionar la muerte al personal que este en contacto con el dieléctrico.

Las pruebas Hipot también son conocidas como pruebas de rigidez dieléctrica, ya que su finalidad es proporcionar información acerca de esta característica en el dieléctrico.

La rigidez dieléctrica de un material aislante se define como el gradiente de potencial máximo que este puede soportar sin que se produzca la ruptura. Es decir las pruebas Hipot reflejan la capacidad del sistema de aislamiento para soportar esfuerzos eléctricos, por esto algunos les llaman a estas pruebas como pruebas de soporte.

La prueba consiste en aplicar deliberadamente una tensión DC superior a la tensión nominal de operación del elemento bajo prueba. Dicha tensión es aplicada con incrementos ya sea de manera constante (rampa) o de manera escalonada. La idea de la prueba es que si el aislamiento soporta esta tensión durante cierto tiempo y no se produce ninguna evidencia de daño tal como una ruptura, una excesiva corriente de fuga o una perforación del material aislante, se asume entonces que será capaz de soportar sin peligros la tensión nominal al momento de estar en servicio.

La prueba se fundamenta en que la sobretensión ocasionará una perforación en cualquier punto débil al interior del aislamiento, por lo tanto es importante elegir una tensión de prueba de modo tal que:

- Un aislamiento en buen estado pueda soportar el esfuerzo eléctrico y de esta forma decir que paso la prueba.
- Un aislamiento dañado no soportará el esfuerzo eléctrico y no pasará la prueba o presentará una falla.

Los resultados de estas pruebas son de tipo binario determinándose simplemente si pasó o falló, lo cual no implica ningún diagnóstico de las condiciones del elemento bajo prueba. Este tipo de pruebas son similares a ir al médico y que el confirme que la persona está o no enferma, para la gran mayoría de personas sería más importante saber que mal lo aqueja y como sanar esa dolencia.

Por esto es que las pruebas Hipot son divididas en dos tipos de pruebas:

- Las pruebas de soporte
- Las pruebas de diagnóstico.

En el anexo A se encuentra la ampliación de la clasificación de la pruebas.

La prueba Hipot se puede realizar con tres tipos de tensión, tensión DC, tensión AC a frecuencia industrial y tensión VLF.

Para evitar confusiones con términos, este trabajo ha designado las pruebas Hipot de soporte, simplemente como pruebas Hipot y se hará alusión al tipo de tensión implementada agregando las siglas de esta, por lo tanto cuando se hable de pruebas Hipot DC, se entenderá como pruebas de sobretensión de soporte efectuadas inyectando tensión directa de otra manera se llamarán las pruebas Hipot VLF con lo cual el lector entenderá que son pruebas Hipot de soporte efectuadas inyectando tensión a muy baja frecuencia VLF.

La tensión VLF es la más joven y por lo tanto la menos conocida, por muchos años las pruebas Hipot DC fueron implementadas principalmente a cables PILC fabricados con procesos de laminación (Paper Insulated Lead Covered - Papel aislado cubierto de plomo), por lo tanto la mayor aplicación de las pruebas Hipot VLF se relegaron a probar aislamientos en máquinas rotativas.

Detractores de estas pruebas también indican, que si bien los elementos pueden soportar las pruebas de rigidez dieléctrica, el simple hecho de haberlas expuesto a dichos esfuerzos dieléctricos les causa debilidades que reducen la vida útil de los elementos.

Los niveles de tensión para las pruebas Hipot dependen de la señal utilizada, variando si la tecnología de inyección es en AC, DC o VLF, este trabajo centrará su atención en las dos últimas. El nivel de tensión de prueba también varía dependiendo de la muestra (cable de MT, transformadores o máquinas rotativas) y en algunos casos la relación entre la tensión de prueba y la tensión nominal de la muestra, no es directamente proporcional a nada o no se contarán con fórmulas que permitan su determinación, simplemente se cuentan con valores que han sido largamente probados en laboratorios de alta tensión y con los cuales se han llevado a cabo las pruebas Hipot exitosamente.

Así mismo los diagramas de conexión varían según el elemento bajo prueba, lo importante es tener en cuenta lo siguiente:

- La idea de la prueba es tener dos puntos, a manera de dos electrodos a los cuales se les aplicará la diferencia de tensión.
- Reconocer las posibles rutas de fuga de la corriente que pueden circular ya sean a través o sobre la superficie del aislamiento.

Por lo tanto cuando se aborde en profundidad cada uno de los elementos bajo prueba que le competen a este trabajo se resaltarán que partes del elemento forman cada electrodo y la posible ruta que puede tomar la corriente de fuga o la trayectoria que podría tener una ruptura total del aislamiento.

Tabla 1: Ventajas y desventajas de usar pruebas DC y VLF.

Ventajas de las pruebas en DC.	Desventajas de las pruebas en DC.
➤ Las unidades de prueba son más económicas.	➤ Las pruebas solo se aplican a cables con menos de 5 años de uso.
➤ Son equipos más portátiles dado su compactación y peso.	➤ Desde 1998 se determinó que dañan el aislamiento de los cables termo rígido.
➤ Menor uso de energía durante una prueba en comparación con pruebas en AC, por lo tanto es más fácil disponer de una fuente de alimentación para estos equipos.	➤ No reproduce la distribución de los esfuerzos dieléctricos en AC a frecuencia industrial. Estos esfuerzos son sensibles a la distribución de la temperatura.
➤ Tienen un historial exitoso con pruebas a cables dieléctricos laminados, estableciendo una buena base de datos.	➤ La prueba es ciega a ciertos tipos de defecto, tales como los huecos limpios (clean voids) y las costadas.
➤ Es efectivo cuando el mecanismo de falla se activa por conducción o por cuenta térmica.	➤ Puede causar la acumulación de carga no deseada, especialmente en los accesorios de los cables aislados y en la superficie.
➤ Son eficaces detectando problemas en la superficie de las articulaciones y terminaciones del cable.	➤ La prueba puede afectar negativamente el rendimiento futuro de la arborización acuosa en cables dieléctricos extruidos.
/	➤ Tienen deficiencias en la fiabilidad de las lecturas de la corriente de fuga tanto en cables eléctricos de potencia como en generadores refrigerados por agua.
Fuente: Autores.	

Si bien el conocimiento de los circuitos, que le permiten a los inyectores de alta tensión en DC lograr estas tensiones elevadas es importante, pasa a un segundo plano para este trabajo

En la tabla 1 se encuentran una serie de ventajas y desventajas de usar pruebas de sobretensión en DC y VLF si se les compara con equipos que inyectan tensión en AC.

A continuación se presenta las normas a las que se hizo referencia anteriormente:

- IEEE 433-2009 Práctica recomendada para pruebas de aislamiento de grandes máquinas rotativas AC con alta tensión a muy baja frecuencia. Describe el uso y los procedimientos para la implementación de la tecnología VLF.
- IEEE Std 400-2001. Guía para pruebas de campo y evaluación del aislamiento de cables de potencia apantallados. En la cual se describen varios métodos de pruebas de campo sobre cables de potencia apantallados desde 5 kV hasta 500 kV, incluyendo equipos y formas de onda en VLF.
- IEEE Std 400.1-2007. Guía para pruebas de campo a cables de potencia apantallados usando DC. Describe dos tipos de pruebas el de soporte o tensión resistiva y el de diagnóstico, y como deben ser realizadas las mediciones en campo sobre cables de potencia apantallados, extruidos o laminados.
- IEEE Std 400.2-2004. Guía para pruebas de campo a cables de potencia apantallados usando VLF. Describe dos tipos de pruebas el de soporte o tensión resistiva y el de diagnóstico, y como deben ser realizadas las mediciones en campo sobre cables de potencia apantallados, extruidos o laminados.

Si se observa las fechas de publicación de las normas son recientes, pero se debe tener en cuenta que las primeras ediciones de estas surgieron años atrás, de lo cual se puede concluir lo siguiente:

- Es una tecnología exitosa con más de 35 años de experiencia realizando pruebas de aislamiento a máquinas rotativas. No se implementó tanto en cables por los niveles de tensión que debían ser alcanzados, ya que una unidad VLF del mismo tamaño alcanza una tensión menor a la de DC, en una relación próxima al 70%.
- Desde 1998 cuando se concluyó de manera casi unánime que las pruebas Hipot DC no solo eran perjudiciales para los aislamientos termo rígidos, sino que también eran un método ineficaz para su análisis, fue hasta entonces cuando buscando entre las diferentes fuentes de tensión disponibles, se concluye que las pruebas Hipot VLF, tanto de soporte como de diagnóstico cumplen con los requerimientos de la industria, que es tener equipos fáciles de transportar con bajo consumo de potencia durante la prueba, etc.
- En cuanto a pruebas de aislamiento a transformadores eléctricos aún no hay referencias del uso de la tecnología VLF, ni una norma que regule su aplicación.

Anteriormente se dijo que con tensión DC solo se podían realizar pruebas de soporte. Con la tecnología VLF se pueden llevar a cabo además de las pruebas de rigidez dieléctrica las pruebas de diagnóstico donde las más conocidas son:

- Pruebas tangente delta (Tan δ).

- Pruebas de descargas parciales (DP).

Son este par de pruebas de diagnóstico las que le dan un valor agregado a esta tecnología ya que estas si reflejan el estado de la calidad de los aislamientos.

A continuación se da respuesta a una de las preguntas más formuladas por las personas encargadas del mantenimiento de los equipos eléctricos, debido a la desinformación que existe acerca la normatividad vigente y los alcances de las pruebas Hipot.

¿La prueba Hipot es una prueba destructiva?

Depende de su significado, la prueba Hipot VLF no deteriora al cable ensayado, como lo hace la prueba en DC, donde el daño real al aislamiento se produce durante la prueba, aumentando las probabilidades de una futura falla.

Por el contrario, el ensayo en VLF; no causa deterioro al aislamiento por su simple aplicación, ya que se trata de corriente alterna, la misma corriente para la cual ha sido diseñado el aislamiento durante su servicio. De hecho, todo cable, transformador o máquina rotativa es probado en fabrica (ensayo tipo), con tensión AC, a niveles más altos de tensión que en una prueba de campo.

Cuando se dice que las pruebas VLF son destructivas, se tiene razón solo cuando la muestra (los cable, los empalmes, las bobinas de una máquina rotativa o los devanados de un transformador) presentan defectos que necesitan ser reparados, ya que la finalidad de la prueba es forzar a la muestra a que presente una ruptura durante la prueba y no durante su servicio, que es precisamente lo que debe ocurrir tarde o temprano en presencia de un defecto. Por otro lado y para hablar correctamente, todas la pruebas de tensión resistiva, (withstand tests), tanto en DC / AC como en VLF; son consideradas pruebas del tipo destructivas por la IEEEE, no por el hecho de que su simple aplicación intente destruir a la muestra bajo ensayo, sino porque las conclusiones de estos ensayos estarán siempre referidas a términos de "pasa / no pasa" (soporta o no soporta), se daña o no se daña, existiendo por lo tanto la posibilidad, que la muestra por su condición de defectuosa, falle durante la prueba.

1.2 PRUEBAS TAN δ .

Es la abreviación de tangente delta y representa una medida de las pérdidas eléctricas en un aislamiento. Un sistema de aislamiento se puede considerar como un condensador real, el cual representa la capacitancia propia del elemento al que pertenezca ya sea un cable, una máquina rotativa, un transformador etc, siendo esta capacitancia prácticamente constante en el tiempo, pero tiene otra componente resistiva que depende del estado del aislamiento.

Estas pruebas también se conocen como factor de disipación (DF), en algunos casos como factor de potencia y representan las pérdidas en el calentamiento del aislamiento. El nivel de disipación puede incrementarse por varios factores:

- Contenido de humedad en el aislamiento.
- Envejecimiento del aislamiento.

- Por presencia de descargas parciales.

Un aislamiento perfecto no presenta pérdidas, pero los aislamientos perfectos no existen al menos no para aplicaciones industriales. En un condensador ideal el ángulo de desfase entre la tensión y corriente es de 90°. A consecuencia de las pérdidas en un sistema real representado por una resistencia, el ángulo de fase varía un ángulo δ con respecto a 90°. El factor de disipación (DF) se define como la tangente de este ángulo δ (la tangente del ángulo de pérdidas), de acá su nombre alternativo $\tan \delta$, y este es el nombre adoptado en este trabajo de investigación.

La medida de la $\tan \delta$ es una herramienta de diagnóstico importante para determinar la calidad de un aislamiento. Un aislamiento eléctrico puede ser representado por dos modelos, un modelo serie y un modelo en paralelo (ver figuras 1 y 3), los cuales serán analizados a continuación.

Del modelo paralelo se puede obtener una expresión matemática, al ver que la relación entre la corriente que circula por la resistencia y la corriente que circula por el condensador ideal.

$$DF = \tan \delta = \frac{|I_R|}{|I_C|} = \frac{\frac{V}{R_P}}{V * C_P * \omega} = \frac{1}{\omega * R_P * C_P} \quad \text{Donde } \omega = 2 * \pi * f$$

Siendo f la frecuencia de prueba.

La mejor manera de representar las pérdidas de conducción que dan lugar a corrientes de fuga de corriente continua es con un circuito equivalente en paralelo.

La mejor manera de representar las pérdidas de polarización producto de las tensiones de corriente alterna, se pueden representar por medio de un circuito equivalente en serie que conste de un condensador ideal con una resistencia en serie.

Del modelo serie se puede obtener una expresión matemática, al ver que la relación entre la tensión en la resistencia y la tensión en el condensador ideal.

$$DF = \tan \delta = \frac{|V_R|}{|V_C|} = \frac{I * R_S}{\frac{I}{\omega * C_S}} = \omega * R_S * C_S$$

Figura 1: Circuito equivalente paralelo de un aislamiento.

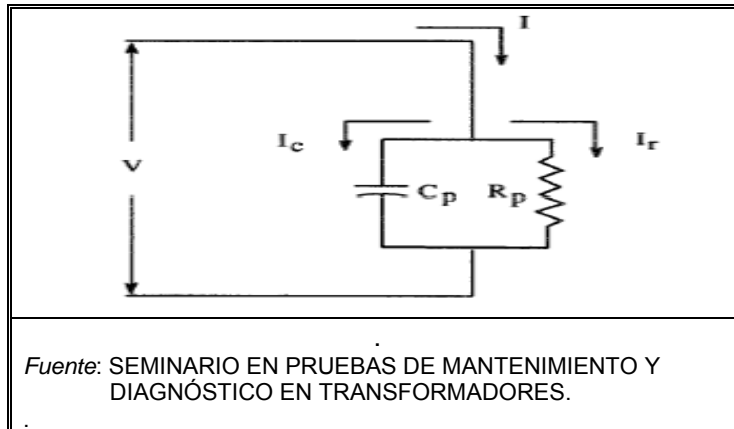


Figura 2: Diagrama fasorial del circuito paralelo de un aislamiento.

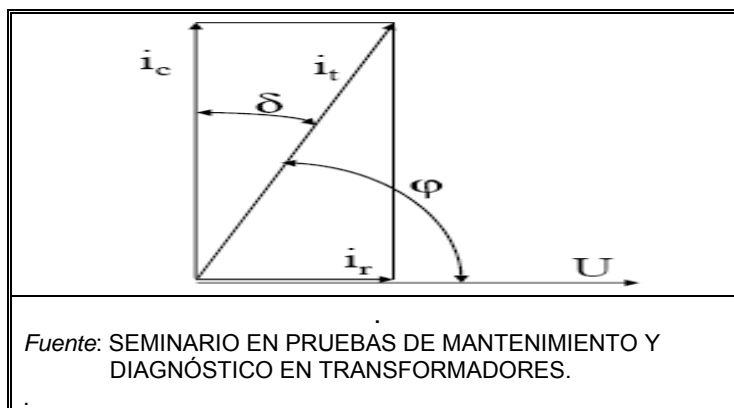


Figura 3: Circuito equivalente serie de un aislamiento.

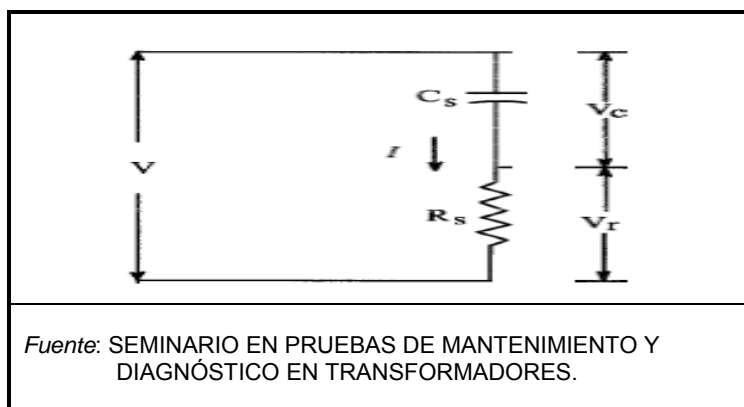
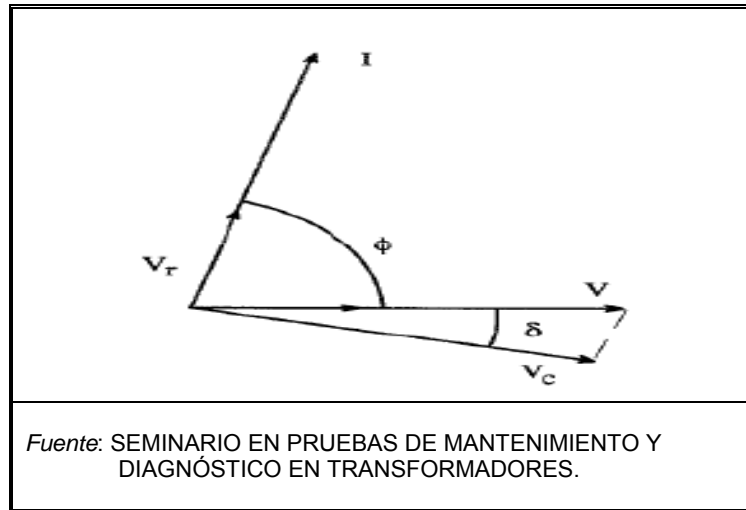


Figura 4: Diagrama fasorial del circuito serie de un aislamiento.



El ángulo δ puede ser muy pequeño en caso de un aislamiento en buen estado, del orden de 10^{-5} , lo que equivale a mirar un reloj de pulsera desde una distancia de 2,5 km. Por eso resulta útil medir el DF a varias frecuencias. Existen equipos que realizan un barrido en frecuencia para estas mediciones, pero abordar este tema no es parte de esta investigación.

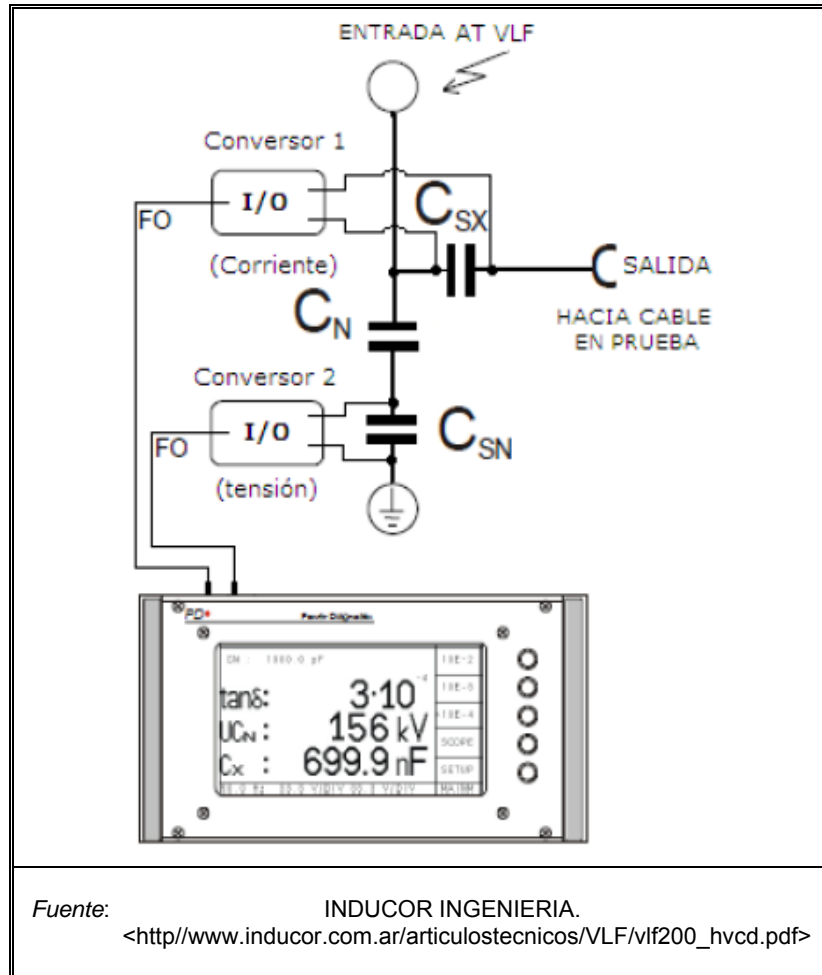
Retomando la tecnología VLF y sabiendo ahora la prevención que se ha generado con las pruebas DC y la profunda aceptación a usar tensiones alternas como las adecuadas para las pruebas de aislamientos. A manera de presentar un ejemplo de cómo un equipo que realiza pruebas de $\tan \delta$, se formuló la siguiente pregunta:

¿Cómo un equipo de tecnología VLF realiza la medida de $\tan \delta$?

Los módulos utilizados para la medición de $\tan \delta$ realizan el proceso descrito a continuación:

Los equipos de medición de $\tan \delta$ toman simultáneamente dos señales de corriente, una por medio de un shunt capacitivo en serie con la muestra (C_{SX}), y otra por medio de un capacitor de referencia (C_N), formando un divisor de tensión (C_{SN}), en paralelo con la muestra, esto lo podemos observar en la figura 10, la cual representa el modo de adquisición de las señales para el modelo VLF 200-HVDC de la marca High Voltage Inc.

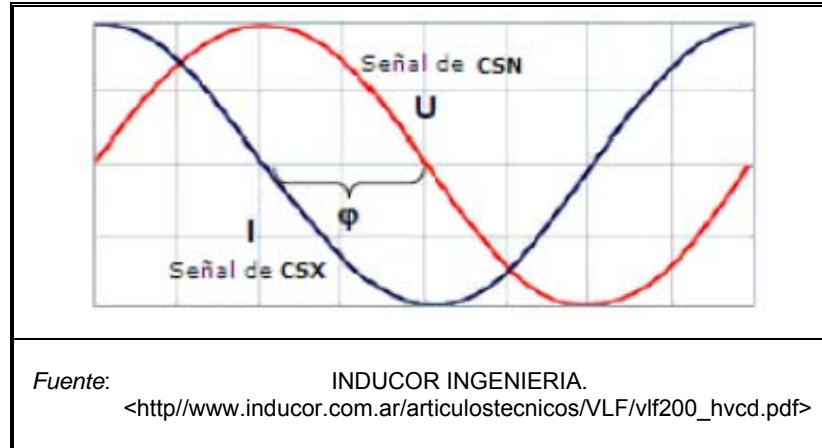
Figura 5: Esquema de medición de la Tan δ .



Ambas señales son capturadas en forma directa sobre el circuito de alta tensión. Luego, dos convertidores I/O, transforman estas señales analógicas en ópticas y las envían hasta el hardware de medición, para ser evaluadas por medio de un microprocesador, obteniéndose finalmente los resultados de capacidad / tangente/ $\cos \varphi$, todos ellos en función a la tensión VLF aplicada.

En la figura 6 se puede observar el análisis gráfico que realizan las unidades de medición de $\tan \delta$, apreciando el actual desfase angular existente entre las formas de ondas de la tensión y de la corriente, corresponde al ángulo φ , situado como complemento de δ .

Figura 6: Análisis gráfico para Tan δ .



Se debe tener en cuenta que para este trabajo de grado se abordarán las pruebas Hipot y Tan δ en procesos de aceptación y mantenimiento en campo a cables eléctricos de MT, máquinas rotativas y transformadores. En la tabla 2 se especifica cuál de estas pruebas aplican para los elementos abordados en este trabajo de grado.

Tabla 2: Alcance de las pruebas Hipot y Tan δ .

		CABLES ELECTRICOS DE MT		MÁQUINAS ROTATIVAS		TRANSFORMADORES	
		Pruebas en fábrica	Pruebas en campo	Pruebas en fábrica	Pruebas en campo	Pruebas en fábrica	Pruebas en campo
HIGH POTENCIAL	DC	Aplica	Aplica	Aplica	Aplica	Aplica	No aplica
	AC	Aplica	No aplica	Aplica	No aplica	Aplica	No aplica
	VLF	Aplica	Aplica	Aplica	Aplica	Aplica	No aplica
TAN δ	VLF	Aplica	Aplica	Aplica	Aplica	Aplica	Aplica

Fuente: Autores.

1.3 APLICACIÓN DE PRUEBAS HIPOT.

En esta parte se profundizara en las temáticas acerca de las pruebas Hipot DC y VLF. Ahora se abordarán uno a uno los elementos bajo prueba que son objeto de investigación por parte de este trabajo de grado.

1.3.1 Pruebas hipot a cables de potencia

Los métodos para el uso de pruebas de Hipot DC de cables se han desarrollado desde el año 1900, principalmente para las pruebas a sistemas de cable laminados, tales como los tipos de cables aislados con papeles cubiertos de plomo. Una unidad de Hipot DC es relativamente fácil de controlar, proporciona datos precisos sobre las fugas actuales, y es relativamente pequeño y ligero de peso. Las normas actuales prevén la utilización de las pruebas de Hipot de DC para aceptación de los cables con extrusión (por ejemplo, reticulado de polietileno [XLP] o de caucho etileno propileno [EPR] o cables de aislamientos laminados (como el papel aislado cubierto de plomo [PILC]), pero la mayoría de las normas industriales, en particular la norma IEEE 400, ya no recomienda probar Hipot en DC para las pruebas de mantenimiento de cables envejecidos en XLP o cables de EPR, por esto se publicó la norma IEEE 400.2, donde se recomienda la utilización de pruebas Hipot con tensión VLF a cables de potencia.

Los detractores de los ensayos de medición de aislamiento o rigidez dieléctrica de un conductor con corriente continua, dicen que este tipo de ensayo, son perjudiciales para el conductor, pero lo cierto es que, es una prueba perfectamente válida para ensayar un conductor antes de su puesta en servicio, donde una avería, conllevaría un retraso en puestas en marcha de la instalación y paro de procesos productivos.

Algunas veces se confunde la prueba de instalación con la prueba de aceptación, si bien ambas son hechas antes de que el elemento sea puesto en marcha, en el caso de los cables de potencia, las pruebas de aceptación se realizan antes de ser tendido el cable en los ductos o canaletas diseñados para este fin y las pruebas de instalación son realizadas una vez tendido el cable, colocados los premoldeados y sus demás accesorios. Lo que recomienda este trabajo es que la prueba de aceptación sea una prueba de resistencia de aislamiento (conocidas como Megger) y las pruebas de instalación sean con tensiones superiores a la nominal, para no someter dos veces el elemento a los esfuerzos dieléctricos de una prueba Hipot.

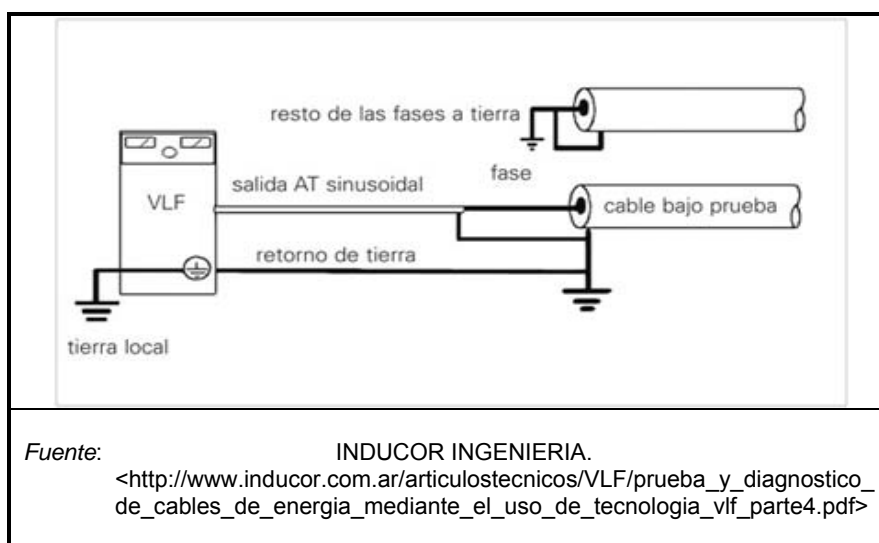
Habitualmente un elemento desde el punto de vista de mantenimiento, se denomina en servicio a aquel que sobrepase un tiempo de funcionamiento. Para el caso de los cables de potencia ese tiempo es de seis (6) meses.

A continuación se plantearán cuatro preguntas básicas que darán claridad de la manera de aplicar este tipo de pruebas a cables de potencia, pero para mayor información el lector deberá consultar el instructivo de pruebas que complementa esta investigación.

¿Cómo conectar el equipo hipot al cable bajo prueba?

Al igual que en una prueba de aislamiento normal (tensión de soporte), los ensayos conducidos con equipos DC o VLF requieren que la muestra (cable monopolar o cable tripolar), se encuentre aislada del resto del sistema eléctrico (su conductor central y su pantalla a tierra).

Figura 7: Diagrama de conexión para Hipot a cables de potencia.



De manera tal que se puedan obtener dos puntos a manera de dos electrodos en los cuales se aplicará la tensión de prueba.

Se conectará la salida de alta tensión DC o VLF a dicho conductor central; y la tierra del equipo, rígidamente unida a la tierra del sistema y con la pantalla del cable de potencia, como se puede observar en la figura 7, el resto de los cables (sean uno o más conductores, de la misma fase o una fase diferente) deberán ser aterrizados sólidamente. La prueba permite que la puesta a tierra de los cables se haga en un extremo o en los dos extremos, pero sea cual sea la elección del encargado de llevar a cabo la prueba deberá esta información hacer parte del reporte final de la prueba y hacerse de igual manera en pruebas futuras, para que se puedan comparar de mejor manera los resultados y cumplir con la exigencia de repetibilidad y reproducibilidad.

¿Qué tensión aplicar durante la prueba a un cable de potencia?

La tensión de prueba que se le aplicará al cable de potencia depende principalmente de la tensión nominal de la muestra, aunque existen algunas indicaciones adicionales ante las dos tecnologías que analiza este proyecto.

En la tabla 3 para escoger la tensión de prueba en DC, se debe identificar la tensión nominal de la muestra, el nivel de aislamiento y el BIL (nivel básico de aislamiento).

La norma IEEE. 400-2001, para referirse a las tensiones de prueba DC, se remite a otra norma de la misma familia la *400.1-2007 Guide for Field Testing of Laminated Dielectric, Shielded Power Cable Systems rated 5 kV and above with High Direct Current Voltage*, en donde no se encuentran los valores para pruebas de instalación para cables con el 133 % del nivel de aislamiento. Esta recomendación fue extraída de la norma Neta 2003 Especificaciones para pruebas de aceptación (*The 2003 NETA Acceptance Testing Specifications*) de su tabla 100.6, pero ninguna de las dos normas entregan especificaciones para pruebas de mantenimiento a cables con el 133% del nivel de aislamiento. Cabe destacar que la tensión de prueba es expresada en valor pico y no en valor rms, en cambio la tensión nominal si se expresa en tensión rms.

Tabla 3: Tensiones de prueba Hipot DC.

Tensión nominal Fase a fase kV	El BIL del sistema kV tensión pico.	Pruebas de aceptación Fase a tierra kV DC.		Pruebas de mantenimiento Fase a tierra kV DC.	
		Nivel de aislamiento.		Nivel de aislamiento.	
		100%	133%	100%	133%
5	75	28	36	23	-
8	95	36	44	29	-
15	110	56	64	46	-
25	150	75	96	61	-
28	170	85	100	68	-
35	200	100	124	75	-
46	250	125	172	95	-
69	350	175	195	130	-

Fuente: IEEE 400.1. Guide for field testing of laminated dielectric, shielded power cable systems rated 5 kV and above with high direct current voltage.

En la norma IEEE 400.1-2007 en el anexo C, se indica que la tensión de prueba para mantenimiento debe ser del 75% de la tensión de prueba de aceptación, entonces se podrá tomar este argumento para obtener los valores de las tensiones de prueba de mantenimiento para cables con el nivel de aislamiento del 133%.

En el caso de la tensión VLF, la tensión de prueba depende principalmente de la tensión nominal del cable, pero se hace diferencia en el tipo de onda implementada por el inyector VLF, y es de esperarse que cada onda genere un esfuerzo dieléctrico diferente por lo tanto los niveles de prueba para ambos tipos de onda difieren.

La norma IEEE.400.2-2004. Presenta dos tablas para las tensiones de prueba, las cuales hacen alusión a las dos formas de onda más implementadas.

Una tabla para las ondas coseno rectangular, indicando el tipo de prueba a ejecutar diferenciando si es de instalación, aceptación o mantenimiento.

Tabla 4: Tensiones de prueba Hipot VLF-Onda coseno rectangular.

Tensión nominal fase a fase tensión rms en kV	Instalación Fase - tierra tensión rms/ tensión pico	Aceptación Fase - tierra tensión rms/ tensión pico	Mantenimiento Fase - tierra tensión rms/ tensión pico
5	12	14	10
8	16	18	14
15	25	28	22
25	38	44	33
35	55	62	47

Fuente: IEEE 400.2. Guide for Field Testing of Shielded Power Cable Systems Using Very Low Frequency (VLF).

La otra tabla que presenta la norma IEEE 400.2 es para las ondas sinusoidales, ambas tablas se encuentran en el capítulo 5 de dicha norma.

Observe que en la tabla 4 la tensión de prueba rms la consideran igual que la tensión pico, y en la tabla 5 la relación de la tensión es de 1 a raíz cuadrada de 2 como lo es en ondas sinusoidales.

Tabla 5: Tensiones de prueba Hipot VLF-Onda sinusoidal.

Tensión nominal fase a fase tensión rms en kV	Instalación Fase - tierra tensión rms/ tensión pico	Aceptación Fase - tierra tensión rms/ tensión pico	Mantenimiento Fase - tierra tensión rms/ tensión pico
5	9 (13)	10 (14)	7 (10)
8	11 (16)	13 (18)	10 (14)
15	18 (25)	20 (28)	16 (22)
25	27 (38)	31 (44)	23 (33)
35	39 (55)	44 (62)	33 (47)

Fuente: IEEE 400.2. Guide for field testing of shielded power cable systems using Very Low Frequency (VLF).

Sea cual sea la tensión de prueba que se pretenda aplicar esta debe ser inyectada paulatinamente hasta alcanzar el máximo requerido, este aumento de la tensión se puede llevar de manera escalonada o a manera de rampa.

Entre los equipos que hay en el mercado como ya se mencionó antes, la frecuencia más implementada es 0,1 Hz y las formas de onda más implementadas son la sinusoidal y el

coseno rectangular, pero VLF tiene otras dos formas de onda aunque sus niveles de tensión para pruebas no han sido establecidas formalmente.

¿Por cuánto tiempo se debe inyectar la tensión de prueba?

Los tiempos de prueba para tensión DC están estipulados en la norma IEEE 400.1 se indican los siguientes valores:

Tabla 6: Tiempos para prueba Hipot DC.

Tiempo en prueba de Instalación Minutos.	Tiempo en pruebas de aceptación. Minutos.	Tiempo en Pruebas de mantenimiento. Minutos.
15	15	5
<i>Fuente:</i> IEEE 400.1. Guide for field testing of laminated dielectric, shielded power cable systems rated 5 kV and above with high direct current voltage.		

En el caso de tensiones VLF se puede asegurar que una de las ventajas de estas pruebas es su corta duración (10 minutos) pero esto en realidad es una verdad a medias como se explicará a continuación. Se debe tener presente que a mayor tiempo de exposición de la muestra a la tensión de prueba mayor será el riesgo de que se presente una ruptura en el aislamiento.

Las recomendaciones de los tiempos de prueba se basan en experimentación realizados sobre 1500 cables XLPE, en donde los resultados fueron los siguientes:

- El 68% de los reportes de falla ocurrieron antes de 12 minutos de prueba.
- El 89% de los reportes de falla ocurrieron antes de 30 minutos de prueba.
- El 95% de los reportes de falla ocurrieron antes de 45 minutos de prueba.
- El 100% de los reportes de falla ocurrieron antes de 60 minutos de prueba.

De esto se puede concluir que la variable de tiempo se convierte entonces en un factor clave para la eficiencia de la prueba y que con 18 minutos más de prueba se puede aumentar en un 21% la probabilidad de encontrar una falla en un cable.

De acá que las recomendaciones tanto de las normas como de los fabricantes es que la duración de la prueba este entre 15 y 60 minutos, tomando valores medios se recomiendan los siguientes tiempos.

Otro factor a tener en cuenta para determinar la duración de una prueba es la rata de crecimiento de las ramificaciones de descargas internas en el cable las cuales con tensión VLF a 0,1 Hz son casi 5 veces mayor que con tensiones a 60 Hz (ver tabla 1 de la norma IEEE 400-2001). Por esto si se puede decir que la duración de una prueba en VLF a 0,1 Hz es más corta que una prueba a 60 Hz, dado que la falla se evidenciará más rápidamente

Tabla 7: Tiempos para prueba Hipot VLF.

Tiempo en prueba de Instalación Minutos.	Tiempo en pruebas de aceptación. Minutos.	Tiempo en Pruebas de mantenimiento. Minutos.
30	30	15
<i>Fuente:</i> Guide for field testing of shielded power cable systems using Very Low Frequency (VLF).		

¿Qué variable se debe medir durante la prueba?

El valor principal a ser medido durante las pruebas Hipot, es la corriente de fuga, aunque algunas otras podrían ayudar en el caso de que se presente una falla. Así entonces es necesario registrar en el protocolo de pruebas la identificación de la muestra, el estado de la muestra y de sus accesorios al igual que las condiciones medio ambientales. Para mayores detalles se deberá ver el protocolo de pruebas adjunto al instructivo para pruebas Hipot y Tan δ .

¿Qué indican los valores tomados durante la prueba?

Básicamente en una prueba de soporte se tienen dos conclusiones pasa/falla, dado que solo se considera la corriente de fuga como una representación de que tan fiable es el aislamiento que se están probando. No todos los equipos de medida tendrán el mismo tope de corriente permisible durante la prueba así que al final el operador deberá observar los valores de corriente de fuga que se presentaron durante la prueba y así determinar si este aislamiento sigue siendo seguro para seguir operando.

Durante los incrementos de tensión es recomendable observar cómo reacciona la corriente de fuga pues esto es un indicativo de cómo la muestra reacciona ante los esfuerzos dieléctricos, y da una medida del contenido de agua en el aislamiento, de la arborescencia acuosa y hasta de las descargas parciales.

En el instructivo de pruebas se indicarán aparte de los niveles de tensión, los tiempos de prueba, los valores a registrar y las recomendaciones para determinar si la prueba pasa/falla. Se indicarán consideraciones de seguridad y como preparar la muestra para evitar incorporar errores en la prueba.

1.3.2 Pruebas Hipot a máquinas rotativas.

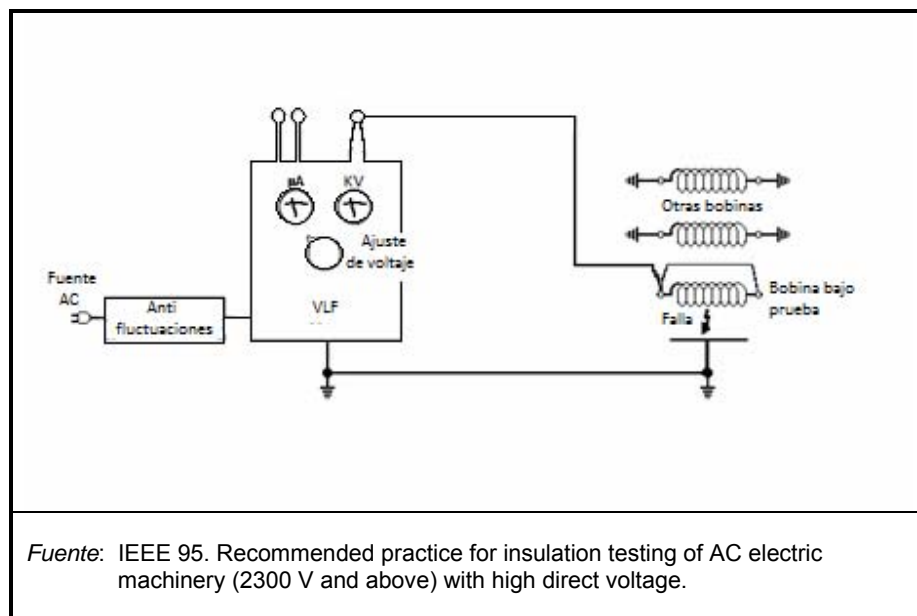
En el caso de máquinas rotativas con las pruebas Hipot se pretende evaluar el aislamiento del sistema electro motriz a tierra, esta prueba se ha implementado de manera similar a las pruebas de aislamiento a tierra, excepto que con Hipot se expone el aislamiento a un estrés dieléctrico.

La prueba Hipot sólo evalúa el plano entre los conductores y la ranura del centro del estator, o de la ranura de la célula. Estas no detectan defectos de bobina como defecto entre espiras (ínter Turn) o desarrollo de cortos en la bobina. Un requisito importante antes de realizar estas pruebas es el de garantizar que la bobina este limpia y seca.

¿Cómo se conecta el equipo Hipot a la máquina rotativa bajo prueba?

Todas las pruebas de Hipot en máquinas rotativas se configuran de manera similar. De ser posible, la bobina de cada fase es separada individualmente y se le aplica tensión solo a la bobina que se quiere probar y las otras bobinas se cortocircuitan a tierra. Esto permitirá que se pruebe el sistema de aislamiento de cada bobina por separado, esto asegura que no hay corriente circulante en el sistema de aislamiento de las otras bobinas.

Figura 8: Diagrama de conexión para pruebas Hipot a máquinas rotativas.



Cabe resaltar que esta prueba se hace a equipos fuera de línea, los cuales han sido puestos a tierra para disipar la energía que pueda tener almacenada y para que sus partes estén en equilibrio térmico con el ambiente.

¿Qué tensión se debe aplicar durante la prueba?

Del estándar IEEE 95-2002, de su capítulo 6 se puede extraer que para pruebas de aceptación en fábrica con frecuencia industrial (50-60 Hz) la tensión de prueba se puede extender del 125 al 150 por ciento de el voltaje línea a línea, esto es aproximadamente igual al 65 a 75 por ciento de $(2E+1000)$, donde V_P está representado en la siguiente ecuación:

$$V_P = (65\% \text{ a } 75\%) * (2E + 1000)$$

Donde E es la tensión nominal de la bobina del estator.

Esta tensión de prueba es un valor que históricamente ha tenido gran éxito en pruebas AC con frecuencia industrial, garantizando que las muestras no fallaran durante la prueba, dado que el grado de limpieza y de humedad en los aislamientos aun no generan una falla. Se ha determinado entonces que la tensión V_P se aplicara en pruebas de fábrica a equipos nuevos (pruebas de aceptación).

La tabla 8 fue extraída del estándar IEEE 433-2009, en el anexo A1, en ella se presenta una comparación entre las tensiones de prueba, dependiendo de la tecnología implementada AC, VLF o DC.

Tabla 8: Tensiones para prueba Hipot.

	Tensión AC	Tensión VLF	Tensión DC
Tensión de prueba	V_P	1,63 V_P	1,7 V_P
<i>Fuente:</i> IEEE 433. Recommended practice for insulation testing of AC electric machinery with high voltage at Very Low Frequency.			

En máquinas rotativas se sigue la norma de usar un excedente del 15% de la tensión utilizada en pruebas a 60 Hz, esencialmente, son pruebas paralelas a pruebas a 60 Hz, salvo que la tensión de ensayo es ligeramente superior.

Las normas a 60 Hz se establecen en términos de tensión RMS, mientras que en VLF se establece en términos de la tensión pico o de cresta. Para pruebas VLF, la tensión de cresta debe ser 1,63 veces la de 60 Hz rms.

Esta cifra se puede demostrar se multiplica el factor de RMS a pico el cual es de 1,414 (raíz de dos) por un incremento del 15% en la tensión VLF.

$$1,414 \times 1,15 = 1,63.$$

El valor de la tensión de prueba en Hipot DC es recomendado como el 1,7 de la tensión en AC.

Sea cual sea la tensión a ser inyectada tendrá que hacerse de manera gradual hasta llegar al valor deseado.

¿Por cuánto tiempo se debe inyectar la tensión de prueba?

En diferentes normas como la IEEE Std 56-1997 (numeral 8.1.3), IEEE Std 4-1995, IEEE Std 433-2009 (anexo A2, tabla A1) y la IEEE Std 95-2002 (numeral 6.3), coinciden que

estas pruebas se deben llevar a cabo durante un minuto, una vez sea alcanzado su valor máximo de tensión.

¿Qué variables se deben registrar durante la prueba?

En una prueba Hipot realizada a una máquina rotativa se debe registrar en el protocolo de pruebas las siguientes variables:

- Valor de la tensión por paso.
- Corriente de fuga.
- Resistencia de aislamiento.
- Temperatura ambiente.
- Humedad relativa.

¿Qué indican los valores registrados durante la prueba?

Los valores que se registran durante la prueba Hipot en las máquinas rotativas, permiten realizar el siguiente análisis:

- Inicialmente se analiza las condiciones atmosféricas, para determinar los correctivos que se deben realizar a los registros de la corriente de fuga y la resistencia de aislamiento (correcciones por temperatura).
- Inmediatamente después de efectuar las correcciones se realiza la comparación con los criterios de aceptación sugeridos por las normas referenciadas en este trabajo de grado y los valores corregidos.
- El análisis se da por finalizado en el momento en se concluye si el equipo bajo prueba pasa o no pasa la prueba.

1.3.3 Pruebas Hipot a transformadores de potencia.

Como se indica en la tabla 2, las pruebas Hipot a transformadores solo se realizan con tensión AC (50-60 HZ), por lo tanto este trabajo de grado no abordara este tipo de pruebas ya que su objeto es llevar a cabo la implementación de pruebas con tecnología DC y VLF.

1.4 APLICACIÓN DE PRUEBAS TAN δ .

Como se ha indicado a lo largo de este trabajo, entre las pruebas de diagnóstico se resaltan las pruebas Tan δ , las cuales al ser incorporadas en un programa de mantenimiento permiten estimar la vida útil de los equipos eléctricos, disminuyendo la presencia de fallas y evitando inversiones innecesarias. A continuación abordaremos estas pruebas dirigidas específicamente a los elementos bajo prueba objeto de nuestro trabajo de grado.

1.4.1 Pruebas Tan δ a cables de potencia.

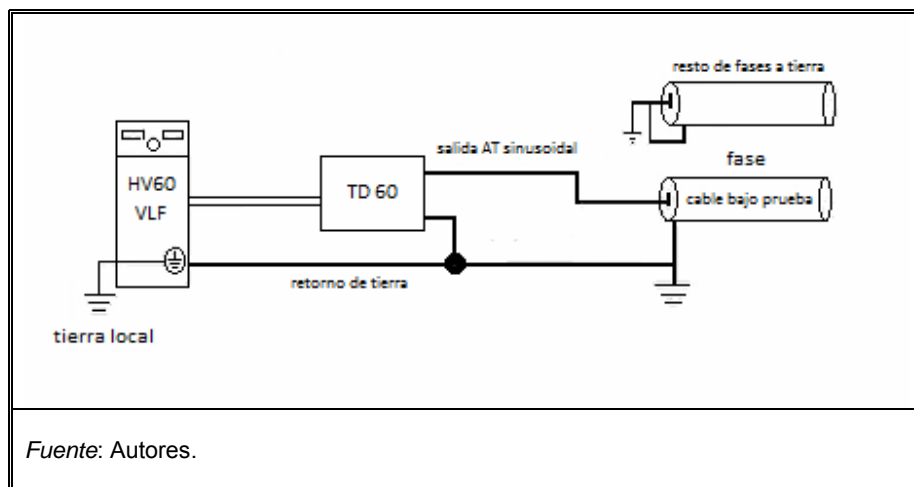
En el caso de los aislamientos para cables eléctricos de tipo polimérico, el principal objetivo es detectar el desarrollo de la arborescencia acuosa (wáter trees), para evitar la instalación de un cable en malas condiciones o retornar a servicio un cable degradado. Algunas de las preguntas más frecuentes acerca de las pruebas Tan Delta a cables son:

¿Cómo se debe conectar el equipo al elemento bajo prueba?

Cuando se hace referencia a pruebas Tan δ aplicadas a cables eléctricos de potencia, seguimos manteniendo el mismo objetivo de las pruebas Hipot, el cual es estudiar el dieléctrico que separa el conductor de la pantalla del cable. Cabe recordar que en pruebas de aislamiento a cables eléctricos es fundamental formar un electrodo con dos de las partes que lo constituyen; por suerte para un cable de potencia tan solo consta de dos puntos que podrían ser considerados como electrodos.

Así que para las pruebas Tan δ a cables de potencia la conexión es mostrada en la figura 9, entonces la tensión de prueba ira aplicada sobre el conductor. Tanto la referencia del equipo como la pantalla del cable irán conectadas a la tierra del sistema de potencia.

Figura 9: Diagrama de conexión para pruebas Tan δ a cables eléctricos de MT.



Las fases restantes de la acometida también deberán estar conectadas a tierra, tanto el conductor como su pantalla, con esto se busca evitar la inducción de tensión en las otras fases. De esta manera se intenta garantizar que las pérdidas medidas corresponden a un solo elemento.

¿Dónde se encuentra el criterio de aprobación para la prueba de Tan δ ?

Para la prueba Tan δ a cables eléctricos de MT, se debe dirigir a la norma IEEE 400-2001. En su numeral 9.7.2 se encontrara el valor máximo para que un cable pueda ser

diagnosticado en buen estado o rechazado. El límite es 4×10^{-3} aplicando una tensión de prueba igual a la nominal de los cables, la norma sugiere que todo cable probado que supere este límite debe ser reparado o según las circunstancias sustituido. En el caso de obtener un valor inferior al límite máximo, la norma recomienda proceder a realizar una prueba de hipot VLF con una tensión de prueba igual a tres veces la tensión nominal del elemento durante 60 minutos, lo que para el análisis de este proyecto de grado no aplica debido a que las pruebas hipot VLF se estudian de manera independiente en el numeral 1.3.1.

¿Qué ventajas y desventajas tiene realizar una prueba Tan δ ?

Algunas de las ventajas y desventajas de realizar pruebas de Tan δ a cables eléctricos de MT serán enunciadas a continuación:

Ventajas:

- La prueba es un examen no destructivo de diagnóstico.
- Los cables son probados con una tensión alterna igual a la tensión de fase a tierra en la que operan.
- El sistema de aislamiento de cables se puede supervisar y desarrollar un historial, el replazo del cable y la prioridad de rejuvenecimiento se puede planificar.
- Los equipos de prueba son transportables, y los requisitos de energía son comparables a los equipos estándar de localización de fallas en cables.

Desventajas:

- Para el presente caso la tensión de prueba es tan solo de 57 kV RMS, y la carga capacitiva máxima es de unos 3 a 10 mF a 0,1 Hz.
- La prueba funciona mejor después de ser realizada al menos dos veces para poder realizar una comparación entre los datos obtenidos al pasar del tiempo.

1.4.2 Pruebas Tan δ a máquinas rotativas.

Las máquinas rotativas son activos muy valiosos para las empresas del sector energético y la industria. Su funcionamiento seguro resulta fundamental, puesto que si se averían pueden dar lugar a enormes pérdidas económicas, con daños en el activo en sí, posibles daños en partes adyacentes de la subestación e interrupciones del servicio eléctrico. Además, unas máquinas rotativas defectuosas representan amenazas letales para el personal de la compañía eléctrica. Las empresas del sector eléctrico están pasando del mantenimiento periódico al mantenimiento basado en el estado.

Por lo tanto, es necesario efectuar pruebas de diagnósticos para evaluar el estado de las máquinas, garantizar su fiabilidad, reducir los costos de mantenimiento y evitar interrupciones imprevistas en la generación de energía.

Debido a esto, las pruebas Tan δ se han convertido en una pieza fundamental en el mantenimiento de las máquinas rotativas, pues resulta muy provechoso diagnosticar el comportamiento del aislamiento de la máquina con el pasar de los años.

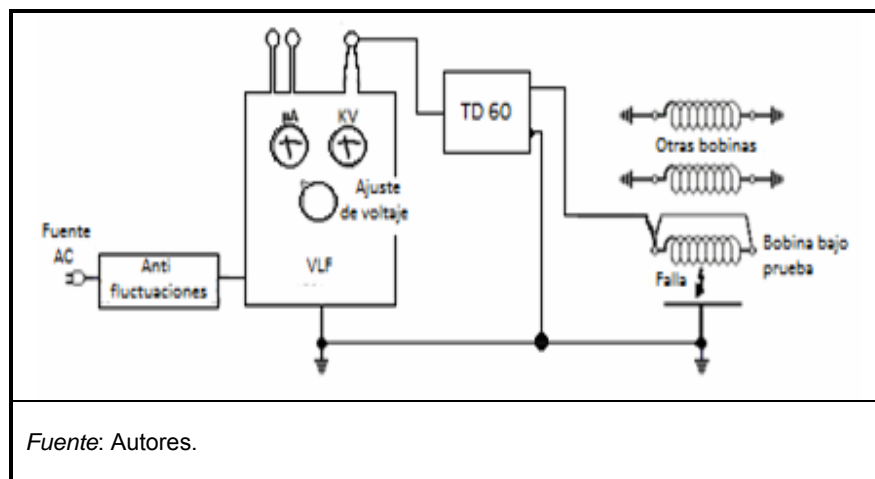
Entre los interrogantes que surgen a partir de este tipo de pruebas, los siguientes son los más frecuentes:

¿Cómo se debe conectar el equipo a la máquina rotativa bajo prueba?

Cuando se hace referencia a pruebas Tan δ aplicadas a máquinas rotativas, se debe tener en cuenta que para obtener una mayor eficiencia en los resultados, el devanado del estator debe ser separado por bobinas.

Así que para las pruebas Tan δ a máquinas rotativas la conexión es mostrada en la figura 10, entonces la tensión de prueba irá aplicada sobre una bobina, y las dos restantes se aterrizaran para que una posible inducción sobre ellas no afecta la medida de la bobina bajo prueba.

Figura 10: Diagrama de conexión para pruebas Tan δ a máquinas rotativas.



¿Qué nivel tensión se debe aplicar a una máquina rotativa para realizar una prueba Tan δ ?

Para realizar una prueba de Tan δ , los niveles de tensión que se utilizan no deben sobrepasar la tensión nominal de la máquina. Para alcanzar la tensión de prueba, se debe ir incrementando la tensión de manera gradual. En la unidad de prueba TD60 se permite programar cuatro pasos de tensión para alcanzar la tensión de prueba. En la figura 10 se muestra que la prueba se realiza por fase, lo que indica que la tensión de fase en borne de la máquina será la tensión de prueba.

¿Qué metodologías existen para realizar un buen análisis de las pruebas Tan δ a máquinas rotativas?

Existen dos métodos para realizar el análisis de los resultados de la prueba de Tan δ , los cuales se presentaran a continuación:

- La primera metodología es la medida directa del Tan δ , este método consiste en inyectar la tensión nominal de fase a cada una de las bobinas, y realizar el análisis con los resultados obtenidos.
- La segunda metodología es la presentada por la norma IEEE 286-2000, donde se describe el ensayo de variación de Tan δ (tip-up). Esta es una manera indirecta de medir el Tan δ , descargas parciales existentes en el aislamiento.

Todos los materiales aislantes tienen pérdidas dieléctricas que pueden medirse con un ensayo de Tan δ o factor de disipación. A bajas tensiones los resultados no dependen de la tensión de ensayo. Sin embargo, al aumentar la tensión alterna, y si existen huecos en el aislamiento, a determinado nivel de tensión aparecen descargas parciales. Estas descargas producen calor, luz y sonido que consumen energía. Esta energía debe ser proporcionada por la fuente de ensayo. Por consiguiente, en un bobinado con aislamiento delaminado, al aumentar la tensión, aparecen descargas parciales. El Tan δ aumentará debido a las pérdidas dieléctricas adicionales. Cuanto mayor sea el aumento en el Tan δ , mayor es la energía consumida por las descargas. En este ensayo, el Tan δ se mide a un mínimo de tensión. El Tan δ a baja tensión, TDbt, es un indicador de las pérdidas dieléctricas normales en el aislamiento. Generalmente se mide a un 20% de la tensión de fase nominal. Luego se aumenta la tensión de ensayo al valor nominal y se mide el TDat. El tip-up resulta:

$$\text{tip-up} = \text{TDat} - \text{TDbt}$$

Cuanto mayor sea el tip-up, mayor es la energía consumida por las descargas parciales. Hay quienes registran estos valores a distintos niveles de tensión y calculan diferentes tip-ups. Graficando el tip-up en función de la tensión es posible determinar la tensión de aparición de las descargas. Históricamente se aplicaba este ensayo a barras y bobinados para ver el grado de impregnación del aislamiento. Sin embargo, a partir de los años 50, se aplica a bobinados completos para detectar mecanismos de deterioro que producen descargas parciales. La presencia de capas semiconductoras de control de campo para tensiones superiores a 6 kV complica la medida. A baja tensión esta capa presenta una alta resistencia y no circula corriente, por lo tanto no hay pérdidas en ella. Al aumentar la tensión, la resistencia de la capa disminuye y comienzan a circular corrientes. Estas producen pérdidas y el equipo de ensayo detecta estas pérdidas adicionales. Como a baja tensión esta capa no contribuye con las pérdidas y a alta tensión si, entonces hay contribución al tip-up. En este caso se podrá detectar sólo si la actividad de descargas parciales es importante.

¿Por cuánto tiempo se debe inyectar la tensión de prueba?

Como se hizo referencia, la tensión de prueba se alcanza gradualmente, para el caso de este proyecto de grado la unidad de prueba lo realiza en cuatro pasos con las siguientes duraciones:

- Paso 1: tres minutos.

- Paso 2: tres minutos.
- Paso 3: tres minutos.
- Paso 4: diez minutos.

En ningún caso la sumatoria de los tiempos debe sobrepasar de 60 minutos.

1.4.3 Pruebas Tan δ a Transformadores.

Un aumento del Tan δ en un transformador puede revelar que se han cortocircuitado aislamientos parciales entre capas capacitivas, lo cual degrada el aislamiento en los transformadores. Una causa a esto es la humedad, esta puede deberse a varios factores, uno de ellos son los respiradores del transformador que pueden poner en contacto el aceite con la atmosfera, unas juntas con fugas, la reparación o instalación también pueden aumentar el nivel de humedad en el transformador. El proceso de envejecimiento normal también puede generar agua como subproducto de la descomposición de la celulosa, según estudios del Cigre, el contenido de humedad puede aumentar del 0,1 -0,2 % al año debido a la descomposición de la celulosa, así el transformador este completamente hermético. La presencia del agua en el aceite y el papel causa tres efectos peligrosos en el aislamiento que son:

- Reducción de la resistencia dieléctrica no disruptiva.
- Aceleración del proceso de envejecimiento de la celulosa
- Generación de burbujas de gas a altas temperaturas.

Según estos hechos la humedad es vital en una larga vida de un transformador, por eso se debe determinar el contenido de humedad para efectuar un secado o para constatar que el proceso de secado tuvo éxito.

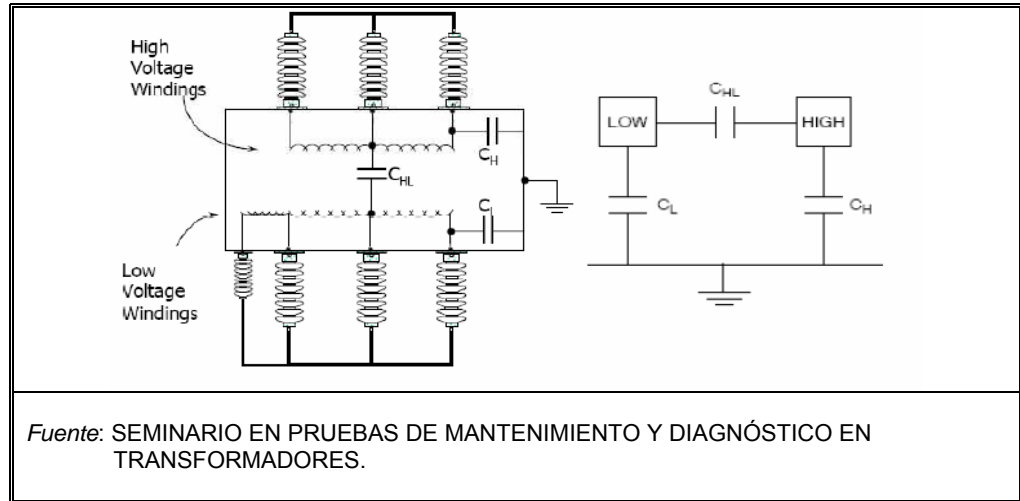
La medición del Tan δ es una herramienta útil para evaluar el contenido de humedad ya que tanto la conductividad como la polarización de los dieléctricos se ven influenciadas por la humedad, a muy bajas frecuencias se descubren las propiedades específicas del aislamiento sólido, siendo un método no invasivo y que no depende de la temperatura.

A continuación se realizaran una serie de preguntas que ayudaran a resolver algunas dudas generadas sobre cómo se realiza una prueba Tan δ a transformadores:

¿Cómo se debe conectar un transformador para realizar una prueba Tan δ ?

A diferencia de los cables eléctricos de MT y las máquinas rotativas donde la prueba de Tan δ se realiza por fase, en los transformadores se prueban las tres fases simultáneamente, para esto es necesario cortocircuitar los bornes del devanado de alta tensión entre sí y de igual manera los bornes del devanado de baja tensión. Esto es ilustrado en la figura 11.

Figura 11: Diagrama de conexión de puentes para los devanados del transformador.



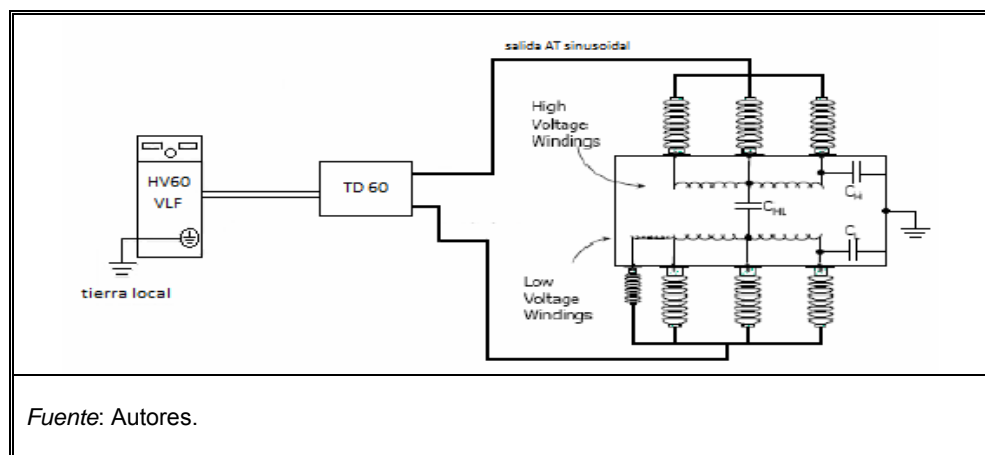
Acto seguido se debe tener claro que la prueba $\tan \delta$ a transformadores se realiza en tres etapas, las cuales enunciaron a continuación:

- Prueba entre el devanado de alta y el de baja tensión.
- Prueba entre el devanado de alta tensión y la tierra del sistema o la carcasa del transformador según sea el caso.
- Prueba entre el devanado de baja tensión y la tierra del sistema o la carcasa del transformador según sea el caso.

A continuación se hará una explicación del modo de conexión de cada una de las etapas.

1. Prueba entre el devanado de alta y el de baja tensión:

Figura 12: Diagrama de conexión para pruebas $\tan \delta$ a transformadores en la etapa 1.

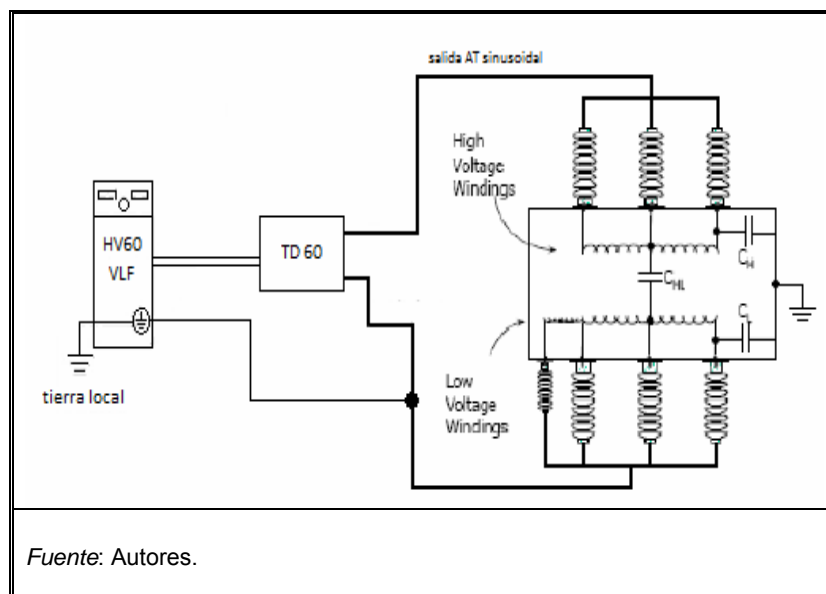


En la figura 12 se puede ver la conexión a realizar para esta etapa de la prueba. A continuación se hará una descripción de las conexiones ilustradas en la figura 12:

- La punta de la salida AT sinusoidal del equipo de prueba va conectada a los bornes del devanado de alta tensión.
- La punta de referencia del equipo de prueba va conectada a los bornes del devanado de baja tensión.

2. Prueba entre el devanado de alta tensión y la tierra del sistema o la carcasa del transformador según sea el caso:

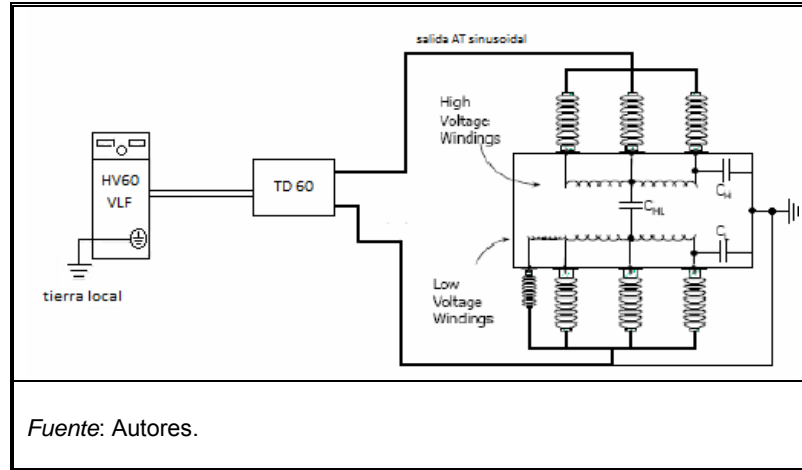
Figura 13: Diagrama de conexión para pruebas Tan δ a transformadores en la etapa 2, con sistema de puesta a tierra.



En las figuras 13 y 14, se encuentra el diagrama de conexiones que se debe implementar para llevar a cabo esta etapa de la prueba Tan δ a transformadores. A continuación se dará una descripción de las conexiones:

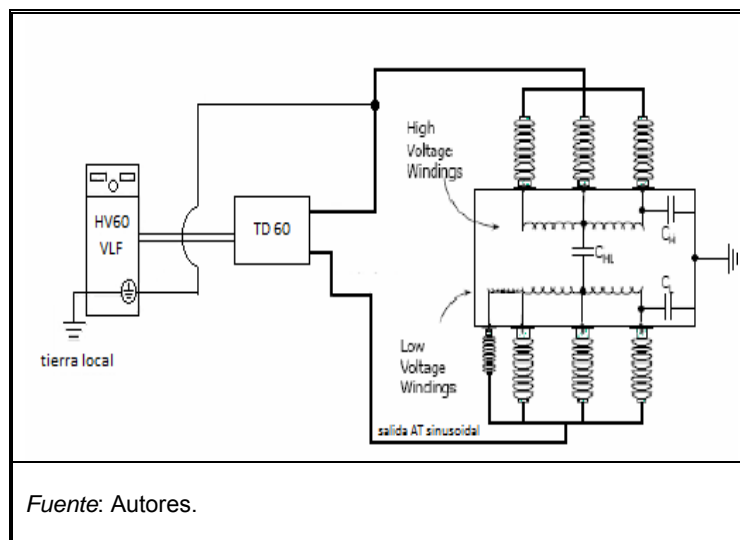
- La punta de salida AT sinusoidal del equipo de prueba va conectada a los bornes del devanado de alta tensión.
- La punta de referencia del equipo de prueba va conectada a los bornes del devanado de baja tensión y adicional a esto se conecta un puente eléctrico entre los bornes del devanado de baja tensión y un punto de tierra. En pruebas de instalación se pueden encontrar dos posibilidades para realizar esta conexión. La figura 13 ilustra cuando el transformador ha sido ubicado en el sitio final de operación y conectado a un sistema de puesta a tierra. La figura 14 ilustra cuando el transformador ha sido ubicado en el sitio final de operación y no se ha conectado a un sistema de puesta a tierra y por esto se debe tomar como punto de tierra la carcasa del transformador.

Figura 14: Diagrama de conexión para pruebas Tan δ a transformadores en la etapa 2, con la carcasa.



3. Prueba entre el devanado de baja tensión y la tierra del sistema o la carcasa del transformador según sea el caso:

Figura 15: Diagrama de conexión para pruebas Tan δ a transformadores en la etapa 3, con sistema de puesta a tierra.

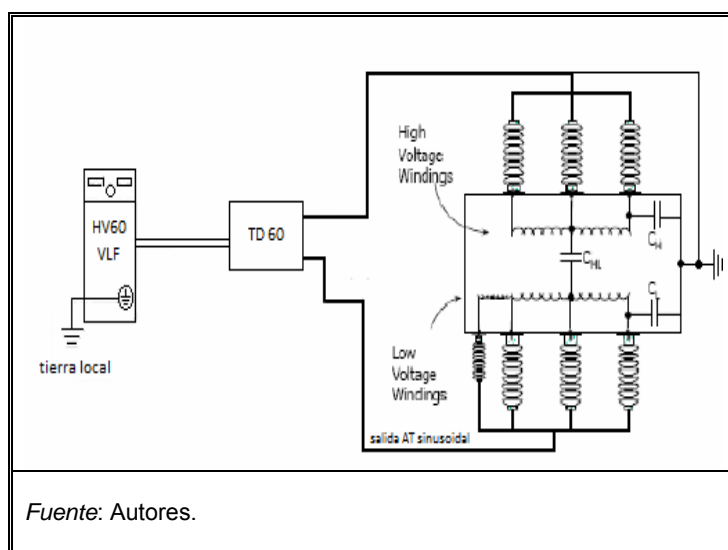


En las figuras 15 y 16, se encuentra el diagrama de conexiones que se debe implementar para llevar a cabo esta etapa de la prueba Tan δ a transformadores. A continuación se dará una descripción de las conexiones:

- La punta de salida AT sinusoidal del equipo de prueba va conectada a los bornes del devanado de baja tensión.

- La punta de referencia del equipo de prueba va conectada a los bornes del devanado de alta tensión y adicional a esto se conecta un puente eléctrico entre los bornes del devanado de alta tensión y un punto de tierra. En pruebas de instalación se pueden encontrar dos posibilidades para realizar esta conexión. La figura 15 ilustra cuando el transformador ha sido ubicado en el sitio final de operación y conectado a un sistema de puesta a tierra. La figura 16 ilustra cuando el transformador ha sido ubicado en el sitio final de operación y no se ha conectado a un sistema de puesta a tierra y por esto se debe tomar como punto de tierra la carcasa del transformador.

Figura 16: Diagrama de conexión para pruebas Tan δ a transformadores en la etapa 3, con la carcasa.



¿Qué nivel tensión se debe aplicar a un transformador para realizar una prueba Tan δ ?

Para realizar una prueba de Tan δ , los niveles de tensión que se utilizan no deben sobrepasar la tensión nominal del devanado que se va a someter a la prueba. Para las etapas 1 y 2 el nivel de tensión a aplicar debe ser la tensión nominal de línea a línea del devanado de alta y en la etapa 3 la tensión a aplicar es la tensión de línea a línea del devanado de baja. Para alcanzar la tensión de prueba, se debe ir incrementando la tensión de manera gradual. En la unidad de prueba TD60 se permite programar cuatro pasos de tensión para alcanzar la tensión de prueba.

¿Por qué se realizan tres pruebas Tan δ en un transformador?

Como se puede apreciar en la figura 11 el aislamiento es representado por una capacitancia, en el caso de los transformadores bi-devanados se tienen tres capacitancias diferentes las cuales se prueba en cada una de las etapas que comprenden la prueba Tan δ .

A continuación se darán a conocer las partes del aislamiento que se someten a prueba en cada etapa:

- Etapa 1: **CHL** es la capacitancia asociada al aislamiento entre los devanados de alta y baja tensión.
- Etapa 2: **CH** es la capacitancia asociada al aislamiento entre el devanado de alta tensión y las partes puestas a tierra (tanque y núcleo).
- Etapa 3: **CL** es la capacitancia asociada entre el devanado de baja tensión y las partes puestas a tierra.

2 DESCRIPCION DE LOS INSTRUCTIVOS DE PRUEBA.

El objeto principal de este trabajo de grado es la creación de instructivos que le permitan al lector realizar pruebas Tan δ y Hipot en cables de MT, maquinas rotativas y transformadores de potencia, utilizando inyectores de sobretensión de tecnología DC y VLF.

A continuación se presenta el orden en el que se encuentran los instructivos dentro de los anexos:

- Anexo B: Acá se podrán encontrar el instructivo de pruebas que le permitirá al usuario realizar pruebas de sobretensión a cables de potencia.
- Anexo C: Este anexo contendrá el instructivo de pruebas referente a máquinas rotativas.
- Anexo D: Para finalizar se entregara el instructivo de pruebas con el cual realizar pruebas a Transformadores eléctricos.

Este trabajo ha sido estructura de manera tal que sirva de guía para:

- Capacitar personal en la realización de pruebas de sobretensión con tecnología DC y VLF, mas puntualmente pruebas Hipot y Tan δ .
- Ser un prototipo para otros instructivos de pruebas, destinados a realizar otro tipo de pruebas ya sean de carácter eléctrico o no.



Ante de discriminar cada una de las partes que conforman los instructivos de pruebas es prudente señalar que estos fueron creados con la intención de servir como documentos independientes de la tesis de grado.

Este diseño de esta manera por los siguientes motivos:

- No obligar al interesado en realizar pruebas eléctricas de sobretensión, a tener que llevar consigo toda la investigación contenida en este trabajo de grado, al campo donde ejecutara las pruebas.

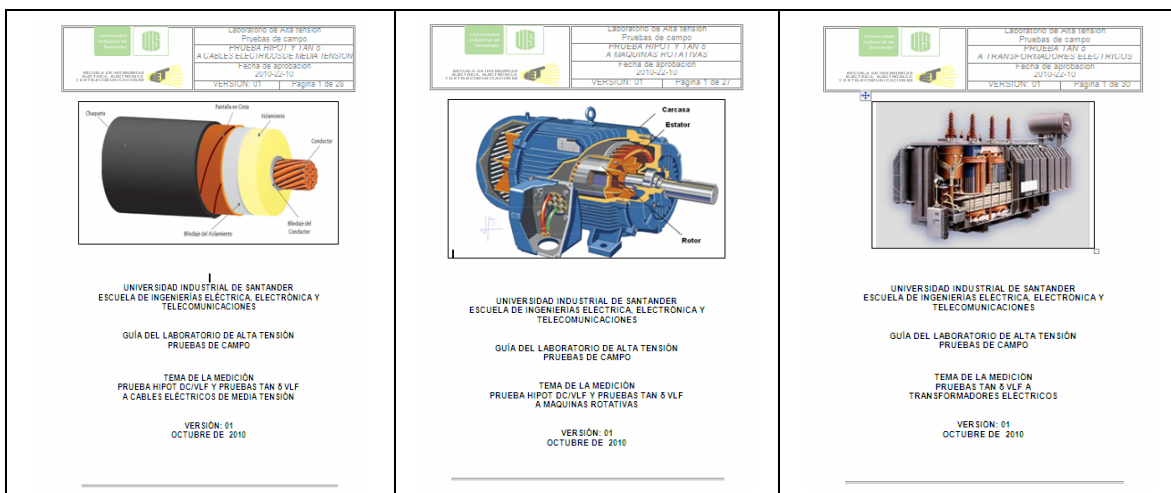
- Permite separar el trabajo de grafo según el elemento bajo prueba, dado que en la práctica existen departamentos de pruebas especializados para cada equipo eléctrico, ejemplo en siemens se tiene un departamento de prueba y capacitación, para transformadores eléctricos otro para maquinas rotativas otro para protecciones eléctricas etc.
- Al separar las pruebas según el equipo a ser probado, se estimula al lector a profundizar en el universo de las pruebas que complementan un buen análisis del estado de cada una de las muestras.

¿Que contiene cada instructivo de pruebas?

Aclarando los motivos que impulsaron a tener estos instructivos de prueba redactados de forma independiente, se procede a hacer referencia al contenido de los manuales.

- Portada.
- Recomendaciones de seguridad industrial.
- Tabla de contenido.
- Introducción.
- Objetivos.
- Alcances.
- Definiciones.
- Método.
- Lista de chequeo.
- Actividades de la prueba.
- Criterios de aprobación.
- Protocolo de prueba.
- Referencia Bibliográfica.
- Equipos utilizados en la práctica.

Portada: recordando que estos instructivos de prueba pueden verse como un todo o de manera independiente, lo más lógico es que cada uno tenga su propia portada, la cual permitirá que sea identificado y le dé el carácter de libertad que se pretende.



Cada portada contiene la siguiente información:

- Una imagen que resalta el elemento bajo prueba, y hace fácil la identificación del contenido del instructivo.
- Logos e información de la Universidad Industrial de Santander y de la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, para darle un carácter de institucionalidad.
- La temática de la medición que aborda el instructivo.
- La versión del instructivo y la fecha de aprobación.

Recomendaciones de seguridad industrial: Dado que las pruebas abordadas se realizan con sobretensiones y se desarrollan en campos eléctricos, se hace necesario implementar una serie de medidas que garanticen las condiciones mínimas de seguridad para:

- Los operarios de las pruebas.
- Los equipos de prueba.
- Los elementos bajo prueba.
- Las instalaciones aledañas a la prueba.
- El personal que de una u otra manera este supervisando el proceso de medición.



Estas recomendaciones son estipuladas por las diferentes normas y casas fabricantes, las cuales fueron consultadas durante la investigación.

Tabla de contenido: Tal cual un documento independiente los instructivos tienen esta información para facilitarle al lector la búsqueda de algún ítem de su interés, los cuales estarán descritos a continuación.

Introducción: En esta parte se hace referencia a los tipos de pruebas abordados por el instructivo, los instrumentos de medida utilizados y las normas de referencia con los cuales se ciñe la investigación.

Objetivo: Aquí se indica lo que se pretende conseguir con la realización de los instructivos y con la realización de las pruebas que estos abordan.

Alcances: Esta sección permite sesgar la aplicación de las pruebas, limitando el universo de los elementos que pueden ser probados bajo los lineamientos del instructivo.

Definiciones: Contiene el léxico básico que se debe manejar por parte de los interesados en realizar las pruebas que se describen en cada instructivo.

Método: Presenta un resumen de la metodología implementada durante la medición para cada una de las pruebas. Lo suficientemente claro como para poder comprender los conceptos que rodean las pruebas.

Lista de chequeo: Enlista los ítems más cruciales para garantizar todo el andamiaje logístico necesario para realizar las pruebas con éxito y sin contratiempos, además permite registrar la fecha, la hora y el responsable del chequeo, lo que evidenciará la ejecución de esta labor.

6. LISTA DE CHEQUEO

En la tabla 2 se encuentran una serie de ítems que le permitirán al operador revisar que tenga a la mano todo lo necesario para efectuar las pruebas Hipot DC/VLF y las pruebas Tan δ VLF, así mismo como una serie de casillas que evidenciarán la realización del chequeo.

Actividad.	Realizada (Fecha: Día, mes y año – hora, hora, minutos, am/pm)
6.1 Llevo los elementos de seguridad para la prueba, ver tabla 1. Observaciones (Si / No):	Si = ____/____/20 - (____/____) No = ____/____/20 - (____/____)
6.2 Examino el buen estado de los equipos de pruebas (IVABO, TC60 y equipos auxiliares, ver sección 11). Observaciones (Si / No):	Si = ____/____/20 - (____/____) No = ____/____/20 - (____/____)
6.3 Verifico la documentación necesaria (ARH, EPS, este manual impreso, y los mencionados en el numeral 7.1.1) Observaciones (Si / No):	Si = ____/____/20 - (____/____) No = ____/____/20 - (____/____)
6.4 Tengo las herramientas necesarias para la prueba (juego de llaves mixtas, extensión eléctrica, lámpara). Observaciones (Si / No):	Si = ____/____/20 - (____/____) No = ____/____/20 - (____/____)
6.5 Reviso los elementos para acordonar la zona de pruebas (conos y cinta de precaución). Observaciones (Si / No):	Si = ____/____/20 - (____/____) No = ____/____/20 - (____/____)
6.6 Compró que llevo los consumibles requeridos para adecuar el elemento bajo prueba (grasas, siliconas, coqueadores de polietileno, paños, alcohol etílico, cintas aislantes, cintas de amarre). Observaciones (Si / No):	Si = ____/____/20 - (____/____) No = ____/____/20 - (____/____)
6.7 Realizo esta inspección antes y después de realizar la prueba. Observaciones (Si / No):	Si = ____/____/20 - (____/____) No = ____/____/20 - (____/____)
Responsable:	
Cargo:	

Tabla 2. Lista de chequeo para pruebas a máquinas rotativas.
Fuente: (Autores).

Dentro de los ítems más cruciales se han seleccionado los siguientes:

- Elementos de seguridad.
- Equipos de inyección y medición.
- Documentación necesaria.
- Herramientas.
- Elementos de acordonamiento.
- Consumible y otros elementos.
- Entrega de orden y aseo del sitio de pruebas.

Frente a cada actividad de la lista de chequeo se disponen una serie de casillas, en las cuales el operador de la prueba deberá evidenciar la realización del chequeo apuntando la fecha en la que se realizó la verificación.

6.4 Tiene las herramientas necesarias para la prueba (juego de llaves mixtas, extensión eléctrica, lámpara).	Si <input type="checkbox"/> (___/___/20__)- (___:___/___) No <input type="checkbox"/>
Observaciones (Si <input type="checkbox"/> / No <input type="checkbox"/>):	
6.5 Reviso los elementos para acordonar la zona de pruebas (conos y cinta de precaución).	Si <input type="checkbox"/> (___/___/20__)- (___:___/___) No <input type="checkbox"/>
Observaciones (Si <input type="checkbox"/> / No <input type="checkbox"/>):	
6.6 Comprobó que lleva los consumibles requeridos para adecuar el elemento bajo prueba (grasas, siliconas, cobertores de polietileno, paños, alcohol etílico, cintas aislantes, cintas de amarre).	Si <input type="checkbox"/> (___/___/20__)- (___:___/___) No <input type="checkbox"/>
Observaciones (Si <input type="checkbox"/> / No <input type="checkbox"/>):	

La casilla de observación se llena siempre que la actividad no puede ser concluida, colocando una marca en el recuadro Si y explicando los motivos por los cuales la actividad no tuvo éxito, o cuando la actividad se realizó y se tiene algún comentario sobresaliente.

Cuando no hay observaciones simplemente se debe marcar el recuadro No.

Para finalizar el chequeo es necesario registrar el nombre del operario o responsable de realizar la verificación de los elementos necesarios para la prueba y el cargo que ocupa dentro de la organización que realiza la prueba.

Responsable:	
Cargo:	
Tabla 2. Lista de chequeo para pruebas a Transformadores. Fuente [Autores].	

En el ambiente laboral las empresas que implementan sistemas de gestión, estipulan este documento como parte importante de cada uno de sus procesos.

Actividades de la prueba: Es la etapa más importante del proyecto dado que entrega los pasos necesarios para ejecutar las pruebas que los instructivos plantean. Recomendándole al lector él como realizar de manera ordenada y segura las pruebas sin perder datos y mitigando al máximo las posibles fuentes de error que se puedan presentar en el desarrollo de la prueba.

Los lineamientos que se siguieron para ordenar el desarrollo de las pruebas fueron los estipulados por las normas consultadas y por las recomendaciones de las casas fabricantes de los elementos bajo prueba, los que permitió separar las actividades en cuatro etapas.

- *Actividades para preparar el elemento bajo prueba:* Enumera las actividades con las cuales el operador podrá recopilar información del elemento bajo prueba, de estudios hechos previamente y del ambiente que rodea la prueba.
- *Establecimiento de la tensión de prueba:* Proporciona las recomendaciones para seleccionar la tensión que se debe aplicar en cada prueba, teniendo en cuenta las características del elemento bajo prueba.
- *Establecimiento de los tiempos de prueba:* Suministra las recomendaciones para el tiempo que debe ser aplicada la tensión de prueba seleccionada con anterioridad.
- *Restablecimiento del elemento bajo prueba:* Entrega una serie de sugerencias para una vez terminada la prueba el operador pueda restablecer el elemento probado, y pueda concluir el análisis de la prueba.

Criterios de aprobación: Como su nombre lo indica son una serie de recomendaciones obtenidas de los estándares internacionales y de casas fabricantes, con los cuales se podrán comparar los datos obtenidos y de esta manera entregar un veredicto de las pruebas.



Complementando la etapa del restablecimiento del elemento bajo prueba, ya que si las pruebas arrojan resultados que confirman la calidad del aislamiento, se podrá restituir la muestra a servicio.

Los instructivos de prueba han sido elaborados para que tengas concordancia con labores de mantenimiento predictivo, en donde se estudia un elemento según la evolución de sus parámetros iniciales, por lo tanto es importante comparar los valores obtenidos con la mediciones hechas en el pasado.

Protocolo de prueba: Esta parte del instructivo permitirá entregar la evidencia de la realización de las pruebas.

El protocolo de pruebas se divide en dos partes:

- La primer parte se divide a su vez en tres secciones:
 - ❖ La primera sección permite recopilar la información más sobresaliente del elemento bajo prueba, datos importantes para estipular la tensión y la duración de prueba.
 - ❖ La segunda sección contiene información referente a las condiciones medio ambientales del sitio de pruebas.

- ❖ En la tercer sección se compilan los datos obtenidos de una prueba de aislamiento puntual, la cual se realiza con valores de tensión menores a los valores nominales de las muestra, por lo tanto si el elemento bajo prueba no pasa esta prueba, se recomienda suspender la prueba de sobretensión e investigar la causa de la falla.

Información del transformador bajo prueba				Fecha: ____/____/20__
Designación del circuito:				
Localización:				
Fabricante del transformador:				
Potencia nominal (kVA)	Tensión nominal de alta (kV)	Tensión nominal de baja (kV)		
Grupo de conexión	Clase de aislamiento	Tipo de refrigeración		
Volumen del aceite	Nivel del aceite	Número de taps		
Instalado: (____/____/20__)	Valores de los taps			
Observaciones del estado:				
Condiciones ambientales				
Temperatura de bulbo seco (°C)	Temperatura de bulbo húmedo (°C)	Temperatura del transformador (°C)		
Altura sobre el nivel del mar (m)	Humedad relativa (%)	Observación:		
Resistencia de aislamiento (Ω)				
Fase A		Fase B		Fase C
Valor medido	Valor medido	Valor medido	Valor medido	Valor corregido
Factor de corrección a 15.8 °C *				
Valor corregido	Valor corregido	Valor corregido	Valor corregido	Valor corregido
Observación:				

- La segunda parte se divide a su vez en cuatro secciones:
 - ❖ En la primer sección el operador indicara el tipo de prueba que se va a realizar (pruebas de aceptación o mantenimiento).
 - ❖ En la segunda sección se registran los valores seleccionados de la tensión a ser inyectada, el número de pasos de tensión y la duración de estos pasos.
 - ❖ En la tercera sección se apuntan las respuestas de la muestra ante el estímulo de la tensión aplicada, datos que permitirán entregar un dictamen del estado de la muestra o del resultado de la prueba.
 - ❖ En la cuarta sección se sitúa el espacio en el cual el operador de la prueba entregara las conclusiones del ensayo basado en los criterios de aceptación y en los datos obtenidos.

Información de la prueba Hipot DC									
Instalación <input type="checkbox"/>			Tipo de prueba			Aceptación <input type="checkbox"/>			
Instalación <input type="checkbox"/>			Tipo de prueba			Aceptación <input type="checkbox"/>			
Instalación <input type="checkbox"/>			Tipo de prueba			Aceptación <input type="checkbox"/>			
Ítem	Paso de tensión	Tensión de prueba kV	Duración s.	Resistencia de aislamiento			Corriente de fuga mA		
				Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
1									
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									
9									
10									
11									
12									
13									
14									
15									
16									
17									
18									
19									
20									
Conclusiones:									
Ejecutado por: Fredy Bautista			Elaborado por: Jorge Villegas			Revisado por: Ing. Julio Chacón MPE		Aprobado por: Ing. José Amaya MIE	

Documentos de referencia bibliográfica: son las referencias que se consultaron a los largo de la investigación. Con los cuales el lector podrá profundizar en los temas de su interés y así podrá generar cambio en el instructivo para que este se adecue a sus necesidades metrológicas.

Equipos utilizados en la práctica: Para finalizar se entrega un resumen con todos los instrumentos que se usan para efectuar la inyección y la medición de los parámetros necesarios para analizar las muestras estudiadas por este trabajo de grado y que estarán en concordancia con las exigencias de la normas consultadas.

Esta sección no es una atadura de fuerza para quien pretenda realizar pruebas de sobretensión o para quien se interese en este trabajo de grado con la finalidad de guiarse en la elaboración de sus propios instructivos, los cuales pueden o no abordar el mismo tipo de pruebas.

Para este lector la recomendación de este trabajo de grado es que realice una lista de las variables que necesita medir, que consulte las exigencias metrológicas para cada proceso de medición y por último que seleccione el instrumento que cumpla con estas condiciones y se amoldan a su capacidad de compra.

3 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Antes de desplazarse a campo para la ejecución de alguna prueba, es necesario realizar un trabajo de tipo logístico, en el cual se revise que todos los elementos que se van a requerir en el momento de la prueba. Véase el ejemplo de la lista de chequeo que se presenta a continuación.

Actividad.	Realizada (Fecha: Día, mes y año – Hora: hora, minutos, am/pm)
6.1 Lleva los elementos de seguridad para la prueba.	Si <input checked="" type="checkbox"/> X (12/10/2010) - (05:10/pm) No <input type="checkbox"/>
Observaciones (Si <input type="checkbox"/> / No <input checked="" type="checkbox"/> X):	
6.2 Examino el buen estado de los equipos de pruebas HVA60, TD60 y equipos auxiliares.	Si <input checked="" type="checkbox"/> X (12/10/2010) - (05:12/pm) No <input type="checkbox"/>
Observaciones (Si <input type="checkbox"/> / No <input checked="" type="checkbox"/> X):	
6.3 Verifico la documentación necesaria (parafiscales, ARP, EPS, el instructivo de pruebas, etc.)	Si <input checked="" type="checkbox"/> X (12/10/2010) - (05:17/pm) No <input type="checkbox"/>
Observaciones (Si <input type="checkbox"/> / No <input checked="" type="checkbox"/> X):	
6.4 Tiene las herramientas necesarias para la prueba (juego de llaves mixtas, extensión eléctrica, lámpara).	Si <input checked="" type="checkbox"/> X (12/10/2010) - (05:23/pm) No <input type="checkbox"/>
Observaciones (Si <input type="checkbox"/> / No <input checked="" type="checkbox"/> X):	
6.5 Reviso los elementos para acordonar la zona de pruebas (conos y cinta de precaución).	Si <input checked="" type="checkbox"/> X (12/10/2010) - (05:30/pm) No <input type="checkbox"/>
Observaciones (Si <input checked="" type="checkbox"/> X / No <input type="checkbox"/>): Se requiere comprar un rollo de cinta de precaución.	
6.6 Comprobó que lleva los consumibles requeridos para adecuar el elemento bajo prueba (grasas, siliconas, cobertores de polietileno, paños, alcohol etílico, cintas aislantes, cintas de amarre).	Si <input checked="" type="checkbox"/> X (12/10/2010) - (05:34/pm) No <input type="checkbox"/>
Observaciones (Si <input type="checkbox"/> / No <input checked="" type="checkbox"/> X):	
6.7 Verificó que el sitio de trabajo se encuentre en condiciones de orden y aseo al final de la prueba.	Si <input checked="" type="checkbox"/> X (13/10/2010) - (12:30/pm) No <input type="checkbox"/>
Observaciones (Si <input checked="" type="checkbox"/> X / No <input type="checkbox"/>): El sitio de trabajo no se encontraba limpio y ordenado al inicio de la prueba.	
Responsable:	Jorge Tulio Villegas Cruz y John Fredy Bautista Reyes
Cargo:	Auxiliares de metrología, Departamento de pruebas.

Después de diligenciar la lista de chequeo y corroborar que se cuentan con todos los elementos para la prueba, se procede a programar el desplazamiento al sitio de trabajo (La lista de chequeo se diligencia de la misma forma para los tres instructivos).

3.1 RESULTADO DE LA PRUEBA A CABLES DE MT.

El instructivo de pruebas para cables de potencia, se divide en tres tipos de pruebas, este proyecto siguió los lineamientos del instructivo para realizar dos de ellas, los resultados se presentan a continuación.

A los cables de MT se le realizaron pruebas Hipot en DC y VLF. Estas pruebas fueron realizadas en la planta de inyección de agua del campo Casabe, propiedad de ECOPETROL S.A. El circuito alimentador principal sometido a prueba, consta de tres conductores por fase. A continuación se expondrán los resultados de dos ternas de este circuito.

3.1.1 Resultado de la prueba hipot DC a cables de MT.

La prueba fue realizada a la triada N°1 de cables de la acometida principal del CCM (celda H6), de la planta de inyección de agua del campo casabe, propiedad de ECOPETROL S.A. Una vez los operadores estén en la planta donde se va a realizar el estudio de aislamiento, se deberá acondicionar el sitio de pruebas y el elemento a ser analizado.

Acto seguido se deberán establecer los controles mínimos de seguridad, después se procede a recopilar la información solicitada por el protocolo que se presenta a continuación:

Información del cable bajo prueba				Fecha: (13/10/2010) Hora:(08:05/am)	
Designación del circuito: Alimentador principal del CCM					
Localización: Cuarto de control, celda H6, Planta de inyección de agua, Campo Casabe.					
Fabricante del cable: Centelsa					
Tensión nominal kV:		15		Tensión de operación kV: 13,8	
Tipo de aislamiento:					
EP <input type="checkbox"/>		XLPE <input checked="" type="checkbox"/>		TRXLPE <input type="checkbox"/>	
				EPR <input type="checkbox"/>	
				PILC <input type="checkbox"/>	
Nivel de aislamiento:					
100% <input type="checkbox"/>		133% <input checked="" type="checkbox"/>		173% <input type="checkbox"/>	
Calibre AWG:		750kcmil		Longitud m: 25	
				Instalado: (10/10/2010)	
Observaciones del estado:					
Información de los terminales o pre-moldeados					
Tipo (Extremo 1)			Tipo (Extremo 2)		
Interior <input checked="" type="checkbox"/>		Exterior <input type="checkbox"/>		Interior <input type="checkbox"/>	
				Exterior <input checked="" type="checkbox"/>	
Tensión nominal kV:		15		Tensión nominal kV: 15	
Fabricante: 3M			Fabricante: 3M		
Estado:					

Condiciones ambientales					
Temperatura ambiente °c: 22		Altura sobre el nivel del mar m: 75		Humedad relativa %: 54	
Observación: Cuarto refrigerado con aire acondicionado en el extremo 1.					
Resistencia de aislamiento MΩ					
Fase A		Fase B		Fase C	
Valor medido	176000	Valor medido	177000	Valor medido	169000
Factor de corrección a 15,6 °c =			1,56		
Valor corregido	274560	Valor corregido	276120	Valor corregido	263640
Observación: Valores de resistencia de aislamiento para la triada N°1.					
Resistencia de aislamiento MΩ					
Fase A		Fase B		Fase C	
Valor medido	186000	Valor medido	193000	Valor medido	200000
Factor de corrección a 15,6 °c =			1,56		
Valor corregido	274560	Valor corregido	276120	Valor corregido	263640
Observación: Valores de resistencia de aislamiento para la triada N°2.					

Obtenida la información que solicita la primera parte del protocolo, se seleccionan los parámetros con los cuales se va a realizar la inyección de tensión, los cuales se estipulan en los instructivos de prueba.

La segunda parte del protocolo presenta los datos medidos durante la realización de la prueba hipot DC de la cual se resalta lo siguiente:

- Se trata de una prueba de aceptación hipot DC, a una triada de cables de 15 kV.
- La tensión máxima de prueba es de 64 kV según la norma 400.1-2007, debido a que la capacidad del equipo HV60 es tan solo de 60 KV, se optó por realizar esta prueba con este nivel de tensión.
- Para llegar a la tensión máxima de prueba fueron necesarios realizar 6 pasos de tensión de 10 kV cada uno. Esto se dispuso de acuerdo con la recomendación de la norma IEEE 400.1-2007 en su numeral 4.3, que propone realizar la prueba en cinco pasos como mínimo y que cada uno de los pasos no exceda un valor de 10 kV.

Información de la prueba Hipot DC a cables de MT									
Tipo de prueba									
Instalación <input type="checkbox"/>			Aceptación <input checked="" type="checkbox"/>				Mantenimiento <input type="checkbox"/>		
Ítem	Paso de tensión	Tensión de prueba kV	Duración s.	Resistencia de aislamiento MΩ			Corriente de fuga μA		
				Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
1	1	10	60	2900	2800	2500	3,5	3,6	4,0
2	2	20	120	8300	7400	6200	2,4	2,7	3,2
3	3	30	180	16000	12000	15000	1,9	2,6	2,0
4	4	40	240	18000	18000	15000	2,2	2,2	2,6
5	5	50	300	13000	13000	14000	3,9	3,8	3,7
6	6	60	360	14000	13000	15000	4,2	4,5	4,0
7	6	60	420	13000	14000	12000	4,7	4,4	4,9
8	6	60	480	12000	11000	12000	5,0	5,5	4,8
9	6	60	540	8400	9300	8800	7,1	6,7	6,8
10	6	60	600	8800	9200	9200	6,8	6,5	6,5
11	6	60	660	8300	8700	8800	7,2	6,9	6,8
12	6	60	720	9500	9000	10000	6,3	6,6	5,8
13	6	60	780	9400	9000	10000	6,4	6,6	5,9
14	6	60	840	10000	9000	11000	6,0	6,6	5,6
15	6	60	900	9500	9000	10000	6,3	6,7	6,0
16	6	60	960	9700	9200	9800	6,2	6,5	6,1
17	6	60	1020	9500	9200	11000	6,3	6,5	5,7
18	6	60	1080	9800	9000	11000	6,1	6,7	5,6
19	6	60	1140	9800	9000	11000	6,1	6,6	5,7
20	6	60	1200	9200	9000	11000	6,5	6,6	5,7

Conclusiones:
La terna de cables soporto el esfuerzo eléctrico de la prueba Hipot DC.

Ejecutado por: Fredy Bautista	Elaborado por: Jorge Villegas	Revisado por: Ing. Julio Chacón MPE	Aprobado por: Ing. José Amaya MIE
----------------------------------	----------------------------------	--	--------------------------------------

- El tiempo total de la inyección de tensión fue de 1200 s (20 minutos).
- Al realizar la prueba de resistencia de aislamiento previa a la prueba Hipot, se evidencio que los cables no poseen fatigas eléctricas, mecánica, térmicas y ataques químicos severos debido a que los valores obtenidos de resistencia de aislamiento cumplen con el criterio estipulado en la norma IEEE 43-2000, donde se recomienda que por cada kilovolt inyectado se debe obtener un megaohm. Para este caso se obtienen medidas superiores a 169 GΩ, en los valores que aún no se han corregido por temperatura, lo que quiere decir que podemos proceder a realizar la prueba Hipot DC.

- Las corrientes de fuga se encuentran dentro del rango contemplado en la norma 400.1-2007, donde se expresa que la corriente de fuga no debe exceder los 100 μA . Cabe resaltar que los tres cables se comportan de manera similar.
- Por lo tanto la conclusión es que la terna de cable soporto el esfuerzo eléctrico establecido por la prueba hipot DC.

3.1.2 Resultado de la prueba hipot VLF a cables de MT.

La prueba de Hipot VLF fue realizada a la triada N°2 de cables de la acometida principal del CCM (celda H6), de la planta de inyección de agua del campo casabe, propiedad de ECOPETROL S.A. con las mismas características que la primera triada.

Los resultados no presentaron evidencias de daños en el aislamiento que comprometan la capacidad de soportar esfuerzos eléctricos.

Información de la prueba Hipot VLF a cables de MT									
Tipo de prueba									
Instalación <input type="checkbox"/>				Aceptación <input checked="" type="checkbox"/>			Mantenimiento <input type="checkbox"/>		
Ítem	Paso de tensión	Tensión de prueba kV	Duración s.	Resistencia de aislamiento $\text{M}\Omega$			Corriente de fuga μA		
				Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
1	1	4	60	267	302	287	21	20	20
2	2	8	120	295	331	305	41	44	43
3	3	12	180	297	330	312	65	68	63
4	4	16	240	297	329	321	91	94	95
5	5	20	300	309	335	325	119	121	118
6	5	20	360	310	333	326	120	121	120
7	5	20	420	311	331	326	120	121	120
8	5	20	480	312	330	326	121	120	120
9	5	20	540	312	330	327	120	120	121
10	5	20	600	313	331	327	120	120	121
11	5	20	660	312	332	327	120	120	121
12	5	20	720	313	334	326	120	120	121
13	5	20	780	312	335	326	120	122	121
14	5	20	840	315	337	327	121	121	121
15	5	20	900	314	337	327	121	121	121
16	5	20	960	313	337	326	121	121	121
17	5	20	1020	315	336	326	121	121	121
18	5	20	1080	317	337	326	121	121	122
19	5	20	1140	317	336	327	121	121	122
20	5	20	1200	317	335	327	121	122	122
21	5	20	1260	317	335	327	121	122	122

22	5	20	1320	317	335	326	121	123	122
23	5	20	1380	318	336	328	122	122	123
24	5	20	1440	318	336	328	122	122	123
25	5	20	1500	319	336	324	122	122	122
26	5	20	1560	320	336	329	122	122	124
27	5	20	1620	320	336	329	122	123	124
28	5	20	1680	320	336	330	122	123	124
29	5	20	1740	321	337	329	123	123	124
30	5	20	1800	321	337	329	123	123	124
31	5	20	1860	320	337	325	123	122	122
32	5	20	1920	320	334	324	123	121	123
33	5	20	1980	319	336	325	123	123	123
34	5	20	2040	321	336	324	122	122	122
35	5	20	2100	321	336	326	122	122	123
Conclusiones:									
La terna de cables soporto el esfuerzo dieléctrico de la prueba Hipot VLF.									
Ejecutado por: Fredy Bautista			Elaborado por: Jorge Villegas			Revisado por: Ing. Julio Chacón MPE		Aprobado por: Ing. José Amaya MIE	

De la segunda prueba y basados nuevamente en el protocolo se resalta lo siguiente:

- Se trata de una prueba de aceptación hipot VLF, a una triada de cables de 15 kV.
- La tensión máxima de prueba es de 20 kV, dispuesta de esta manera por la norma IEEE 400.2-2004.
- Para llegar a la tensión máxima de prueba fueron necesarios realizar 5 pasos de tensión de 4 kV cada uno. Esto sigue el mismo criterio de la prueba en tensión DC.
- El tiempo total de la inyección de tensión fue de 2100 s (35 minutos).
- La resistencia de aislamiento, al igual que la triada anterior presenta niveles de aislamiento del orden de 186 GΩ. Como la prueba es independiente de la prueba Hipot tanto en DC y/o VLF, nos acogemos al mismo criterio en los dos casos.
- Las corrientes de fuga no evidencian fallas severas en el aislamiento de ninguna de las fases, dado que su comportamiento es estable y no sufre variaciones fuertes durante el trámite de la prueba.
- Por lo tanto la conclusión es que la terna de cable soporto el esfuerzo dieléctrico establecido por la prueba hipot VLF.

Si se comparan las pruebas hipot DC con las de VLF sobresalen los siguientes aspectos.

- La tensión de prueba es tres veces mayor en DC que en VLF, esto se da principalmente por el nivel de aislamiento del cable bajo prueba el cual es del 133%,

esto obedece a que para pruebas hipot DC la tensión a ser inyectada es mayor a medida que aumenta el nivel de aislamiento pero para pruebas hipot VLF, las recomendaciones de la tensión de prueba dependen solo del cable bajo prueba y de la onda de tensión que el inyector VLF otorgue.

- Al ser la tensión de prueba menor en VLF, permite realizar menos pasos de tensión y que estos sean de menor amplitud.
- La duración de la prueba en VLF es mayor a la prueba en DC.
- Las corrientes de fuga son más elevadas bajo la tecnología VLF, pero más estables durante todo el tiempo de prueba.

3.2 RESULTADO DE LA PRUEBA A MÁQUINAS ROTATIVAS.

Dado que las máquinas rotativas son el segundo grupo de elementos eléctricos estudiados por este trabajo de grado, realizamos una prueba de Tan δ a un generador de propiedad de TEBSA. La información de la máquina seleccionada para comprobar la efectividad del instructivo de pruebas es la siguiente:

Información de la máquina rotativa bajo prueba			Fecha: (11/09/2010) Hora:(03:10/pm)		
Designación de la máquina: Generador GT11					
Localización: Planta termo Barranquilla, unidad de generación GT11.					
Fabricante: ABB		Año:-No se identifica-			
Potencia nominal MVA:	140	Factor de potencia:	0,85		
Tensión nominal kV:	13,8	Corriente nominal kA:	5,887		
Clase de aislamiento:	B	Conexión:	Y		
Observaciones del estado:					
Condiciones ambientales					
Temperatura ambiente °c:	40	Altura sobre el nivel del mar m:	7	Humedad relativa %:	
				36	
Observación:					
Resistencia de aislamiento M Ω					
Fase A		Fase B		Fase C	
Valor medido	2870	Valor medido	2500	Valor medido	2800
Factor de corrección a 20 °c =			2,5		
Valor corregido	7175	Valor corregido	6250	Valor corregido	7000
Observación:					

3.2.1 Resultado de la prueba Tan δ VLF a máquinas rotativas.

Obtenida la información que solicita la primera parte del protocolo, se seleccionan los parámetros con los cuales se va a realizar la inyección de tensión, los cuales se estipulan en los instructivos de prueba.

La segunda parte del protocolo presenta los datos medidos durante la realización de la prueba Tan δ de la cual se resalta lo siguiente:

Información de la prueba Tan δ VLF a máquinas rotativas												
Tipo de prueba												
Instalación <input type="checkbox"/>				Aceptación <input checked="" type="checkbox"/>					Mantenimiento <input type="checkbox"/>			
Ítem	Paso de tensión	Tensión de prueba kV	Duración s.	Tan δ M Ω $\times 10^{-3}$			Capacitancia nF			Corriente de fuga mA		
				Fase			Fase			Fase		
				A	B	C	A	B	C	A	B	C
1	1	2	180	23,2	23,8	24,6	395	397	394	0,49	0,49	0,49
2	2	4	360	26,1	26,6	27,7	396	397	394	0,99	0,99	0,99
3	3	6	540	29,3	29,8	31,2	398	399	397	1,49	1,50	1,49
4	4	8	1080	33,1	33,4	35,1	399	400	398	2,0	2,0	1,99
Conclusiones:												
Ejecutado por: Fredy Bautista			Elaborado por: Jorge Villegas			Revisado por: Ing. Julio Chacón MPE			Aprobado por: Ing. José Amaya MIE			

- Los valores de resistencia de aislamiento, ofrecieron un análisis positivo del aislamiento, lo cual nos permite proceder a realizar la prueba Tan δ .
- La prueba se realiza con tensión de fase (8 kV). La prueba se dispuso de esta manera dado que se realizó la prueba a cada una de las bobinas por separado y la norma 433-2009 lo dispone de la misma manera en su anexo A.
- La duración total de la prueba fue de 1080 s (18 minutos).
- Se efectuaron 4 pasos de tensión de 2 kV cada uno.
- Los valores de Tan δ para los tres devanados del estator, son similares en cada paso de tensión. Estos valores se encuentran dentro del rango de 0,5% recomendado por la norma IEEE 43-2000, para que el aislamiento de un devanado este en buen estado.
- Los valores de capacitancia no presentan variaciones bruscas a medida que se incrementa la tensión.

- La corriente de fuga en las tres fases, aumento a medida que aumentaba la tensión de prueba, pero no presenta valores que pongan en riesgo la integridad del aislamiento de la máquina.
- Los valores de resistencia de aislamiento, ofrecieron un análisis positivo del aislamiento, lo cual nos permite proceder a realizar la prueba Tan δ

3.3 RESULTADO DE LA PRUEBA A TRANSFORMADORES.

El último grupo de elementos eléctricos estudiados por este trabajo de grado, son los transformadores. La prueba de Tan δ fue realizada en el campo cantagallo de propiedad de ECOPETROL S.A. La información recopilada para comprobar la efectividad del instructivo de pruebas es la siguiente:

Información del transformador bajo prueba				Fecha: (21/12/2008) Hora:(02:13/pm)	
Designación del circuito: Transformador principal de la unidad generadora N° 1					
Localización: Centro de generación Cantagallo – ECOPETROL S.A.					
Fabricante del transformador: SIEMENS S.A.					
. Potencia nominal kVA	2000	Tensión nominal de alta kV	13,8	Tensión nominal de baja kV:	4,16
Grupo de conexión	Ynd1	Clase de aislamiento	I	Tipo de refrigeración	ONAN
Volumen del aceite	1300 Lts	Año de fabricación	2008	Numero de taps	5
Observaciones del estado:					
Condiciones ambientales					
Temperatura ambiente °c: 36,4		Altura sobre el nivel del mar m: 63		Humedad relativa %: 48	
Observación:					
Resistencia de aislamiento M Ω					
Alta – Baja		Alta – Tierra		Baja - Tierra	
Valor medido	48700	Valor medido	20100	Valor medido	101000
Factor de corrección a 20 °C =			2,80		
Valor corregido	136360	Valor corregido	56280	Valor corregido	282800
Observación:					

3.3.1 Resultado de la prueba Tan δ VLF a transformadores.

Obtenida la información que solicita la primera parte del protocolo, se seleccionan los parámetros con los cuales se va a realizar la inyección de tensión, los cuales se estipulan en los instructivos de prueba.

La segunda parte del protocolo presenta los datos medidos durante la realización de la prueba Tan δ de la cual se resalta lo siguiente:

Información de la prueba Tan δ VLF a transformadores				
Tipo de prueba				
Instalación <input type="checkbox"/>	Aceptación <input checked="" type="checkbox"/>			Mantenimiento <input type="checkbox"/>
Paso de tensión	1	2	3	4
Duración s	180	360	540	1080
PRUEBA DE ALTA – BAJA.				
Tensión de prueba kV	3,5	6,9	10,4	13,8
Tan δ M Ω x10 ⁻³	71,7	78,2	68,6	59,1
Capacitancia nF	6	7	7	7
Corriente de fuga mA	0,014	0,028	0,043	0,057
PRUEBA ALTA – TIERRA.				
Tensión de prueba kV	3,5	6,9	10,4	13,8
Tan δ M Ω x10 ⁻³	67,6	67,6	63,2	56,7
Capacitancia nF	6	7	7	7
Corriente de fuga mA	0,014	0,028	0,042	0,056
PRUEBA BAJA – TIERRA.				
Tensión de prueba kV	1	2,1	3,1	4,2
Tan δ M Ω x10 ⁻³	66,8	87,7	87,8	90,0
Capacitancia nF	8	8	8	8
Corriente de fuga mA	0,004	0,010	0,015	0,020
Conclusiones:				
Ejecutado por: Fredy Bautista	Elaborado por: Jorge Villegas		Revisado por: Ing. Julio Chacón MPE	Aprobado por: Ing. José Amaya MIE

La realización de las pruebas nos permitió la verificación y corrección de la lista de chequeo y los protocolos, esto con el fin de optimizarlos y hacerlos más prácticos para la realización de las pruebas eléctricas que trata este trabajo de grado.

4 CONCLUSIONES

- Antes de realizar pruebas hipot o $\tan \delta$, es necesario descartar fallas severas en el aislamiento, esta verificación se puede hacer por medio de pruebas de resistencia de aislamiento las cuales tienen las siguientes características:
 - ❖ Son realizadas aplicando tensiones DC.
 - ❖ Las tensiones aplicadas son inferiores a la tensión nominal de los elementos bajo prueba.
 - ❖ La duración de la prueba es de 60 s, y se conocen ampliamente como pruebas puntuales de aislamiento.
 - ❖ La norma IEEE 43-2000 en su tabla 1, entrega las recomendaciones de la tensión de prueba y los valores aproximados que se deben obtener.
- Las sobretensiones aplicadas en pruebas hipot, son inyectadas de manera gradual ya sea a manera continua o por pasos de tensión por los siguientes motivos.
 - ❖ Los elementos bajo prueba son de altas capacitancias.
 - ❖ Si existen puntos débiles en el aislamiento, la falla se expondrá a medida que se incrementa la tensión.
- En cuanto a las pruebas hipot sin importar el tipo de onda a ser implementada se puede destacar lo siguiente:
 - ❖ Las recomendaciones para la tensión de prueba a ser inyectada ha sido establecida de manera estadística por lo tanto los valores no obedecen a una ecuación en particular excepto para probar los devanados de las máquinas rotativas.
 - ❖ El tiempo de prueba no debe ser superior a una hora por dos motivos:
 - ✓ Evitar cambios en las condiciones atmosféricas.
 - ✓ Las pruebas experimentales han establecido que después de una hora de aplicada la sobretensión la totalidad de las muestras sus falla de aislamiento.
 - ❖ No se debe confundir la finalidad de las pruebas hipot con la finalidad de las pruebas dieléctricas en general, dado que la finalidad de las pruebas hipot es hacer que un cable en mal estado evidencie su deterioro por medio de una falla, lo que les da un carácter de prueba destructiva, pasando a un segundo plano los valores obtenidos de corrientes de fuga durante la inyección de tensión.
 - ❖ El que un equipo eléctrico soporte los esfuerzos dados por la aplicación de una sobretensión a lo largo de una prueba hipot, no garantiza que el equipo no presente fallas en el sistema de aislamiento una vez sea puesto en servicio.

- Las unidades de prueba DC/VLF brindan las siguientes ventajas en comparación con las unidades de prueba AC a 50-60 Hz.
 - ❖ Son más livianos, lo que permite su fácil transporte hasta el sitio de pruebas, la unidad HV60 pesa 60 kg.
 - ❖ Son más económicos.
 - ❖ La disminución de la frecuencia de prueba, permite un ahorro energético.
 - ❖ La unidad HV60 permite probar a 0,1 Hz cargas de 1 μ F (aproximadamente 3000 m de un cable de potencia) y a 0,02 Hz cargas de 5 μ F (aproximadamente 15000 m de un cable de potencia).
 - ❖ Las pruebas hipot aplicadas a transformadores solo son avaladas a 60 Hz.
- Comparaciones de la tecnología DC y la tecnología VLF.
 - ❖ Los criterios de selección de la tensión de prueba para cables es más concreto en DC que en VLF, ya que para DC se especifica no solo la tensión nominal de la muestra, si no su nivel de aislamiento y en algunos casos los calibres del conductor además del espesor del aislamiento.
 - ❖ Las unidades VLF permiten realizar no solo pruebas de soporte hipot, si no también pruebas de diagnóstico como los son las pruebas Tan δ y descargas parciales (DP).
 - ❖ La tecnología DC se recomienda no sea utilizada en cables con más de 5 años en servicio mientras que para la tecnología VLF no hay restricciones en cuanto a la edad de la muestra.
 - ❖ La norma IEEE 400.2-2004 avala cuatro tipos de onda de tensión para las unidades de tecnología VLF, pero solo para dos de ellas (la onda sinusoidal y el coseno rectangular), especifica los criterios de prueba.
 - ❖ El consenso entregado a finales de los 90, indicando que las pruebas de sobretensión en DC, no solo deterioran rápidamente el aislamiento termo rígido de cables de potencia sino que constituyen un método poco diciente de la calidad de los aislamientos, fortaleció la implementación de las pruebas en VLF.
- La tecnología VLF lleva más de 35 años de experiencia realizando pruebas de aislamiento a máquinas rotativas, evidencia de esto es la norma IEEE 433 que fue publicada por primera vez en el año 1974.
- La finalidad de las pruebas Tan δ , no es poner a prueba la capacidad de los aislamientos a soportar esfuerzos eléctricos, es determinar la calidad del aislamiento y el grado de deterioro que tenga, por lo tanto no es necesario que se realicen las medidas de Tan δ , con valores superiores a la tensión nominal.

5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- HIGHVOLTAGE. Disponible en internet:
<http://www.hvinc.com/downloads/HPA_Series_AC_Dielectric_Test_Sets.pdf>.
- KUFFEL, E. y ZAENGL, W.S. y KUFFEL, J. En: High Voltage Engineering fundamentals. 2 ed. Grand Britain:Butterworth-Heinemann, 2000. p. 8-76.
- INDUCOR INGENIERIA. Disponible en internet:
<http://www.inducor.com.ar/articulostecnicos/VLF/prueba_y_diagnostico_de_cables_de_energia_mediante_el_uso_de_tecnologia_vlf_parte1.pdf>.
- INDUCOR INGENIERIA. Disponible en internet:
<http://www.inducor.com.ar/articulostecnicos/VLF/vlf200_hvcd.pdf>.
- INDUCOR INGENIERIA. Disponible en internet:
<http://www.inducor.com.ar/articulostecnicos/VLF/prueba_y_diagnostico_de_cables_de_energia_mediante_el_uso_de_tecnologia_vlf_parte4.pdf>.
- INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEER. Standard techniques for high-voltage testing. IEEE std4-1995. New York: IEEE, 1995. 137 p.
- INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEER. Recommended practice for testing insulation resistance of rotating machinery. IEEE 43-2000. New York: IEEE, 2000. 27 p.
- INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEER. Guide for diagnostic field testing of electric power apparatus Part 1. Oil filled power transformers, regulators, and reactors. IEEE std 62-1995. New York: IEEE, 1995. 64 p.
- INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEER. Recommended practice for insulation testing of AC electric machinery (2300 V and above) with high direct voltage. IEEE 95-2002. New York: IEEE, 2002. 57 p.
- INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEER. Recommended practice for measurement of power factor tip-up of electric machinery stator coil insulation. IEEE 286-2000. New York: IEEE, 2000. 35 p.
- INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEER. Guide for field testing and evaluation of the insulation of shielded power cable systems. IEEE 400-2001. New York: IEEE, 2001. 40 p.
- INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEER. Guide for field testing of laminated dielectric, shielded power cable systems rated 5 kV and above with high direct current voltage. IEEE 400.1-2007. New York: IEEE, 2007. 24 p.

- INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEER. Guide for Field Testing of Shielded Power Cable Systems Using Very Low Frequency (VLF). IEEE 400.2-2004. New York: IEEE, 2004. 29 p.
- INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEER. Guide for insulation maintenance for rotating electric machinery (5 hp to less than 10 000 hp). IEEE 432-1992. New York: IEEE, 1992. 28 p.
- INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEER. Recommended practice for insulation testing of AC electric machinery with high voltage at Very Low Frequency. IEEE 433-2009. New York: IEEE, 2009. 30 p.
- INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEER. Recommended practices for safety in high-voltage and high-power testing. IEEE 510-1983. New York: IEEE, 1983. 24 p.
- INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEER. Standard for standard general requirements for liquid-immersed distribution, power, and regulating Transformers. IEEE std C57.12.00.-2006. New York: IEEE, 2007. 71 p.
- INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEER. Standard terminology for power and distribution transformers. IEEE std C57.12.80.-2002. New York: IEEE, 2002. 51 p.
- INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEER. Standard test code for liquid-immersed distribution, power, and regulating transformers. IEEE std C57.12.90.-2006. New York: IEEE, 2007. 94 p.
- INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEER. Standard test code for dry-type distribution and power transformers. IEEE std C57.12.91.-2001. New York: IEEE, 2001. 83 p.
- SEMINARIO EN PRUEBAS DE MANTENIMIENTO Y DIAGNÓSTICO EN TRANSFORMADORES. (9-10. julio, 2009: Bogotá D.C., Colombia). Memorias. Bogotá D.C.: GERS S.A, 2009.

6 ANEXOS

ANEXO A. CLASIFICACIÓN DE LAS PRUEBAS.

Las pruebas a elementos eléctricos se pueden clasificar de diferentes maneras este trabajo resalta tres (3) de ellas, según la etapa en la que se encuentre el elemento bajo prueba, según la exigencia de su análisis y según la fuente de tensión implementada.

Pruebas según su etapa.

La etapa a la cual se hace alusión en este caso es el lugar o proceso en donde se encuentre el elemento bajo prueba ya que se toman consideraciones diferentes si aún está en proceso de fabricación, de instalación o durante su vida útil.

Pruebas de fábrica.

Una vez construido o fabricado el elemento eléctrico es necesario efectuar algunas pruebas con las siguientes finalidades:

- Verificar las características de operación y calidad de fabricación antes de ser entregado al cliente.
- Comprobar el cumplimiento específico de algún parámetro o función.
- Establecer parámetros de referencia ante pruebas futuras.
- Elaborar los protocolos de pruebas y sus respectivos informes.

Al tener el elemento bajo prueba dentro de las instalaciones de la fábrica se puede llevar a cabo un control sobre las condiciones medio ambientales (temperatura, humedad relativa y presión atmosférica) durante la prueba. Gracias al control de las condiciones medio ambientales se puede ejercer una comparación más exacta con los criterios de aceptación establecidos por los estándares internacionales, para cada elemento bajo prueba.

Pruebas de aceptación.

Una vez terminado y aprobado el proceso de fabricación del elemento eléctrico, se inicia una etapa donde puede ser manipulado por varias personas, antes de que comience el proceso de instalación, siendo necesario efectuar algunas pruebas antes de ser puesto en marcha, con las siguientes finalidades:

- Constatar que durante los tiempos de almacenamiento no se afectaron las características del elemento.
- Verificar la normalidad en el transporte, manejo de un posible desarme y posterior ensamble o durante la instalación (cables eléctricos, transformadores y máquinas rotativas).
- Comprobar que las condiciones son las adecuadas antes de energizar el elemento.
- Establecer nuevamente parámetros ante pruebas futuras.
- Servir de soporte para la entrega parcial o total de la obra.

Pruebas de mantenimiento.

Son pruebas realizadas periódicamente o cuando ha sucedido algún evento que ponga en duda la funcionalidad del elemento, son convenientes por lo siguiente:

- Determinar el grado de deterioro (envejecimiento) del elemento, ya sea por el paso del tiempo, un evento eléctrico, mecánico, térmico o físico químico.
- Comprobar que se mantienen las condiciones adecuadas para permanecer operando.
- Evaluar los efectos provocados por eventos tales como cortos circuitos, disparo de protecciones etc.
- Programar intervenciones futuras ante los resultados del mantenimiento (reparaciones o reposiciones).
- Evitar fallas catastróficas.

Las pruebas de mantenimiento a su vez pueden ser de tres tipos:

- Pruebas predictivas: se realizan a elementos que han estado en condiciones normales de funcionamiento para determinar su vida útil.
- Pruebas preventivas: se realizan cuando han ocurrido eventos que ponen en entre dicho la capacidad de un elemento para soportar esfuerzos eléctricos.
- Pruebas correctivas: se realizan para determinar los elementos que necesitan ser reemplazados en un sistema que presenta fallas.

En la actualidad para cualquiera de los tres escenarios de prueba anteriormente mencionados, un valor puntual (es el resultado de realizar una prueba en un determinado tiempo) es un criterio de aceptación poco determinante, lo que se promueve hoy en día es tener un historial de las pruebas al elemento y comparar los resultados obtenidos con los valores históricos y así poder establecer cómo ha evolucionado con el pasar del tiempo.

Pruebas según la exigencia de su análisis.

Si bien dos equipos en fábrica son construidos de la misma manera, se debe tener en cuenta que sus condiciones de operación serán diferentes dado que serán sometidos a distintos esfuerzos. Lo cual representa que a dos elementos iguales se le implementaran programas de mantenimientos diferentes, dividiendo las pruebas en:

Pruebas de rutina.

Se efectúan a todos y cada uno de los elementos de un lote para verificar sus características básicas, habitualmente se incluye dentro de los programas de mantenimiento, y deben ser de fácil ejecución.

Algunas normas las definen de la siguiente manera:

- *ANSI/IEEE C57.12.80-1978*: Son pruebas hechas por el fabricante para control de calidad en cada elemento o muestra representativa, o sobre partes o materiales si se requiere, para verificar que el producto cumple con las especificaciones de su diseño.
- Algunas pruebas de rutina en cables eléctricos de MT son:
 - ❖ Pruebas dimensionales.
 - ❖ Pruebas de grado de reticulación.
 - ❖ Pruebas de penetración de agua.
 - ❖ Resistencia eléctrica del conductor.
 - ❖ Resistencia de aislamiento.
- Algunas pruebas de rutina en transformadores son:
 - ❖ Medición de la resistencia de los devanados.
 - ❖ Medición de la relación de transformación, verificación de la polaridad y relación de fase.
 - ❖ Medición de la tensión de cortocircuito.
 - ❖ Medición de la impedancia y pérdidas con carga.
 - ❖ Medición de las pérdidas y corriente sin carga.
 - ❖ Ensayo de tensión aplicada.
- Algunas pruebas de rutina para máquinas rotativas son:
 - ❖ Medición de resistencia de aislamiento.
 - ❖ Prueba de ELCID
 - ❖ Termografía.

Pruebas de diseño.

También son llamadas pruebas tipo, se realizan sobre una unidad de prueba o prototipo, en algunas normas se definen de la siguiente manera:

- *ANSI/IEEE C57.12.80-1978*: Son pruebas hechas para determinar la validez de un diseño particular, un estilo o modelo, de un equipo o sus componentes, para cumplir con sus rangos asignados y para operar satisfactoriamente bajo condiciones normales de servicio o bajo condiciones especiales, si estas son especificadas; y para demostrar que se ajusta a normas apropiadas de la industria.
- *IEEE Std C57.12.00-2006*: Son pruebas hechas para determinar que el diseño de un tipo particular, estilo o modelo de un transformador o sus partes componentes es adecuado.
- Algunas pruebas tipo en cables de MT son:
 - ❖ Rigidez dieléctrica.
 - ❖ Tangente Delta con onda sinusoidal.
 - ❖ Descargas parciales.
- Algunas pruebas tipo en transformadores son:
 - ❖ Medición de ruido audible.
 - ❖ Ensayo de calentamiento.
 - ❖ Aptitud para soportar el cortocircuito.
- Algunas pruebas tipo para máquinas rotativas son:
 - ❖ Detección de fisuras en el aislamiento.
 - ❖ Análisis de acuñado en ranuras.
 - ❖ Detección de espiras en cortocircuito.

1.1.2.3 Pruebas especiales.

Se realizan habitualmente bajo pedido, dada la exigencia del cliente o del fabricante, algunas de las definiciones se dan a continuación:

- Son pruebas para evaluar en productos individuales, con normas que puedan ser especificadas por el comprador, adicionales a las pruebas de rutina (Ejemplo: impulso, Factor de potencia del aislamiento.)
- *NTC 380*: dice “Es un ensayo realizado para demostrar el cumplimiento de alguna condición particular”.
- Algunas pruebas especiales a cables de MT son:
 - ❖ Medida de la resistencia eléctrica de la pantalla metálica.
 - ❖ Medida de la resistividad eléctrica de las pantallas semiconductoras.
 - ❖ Medida de la resistividad volumétrica y constante del aislamiento.
- Algunas pruebas especiales en transformadores son:

- ❖ Medición de la impedancia de secuencia cero.
 - ❖ Verificación de la resistencia dinámica.
 - ❖ Medición de las capacitancias.
 - ❖ Medición de las descargas parciales.
 - ❖ Medida de los armónicos (sin carga).
 - ❖ Obtención de la respuesta en frecuencia FRA.
- Algunas pruebas especiales en máquinas rotativas son:
- ❖ Scanner de la variación del campo magnético.
 - ❖ Pruebas al entrehierro: (deformación del estator y del rotor).

En este punto es importante indicar que una prueba puede tener el carácter de rutina, diseño o especial según la importancia que tenga un elemento dentro de un sistema de potencia, si el elemento es un eslabón crítico para las operaciones del sistema tomará más importancia y será más exigente su mantenimiento.

Pruebas según su fuente de tensión.

En el ámbito del mantenimiento se cuentan con varias clases de equipos de inyección, los cuales simulan los parámetros eléctricos ya sea variando la corriente, la frecuencia o para el caso del presente proyecto la tensión. Más precisamente la finalidad de este trabajo de investigación es determinar cómo se comportan los equipos ante los esfuerzos provocados por las tensiones de prueba, si bien la tensión nominal del sistema no causa daños graves al aislamiento, salvo en circunstancias especiales por ejemplo en condiciones de contaminación.

Se recuerda que la tensión nominal en un sistema es el parámetro que permite determinar el dimensionamiento de los aislamientos que forman parte de un equipo de generación, transmisión o distribución.

Los esfuerzos de tensión en los sistemas de energía surgen de dos tipos de sobretensiones:

- Sobretensiones de origen externo, están asociadas con descargas atmosféricas y no dependen de la tensión nominal del sistema. Los efectos de las sobretensiones producidas por los rayos disminuyen a medida que aumenta la tensión nominal de sistema.
- Sobretensiones de origen interno, son generadas por los cambios en las condiciones de funcionamiento del sistema, tales como las operaciones de conmutación, una falla en el sistema, las fluctuaciones en la carga o en la generación.

La magnitud de las sobretensiones internas depende de la tensión nominal, la instancia en la que se produce el cambio en las condiciones de funcionamiento, la complejidad del sistema etc. Dado que el cambio en las condiciones del sistema generalmente se asocia con las operaciones de conmutación, estas sobretensiones se denominan generalmente como sobretensiones de conmutación.

En el diseño del sistema de aislamiento se le da gran importancia a dos situaciones:

- Determinar los esfuerzos de tensión que debe soportar el aislamiento.
- Determinar la respuesta del aislamiento cuando se someten a estas sobretensiones.

El equilibrio entre los esfuerzos dieléctricos y la fuerza del dieléctrico del aislamiento se inscribe en el marco de la coordinación de aislamiento, para mayor información ver capítulo 8 de Kuffel.

La magnitud y el tipo de tensión de prueba varían con cada equipo en particular. Los métodos estándar de medición de alta tensión y las técnicas básicas para su aplicación a todo tipo de aparatos, para la tensión alterna, tensiones continuas, tensiones de impulso de conmutación, tensiones de impulso tipo rayo y tensiones en VLF se establecen en las normas nacionales e internacionales, aunque en algunos casos son divulgadas con mayor simplicidad por casas fabricantes.

Entre las fuentes más implementadas para llevar a cabo pruebas con altas tensiones se encuentran las siguientes:

Pruebas con tensiones a frecuencia industrial.

Son pruebas realizadas con transformadores elevadores de tensión a 50 o 60 Hz, su duración puede oscilar de un minuto hasta una hora dependiendo de la exigencia de la prueba.

La tensión de prueba se fija en un valor superior a la tensión nominal simulando las sobretensiones que puedan darse durante los años de servicio y así evaluar la capacidad de los aislamientos para soportar los esfuerzos eléctricos.

Para equipos en instalaciones interiores y exteriores las pruebas se deben llevar a cabo en condiciones secas.

Entre las principales diferencias de estos transformadores elevadores y uno de potencia, se tiene:

- Su carga es mayormente capacitiva.
- Para variar la tensión de salida, se implementa un regulador en el primario.
- Sus tensiones de cortocircuito son mayores que las de sus homólogos de igual potencia.
- Se instalan reactancias inductivas a la salida del primario para compensar la carga capacitiva, reduciendo la potencia del transformador.

Estos pueden ser construidos de dos maneras.

- Transformadores de una sola unidad divididos también en cuatro tipos:
 - ❖ Tipo tanque.
 - ❖ Tipo bushing.

- ❖ Tipo resonante serie.
- ❖ Tipo resonante paralelo.

En la figura a continuación, se ilustra un modelo del equipo tipo resonante serie.

Figura A1. Transformador tipo resonante serie.



- Transformadores en cascada: son utilizados para obtener tensiones superiores a los 600 kV.

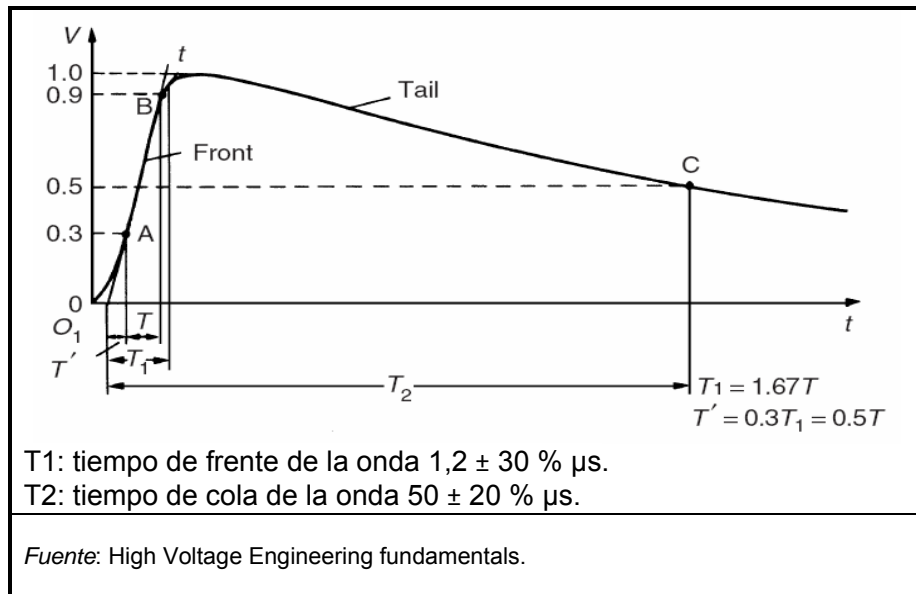
Para probar equipos de alta capacitancia como es el caso de transformadores de potencia, cables de MT y máquinas rotativas, se emplea el tipo resonante serie, el cual con la ayuda de una carga inductiva compensa la carga capacitiva del elemento bajo prueba y así puede suministrar la corriente (potencia) requerida para el ensayo.

Pruebas con impulsos de tensión tipo rayo.

Las descargas atmosféricas que impactan en líneas de transmisión inducen un fuerte aumento de las tensiones en la línea y crean ondas que se propagan a lo largo de ella que podrían dañar el aislamiento del sistema. La magnitud de estas sobretensiones puede llegar a varios miles de kilovoltios, dependiendo del aislamiento.

Mediciones exhaustivas y una larga experiencia han demostrado que las sobretensiones tipo rayo se caracterizan por una corta duración del frente de onda, que van desde una fracción de un microsegundo a varias decenas de microsegundos y luego disminuye lentamente a cero.

Figura A2. Onda 1,2/50.



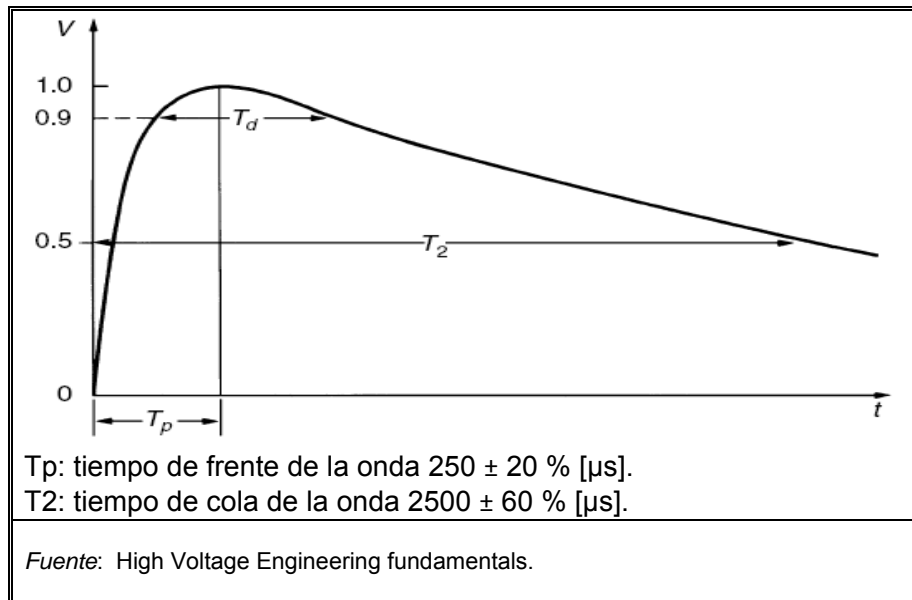
La tensión de choque normal ha sido aceptada como un impulso aperiódico que alcanza su valor máximo en $1,2 \mu\text{s}$ y luego disminuye lentamente, en aproximadamente $50 \mu\text{s}$, a la mitad de su valor de pico, como se puede observar en la figura A2, a estos tiempos se les denominan de frente (front) y de cola (tail) respectivamente. La onda también es mundialmente conocida como onda 1,2/50, por la duración de sus tiempos.

Las tensiones de impulso son ampliamente utilizados en los laboratorios de investigación en los estudios fundamentales de los mecanismos de descarga eléctrica, especialmente cuando el tiempo de ruptura es de interés.

Pruebas con impulsos de maniobra.

Las sobretensiones transitorias que acompañan a los cambios repentinos en el estado de los sistemas de potencia, por ejemplo, operaciones de conmutación o fallas, que se conoce como impulso de maniobra. Se ha hecho generalmente reconocido que las tensiones de impulso de maniobra suelen ser el factor dominante que afecta el diseño de aislamiento de sistemas de potencia para tensiones nominales superiores a 230 kV. En consecuencia, las diversas normas internacionales recomiendan que los aparatos diseñados para estas tensiones sean probados con tensiones de impulsos de maniobra.

Figura A3. Onda 200/2500.



Aunque la forma de onda de sobretensiones de conmutación que ocurren en el sistema puede variar ampliamente, con base en la experiencia se ha designado la onda estándar como 250/2500, de acuerdo con sus tiempos característicos.

Pruebas con tensiones en DC.

Las pruebas con tensión que utilizan equipos de tecnología en corriente continua se han usado principalmente para trabajos de investigación netamente científica y para probar equipos relacionados con sistemas de transmisión en HVDC.

En los últimos años, con el creciente interés en la transmisión HVDC, un número creciente de laboratorios industriales se están equipados con fuentes para la producción altas tensiones con corriente continua. Debido a la diversidad en la aplicación de las tensiones DC, que van desde los experimentos de física básica hasta las aplicaciones industriales, han establecido una gran gama en los requisitos de la tensión de salida, en consecuencia se encuentran equipos inyectoros de tensión DC con un rango de valores muy amplio.

Las aplicaciones industriales principalmente se utilizan para probar transformadores, bujes, cables de potencia, condensadores, máquinas rotativas, interruptores etc... elementos que cuentan con capacitancias relativamente grandes como para ser probadas con tensión alterna a frecuencia industrial. Convirtiéndose entonces este tipo de tensión en parte fundamental de esta investigación, pues con tensión continua se pueden llevar a cabo las pruebas hipot que se explicarán a continuación.

Pruebas hipot VLF.

Las pruebas hipot se pueden llevar a cabo con tensión DC o tensión VLF. Se debe recordar que su finalidad es someter un aislamiento a una tensión superior a la nominal. Ha venido tomando mucha fuerza realizar las pruebas con tensión VLF dado que sus aplicación no afecta la vida útil de los aislamientos en los cables y máquinas rotativas. Más adelante se verá una comparación entre los niveles de tensión de prueba para cada una de las tecnologías de inyección (DC y VLF) y los tiempos de aplicación de prueba, al igual que algunos datos que pueden indicar que pruebas se pueden utilizar para obtener un diagnóstico de los elementos bajo prueba. No se debe olvidar que este tipo de pruebas son llamadas de soporte así que su nivel de diagnóstico es limitado y para muchos es casi nulo.

Si bien las pruebas con tensión DC, no predicen un tiempo de vida para la muestra cómo si es posible hacerlo con equipos que se ensayan con corriente alterna, y si bien hay que darles la razón, en la práctica también es cierto que una vez puesta en marcha una instalación nadie para un proceso o corta el suministro para comprobar que el cable está viviendo días prestados, por lo tanto las pruebas de soporte son bastante aceptadas en la industria.

También se tiene la posibilidad de realizar pruebas de mantenimiento, pero en este caso no se puede hacer una comparación directa y así saber cuál es el envejecimiento del cable; aquí es necesario decir que la norma indica que un cable que ha estado en servicio obliga a que la tensión aplicada sea inferior, a la tensión durante una prueba de instalación o de aceptación.

¿Qué equipos de prueba se deben utilizar?

En la actualidad existen dos métodos difundidos y reconocidos para realizar pruebas de diagnóstico a cables de potencia, máquinas rotativas y transformadores. Estos métodos consisten en realizar las pruebas con altas tensiones a frecuencia industrial (60 Hz) y a VLF, las primeras son más implementadas en fábrica y las segundas son una opción que facilita realizarlas en el lugar de instalación, llamadas también pruebas de campo o pruebas in situ. Este trabajo centra su atención en las pruebas de campo con VLF.

¿Qué significa VLF?

Son las siglas en inglés para muy baja frecuencia (Very Low Frequency). La IEEE por definición establece que los equipos de ensayo de tecnología VLF será todo aquel que pueda generar una alta tensión de corriente alterna con una frecuencia del orden de 0,01 Hz a 1Hz.

Los equipos que implementan esta tecnología son simplemente un probador de aislamiento en corriente alterna, que trabaja a muy baja frecuencia. La frecuencia más implementada en el mercado es de 0,1 Hz, a esta frecuencia la duración de un ciclo completo es de 10 segundos, en vez de los 20 milisegundos correspondientes a 60 Hz. Existe otra gama de equipos en los cuales la frecuencia de salida puede estar en el rango de 0,0001 Hz a 1 Hz, pero estos se utilizan para cargas muy grandes. Como se verá más adelante al disminuir la frecuencia se permite probar capacitancias mayores.

Los equipos VLF han sido usados durante décadas para pruebas de máquinas rotativas (IEEE 433-2009), ya cumple 35 años de estar siendo implementadas en la industria.

¿Dónde se usa VLF?

La prueba VLF se usa en cualquier aplicación que requiera pruebas AC, sobre cargas de alta capacitancia. La mayor aplicación es para probar el dieléctrico de cables, seguido de pruebas de grandes máquinas rotativas y aunque no se han regulado se usa también en transformadores de potencia y ocasionalmente para pruebas de aisladores, interruptores y tableros eléctricos. El Hipot VLF es una herramienta muy eficaz para el acondicionamiento de fallas en cables (reducción de la tensión de ignición o de cebado de una falla).

¿Qué tensiones se encuentran disponibles en equipos VLF?

Hoy en día los probadores de aislamiento con tecnología VLF, se comercializan en tensiones máximas de inyección que van desde los 20 kV hasta los 240 kV (es importante indicar que son equipos monofásicos). Un factor a tener en cuenta en el momento de seleccionar un equipo VLF, es su capacitancia de carga máxima de prueba, existiendo modelos desde los 2 μF ; hasta los 55 μF .

¿Por qué utilizar muy bajas frecuencias?

Esto es más fácil de contestar si se observa el siguiente ejemplo:

Un cable de potencia de 3 048 m de 15 kV, tiene aproximadamente 1 μF de Capacitancia. La Reactancia Capacitiva a 60 Hz es:

$X_c = \text{Reactancia Capacitiva}$

$$X_c = \frac{1}{2\pi fC}$$

$$X_c = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2\pi(60\text{Hz})(10^{-6}\text{F})} = 2,650\text{k}\Omega$$

Para realizar una prueba de mantenimiento se debe aplicar una tensión de 22 kV, según lo recomendado por IEEE 400.2-2004, en su tabla 4 y se requeriría una fuente de alimentación con capacidad de 8,3 A ó 183 kVA. Obviamente esto constituye un equipo de un tamaño y peso considerable, no práctico para su transporte en campo, lo cual conlleva a mayores dificultades logísticas.

$$I = \frac{V}{X_c} = \frac{22\ 000\text{V}}{2,650\text{k}\Omega} = 8,3\text{A}$$

Pero, la reducción de frecuencia a 0,1 Hz, si bien genera un aumento de la reactancia capacitiva,

$$X_c = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2\pi(0,1\text{Hz})(10^{-6}\text{F})} = 1,6\text{M}\Omega$$

Permite entonces, ahora para los mismos 22 kV reducir el consumo de corriente y potencia, a

$$I = \frac{V}{X_c} = \frac{22\ 0000}{1,6 * 10^6 \Omega} = 14mA$$

De esta forma, para los mismos 22 kV aplicados, se requieren 14 mA únicamente (0,302 kVA), para energizar la muestra, o sea una potencia 605 veces menor que a 60 Hz. En términos generales se puede hablar de 600 veces menos potencia y 10 veces menos energía para realizar las pruebas con VLF 0,1 Hz y no con 60 Hz.

Además, esto demuestra que con la misma potencia, a 0,01 Hz, se pueda llegar a probar un cable o las bobinas de una máquina rotativa 6000 veces mayor que con el uso de 60 Hz.

En conclusión las unidades VLF son más pequeñas, ligeras, portátiles, y mucho menos costosas que cualquier otro método de prueba de AC para cargas de alta capacitancia. Además, una hipot VLF se puede utilizar como una fuente de voltaje para pruebas de descargas parciales y Tan δ , solo es necesario adicionar un módulo para cada una de las pruebas de diagnóstico. Con facilidad puede ser transportado en una camioneta o en su carro en lugar de camiones de cama baja como se requiere con unidades a 60 Hz.

¿Existen unidades VLF con formas de onda diferentes a la sinusoidal?

Es de esperarse que una unidad VLF genere una onda sinusoidal casi perfecta a su salida. No obstante cada fabricante intenta imponer su diseño intentando superar el gran problema técnico que significa producir una señal lo más parecida a una onda seno.

Lo que pocos aclaran es que esta onda sinusoidal es producida a partir de una corriente continua, que después de ser acondicionada por algún sistema electromecánico o electrónico, logra formar una alternancia mediante un proceso sistemático de carga y descarga de la muestra.

Existen diseños alemanes de unidades VLF, que generan formas de ondas trapezoidales o cuadradas, con transiciones cosenosoidales entre polos. Los fabricantes de estas unidades VLF a menudo intentan difundir que los tipos de ondas anteriormente mencionadas son superiores a las unidades con ondas sinusoidales, todo esto con la intención de comercializar sus equipos y no con argumentos.

Figura A4. Forma de onda sinusoidal de VLF a 0,1 Hz.

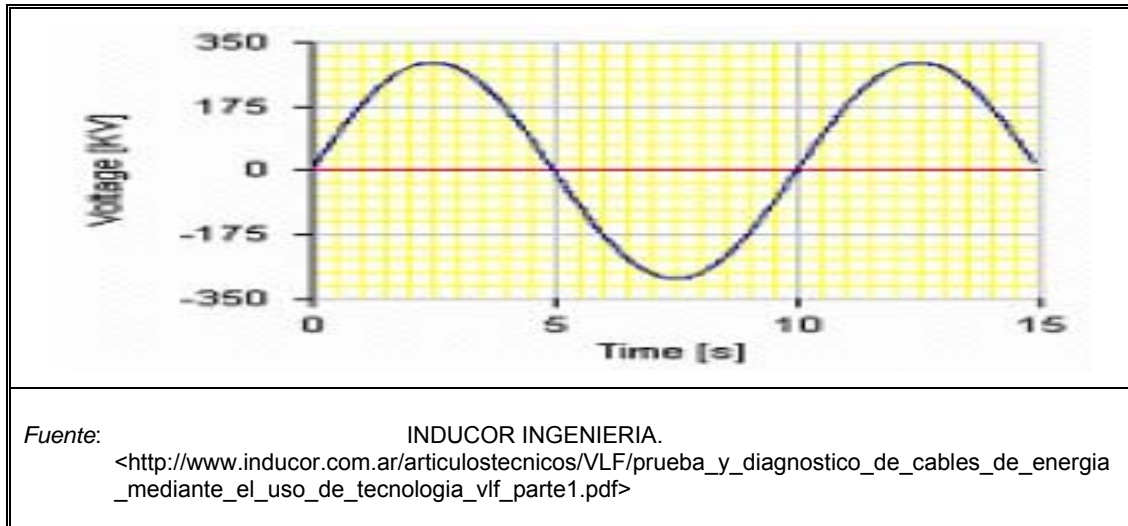
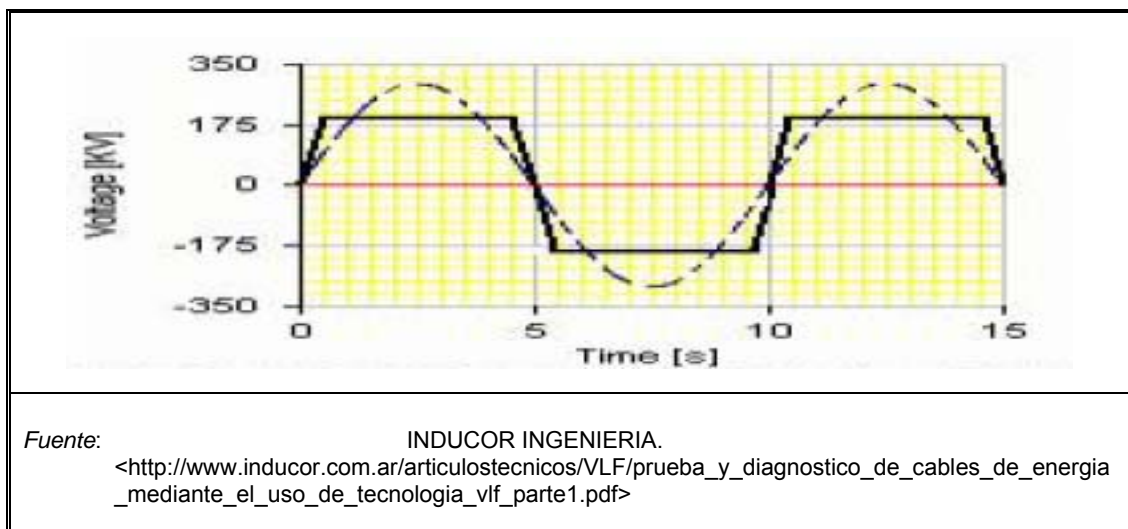


Figura A5. Forma de onda Coseno rectangular de VLF a 0,1 Hz.



Algunos fabricantes han logrado señales de tipo cuadrada, coseno-rectangulares, rectangulares bipolares y saltos de tensión.

¿Es posible que una muestra falle durante una prueba en VLF?

Precisamente esta es la intención de la prueba VLF. No es una prueba de diagnóstico (condition assessment testing), es una prueba de tensión aplicada. No hay que tomar

lecturas de corriente de fuga, (las corrientes de fuga DC, dicen poco acerca de la calidad de un cable o de otro aislamiento).

Una muestra no soporta (no resiste) la tensión de ensayo, o falla durante el mismo, si tiene defectos, y por lo tanto no resiste la aplicación de 2 ó 3 veces su tensión nominal, significa que no durará en servicio. La idea básica es, que si el elemento bajo prueba tiene que fallar, que lo haga entonces durante la prueba, y no cuando esté en servicio, así será menos crítica su reparación o sustitución, además que una falla no programada trae consigo costos mayores que una parada programada.

¿Qué normativas respaldan los ensayos en VLF?

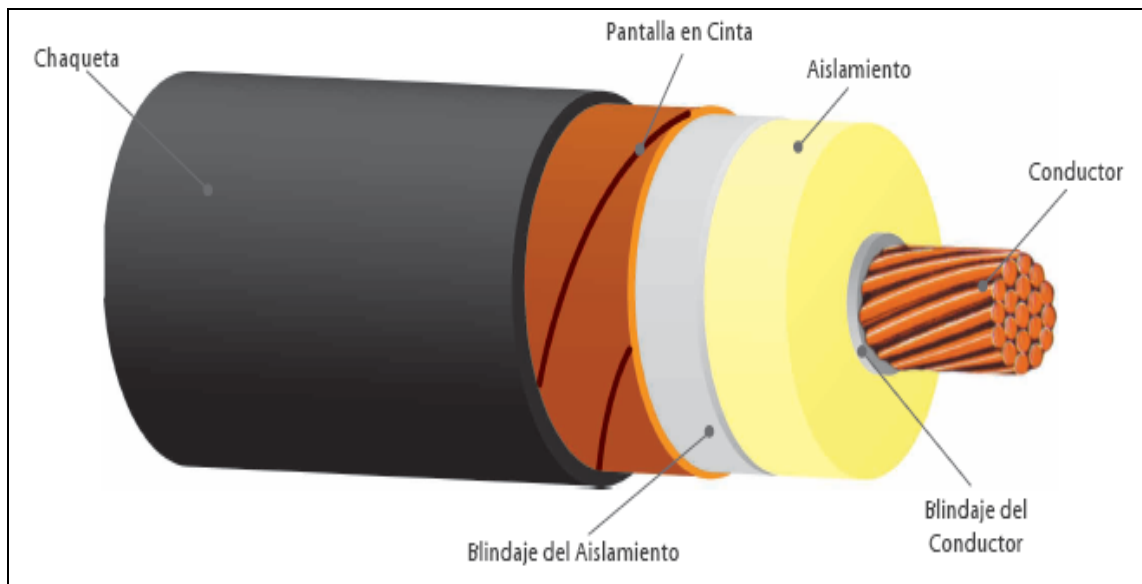
Casi todos los entes de ingeniería del mundo, EPRI, IEEE, CEA (Asociación Eléctrica Canadiense), y otras organizaciones de ingeniería de otros países, casi todos los fabricantes de cables y máquinas rotativas del mundo han aceptado la efectividad del uso del VLF. Las normas de pruebas VLF alemanas (normas DIN-VDE 0276-620 y 0276-1001) existen desde hace 8 años, IEEE ha escrito la norma de pruebas de cables VLF (IEEE 400-2001), y la norma IEEE 433-2009 para pruebas VLF a máquinas rotativas, ya tiene una vigencia de nada menos que 35 años, aunque en realidad tiene más de cincuenta (50) años el ámbito de ensayos a máquinas rotativas, con un prestigio ganado por sus amplias ventajas en el campo de la investigación predictiva de defectos.

¿Por qué la tecnología VLF no ha sido difundida ampliamente?

La tecnología VLF no es nueva. Sin embargo, la razón de no haber sido utilizada más ampliamente más allá de su primitiva aplicación en ensayos de máquinas rotativas, es porque solo hasta finales de los 90 se ha logrado determinar que las pruebas en DC dañan el dieléctrico del cable, y son un medio ineficaz para determinar su calidad.

Las pruebas de VLF en campo, no fueron factibles hasta que H.V. Inc. desarrollará las primeras líneas de equipos, verdaderamente portátiles, y con salida sinusoidal produciendo unidades a gran escala. Hoy en día, funcionan en todo el mundo, centenares de unidades VLF.


ANEXO B. INSTRUCTIVO DE PRUEBAS A CABLES DE MT.



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

**PRUEBA HIPOT DC/VLF Y PRUEBAS TAN δ VLF
A CABLES ELÉCTRICOS DE MEDIA TENSIÓN**

**VERSIÓN: 01
OCTUBRE DE 2010**



“Recuerde que lo urgente no nuble lo importante”

A continuación una serie de medidas de seguridad que se deben acatar durante la prueba.

- No trabaje en pruebas eléctricas sin un compañero.
- Considere que todo circuito esta energizado hasta comprobar lo contrario, todo trabajo eléctrico es potencialmente peligroso.
- Delimite una zona de prueba y no permita el acceso a personal no autorizado.
- Desenergice todos los elementos antes de iniciar cualquier labor.
- Utilice herramienta aislada, adecuada para trabajos eléctricos.
- Protéjase del contacto con otros equipos energizados, cercanos al sitio de prueba.
- Mantenga las instalaciones siempre limpias y con sus medios de protección.
- No deje en contacto los elementos eléctricos con aceites, grasas o algún otro elemento que deteriore su aislamiento.
- Lleve siempre a la mano un medio de comunicación efectivo para mantener contacto entre los operadores de los dos extremos el cable.
- Identifique las salidas de emergencia, la ubicación de los extintores y del botiquín de primeros auxilios.

En la tabla 1 se encuentra una serie de elementos que deben estar presentes durante la prueba para la protección de la personal que realiza las conexiones y de aquel que supervisan las labores, estos elementos también permitirán proteger el elemento bajo prueba y los equipos de prueba.

Elementos de Protección Personal de uso obligatorio durante la prueba.			Elementos de uso obligatorio en el lugar de la prueba.	
Para:	Quien conecta	Todos los integrantes	Valla de señalización.	
Casco dieléctrico.			Manta dieléctrica clase 4.	
Lentes plásticos.			Sistema de puesta a tierra.	
Protector facial.			Bastón de rescate.	
Guantes dieléctricos Clase 4.			Detector de tensión.	
Guantes de carnaza.			Pértiga de descarga	
Chaqueta Anti fuego.			Extintor clase E (Riesgo electrocución)	
Botas dieléctricas.			Primeros auxilios.	

Tabla 9. Elementos necesarios para la seguridad de la prueba.
Fuente [Autores].

TABLA DE CONTENIDO

1.	<u>INTRODUCCIÓN</u>	- 89 -
2.	<u>OBJETIVOS</u>	- 89 -
3.	<u>ALCANCE</u>	- 89 -
4.	<u>DEFINICIONES</u>	- 90 -
5.	<u>MÉTODO</u>	- 92 -
5.1	<u>MÉTODO PRUEBAS HIPOT.</u>	- 92 -
5.2	<u>MÉTODO PRUEBAS TAN δ</u>	- 93 -
6.	<u>LISTA DE CHEQUEO</u>	- 94 -
7.	<u>ACTIVIDADES DE LA PRUEBA</u>	- 95 -
7.1	<u>Actividades para preparar el elemento bajo prueba</u>	- 95 -
7.2	<u>Establecimiento de la tensión de prueba.</u>	- 100 -
7.3	<u>Establecimiento de los tiempos de prueba.</u>	- 102 -
7.4	<u>Restablecimiento del elemento bajo prueba.</u>	- 103 -
8.	<u>CRITERIOS DE APROBACIÓN</u>	- 104 -
8.1	<u>Criterio de aprobación en prueba Hipot.</u>	- 104 -
8.2	<u>Criterio de aprobación en pruebas Tan δ.</u>	- 104 -
9.	<u>PROTOCOLO DE PRUEBAS</u>	- 105 -
10.	<u>DOCUMENTOS DE REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA.</u>	- 109 -
11.	<u>EQUIPOS UTILIZADOS EN LA PRÁCTICA</u>	- 110 -

1. INTRODUCCIÓN

Este manual de procedimiento está destinado a proporcionar la orientación general de la metodología para ejecutar pruebas de soporte Hipot a cables eléctricos de media tensión MT, además de pruebas de diagnóstico Tan δ en VLF, utilizando como fuente un equipo inyector de alta tensión marca HV diagnostics modelo HVA60.

Para pruebas Tan δ será necesario adicionar el módulo TD60, de la marca HV diagnostics y se tendrán en cuenta los parámetros establecidos por las siguientes normas:

- *IEEE Std 400-2001 “Guía para pruebas de campo y evaluación del aislamiento de sistemas de cables de potencia apantallados”*, en sus capítulos 5 pruebas con tensión continua (DC), 8 pruebas a muy baja frecuencia (VLF) y 9 pruebas del factor de disipación.
- *IEEE Std 400.2-2004 “Guía para pruebas de campo de sistemas de cables de potencia apantallados usando Muy Baja frecuencia (VLF)”*, en sus capítulos 5.3 pruebas VLF con forma de onda sinusoidal y 5.5 7pruebas del factor de disipación/factor de disipación diferencial/corriente de fuga/perdidas armónicas con forma de onda sinusoidal.

2. OBJETIVOS

- Determinar y aplicar un procedimiento que permita estimar la capacidad para soportar esfuerzos dieléctricos por parte del aislamiento de un cable apantallado de MT, implementando un inyector de alta tensión en DC y/o VLF, estableciendo si el elemento bajo prueba está en condiciones para seguir operando.
- Diagnosticar la calidad del aislamiento eléctrico de un cable apantallado de MT, por medio de la prueba Tan δ en VLF y estimar la vida útil del elemento bajo prueba.

3. ALCANCE

Este manual de procedimiento es aplicable para realizar tanto las pruebas de soporte HIPOT como las de diagnóstico Tan δ , a cables eléctricos apantallados de MT (desde 5 kV hasta 57,5 kV), fabricados con procesos de extrusión para aislamientos tales como:

- PE (Polietileno- polyethylene).
- XLPE (Polietileno de enlaces cruzados o reticulado - cross linked polyethylene)
- TRXLPE (Polietileno de enlaces cruzados o reticulado con retardo de árbol - tree retardant cross linked polyethylene) y
- EPR (Caucho de Etileno Propileno – ethylene propylene rubber).

O fabricados con procesos de laminación como:

❖ PILC (Papel aislado cubierto de plomo - Paper Insulated Lead Covered).

Las pruebas cubren los niveles de aislamiento del 100% y del 133%, para el nivel de aislamiento del 173% se deberá consultar al fabricante para establecer las tensiones de prueba y los tiempos de aplicación de la misma.

La prueba Hipot puede ser de dos tipos de aceptación o de mantenimiento ambos tipos son cubiertos por este trabajo, aunque se resalta que para implementar las pruebas Hipot en DC, los cables deben estar nuevos o con menos de 5 años de uso, de lo contrario se deberá implementar las pruebas Hipot en VLF.

Este manual de procedimiento puede ser ejecutado por empleados o trabajadores, ya sea en calidad de Ingenieros, Tecnólogos o Técnicos de mediciones, bajo el aval del laboratorio de alta tensión de la UIS o del departamento de mantenimiento tecnológico de la UIS.

4. DEFINICIONES

Este manual de procedimiento, aplica los términos y definiciones, dictaminados por la *IEEE 100-2000 "la autoridad de estándares IEEE diccionario términos y definiciones", séptima edición [B4].*

A continuación algunos de los términos más relevantes.

4.1 Arborescencia acuosa: modificación química del patrón de la electro-oxidación de las dendritas en presencia de humedad, la cual puede mejorar con esfuerzos como protuberancias, contaminantes o huecos en los materiales poliméricos sometidos a tensión eléctrica y humedad. En el sitio de una arborescencia acuosa, el aislamiento se degrada, la descarga parcial no está presente, y la rotura completa del aislamiento se puede producir posteriormente cuando la arborescencia acuosa produzca una arborescencia eléctrica. El crecimiento de los árboles el agua en condiciones de servicio es un proceso muy lento, por lo general toma varios años para penetrar por completo el aislamiento de la parte interior o exterior. Aunque no ha habido casos documentados de descargas parciales detectables en el campo de los árboles de agua, árboles de agua puede convertir a los árboles eléctrica como resultado de un impulso de rayo, el cambio de mareas, o los niveles excesivos de tensión de prueba IEEE 400.2-2004.

4.2 Arborescencia eléctrica: consiste en micro canales no sólidos o carbonizados que crecen en forma de árbol, el cual puede aumentar su crecimiento en la presencia de protuberancias, contaminantes, huecos, arborescencia acuosa además de ser sometido a la tensión eléctrica durante un período prolongado. En el sitio de un árbol eléctrico el aislamiento se dañará irreversiblemente. La descarga parcial puede estar presente y es sólo cuestión de tiempo que se complete la ruptura IEEE 400.2-2004.

4.3 Condiciones de repetibilidad de una medición: condición de medición, dentro de un conjunto de condiciones que incluye el mismo procedimiento de medida, los mismos operadores, el mismo sistema de medida, las mismas condiciones de operación y el mismo lugar, así como mediciones repetidas del mismo objeto o de un objeto similar en un periodo corto de tiempo [B6].

4.4 Condición de reproducibilidad de una medición: condición de medición, dentro de un conjunto de condiciones que incluye diferentes lugares, operadores, sistemas de medida y mediciones repetidas de los mismos objetos u objetos similares [B6].

4.5 Corriente de fuga: Son sendas de corriente que se deslizan por la superficie de los aislamientos y son constantes en el tiempo. Dependen principalmente de la película de humedad, mezclada con polvo y otras sustancias extrañas depositadas sobre la superficie del material [B7].

4.5 Esfuerzo eléctrico: es el campo eléctrico al cual está sometido un aislamiento [B7].

4.6 Elemento bajo prueba: Un dispositivo o sistema utilizado para la evaluación de un producto representativo que será comercializado.
Un componente Representante de una unidad o sistema que se utilizará para fines de evaluación.

4.7 Nivel básico de aislamiento: Es la tensión de choque que un equipo eléctrico está obligado a soportar sin presentar fallo o descarga disruptiva en un 90% de los casos en condiciones especiales de temperatura y humedad. Se designa en términos de la tensión de cresta [B1].

4.8 Procedimiento de medida: descripción detallada de una medición conforme a uno o más principios de medida y a un método de medida dado, basado en un modelo de medida y que incluye los cálculos necesarios para obtener un resultado de medida [B6].

4.9 Pruebas de aceptación: son pruebas de campo realizadas después de la instalación del sistema de cables, incluyendo las terminaciones y las uniones, pero antes de que el sistema de cables sea puesto en servicio. La prueba detectará los daños durante la instalación y mostrará los defectos graves o errores en la instalación [B1].

4.10 Pruebas de diagnóstico: son pruebas de campo realizadas durante la vida útil del sistema de cables, incluyendo las terminaciones y las uniones, pero antes de que el sistema de cables sea puesto en servicio. La prueba detectará los daños durante la instalación y mostrará los defectos graves o errores en la instalación [B1].

4.11 Pruebas de instalación: Son pruebas de campo que se realizan después de la instalación del cable, pero antes de hacer los empalmes o las terminaciones. La prueba está destinada a detectar daños en el transporte, almacenamiento o instalación del cable [B1].

4.12 Pruebas de mantenimiento: son pruebas de campo realizadas durante la vida útil del cable. Su objetivo es detectar el deterioro del sistema y comprobar la utilidad (vida útil) de manera que los procedimientos adecuados de mantenimiento puedan ser iniciados [B1].

4.13 Rigidez dieléctrica: es el máximo esfuerzo al cual se puede someter un dieléctrico sin que cambien sus condiciones de aislamiento, se expresa en kilovoltios por milímetro [B5].

4.14 Rigidez dieléctrica crítica: campo eléctrico que producirá una pérdida de las condiciones de aislamiento, dependiendo del estado del aislamiento, en gases y líquidos la pérdida de su capacidad aislante es momentánea y en sólidos la pérdida de su capacidad aislante es permanente [B5].

4.15 Ruptura: es la descarga disruptiva o desglose a través del aislamiento [B3].

4.16 Tensión de prueba: Es el voltaje aplicado a través de la muestra durante una prueba. Para pruebas de soporte la tensión de prueba es el máximo valor de tensión que un elemento nuevo soporta con la integridad intacta sin ninguna descarga disruptiva, ni sufrir fallas de los componentes, por encima de los niveles permisibles, cuando se somete a un determinado número de aplicaciones de la tensión de ensayo, en condiciones específicas.

4.17 Tensión del 50% de la descarga disruptiva: Es el valor de la tensión de prueba que tiene la probabilidad del 50% de producir una descarga disruptiva [B12].

5. MÉTODO.

Este manual de procedimiento se divide en dos grupos de pruebas:

- Pruebas de soporte Hipot: las cuales a su vez pueden ser de dos tipos.
 - ❖ Pruebas Hipot DC
 - ❖ Pruebas Hipot VLF
- Pruebas de diagnóstico Tan δ VLF

Sus correspondientes métodos de prueba serán abordados a continuación.

5.1 MÉTODO PRUEBAS HIPOT.

El método que se utilizará a lo largo de este manual es el de soporte (withstand test). Esta prueba consiste en aplicar una determinada sobretensión durante un periodo de tiempo estipulado, se fundamenta en el principio de que si durante la realización de la prueba los cables resisten la tensión aplicada, sin presentar ruptura del aislamiento, una corriente excesiva de fuga o una perforación del aislamiento, lo cual establece que el aislamiento soporta el esfuerzo eléctrico de la tensión aplicada, entonces el cable será apto para regresar a servicio dándose como conclusión que es resistente a esfuerzos dieléctricos, sin tener en cuenta el grado de deterioro interno que posea (diagnóstico), ya que esto no está considerado dentro del alcance de la prueba.

Si por el contrario durante la realización de la prueba el cable presenta una falla en su aislamiento, entonces la conclusión como lo indica la norma de referencia sería que el cable presentaría una falla en el servicio o una ruptura futura.

La conclusión final de este tipo de pruebas es de resultado binario “pasa/falla”, sin establecer conclusiones acerca del estado del aislamiento, sin efectuar un diagnóstico del elemento bajo prueba.

El tipo de tensión aplicada durante la prueba es relevante dado que la intención de la prueba es observar si el cable soporta una sobretensión, pasando a un segundo plano si esta es de corriente continua o de corriente alterna.

Este manual de procedimiento centra su atención en las pruebas de soporte realizadas en DC y/o VLF, utilizándose el método de pasos el cual indica que se debe aplicar la tensión de prueba lentamente o con incrementos (pasos de tensión) de igual valor para llegar a la máxima tensión especificada. El número de pasos requeridos debe estar entre 5 y 7. Permitiendo tiempo suficiente a cada parada para estabilizar la corriente de fuga.

El reporte de la prueba solamente se considerara culminado cuando se establecen las debidas conclusiones y/o recomendaciones.

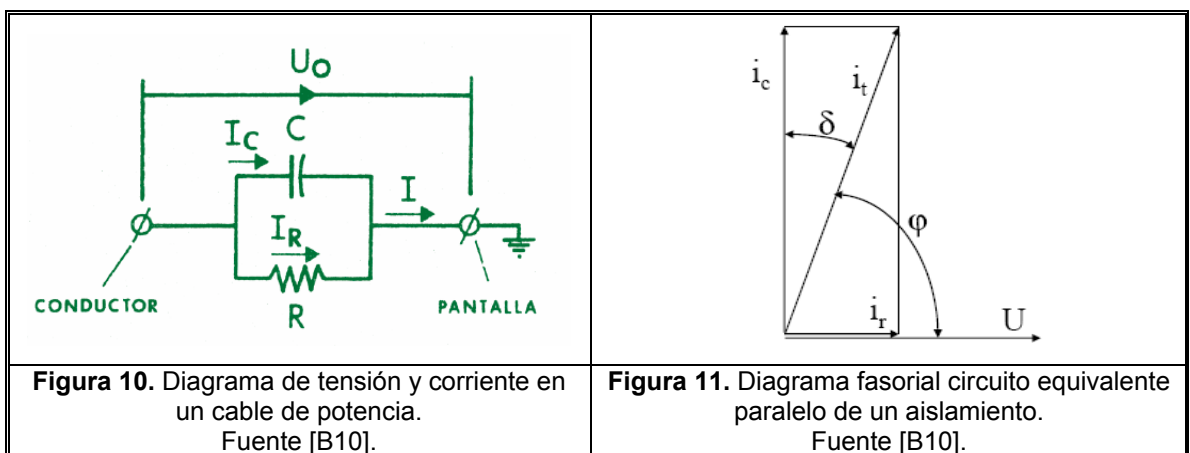
5.2 MÉTODO PRUEBAS TAN δ

El aislamiento de un cable de potencia se puede considerar como un condensador real, lo cual hace prever que en el dieléctrico estará presente una componente resistiva de la corriente, conocida como corriente de fuga I_r , la cual estará en fase con la tensión aplicada y tendrá otra corriente capacitiva la cual estará desfasada 90° de la tensión U , como se puede observar en la figura 1.

La corriente real I_r en el dieléctrico forma un ángulo δ (ángulo de pérdidas) con la corriente capacitiva I_c , como se observa en la figura 2.

La expresión matemática de la Tan δ viene dada por la ecuación 1

$$\text{Tan } \delta = I_r / I_c \tag{1}$$



6. LISTA DE CHEQUEO

En la tabla 2 se encuentran una serie de ítems que le permitirán al operador revisar que tenga a la mano todo lo necesario para efectuar las pruebas Hipot DC/VLF y las pruebas Tan δ VLF, así mismo como una serie de casillas que evidenciarán la realización del chequeo.

Actividad.	Realizada (Fecha: Día, mes y año – Hora: hora, minutos, am/pm)
6.1 Lleva los elementos de seguridad para la prueba, ver tabla 1.	Si <input type="checkbox"/> (___/___/20___) - (___:___/___) No <input type="checkbox"/>
Observaciones (Si <input type="checkbox"/> / No <input type="checkbox"/>):	
6.2 Examino el buen estado de los equipos de pruebas HVA60, TD60 y equipos auxiliares, ver sección 11.	Si <input type="checkbox"/> (___/___/20___) - (___:___/___) No <input type="checkbox"/>
Observaciones (Si <input type="checkbox"/> / No <input type="checkbox"/>):	
6.3 Verifico la documentación necesaria (ARP, EPS, este manual impreso, y los mencionados en el numeral 7.1.1)	Si <input type="checkbox"/> (___/___/20___) - (___:___/___) No <input type="checkbox"/>
Observaciones (Si <input type="checkbox"/> / No <input type="checkbox"/>):	
6.4 Tiene las herramientas necesarias para la prueba (juego de llaves mixtas, extensión eléctrica, lámpara).	Si <input type="checkbox"/> (___/___/20___) - (___:___/___) No <input type="checkbox"/>
Observaciones (Si <input type="checkbox"/> / No <input type="checkbox"/>):	
6.5 Reviso los elementos para acordonar la zona de pruebas (conos y cinta de precaución).	Si <input type="checkbox"/> (___/___/20___) - (___:___/___) No <input type="checkbox"/>
Observaciones (Si <input type="checkbox"/> / No <input type="checkbox"/>):	
6.6 Comprobó que lleva los consumibles requeridos para adecuar el elemento bajo prueba (grasas, siliconas, cobertores de polietileno, paños, alcohol etílico, cintas aislantes, cintas de amarre).	Si <input type="checkbox"/> (___/___/20___) - (___:___/___) No <input type="checkbox"/>
Observaciones (Si <input type="checkbox"/> / No <input type="checkbox"/>):	
6.7 Realice esta inspección antes y después de realizar la prueba.	Si <input type="checkbox"/> (___/___/20___) - (___:___/___) No <input type="checkbox"/>
Observaciones (Si <input type="checkbox"/> / No <input type="checkbox"/>):	
Responsable:	
Cargo:	
Tabla 12. Lista de chequeo para pruebas a cables eléctricos de MT. Fuente [Autores].	

7. ACTIVIDADES DE LA PRUEBA

Las actividades serán separadas en cuatro (4) etapas para facilitar su seguimiento.

7.1 Actividades para preparar el elemento bajo prueba

Esta primera etapa permitirá al operador de la prueba recopilar información del cable bajo prueba, de las condiciones atmosféricas de prueba y establece un escenario seguro para la ejecución de la prueba.

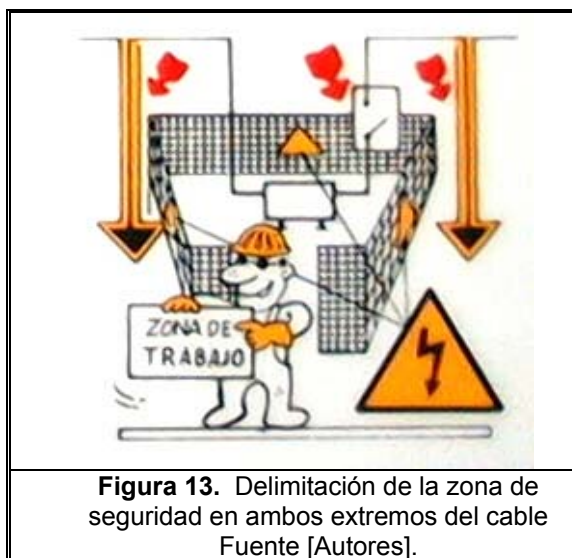
La prueba no puede ser llevada a cabo o se debe suspender si se presentan precipitaciones o si se presentan amagos de lluvia, ya que la presencia de humedad podría influir negativamente en el resultado de la prueba.

A continuación se enumeran las actividades necesarias para esta etapa.

7.1.1 Mantenga en un lugar visible los siguientes documentos:

- Informes de prueba ejecutadas al elemento bajo prueba.
- Permiso de trabajo.
- Manual del equipo de pruebas.
- Planos de instalación
- Normas de seguridad del sitio de trabajo (charla de seguridad) y/o permisos de trabajo.
- Certificados de calibración al día del equipo de pruebas.

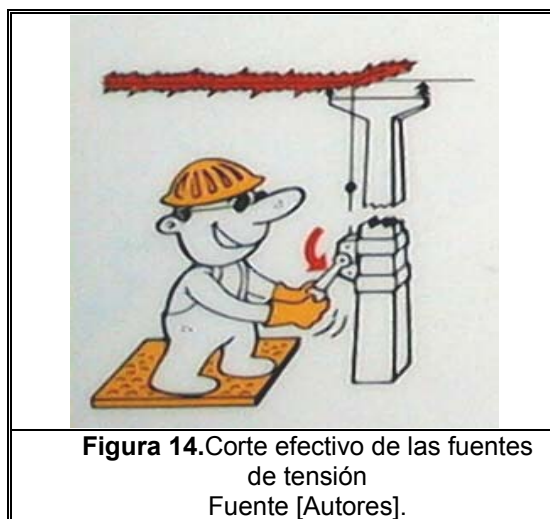
Solicite los documentos que necesite al jefe de mantenimiento responsable del lugar de trabajo.



7.1.2 Establezca una zona segura en ambos extremos del cable. Utilice elementos que resalten el riesgo eléctrico (barreras con advertencias) y no permita que personal no autorizado ingrese a ella (un vigilante en cada extremo del cable), ver figura 5.

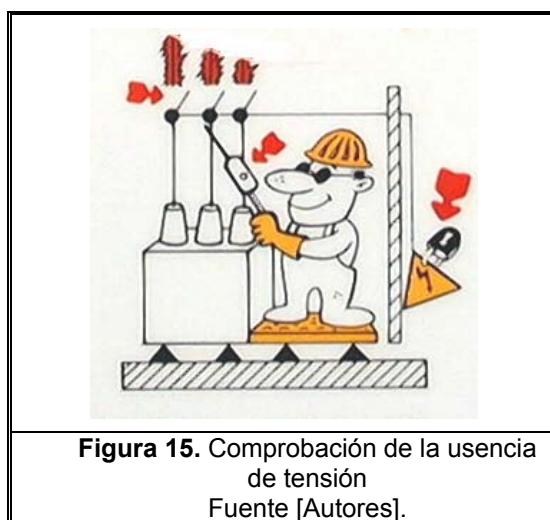
7.1.3 Verifique los canales de comunicación (radioteléfono o celular), y mantenga la comunicación abierta a lo largo de la prueba.

7.1.4 Verifique que el interruptor asociado al sistema de cables a ser probado este abierto, comprobando que se realizó un corte efectivo de todas las fuentes de tensión ver figura 6.

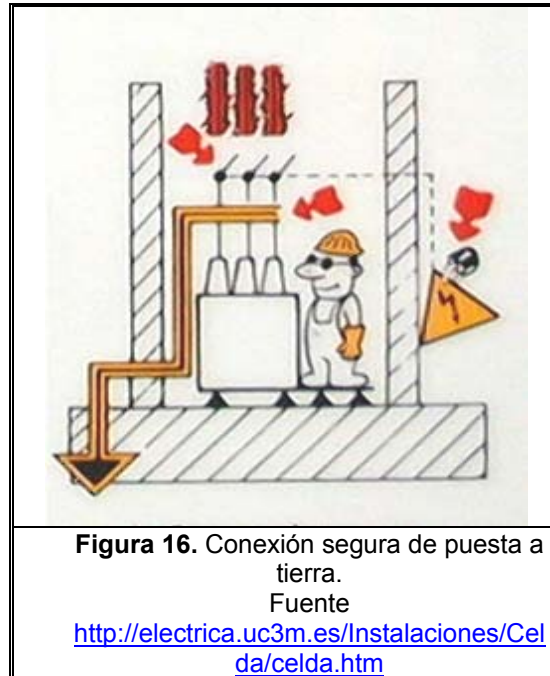


7.1.5 Verifique que los cables han sido desconectados de la red de medición y control (CT'S, PT'S, Relés etc), que puedan verse afectados con la tensión de prueba.

7.1.6 Compruebe la ausencia de tensión con un medidor de campo antes de manipular el cable bajo prueba, ver figura 7.



- 7.1.7 Desenergice el/los elemento(s) a ser probado(s) y establezca una conexión segura a tierra de los conductores y sus pantallas, hasta el momento de la inyección de tensión, ver figura 8.



- 7.1.8 Identifique el sistema de cables bajo prueba, registrando en el protocolo de pruebas los siguientes datos:
- Circuito
 - Tensión nominal de diseño
 - Tensión de operación
 - Tipo de aislamiento
 - Nivel de aislamiento
 - Calibre del conductor
 - Longitud
 - Fecha de instalación
 - Estado del cable.

Reporte cualquier diferencia entre las especificaciones del cable bajo prueba y los datos incluidos en los planos.

- 7.1.9 Limpie la superficie del conductor para liberarlo de contaminantes (utilice un paño seco y alcohol isopropílico o una sustancia aislante).
- 7.1.10 Aplique grasas, siliconas o masillas para minimizar las corrientes de fuga y evitar la combustión súbita generalizada (Flashover), de ser necesario cubra la superficie

expuesta del conductor con una película de polietileno o vidrio para minimizar el efecto corona.

7.1.11 Identifique los premoldeados de los terminales del cable bajo prueba, registrando en el protocolo de pruebas los siguientes datos:

- Tipo de premoldeados
- Tensión nominal de diseño
- Fabricante
- Estado

Inspeccione si se ejerce alguna curvatura excesiva en las puntas del cable, o si sus medios de sujeción o de apoyo no afectan su integridad.

7.1.12 Separe los elementos que no serán sometidos a prueba con una distancia no menor a una pulgada (1") por cada 10 kV aplicados, (2,54 cm por cada 10 kV) de la tensión de prueba, de ser necesario cubra las piezas cercanas que produzcan tensión.

7.1.13 De ser necesario implemente aliviadores de sobretensión en los extremos del cable por medio de resistencias no inductivas de 50 Ω .

7.1.14 Solicite una salida estable para la alimentación del equipo de pruebas HVA60, el cual consume 2 kW, a una tensión 110-240 V, 50-60 Hz. No utilice salidas que alimenten cargas tales como hornos eléctricos o soldadores de arco, pues estas pueden generar fluctuaciones en la tensión de prueba.

7.1.15 Mida la humedad relativa y la temperatura ambiente. Registre estos valores en el protocolo de pruebas.

7.1.16 Mida y registre en el protocolo de pruebas la temperatura en el terminal de prueba del cable (lo ideal es que sea igual a la temperatura ambiente o de bulbo seco leída en el psicrómetro) también registre la altura sobre el nivel del mar ASNM.

7.1.17 Retire la puesta a tierra del numeral 7.1.7.

7.1.18 Realice una prueba de aislamiento puntual, inyecte como máximo 5 kV, durante un minuto a cada una de las fases del sistema de cables bajo prueba para descartar fallas a tensiones superiores. Registre el valor de la resistencia de aislamiento en el protocolo de prueba, ver figura 9.



7.1.19 Realice la corrección por temperatura de los valores medidos de la resistencia de aislamiento, usando la tabla 3.

Tabla 18. Factores de corrección por temperatura para cables de MT.

Temperatura ° C	0	5	10	15,6	20	25	30	35
Factores de corrección	0,28	0,43	0,64	1,0	1,43	2,17	3,20	4,77
Temperatura ° C	40	45	50	55	60	65	70	75
Factores de corrección	7,15	10,70	16,00	24,00	36,00	-	-	-

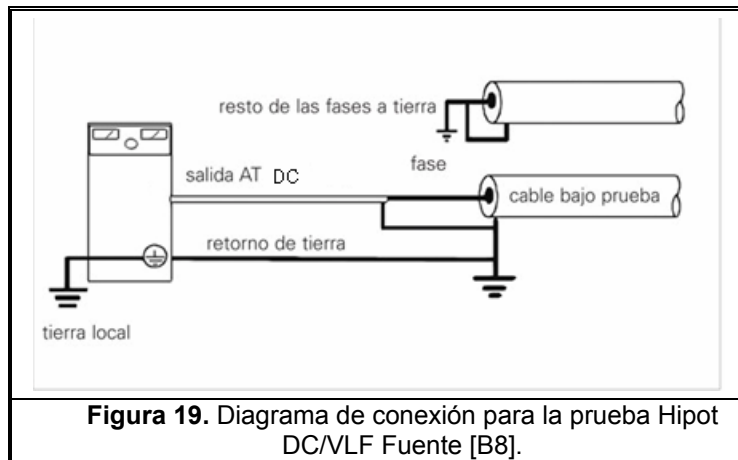
Fuente: Más vale prevenir de AVO International

7.1.20 Cortocircuite el conductor y la pantalla de cada uno de los cables que no serán sometidos a prueba y conéctelos sólidamente a tierra figura 10.

7.1.21 Si su finalidad es realizar una prueba Hipot DC/VLF.

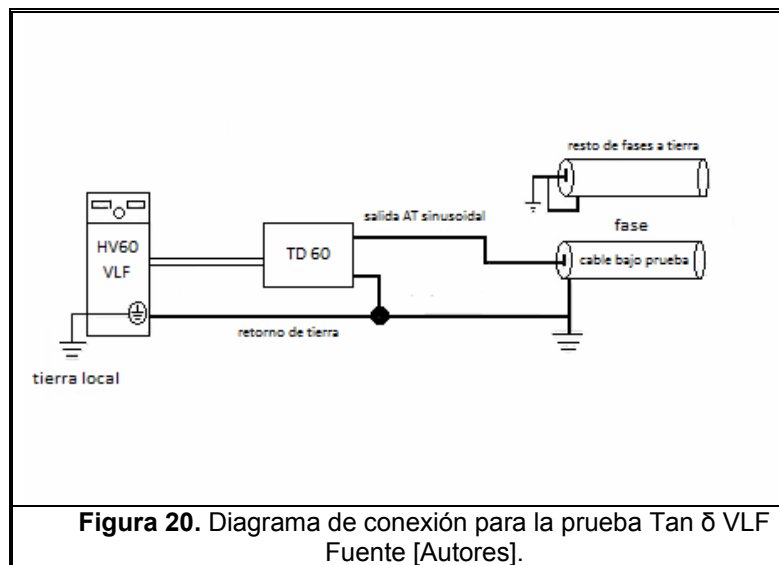
7.1.21.1 Conecte la referencia de la unidad HV60 a la pantalla del cable bajo prueba y realice un puente con las pantallas de los otros cables, ver figura 10.

7.1.21.2 Conecte la salida de alta tensión de la unidad HV60 al conductor del elemento que va a ser probada así como lo indica la figura 10.



Esta conexión aplica tanto a pruebas de aislamiento puntual, Hipot DC/VLF.

7.1.22 Si su interés es realizar una prueba Tan δ VLF, deberá efectuar la conexión de la figura 11.



Para realizar pruebas Tan δ , es necesario adicionar el módulo TD60 a la configuración de la prueba Hipot donde solo se utiliza el módulo HV60.

7.2 Establecimiento de la tensión de prueba.

El nivel máximo de tensión de prueba dependerá del tipo de prueba a realizar, en esta sección se presentan las recomendaciones para las tres (3) pruebas que cubre este procedimiento.

7.2.1 Para la realización de pruebas Hipot DC, la tensión de prueba se debe seleccionar de la tabla 3, teniendo en cuenta la tensión nominal fase a fase RMS del cable, el BIL, el nivel de aislamiento y el tipo de prueba a realizar (aceptación/mantenimiento).

La tensión se debe aplicar de manera gradual, realizándose un mínimo 5 pasos de tensión de igual magnitud, pero en ningún caso un paso de tensión debe exceder de 10 kV, una vez seleccionado el nivel de tensión y establecido el número de pasos registre estos valores en el protocolo de pruebas.

NOTA 1: En Colombia se fabrican cables de MT con las siguientes tensiones de diseño 5, 8, 15, 25, 35 kV, de acuerdo a la norma NTC 2050. De 46 y 69 kV según la NTC 2186 y se están realizando inversión para la fabricación de cables de 138 kV según las normas ICEA (Insulated Cable Engineering Association), con niveles de aislamiento del 100% y bajo pedido del 133% y 173%.

NOTA 2: El nivel de tensión seleccionado en la tabla 2, es un valor pico fase a fase, pero el nivel de tensión a ser inyectado durante la prueba debe ser el valor fase a tierra RMS.

NOTA 3: Se recomienda que las pruebas de mantenimiento a cables con más de 5 años de uso se realicen utilizando un inyector de alta tensión de tecnología Very Low Frequency VLF.

Tensión nominal RMS Fase a fase kV.	El BIL del sistema kV tensión pico.	Pruebas de aceptación Fase a tierra kV DC.		Pruebas de mantenimiento Fase a tierra kV DC.	
		Nivel de aislamiento.		Nivel de aislamiento.	
		100%	133%	100%	133%
5	75	28	36	23	-
8	95	36	44	29	-
15	110	56	64	46	-
25	150	75	96	61	-
28	170	85	100	68	-
35	200	100	124	75	-
46	250	125	172	95	-
69	350	175	195	130	-

Tabla 21. Tensiones de prueba hipot DC
Fuente [B2-B9].

7.2.2 Para la realización de pruebas Hipot VLF (onda sinusoidal), la tensión de prueba se debe seleccionar de la tabla 4, teniendo en cuenta la tensión nominal fase a fase RMS del cable y el tipo de prueba a realizar (instalación, aceptación o mantenimiento).

La tensión se debe aplicar de manera gradual, realizándose un mínimo 5 pasos de tensión de igual magnitud, pero en ningún caso un paso de tensión debe exceder de 10 kV, una vez seleccionado el nivel de tensión y establecido el número de pasos registre estos valores en el protocolo de pruebas.

Tensión nominal fase a fase tensión rms en kV	Instalación Fase - tierra tensión rms/ tensión pico	Aceptación Fase - tierra tensión rms/ tensión pico	Mantenimiento Fase - tierra tensión rms/ tensión pico
5	9 (13)	10 (14)	7 (10)
8	11 (16)	13 (18)	10 (14)
15	18 (25)	20 (28)	16 (22)
25	27 (38)	31 (44)	23 (33)
35	39 (55)	44 (62)	33 (47)

Tabla 22. Tensiones de prueba hipot VLF-Onda sinusoidal.
Fuente [B].

7.2.3 Si su objetivo es realizar pruebas Tan δ VLF, la tensión de prueba será la nominal del cable bajo prueba.

La tensión se debe aplicar de manera gradual, realizándose siempre 4 pasos de tensión de igual magnitud, una vez seleccionado el nivel de tensión y establecidos los pasos de tensión, registre estos valores en el protocolo de pruebas.

7.3 Establecimiento de los tiempos de prueba.

El tiempo de prueba dependerá básicamente del tipo de prueba que se pretenda realizar.

7.3.1 Para pruebas Hipot DC el tiempo de aplicación de la tensión para las pruebas se estipula en la tabla 5, teniendo en cuenta el tipo de prueba a efectuarse (instalación, aceptación o mantenimiento).

Mantenga el nivel de tensión de cada paso durante un minuto para los primeros n-1 pasos.

Para el enésimo paso consulte la tabla 5. Registre en el protocolo de pruebas, el tiempo seleccionado y la corriente de fuga al final de cada paso.

Tiempo en prueba de Instalación Minutos.	Tiempo en pruebas de aceptación. Minutos.	Tiempo en Pruebas De mantenimiento. Minutos.
15	15	5

Tabla 23. Tiempos para prueba hipot DC.

7.3.2 Para pruebas Hipot VLF el tiempo de aplicación de la tensión para las pruebas se estipula en la tabla 6, teniendo en cuenta el tipo de prueba a efectuarse (instalación, aceptación o mantenimiento).

Tiempo en prueba de Instalación Minutos.	Tiempo en pruebas de aceptación. Minutos.	Tiempo en Pruebas De mantenimiento. Minutos.
30	30	15

Tabla 24. Tiempos para prueba hipot VLF.

7.3.3 Para pruebas Tan δ VLF el tiempo de aplicación de la tensión para las pruebas se estipula en la tabla 7, teniendo en cuenta el tipo de prueba a efectuarse (instalación, aceptación o mantenimiento).

Para los tres primeros pasos mantenga el nivel de tensión durante tres minutos.

Para el cuarto y último paso consulte la tabla 7. Registre en el protocolo de pruebas, el tiempo seleccionado, la corriente de fuga, la capacitancia y la Tan δ al final de cada paso.

Tiempo en prueba de Instalación Minutos.	Tiempo en pruebas de aceptación. Minutos.	Tiempo en Pruebas De mantenimiento. Minutos.
25	25	10

Tabla 25. Tiempos para prueba tan δ VLF.

7.4 Restablecimiento del elemento bajo prueba.

Una vez terminada la aplicación de tensión al cable de potencia se deberán efectuar los siguientes pasos antes de regresar el cable a servicio:

- 7.4.1 Disipe la energía almacenada en el cable durante la prueba, colocando a tierra el conductor del elemento probado.
- 7.4.2 Retire los puentes realizados entre las pantallas de los cables y el sistema de puesta a tierra.
- 7.4.3 De ser necesario libere los cables de ataduras, para que puedan ser conectados en sus lugares correspondientes.

8. CRITERIOS DE APROBACIÓN

Culminada las pruebas se deberán contrastar los valores obtenidos con las recomendaciones establecidas internacionalmente, para entregar un veredicto del estado de la muestra.

8.1 Criterio de aprobación en prueba Hipot.

La prueba de soporte Hipot en DC/VLF será considerada satisfactoria si durante su desarrollo no se presentan cortocircuitos o descargas de tipo disruptivas, evidenciadas por la corriente de fuga (falla en la rigidez dieléctrica).

La estabilidad de la corriente de fuga (más allá de su valor absoluto) a lo largo de la prueba, es un buen indicador de la estabilidad del aislamiento, variaciones de la corriente de fuga pueden ser indicios de contaminantes o humedad en el cable bajo prueba.

Los valores típicos de corriente de fuga son de 100 a 150 [μ A], de presentasen valores superiores sin ocurrir la descarga disruptiva o sin que el equipo de prueba accione sus protecciones (se dispara o se apaga), es recomendable indagar sobre el estado de los empalmes, los terminales del cable, presencia de humedad o contaminantes, realizando las pruebas de diagnóstico que recomienda la norma IEEE Std 400-2001 tales como pruebas tangente delta ($\tan \delta$) y descargas parciales (PD).

De presentarse una descarga disruptiva se recomienda utilizar un equipo localizador de fallas para tomar las decisiones de si se repara el cable o se procede a realizar su sustitución.

8.2 Criterio de aprobación en pruebas Tan δ .

Dado que la visión de este tipo de pruebas es la de un mantenimiento predictivo, lo más recomendable es comparar los valores obtenidos actualmente con los valores históricos y así determinar un porcentaje de envejecimiento del aislamiento.

Si no se cuentan con valores históricos, una opción es realizar una inter comparación entre las fases probadas, promediando los resultados con lo cual si alguna de las fases dista mucho (valores superiores) de las otras dos, entonces se podrá en duda la calidad de su aislamiento.

Por último verifique que en ningún momento el valor de la Tan δ en alguna de las fases sobrepase el $4 \cdot 10^{-3}$, (valor establecidos por la norma IEEE 400-2001 en su numeral 9.7.2).

9. PROTOCOLO DE PRUEBAS

El protocolo de pruebas está dividido en dos partes:

- En la primera parte se registran los datos generales del cable, de sus premoldeados, de las condiciones ambientales y la medición de la resistencia de aislamiento preliminar.

Información del cable bajo prueba				Fecha: (___/___/20__)	
Hora: (___:___/___)					
Designación del circuito:					
Localización:					
Fabricante del cable:					
Tensión nominal kV:		Tensión de operación kV:			
Tipo de aislamiento:					
EP <input type="checkbox"/>	XLPE <input type="checkbox"/>	TRXLPE <input type="checkbox"/>	EPR <input type="checkbox"/>	PILC <input type="checkbox"/>	
Nivel de aislamiento:					
100% <input type="checkbox"/>		133% <input type="checkbox"/>		173% <input type="checkbox"/>	
Calibre AWG/Kcmil:		Longitud m:		Instalado: (___/___/20__)	
Observaciones del estado:					
Información de los terminales o pre-moldeados					
Tipo (Extremo 1)			Tipo (Extremo 2)		
Interior <input type="checkbox"/>	Exterior <input type="checkbox"/>	Interior <input type="checkbox"/>	Exterior <input type="checkbox"/>		
Tensión nominal kV:		Tensión nominal kV:			
Fabricante:			Fabricante:		
Estado:					
Condiciones ambientales					
Temperatura ambiente °c:		Altura sobre el nivel del mar m:		Humedad relativa %:	
Observación:					
Resistencia de aislamiento MΩ					
Fase A		Fase B		Fase C	
Valor medido		Valor medido		Valor medido	Valor corregido
Factor de corrección a 15,6 °c =					
Valor corregido		Valor corregido		Valor corregido	
Observación:					

➤ En la segunda parte utilizara un protocolo diferente para cada tipo de prueba.

❖ Para registrar la información referente a la prueba hipot DC a ser efectuada además del dictamen final basado en los datos obtenidos.

Información de la prueba Hipot DC a cables de MT									
Tipo de prueba									
Instalación <input type="checkbox"/>			Aceptación <input type="checkbox"/>			Mantenimiento <input type="checkbox"/>			
Ítem	Paso de tensión	Tensión de prueba kV	Duración s.	Resistencia de aislamiento MΩ			Corriente de fuga μA		
				Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
1									
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									
9									
10									
11									
12									
13									
14									
15									
16									
17									
18									
19									
20									
Conclusiones:									
Ejecutado por: Fredy Bautista			Elaborado por: Jorge Villegas			Revisado por: Ing. Julio Chacón MPE		Aprobado por: Ing. José Amaya MIE	

- ❖ Para registrar la información referente a la prueba hipot VLF a ser efectuada además del dictamen final basado en los datos obtenidos.

Información de la prueba Hipot VLF a cables de MT										
Tipo de prueba										
Instalación <input type="checkbox"/>			Aceptación <input type="checkbox"/>			Mantenimiento <input type="checkbox"/>				
Ítem	Paso de tensión	Tensión de prueba kV	Duración s.	Resistencia de aislamiento MΩ			Corriente de fuga μA			
				Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C	
1										
2										
3										
4										
5										
6										
7										
8										
9										
10										
11										
12										
13										
14										
15										
16										
17										
18										
19										
20										
21										
22										
23										
24										
25										
26										
27										
28										
29										
30										
31										
32										
33										
34										
35										
Conclusiones:										
Ejecutado por: Fredy Bautista			Elaborado por: Jorge Villegas			Revisado por: Ing. Julio Chacón MPE		Aprobado por: Ing. José Amaya MIE		

- ❖ Para registrar la información referente a la prueba Tan δ VLF a ser efectuada además del dictamen final basado en los datos obtenidos.

Información de la prueba Tan δ VLF a cables de MT												
Tipo de prueba												
Instalación <input type="checkbox"/>				Aceptación <input checked="" type="checkbox"/>					Mantenimiento <input type="checkbox"/>			
Ítem	Paso de tensión	Tensión de prueba Kv	Duración s.	Tan δ M Ω x10 ⁻³			Capacitancia nF			Corriente de fuga mA		
				Fase			Fase			Fase		
				A	B	C	A	B	C	A	B	C
1												
2												
3												
4												
Conclusiones:												
Ejecutado por: Fredy Bautista			Elaborado por: Jorge Villegas			Revisado por: Ing. Julio Chacón MPE			Aprobado por: Ing. José Amaya MIE			

10. DOCUMENTOS DE REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA.

- [B1] IEEE Std 400-2001 “Guía para pruebas de campo y evaluación del aislamiento de sistemas de cables de potencia apantallados”.
- [B2] IEEE Std 400.1-2007 “Guía para pruebas de campo de sistemas de cables de potencia apantallados de tensión nominal 5kV y superiores con alta tensión de corriente directa”.
- [B3] IEEE Std 400.2-2004 “Guía para pruebas de campo de sistemas de cables de potencia apantallados usando muy baja frecuencia VLF”.
- [B4] IEEE 100 “la autoridad de estándares IEEE diccionario términos y definiciones”, séptima edición.
- [B5] Rugeles Jones, Julio. Conceptos básicos en técnicas de alta tensión. 2da edición Bucaramanga Col. 1991.
- [B6] VIM Vocabulario Internacional de Metrología, 3ra edición 2008, Centro Español de Metrología.
- [B7] El aislamiento del equipo eléctrico de media tensión, publicación técnica Schneider PT-060, Edición Mayo de 2001.
- [B8] Prueba y diagnóstico de cables de energía mediante el uso de tecnología VLF Parte I, Electrical Testing Group Inducor Ingeniería.
- [B9] Lineamientos para las pruebas eléctricas HIPOT en campo, artículo emitido por la empresa fabricante General cables.
http://www.generalcable.com/NR/rdonlyres/CE3712B7-85A9-4D66-8876-8AA96ED3641C/0/SPEC_F075.pdf
- [B10] Dieléctricos, Publicación de General cables.
- [B11] Sistema móvil para diagnóstico de cables de alta tensión (132KV / 220KV) VLF-200 HVCD, Electrical Testing Group Inducor Ingeniería S.A.
- [B12] Pruebas y diagnóstico de cables de energía mediante el uso de tecnología VLF, Electrical Testing Group Inducor Ingeniería S.A.
- [B13] IEEE Std 4-1995 “Guía para pruebas de campo y evaluación del aislamiento de sistemas de cables de potencia apantallados”.
- [B14] “Más vale prevenir...”. AVO International. Tercera edición 1996.

11. EQUIPOS UTILIZADOS EN LA PRÁCTICA

Antes de iniciar cualquier labor necesitamos cerciorarnos de la ausencia de tensión en el elemento bajo prueba

	<p>DETECTOR DE VOLTAJE DE CORRIENTE ALTERNA TIC TRACER TIF 100</p> <p>características :</p> <ul style="list-style-type: none">➤ Temperaturas de operación: 0°C a 52°C➤ Para voltajes de 30 - 1500V de AC.➤ Usa batería de 9 V - vida de la batería: 1 año
---	--

Durante la prueba será necesario recopilar de las condiciones atmosféricas, tales como temperatura ambiente y humedad relativa.

	<p>Medidor de temperatura y humedad relativa.</p> <p>Rango de medida de temperatura: -50 to 70°C (-58 hasta 158°F) Resolución de temperatura: 0.1°C Precisión de temperatura: ±1.0°C Periodo de medida de temperatura: 10 segundos</p> <p>Rango de medida de humedad: 20% - 90% Resolución de humedad: 1% Precisión de humedad: ±3% RH (50% - 80% RH), ±5% RH (20% - 50% RH and 80% - 90% RH) Periodo de medida de humedad: 10 segundos</p> <p>Energía: Pila X1 AAA Dimensiones de la unidad: 10.5 x 11 x 2cm (4 x 4.5 x 0.9")</p>
---	--

La prueba de resistencia de aislamiento debe ser realizada para descartar daños severos en los aislamientos.

	<p>características :</p> <p>rango: 0-9.99mW/cm² Alarma audible y visual, valor de aviso: 5.0mW/cm² Precisión: ± 1dB Alimentación: 1 x pila alcalina de 9V tipo E-block T Temperatura de funcionamiento: 0°C ~ 40°C Humedad ambiente relativa: 0% ~ 85% Dimensiones: 160 x 60 x 42mm Peso: 150g Pantalla LCD retro iluminación blanca. Función retención del valor máx. (MAX hold)</p>
	
<p>TeraOhm 5 kV. Marca ADWEL. Medidor automático de aislamiento.</p>	


Dada que las pruebas se llevan a cabo en plantas, en muchos casos será necesaria la comunicación entre dos puntos lejanos.

	<p>Walkie Talkie</p> <p>características :</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Temperaturas de operación: 0°C a 52°C. ➤ Para voltajes de 30 - 1500V de AC. ➤ Usa batería de 9 V - vida de la batería: 1 año
---	---

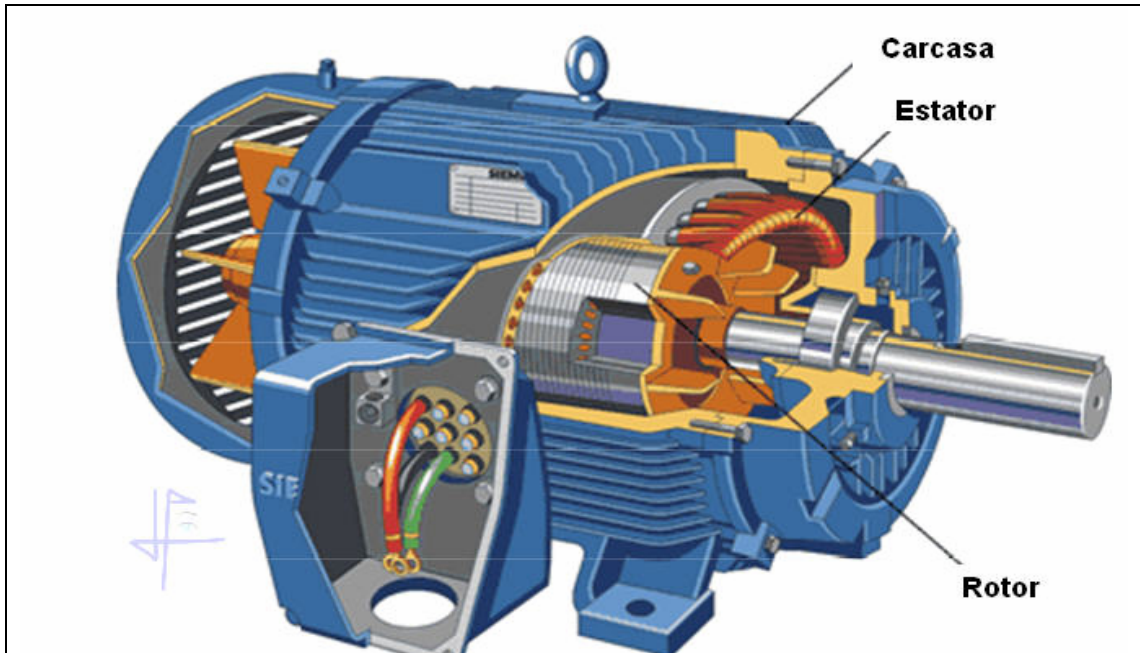
El equipo de inyección principal para las pruebas es el siguiente:

	<p>Unidad de prueba HV60 High Voltage diagnostic</p> <p>características :</p> <p>Alimentación: 110-220 V con 50-60 Hz</p> <p>Tensión de salida:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Tensión directa 0-62 kV pico • Sinusoidal 0-60 kV. • Exactitud $\pm 1\%$. <p>Corriente de salida:</p> <ul style="list-style-type: none"> • De 0-50 mA. • Resolución 10 μA. • Exactitud $\pm 1\%$. <p>Rango de resistencia.</p> <ul style="list-style-type: none"> • De 0,1 MΩ a 5 GΩ.
<p>Accesorios:</p> <p>Cable de HV de 4,5 m con pinza tipo cocodrilo en uno de los extremos.</p> <p>Cable de puesta a tierra de 4,5 m con una pinza tipo cocodrilo en uno de los extremos y en el otro un terminal de ojo.</p> <p>Caja para transporte del equipo y sus accesorios.</p>	<p>Frecuencia de salida:</p> <ul style="list-style-type: none"> • De 0,02 a 0,1 Hz • Resolución 0,01 Hz <p>Medidas de:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Voltaje y corriente (RMS verdadero y/o pico) • Capacitancia. • Resistencia. • Tiempo. • Voltaje de flameo.
<p>Carga en la salida</p> <p>1.0 μF @ 0.1 Hz @ 44kV RMS (Aproximadamente 3048 m (10,000 ft) de cable)*</p> <p>2.0 μF @ 0.05 Hz @ 44kV RMS (Aproximadamente 6096 m (20,000 ft) de cable)*</p> <p>5.0 μF @ 0.02 Hz @ 44kV RMS (Aproximadamente 15240 m (50,000 ft) de cable)*</p> <p>Capacitancia máxima 10 μF</p>	

Por último se presentan las características del módulo TD60, cual permite realizar las pruebas Tan δ .

	<p>Módulo de prueba TD60 High Voltage diagnostic.</p> <p>características :</p> <p>Alimentación: Se alimenta de la salida del equipo HV60.</p> <p>Tensión de salida:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Sinusoidal 0-44 kV RMS. • Resolución 0,1 kV. • Exactitud $\pm 0,5\%$. <p>Medición de corriente:</p> <ul style="list-style-type: none"> • De 0-50 mA. • Resolución 1 μA. • Exactitud $\pm 0,5\%$.
<p>Accesorios:</p> <p>Cable de HV de 4,5 m para acoplarlo al equipo HV60.</p> <p>Cable de puesta a tierra de 4,5 m con una pinza tipo cocodrilo en su extremo.</p> <p>Cable de salida para conectar a la muestra bajo prueba.</p> <p>Transmisor tipo Bluetooth</p> <p>Caja para transporte del equipo y sus accesorios.</p>	<p>Medición de la Tan δ:</p> <ul style="list-style-type: none"> • De $0-100 \cdot 10^{-3}$. • Resolución $0,3 \cdot 10^{-3}$. • Exactitud $\pm 0,5 \cdot 10^{-3}$. <p>Interfaz con el computador.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Tipo bluetooth.
<p>Carga en la salida</p> <p>1.0 μF @ 0.1 Hz @ 44kV RMS (Aproximadamente 3048 m (10,000 ft) de cable)*</p> <p>2.0 μF @ 0.05 Hz @ 44kV RMS (Aproximadamente 6096 m (20,000 ft) de cable)*</p> <p>5.0 μF @ 0.02 Hz @ 44kV RMS (Aproximadamente 15240 m (50,000 ft) de cable)*</p> <p>Capacitancia máxima 10 μF</p>	


ANEXO C. INSTRUCTIVO DE PRUEBAS A MÁQUINAS ROTATIVAS



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES

PRUEBA HIPOT DC/VLF Y PRUEBAS TAN δ VLF
A MÁQUINAS ROTATIVAS

VERSIÓN: 01
OCTUBRE DE 2010



“Recuerde que lo urgente no nuble lo importante”

A continuación una serie de medidas de seguridad que se deben acatar durante la prueba.

- No trabaje en pruebas eléctricas sin un compañero.
- Considere que todo circuito esta energizado hasta comprobar lo contrario, todo trabajo eléctrico es potencialmente peligroso.
- Delimite una zona de prueba y no permita el acceso a personal no autorizado.
- Desenergice todos los elementos antes de iniciar cualquier labor.
- Utilice herramienta aislada, adecuada para trabajos eléctricos.
- Protéjase del contacto con otros equipos energizados, cercanos al sitio de prueba.
- Mantenga las instalaciones siempre limpias y con sus medios de protección.
- No deje en contacto los elementos eléctricos con aceites, grasas o algún otro elemento que deteriore su aislamiento.
- Identifique las salidas de emergencia, la ubicación de los extintores y del botiquín de primeros auxilios.

En la tabla 1 se encuentra una serie de elementos que deben estar presentes durante la prueba para la protección de la personal que realiza las conexiones y de aquel que supervisan las labores, estos elementos también permitirán proteger el elemento bajo prueba y los equipos de prueba.

Elementos de Protección Personal de uso obligatorio durante la prueba.			Elementos de uso obligatorio en el lugar de la prueba.	
Para:	Quien conecta	Todos los integrantes	Valla de señalización.	
Casco dieléctrico.			Manta dieléctrica clase 4.	
Lentes plásticos.			Sistema de puesta a tierra.	
Protector facial.			Bastón de rescate.	
Guantes dieléctricos Clase 4.			Detector de tensión.	
Guantes de carnaza.			Pértiga de descarga	
Chaqueta Anti fuego.			Extintor clase E (Riesgo electrocución)	
Botas dieléctricas.			Primeros auxilios.	

Tabla 26. Elementos necesarios para la seguridad de la prueba.
Fuente [Autores].

TABLA DE CONTENIDO

1.	<u>INTRODUCCIÓN</u>	- 117 -
2.	<u>OBJETIVOS</u>	- 117 -
3.	<u>ALCANCE</u>	- 117 -
4.	<u>DEFINICIONES</u>	- 117 -
5.	<u>MÉTODO</u>	- 119 -
5.1	<u>MÉTODO PRUEBAS HIPOT.</u>	- 119 -
5.2	<u>MÉTODO PRUEBAS TAN δ</u>	- 120 -
6.	<u>LISTA DE CHEQUEO</u>	- 121 -
7.	<u>ACTIVIDADES DE LA PRUEBA</u>	- 122 -
7.1	<u>Actividades para preparar el elemento bajo prueba</u>	- 122 -
7.2	<u>Establecimiento de la tensión de prueba.</u>	- 125 -
7.3	<u>Establecimiento de los tiempos de prueba.</u>	- 126 -
7.4	<u>Restablecimiento del elemento bajo prueba.</u>	- 127 -
8.	<u>CRITERIOS DE APROBACIÓN</u>	- 127 -
8.1	<u>Criterio de aprobación en prueba Hipot.</u>	- 127 -
8.2	<u>Criterio de aprobación en prueba Tan δ.</u>	- 127 -
9.	<u>PROTOCOLO DE PRUEBAS</u>	- 128 -
10.	<u>DOCUMENTOS DE REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA.</u>	- 131 -
11.	<u>EQUIPOS UTILIZADOS EN LA PRÁCTICA</u>	- 132 -

1. INTRODUCCIÓN

Este manual de procedimiento está destinado a proporcionar la orientación general de la metodología para ejecutar pruebas de soporte Hipot a máquinas rotativas, además de pruebas de diagnóstico Tan δ en VLF, utilizando como fuente un equipo inyector de alta tensión marca HV diagnostics modelo HVA60.

Para pruebas Tan δ será necesario adicionar el módulo TD60, de la marca HV diagnostics y se tendrán en cuenta los parámetros establecidos por las siguientes normas:

- *ANSI/IEEE Std 433-1974 “Práctica recomendada para pruebas de aislamiento a grandes máquinas rotativas AC con alta tensión en VLF”.*
- *IEEE Std 95TM-2002 “practica recomendada para pruebas de aislamiento a máquinas eléctricas AC (2300 V y superiores) con alta tensión directa”.*

2. OBJETIVOS

- Determinar y aplicar un procedimiento que permita estimar la capacidad para soportar esfuerzos dieléctricos por parte del aislamiento de una máquina rotativa, implementando un inyector de alta tensión en DC y/o VLF, estableciendo si el elemento bajo prueba está en condiciones para seguir operando.
- Diagnosticar la calidad del aislamiento eléctrico de una máquina rotativa, por medio de la prueba Tan δ en VLF y estimar la vida útil del elemento bajo prueba.

3. ALCANCE

Este manual de procedimiento es aplicable para realizar tanto las pruebas de soporte HIPOT como las de diagnóstico Tan δ , a máquinas rotativas (desde 2,3 kV hasta 57,5 kV), sin importar sus valores de potencia para los siguientes equipos:

- Generadores síncronos y asíncronos.
- Motores síncronos y asíncronos.
- No aplica a máquinas de corriente continua.

Las pruebas de sobretensión pueden ser de dos tipos de aceptación o de mantenimiento ambos tipos son cubiertos por este trabajo.

Este instructivo de pruebas puede ser ejecutado por empleados o trabajadores, ya sea en calidad de Ingenieros, Tecnólogos o Técnicos de mediciones, bajo el aval del laboratorio de alta tensión de la UIS o del departamento de mantenimiento tecnológico de la UIS.

4. DEFINICIONES

Este instructivo de pruebas, aplica los términos y definiciones, dictaminados por la *IEEE 100-2000 “la autoridad de estándares IEEE diccionario términos y definiciones”, séptima edición.*

A continuación algunos de los términos más relevantes.

4.1 Elemento bajo prueba: Un dispositivo o sistema utilizado para la evaluación de un producto representativo que será comercializado.

Un componente Representante de una unidad o sistema que se utilizará para fines de evaluación.

4.2 Espaciador aislante: como se utiliza en un sistema de aislamiento de gas es un aislante utilizado para apoyar el conductor interno en el encerramiento

4.3 Condiciones de repetibilidad de una medición: condición de medición, dentro de un conjunto de condiciones que incluye el mismo procedimiento de medida, los mismos operadores, el mismo sistema de medida, las mismas condiciones de operación y el mismo lugar, así como mediciones repetidas del mismo objeto o de un objeto similar en un periodo corto de tiempo [B6].

4.4 Condición de reproducibilidad de una medición: condición de medición, dentro de un conjunto de condiciones que incluye diferentes lugares, operadores, sistemas de medida y mediciones repetidas de los mismos objetos u objetos similares [B6].

4.5 Corriente de fuga: Son sendas de corriente que se deslizan por la superficie de los aislamientos y son constantes en el tiempo. Dependen principalmente de la película de humedad, mezclada con polvo y otras sustancias extrañas depositadas sobre la superficie del material [B7].

4.6 Esfuerzo eléctrico: es el campo eléctrico al cual está sometido un aislamiento [B7].

4.7 Elemento bajo prueba: Un dispositivo o sistema utilizado para la evaluación de un producto representativo que será comercializado.

Un componente Representante de una unidad o sistema que se utilizará para fines de evaluación.

4.8 Nivel básico de aislamiento: Es la tensión de choque que un equipo eléctrico está obligado a soportar sin presentar fallo o descarga disruptiva en un 90% de los casos en condiciones especiales de temperatura y humedad. Se designa en términos de la tensión de cresta [B1].

4.9 Procedimiento de medida: descripción detallada de una medición conforme a uno o más principios de medida y a un método de medida dado, basado en un modelo de medida y que incluye los cálculos necesarios para obtener un resultado de medida [B6].

4.10 Prueba de aceptación: una prueba aplicada a los devanados nuevos antes de su uso comercial. Se puede realizar en la fábrica o después de la instalación.

4.11 Prueba de mantenimiento: Una prueba aplicada a un devanado después de estar en servicio conveniente para la continuidad del servicio. Se hace generalmente a una tensión más baja que la prueba de aceptación.

4.12 Rigidez dieléctrica: es el máximo esfuerzo al cual se puede someter un dieléctrico sin que cambien sus condiciones de aislamiento, se expresa en kilovoltios por milímetro [B5].

4.13 Rigidez dieléctrica crítica: campo eléctrico que producirá una pérdida de las condiciones de aislamiento, dependiendo del estado del aislamiento, en gases y líquidos la pérdida de su capacidad aislante es momentánea y en sólidos la pérdida de su capacidad aislante es permanente [B5].

4.14 Ruptura: es la descarga disruptiva o desglose a través del aislamiento [B3].

4.15 Tensión de prueba: Es el voltaje aplicado a través de la muestra durante una prueba. Para pruebas de soporte la tensión de prueba es el máximo valor de tensión que un elemento nuevo soporta con la integridad intacta sin ninguna descarga disruptiva, ni sufrir fallas de los componentes, por encima de los niveles permisibles, cuando se somete a un determinado número de aplicaciones de la tensión de ensayo, en condiciones específicas.

4.16 Tensión del 50% de la descarga disruptiva: Es el valor de la tensión de prueba que tiene la probabilidad del 50% de producir una descarga disruptiva [B12].

5. MÉTODO.

Este instructivo de pruebas se divide en dos grupos de pruebas:

- Pruebas de soporte Hipot: las cuales a su vez pueden ser de dos tipos.
 - ❖ Pruebas Hipot DC
 - ❖ Pruebas Hipot VLF
- Pruebas de diagnóstico Tan δ VLF

Sus correspondientes métodos de prueba serán abordados a continuación.

5.1 MÉTODO PRUEBAS HIPOT.

El método que se utilizará a lo largo de este manual es el de soporte (withstand test). Esta prueba consiste en aplicar una determinada sobretensión durante un periodo de tiempo estipulado, se fundamenta en el principio de que si durante la realización de la prueba los devanados de la máquina rotativa resisten la tensión aplicada, sin presentar ruptura del aislamiento, una corriente excesiva de fuga o una perforación del aislamiento, lo cual establece que el aislamiento soporta el esfuerzo eléctrico de la tensión aplicada, entonces la máquina será apta para regresar a servicio dándose como conclusión que es resistente a esfuerzos dieléctricos, sin tener en cuenta el grado de deterioro interno que posea (diagnóstico), ya que esto no está considerado dentro del alcance de la prueba.

Si por el contrario durante la realización de la prueba los devanados de la máquina rotativa presentan una falla en su aislamiento, entonces la conclusión como lo indica la

norma de referencia sería que la máquina presentaría una falla en el servicio o una ruptura futura.

La conclusión final de este tipo de pruebas es de resultado binario “pasa/falla”, sin establecer conclusiones acerca del estado del aislamiento, sin efectuar un diagnóstico del elemento bajo prueba.

El tipo de tensión aplicada durante la prueba es relevante dado que la intención de la prueba es observar si la máquina soporta una sobretensión, pasando a un segundo plano si esta es de corriente continua o de corriente alterna.

Este manual de procedimiento centra su atención en las pruebas de soporte realizadas en DC y/o VLF, utilizándose el método de pasos el cual indica que se debe aplicar la tensión de prueba lentamente o con incrementos (pasos de tensión) de igual valor para llegar a la máxima tensión especificada. El número de pasos requeridos debe estar entre 5 y 7. Permitiendo tiempo suficiente a cada parada para estabilizar la corriente de fuga.

El reporte de la prueba solamente se considerara culminado cuando se establecen las debidas conclusiones y/o recomendaciones.

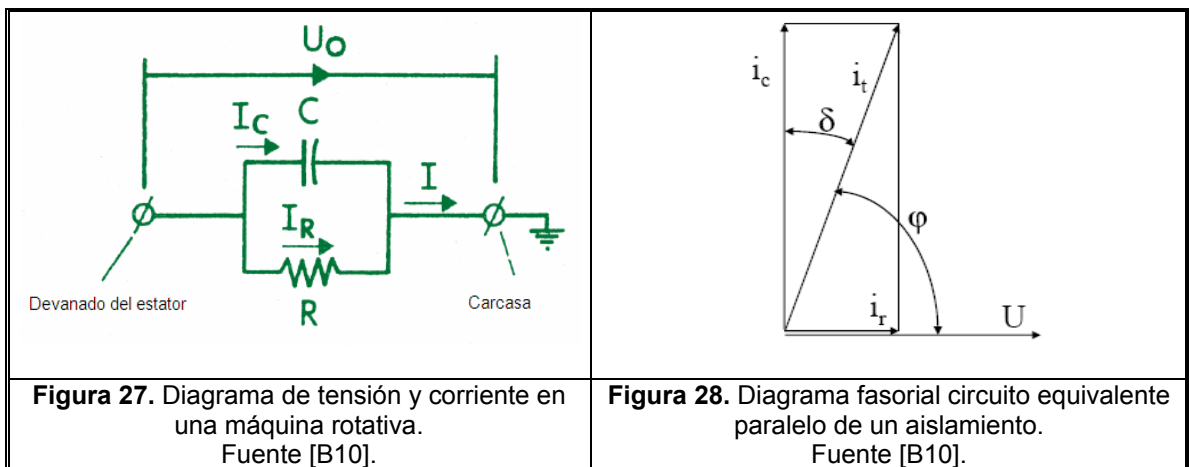
5.2 MÉTODO PRUEBAS TAN δ

El aislamiento de una máquina rotativa se puede considerar como un condensador real, lo cual hace prever que en el dieléctrico estará presente una componente resistiva de la corriente, conocida como corriente de fuga I_r , la cual estará en fase con la tensión aplicada y tendrá otra corriente capacitiva la cual estará desfasada 90° de la tensión U , como se puede observar en la figura 1.

La corriente real I_r en el dieléctrico forma un ángulo δ (ángulo de pérdidas) con la corriente capacitiva I_c , como se observa en la figura 2.

La expresión matemática de la Tan δ viene dada por la ecuación 1

$$\text{Tan } \delta = I_r / I_c \tag{2}$$



6. LISTA DE CHEQUEO

En la tabla 2 se encuentran una serie de ítems que le permitirán al operador revisar que tenga a la mano todo lo necesario para efectuar las pruebas Hipot DC/VLF y las pruebas Tan δ VLF, así mismo como una serie de casillas que evidenciarán la realización del chequeo.

Actividad.	Realizada (Fecha: Día, mes y año – Hora: hora, minutos, am/pm)
6.1 Lleva los elementos de seguridad para la prueba, ver tabla 1.	Si <input type="checkbox"/> (___/___/20___) - (___:___/___) No <input type="checkbox"/>
Observaciones (Si <input type="checkbox"/> / No <input type="checkbox"/>):	
6.2 Examino el buen estado de los equipos de pruebas HVA60, TD60 y equipos auxiliares, ver sección 11.	Si <input type="checkbox"/> (___/___/20___) - (___:___/___) No <input type="checkbox"/>
Observaciones (Si <input type="checkbox"/> / No <input type="checkbox"/>):	
6.3 Verifico la documentación necesaria (ARP, EPS, este manual impreso, y los mencionados en el numeral 7.1.1)	Si <input type="checkbox"/> (___/___/20___) - (___:___/___) No <input type="checkbox"/>
Observaciones (Si <input type="checkbox"/> / No <input type="checkbox"/>):	
6.4 Tiene las herramientas necesarias para la prueba (juego de llaves mixtas, extensión eléctrica, lámpara).	Si <input type="checkbox"/> (___/___/20___) - (___:___/___) No <input type="checkbox"/>
Observaciones (Si <input type="checkbox"/> / No <input type="checkbox"/>):	
6.5 Reviso los elementos para acordonar la zona de pruebas (conos y cinta de precaución).	Si <input type="checkbox"/> (___/___/20___) - (___:___/___) No <input type="checkbox"/>
Observaciones (Si <input type="checkbox"/> / No <input type="checkbox"/>):	
6.6 Comprobó que lleva los consumibles requeridos para adecuar el elemento bajo prueba (grasas, siliconas, cobertores de polietileno, paños, alcohol etílico, cintas aislantes, cintas de amarre).	Si <input type="checkbox"/> (___/___/20___) - (___:___/___) No <input type="checkbox"/>
Observaciones (Si <input type="checkbox"/> / No <input type="checkbox"/>):	
6.7 Realice esta inspección antes y después de realizar la prueba.	Si <input type="checkbox"/> (___/___/20___) - (___:___/___) No <input type="checkbox"/>
Observaciones (Si <input type="checkbox"/> / No <input type="checkbox"/>):	
Responsable:	
Cargo:	
Tabla 29. Lista de chequeo para pruebas a máquinas rotativas. Fuente [Autores].	

7. ACTIVIDADES DE LA PRUEBA

Las actividades serán separadas en cuatro (4) etapas para facilitar su seguimiento.

7.1 Actividades para preparar el elemento bajo prueba

Esta primera etapa permitirá al operador de la prueba recopilar información de la máquina rotativa bajo prueba, de las condiciones atmosféricas de prueba y establece un escenario seguro para la ejecución de la prueba.

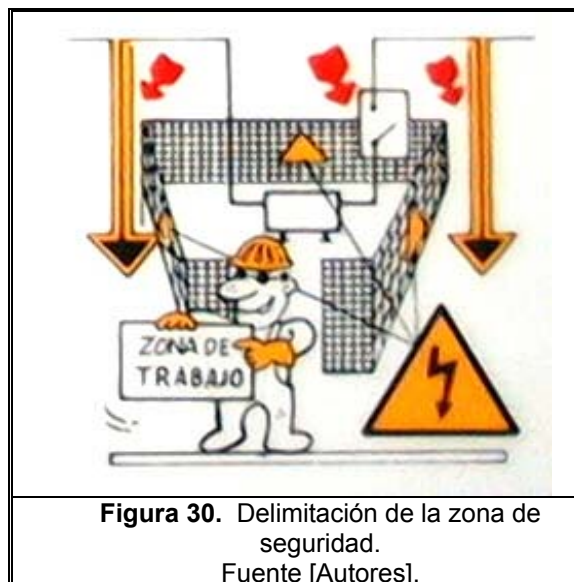
La prueba no puede ser llevada a cabo o se debe suspender si se presentan precipitaciones o si se presentan amagos de lluvia, ya que la presencia de humedad (superior al 80 %) podría influir negativamente en el resultado de la prueba.

A continuación se enumeran las actividades necesarias para esta etapa.

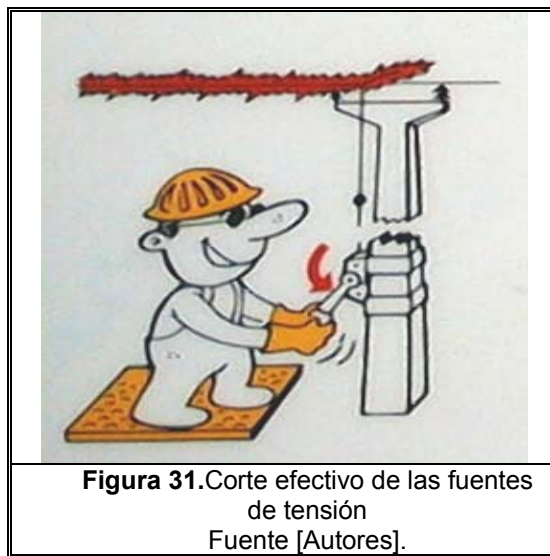
7.1.1 Mantenga en un lugar visible los siguientes documentos:

- Informes de prueba ejecutadas al elemento bajo prueba.
- Permiso de trabajo.
- Manual del equipo de pruebas.
- Planos de instalación
- Normas de seguridad del sitio de trabajo (charla de seguridad) y/o permisos de trabajo.
- Certificados de calibración al día del equipo de pruebas.

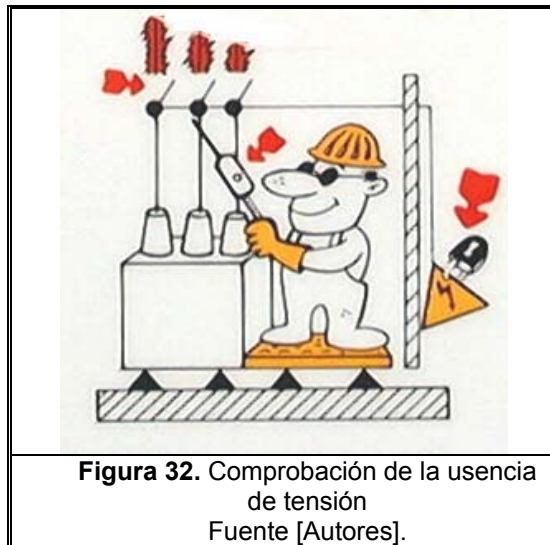
Solicite los documentos que necesite al jefe de mantenimiento responsable del lugar de trabajo.



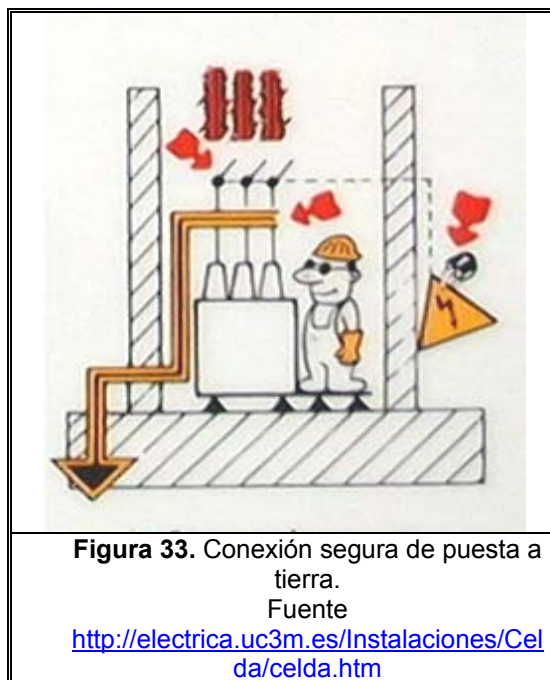
- 7.1.2 Establezca una zona segura alrededor de la máquina rotativa. Utilice elementos que resalten el riesgo eléctrico (barreras con advertencias) y no permita que personal no autorizado ingrese a ella (un vigilante en la zona de trabajo), ver figura 5.
- 7.1.3 Verifique los canales de comunicación (radioteléfono o celular), y de ser necesario mantenga la comunicación abierta a lo largo de la prueba.
- 7.1.4 Verifique que el interruptor asociado a la máquina rotativa a ser probada este abierto, comprobando que se realizó un corte efectivo de todas las fuentes de tensión ver figura 6.



- 7.1.5 Verifique que la máquina ha sido desconectada de la red de medición y control (CT'S, PT'S, Relés etc), que puedan verse afectados con la tensión de prueba.
- 7.1.6 Compruebe la ausencia de tensión con un medidor de campo antes de manipular la máquina bajo prueba, ver figura 7.



7.1.7 Desenergice el/los elemento(s) a ser probado(s) y establezca una conexión segura a tierra de los devanados del estator, hasta el momento de la inyección de tensión, ver figura 8.



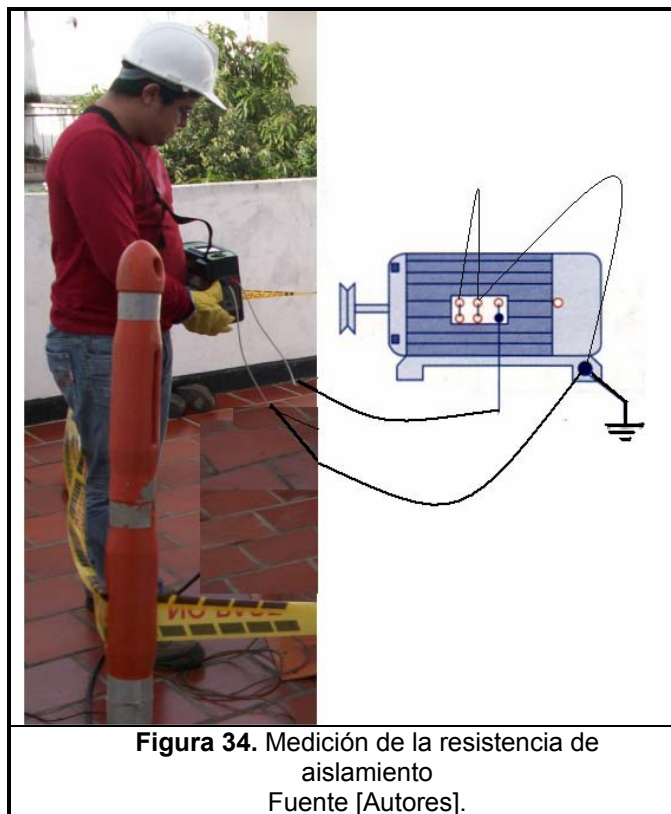
7.1.8 Identifique la máquina rotativa bajo prueba, registrando en el protocolo de pruebas los siguientes datos:

- Circuito
- Es Generador o Motor
- Potencia nominal
- Tensión nominal

- Clase de aislamiento
- Factor de potencia
- Año de fabricación.
- Estado de la máquina.
- Fabricante

Reporte cualquier diferencia entre las especificaciones de la máquina rotativa bajo prueba y los datos incluidos en los planos.

- 7.1.9 Limpie la superficie de los bornes de conexión de la máquina para liberarlo de contaminantes (utilice un paño seco y alcohol isopropílico o una sustancia aislante).
- 7.1.10 Aplique grasas, siliconas o masillas para minimizar las corrientes de fuga y evitar la combustión súbita generalizada (Flashover), de ser necesario cubra la superficie expuesta del conductor con una película de polietileno o vidrio para minimizar el efecto corona.
- 7.1.11 Si tiene oportunidad de realizar una inspección visual verificando si hay polvo amarillento sobre las cuñas en las ranuras. Esto es indicativo de desgaste del material de las cuñas o aislamiento por aflojamiento de cuñas
- 7.1.12 Solicite una salida estable para la alimentación del equipo de pruebas HVA60, el cual consume 2 kW, a una tensión 110-240 V, 50-60 Hz. No utilice salidas que alimenten cargas tales como hornos eléctricos o soldadores de arco, pues estas pueden generar fluctuaciones en la tensión de prueba.
- 7.1.13 Mida la humedad relativa y la temperatura ambiente. Registre estos valores en el protocolo de pruebas.
- 7.1.14 Mida y registre en el protocolo de pruebas la temperatura en los terminal de prueba de los devanados de la máquina (lo ideal es que sea igual a la temperatura ambiente) también registre la altura sobre el nivel del mar ASNM.
- 7.1.15 Retire la puesta a tierra del numeral 7.1.7.
- 7.1.16 Realice una prueba de aislamiento puntual, inyecte como máximo 5 kV, durante un minuto a cada uno de los devanados del estator bajo prueba para descartar fallas a tensiones superiores. Registre el valor de la resistencia de aislamiento en el protocolo de prueba, ver figura 9.



7.1.17 Realice la corrección por temperatura de los valores medidos de la resistencia de aislamiento, usando la tabla 3.

Tabla 35. Factores de corrección por temperatura para máquinas rotativas.

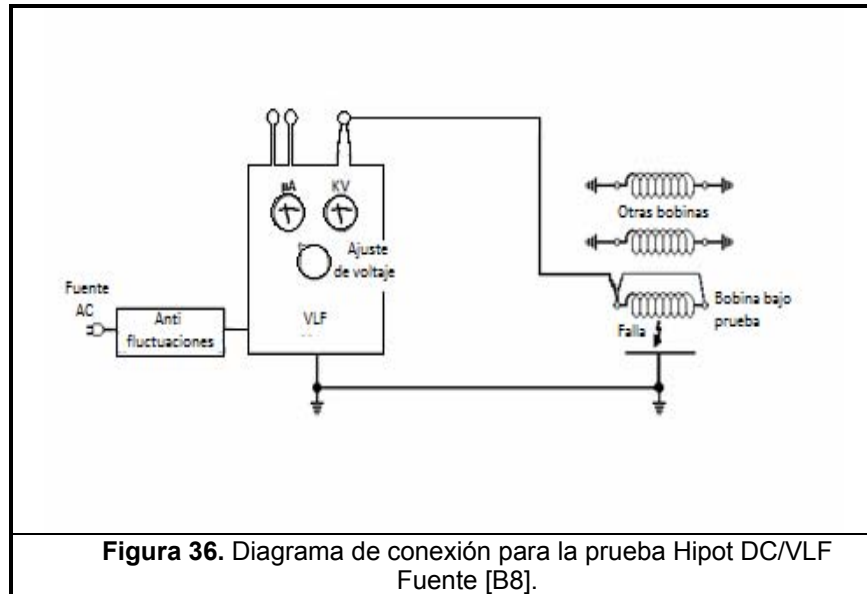
Temperatura ° C		0	5	10	15,6	20	25	30	35
Factores de corrección	Clase A	0,21	0,31	0,45	0,71	1,0	1,48	2,20	3,24
	Clase B	0,40	0,50	0,63	0,81	1,0	1,25	1,58	2,0
Temperatura ° C		40	45	50	55	60	65	70	75
Factores de corrección	Clase A	4,8	7,1	10,45	15,5	22,8	34,0	50,0	74,0
	Clase B	2,5	3,15	3,98	5,0	6,3	7,9	10,0	12,6

Fuente: Más vale prevenir de AVO International

7.1.18 Cortocircuite los devanados del estator de cada una de las fases que no serán sometidos a prueba y conéctelos sólidamente a tierra figura 10.

7.1.19 Si su finalidad es realizar una prueba Hipot DC/MLF.

7.1.19.1 Conecte la referencia de la unidad HV60 a la carcasa de la máquina bajo prueba.



7.1.19.2 Realice un puente seguro a tierra, de los dos devanados que no serán sometidos a prueba, ver figura 10.

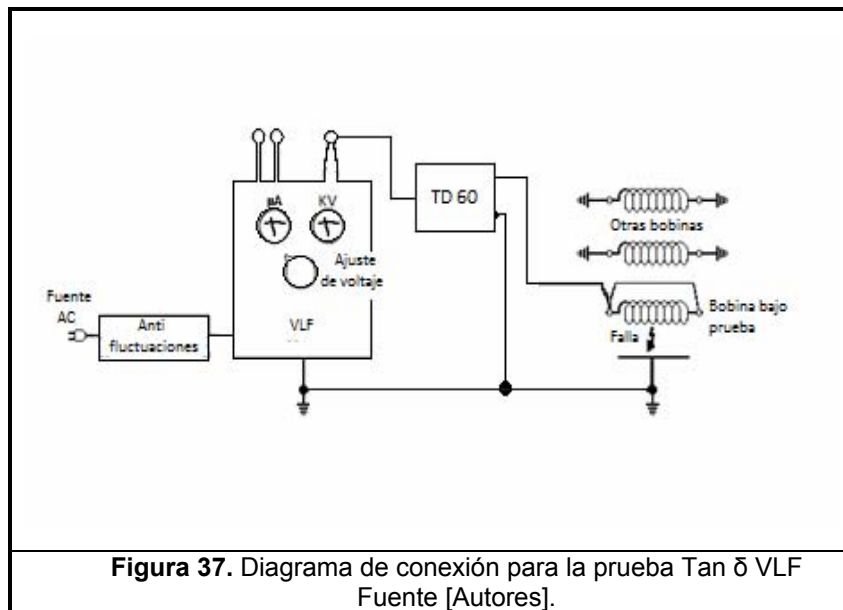
7.1.19.3 Conecte la salida de alta tensión de la unidad HV60 al devanado que va a ser probada así como lo indica la figura 10.

Esta conexión aplica tanto a pruebas de aislamiento puntual, Hipot DC/VLF.

7.1.20 Si su interés es realizar una prueba Tan δ VLF, deberá efectuar la conexión de la figura 11.

7.1.20.1 Conecte la referencia de la unidad HV60 y del módulo TD60 a la carcasa de la máquina bajo prueba.

7.1.20.2 Realice un puente seguro a tierra, de los dos devanados que no serán sometidos a prueba, ver figura 11.



7.1.20.3 Acople el módulo TD60 a la unidad HV60 por medio de su salida de alta tensión como lo indica la figura 11.

7.1.20.4 Conecte la salida de alta tensión del módulo TD60 al devanado que va a ser probada así como lo indica la figura 11.

7.2 Establecimiento de la tensión de prueba.

El nivel máximo de tensión de prueba dependerá del tipo de prueba a realizar, en esta sección se presentan las recomendaciones para las tres (3) pruebas que cubre este procedimiento.

7.2.1 Para la realización de pruebas Hipot DC, la tensión de prueba se debe seleccionar de la tabla 4, teniendo en cuenta la tensión nominal fase a tierra RMS del bobinado y el tipo de prueba a realizar (aceptación/ mantenimiento).

Tensión nominal fase a tierra Rms en kV	Pruebas de Aceptación Tensión fase - tierra tensión pico kV	Pruebas de Mantenimiento Tensión fase - tierra tensión pico
E	$1.7 \cdot (0,65-0,75)(2 \cdot E+1)$	$1.7 \cdot (0,50-0,60)(2 \cdot E+1)$

Tabla 38. Tensiones de prueba hipot DC.
Fuente [IEEE 95-2002].

La tensión se debe aplicar de manera gradual, realizándose un mínimo 5 pasos de tensión de igual magnitud, pero en ningún caso un paso de tensión debe exceder de 10 kV, una vez seleccionado el nivel de tensión y establecido el número de pasos registre estos valores en el protocolo de pruebas.

NOTA 1: Habitualmente la tensión de referencia en equipos eléctricos viene dada por tensiones de línea RMS, pero para el caso de las pruebas depende de si la tensión es aplicada por fase o por línea.

7.2.2 Para la realización de pruebas Hipot VLF (onda sinusoidal), la tensión de prueba se debe seleccionar de la tabla 5, teniendo en cuenta la tensión nominal fase a tierra RMS del bobinado y el tipo de prueba a realizar (instalación, aceptación o mantenimiento).

Tensión nominal fase a tierra Rms en kV	Pruebas de Aceptación Tensión fase - tierra tensión pico kV	Pruebas de Mantenimiento Tensión fase - tierra tensión pico
E	$1.63^{*(0,65-0,75)(2^*E+1)}$	$1.63^{*(0,50-0,60)(2^*E+1)}$

Tabla 39. Tensiones de prueba hipot VLF.
Fuente [IEEE 95-2002].

La tensión se debe aplicar de manera gradual, realizándose un mínimo 5 pasos de tensión de igual magnitud, pero en ningún caso un paso de tensión debe exceder de 10 kV, una vez seleccionado el nivel de tensión y establecido el número de pasos registre estos valores en el protocolo de pruebas.

7.2.3 Si su objetivo es realizar pruebas Tan δ VLF, la tensión de prueba será la nominal de fase del bobinado bajo prueba.

La tensión se debe aplicar de manera gradual, realizándose siempre 4 pasos de tensión de igual magnitud, una vez seleccionado el nivel de tensión y establecidos los pasos de tensión, registre estos valores en el protocolo de pruebas.

7.3 Establecimiento de los tiempos de prueba.

El tiempo de prueba dependerá básicamente del tipo de prueba que se pretenda realizar.

7.3.1 Para pruebas Hipot DC/VLF el tiempo de aplicación de la tensión de prueba debe ser de un minuto por cada paso de tensión que se realice, incluyendo el paso de tensión donde se alcanzado el valor máximo de tensión.

7.3.2 Para pruebas Tan δ VLF el tiempo de aplicación de la tensión para las pruebas se estipula en la tabla 6, teniendo en cuenta el tipo de prueba a efectuarse (instalación, aceptación o mantenimiento).

Para los tres primeros pasos mantenga el nivel de tensión durante tres minutos. Para el cuarto y último paso consulte la tabla 6. Registre en el protocolo de pruebas, el tiempo seleccionado, la corriente de fuga, la capacitancia y la Tan δ al final de cada paso.

Tiempo en prueba de Instalación Minutos.	Tiempo en pruebas de aceptación. Minutos.	Tiempo en Pruebas De mantenimiento. Minutos.
10	10	5

Tabla 40. Tiempos para prueba tan δ VLF.

7.4 Restablecimiento del elemento bajo prueba.

Una vez terminada la aplicación de tensión a los tres devanados del estator de la máquina bajo prueba se deberán efectuar los siguientes pasos antes de regresar la máquina a servicio:

- 7.4.1 Disipe la energía almacenada en los devanados durante la prueba, colocándolos a tierra durante un tiempo prudencial.
- 7.4.2 Retire los puentes realizados entre los devanados que no estaban siendo probados y el sistema de puesta a tierra.
- 7.4.3 Despeje la zona de pruebas para que se repongan las conexiones de la máquina al resto del sistema de potencia y de control.

8. CRITERIOS DE APROBACIÓN

Culminada la prueba se deberán contrastar los valores obtenidos con las recomendaciones establecidas internacionalmente, para entregar un veredicto del estado de la muestra.

8.1 Criterio de aprobación en prueba Hipot.

La prueba de soporte Hipot en DC/VLF será considerada satisfactoria si durante su desarrollo no se presentan cortocircuitos o descargas de tipo disruptivas, evidenciadas por la corriente de fuga (falla en la rigidez dieléctrica).

La estabilidad de la corriente de fuga (más allá de su valor absoluto) a lo largo de la prueba, es un buen indicador de la estabilidad del aislamiento, variaciones de la corriente de fuga pueden ser indicios de contaminantes o humedad en los devanados de la máquina bajo prueba.

Los valores típicos de corriente de fuga son de 50 a 100 μA (consulte con los fabricantes de la máquina), de presentasen valores superiores sin ocurrir la descarga disruptiva o sin que el equipo de prueba accione sus protecciones (se dispara o se apaga), es recomendable indagar sobre el estado de los empalmes, los terminales del cable, presencia de humedad o contaminantes, realizando las pruebas de diagnóstico tales como pruebas tangente delta ($\tan \delta$) y descargas parciales (PD).

De presentarse una descarga disruptiva se recomienda utilizar un equipo localizador de fallas para tomar las decisiones de si se repara el cable o se procede a realizar su sustitución.

8.2 Criterio de aprobación en prueba Tan δ .

Dado que la visión de este tipo de pruebas es la de un mantenimiento predictivo, lo más recomendable es comparar los valores obtenidos actualmente con los valores históricos y así determinar un porcentaje de envejecimiento del aislamiento.

Si no se cuentan con valores históricos, una opción es realizar una inter comparación entre las fases probadas, promediando los resultados con lo cual si los devanados de alguna de las fases dista mucho (valores superiores) de las otras dos, entonces se podrá en duda la calidad de su aislamiento.

Por último verifique que en ningún momento el valor de la $\tan \delta$ en alguna de las fases sobrepase el $5 \cdot 10^{-3}$, para máquinas nuevas y de $10 \cdot 10^{-3}$ para maquinas usadas, los valores superiores deberán ser analizados.

9. PROTOCOLO DE PRUEBAS

El protocolo de pruebas está dividido en dos partes:

- En la primera parte se registran los datos generales del cable, de sus premoldeados, de las condiciones ambientales y la medición de la resistencia de aislamiento preliminar.

Información de la máquina rotativa bajo prueba				Fecha: (__ / __ / 20 __)	
Hora: (__ : __)					
Designación de la máquina:					
Localización:					
Fabricante:			Año:		
Potencia nominal MVA:		Factor de potencia:			
Tensión nominal kV:		Corriente nominal kA:			
Clase de aislamiento:		Conexión:			
Observaciones del estado:					
Condiciones ambientales					
Temperatura ambiente °c:		Altura sobre el nivel del mar m:		Humedad relativa %:	
Observación:					
Resistencia de aislamiento MΩ					
Fase A		Fase B		Fase C	
Valor medido		Valor medido		Valor medido	Valor corregido
Factor de corrección a 20 °c =					
Valor corregido		Valor corregido		Valor corregido	
Observación:					

- En la segunda parte utilizara un protocolo diferente para cada tipo de prueba.
 - ❖ Para registrar la información referente a la prueba hipot DC a ser efectuada además del dictamen final basado en los datos obtenidos.

Información de la prueba Hipot DC a máquinas rotativas										
Tipo de prueba										
Instalación <input type="checkbox"/>			Aceptación <input type="checkbox"/>			Mantenimiento <input type="checkbox"/>				
Ítem	Paso de tensión	Tensión de prueba kV	Duración s.	Resistencia de aislamiento MΩ			Corriente de fuga μA			
				Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C	
1										
2										
3										
4										
5										
6										
7										
8										
9										
10										
11										
12										
13										
14										
15										
16										
17										
18										
19										
20										
Conclusiones:										
Ejecutado por: Fredy Bautista			Elaborado por: Jorge Villegas			Revisado por: Ing. Julio Chacón MPE		Aprobado por: Ing. José Amaya MIE		

- ❖ Para registrar la información referente a la prueba hipot VLF a ser efectuada además del dictamen final basado en los datos obtenidos.

Información de la prueba Hipot VLF a máquinas rotativas										
Tipo de prueba										
Instalación <input type="checkbox"/>			Aceptación <input type="checkbox"/>			Mantenimiento <input type="checkbox"/>				
Ítem	Paso de tensión	Tensión de prueba kV	Duración s.	Resistencia de aislamiento MΩ			Corriente de fuga μA			
				Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C	
1										
2										
3										
4										
5										
6										
7										
8										
9										
10										
11										
12										
13										
14										
15										
16										
17										
18										
19										
20										
21										
22										
23										
24										
25										
26										
27										
28										
29										
30										
31										
32										
33										
34										
35										
Conclusiones:										
Ejecutado por: Fredy Bautista		Elaborado por: Jorge Villegas			Revisado por: Ing. Julio Chacón MPE			Aprobado por: Ing. José Amaya MIE		

- ❖ Para registrar la información referente a la prueba Tan δ VLF a ser efectuada además del dictamen final basado en los datos obtenidos.

Información de la prueba Tan δ VLF a máquinas rotativas.														
Tipo de prueba														
Instalación <input type="checkbox"/>				Aceptación <input checked="" type="checkbox"/>					Mantenimiento <input type="checkbox"/>					
Ítem	Paso de tensión	Tensión de prueba Kv	Duración s.	Tan δ M Ω x10 ⁻³			Capacitancia nF			Corriente de fuga mA				
				Fase			Fase			Fase				
				A	B	C	A	B	C	A	B	C		
1														
2														
3														
4														
Conclusiones:														
Ejecutado por: Fredy Bautista			Elaborado por: Jorge Villegas			Revisado por: Ing. Julio Chacón MPE			Aprobado por: Ing. José Amaya MIE					

10. DOCUMENTOS DE REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA.

[B1] IEEE Std 43-2000 “Practica Recomendada para medir la resistencia de aislamiento a máquinas rotativas”.

[B2] IEEE Std 95-2002 “Practica Recomendada para medir de aislamiento a máquinas rotativas AC (2300 V y superiores) con alta tensión directa”.

[B3] IEEE Std 433-1974 “Practica Recomendada para medir de aislamiento a grandes máquinas rotativas AC con alta tensión a muy baja frecuencia VLF”.

[B4] IEEE 100 “la autoridad de estándares IEEE diccionario términos y definiciones”, séptima edición.

[B5] Ing. Esparza salcedo, Marcos y Ing. Ponce de León, Eugenio. Diagnóstico integral del devanado del estator de generadores eléctricos. Cigre comité mexicano Bienal 2001.

[B6] Rugeles Jones, Julio. Conceptos básicos en técnicas de alta tensión. 2da edición Bucaramanga Col. 1991.

[B7] VIM Vocabulario Internacional de Metrología, 3ra edición 2008, Centro Español de Metrología.

[B8] El aislamiento del equipo eléctrico de media tensión, publicación técnica Schneider PT-060, Edición Mayo de 2001.

[B9] Dieléctricos, Publicación de General cables.

[B10] IEEE Std 4-1995 “Guía para pruebas de campo y evaluación del aislamiento de sistemas de cables de potencia apantallados”.

[B11] “Más vale prevenir...”. AVO International. Tercera edición 1996.

11. EQUIPOS UTILIZADOS EN LA PRÁCTICA

Los equipos utilizados en las pruebas Hipot a cables eléctricos, máquinas rotativas y transformadores son los mismos, por lo tanto se dispuso tan solo incluirlos en el instructivo para cables de media tensión.


ANEXO D. INSTRUCTIVO DE PRUEBAS A TRANSFORMADORES



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

**PRUEBAS TAN δ VLF A
TRANSFORMADORES ELÉCTRICOS**

**VERSIÓN: 01
OCTUBRE DE 2010**



“Recuerde que lo urgente no nuble lo importante”

A continuación una serie de medidas de seguridad que se deben acatar durante la prueba.

- No trabaje en pruebas eléctricas sin un compañero.
- Considere que todo circuito esta energizado hasta comprobar lo contrario, todo trabajo eléctrico es potencialmente peligroso.
- Delimite una zona de prueba y no permita el acceso a personal no autorizado.
- Desenergice todos los elementos antes de iniciar cualquier labor.
- Utilice herramienta aislada, adecuada para trabajos eléctricos.
- Protéjase del contacto con otros equipos energizados, cercanos al sitio de prueba.
- Mantenga las instalaciones siempre limpias y con sus medios de protección.
- No deje en contacto los elementos eléctricos con aceites, grasas o algún otro elemento que deteriore su aislamiento.
- Identifique las salidas de emergencia, la ubicación de los extintores y del botiquín de primeros auxilios.

En la tabla 1 se encuentra una serie de elementos que deben estar presentes durante la prueba para la protección de la personal que realiza las conexiones y de aquel que supervisan las labores, estos elementos también permitirán proteger el elemento bajo prueba y los equipos de prueba.

Elementos de Protección Personal de uso obligatorio durante la prueba.			Elementos de uso obligatorio en el lugar de la prueba.	
Para:	Quien conecta	Todos los integrantes	Valla de señalización.	
Casco dieléctrico.			Manta dieléctrica clase 4.	
Lentes plásticos.			Sistema de puesta a tierra.	
Protector facial.			Bastón de rescate.	
Guantes dieléctricos Clase 4.			Detector de tensión.	
Guantes de carnaza.			Pértiga de descarga	
Chaqueta Anti fuego.			Extintor clase E (Riesgo electrocución)	
Botas dieléctricas.			Primeros auxilios.	

Tabla 41. Elementos necesarios para la seguridad de la prueba.
Fuente [Autores].

TABLA DE CONTENIDO

<u>1.</u>	<u>INTRODUCCIÓN</u>	- 136 -
<u>2.</u>	<u>OBJETIVOS</u>	- 136 -
<u>3.</u>	<u>ALCANCE</u>	- 136 -
<u>4.</u>	<u>DEFINICIONES</u>	- 136 -
<u>5.</u>	<u>MÉTODO</u>	- 139 -
<u>5.1</u>	<u>MÉTODO PRUEBAS TAN δ</u>	- 139 -
<u>6.</u>	<u>LISTA DE CHEQUEO</u>	- 140 -
<u>7.</u>	<u>ACTIVIDADES DE LA PRUEBA</u>	- 141 -
<u>7.1</u>	<u>Actividades para preparar el elemento bajo prueba</u>	- 141 -
<u>7.2</u>	<u>Establecimiento de la tensión de prueba</u>	- 147 -
<u>7.3</u>	<u>Establecimiento de los tiempos de prueba</u>	- 150 -
<u>7.4</u>	<u>Restablecimiento del elemento bajo prueba</u>	- 150 -
<u>8.</u>	<u>CRITERIOS DE APROBACIÓN</u>	- 151 -
<u>8.1</u>	<u>Criterio de aprobación en prueba Tan δ</u>	- 151 -
<u>9.</u>	<u>PROTOCOLO DE PRUEBAS</u>	- 152 -
<u>10.</u>	<u>DOCUMENTOS DE REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA</u>	- 154 -
<u>11.</u>	<u>EQUIPOS UTILIZADOS EN LA PRÁCTICA</u>	- 155 -

1. INTRODUCCIÓN

Este manual de procedimiento está destinado a proporcionar la orientación general de la metodología para ejecutar pruebas de diagnóstico Tan δ en VLF a transformadores eléctricos de potencia, utilizando como fuente un equipo inyector de alta tensión marca HV diagnostics modelo HVA60, adicionándole el modulo TD60, de la marca HV diagnostics y se tendrán en cuenta los parámetros establecidos por la siguiente norma:

- *IEEE Std C57.12.90-2006 “Código estándar IEEE para pruebas a transformadores de potencia, de distribución y regulación sumergidos en líquidos”, en sus capítulos 10 pruebas dielectricas.*

2. OBJETIVOS

- Diagnosticar la calidad del aislamiento eléctrico de un transformador de potencia, por medio de la prueba Tan δ en VLF y estimar la vida útil del elemento bajo prueba.

3. ALCANCE

Este manual de procedimiento es aplicable para realizar la prueba de diagnóstico Tan δ , a transformadores de potencia y distribución, que cumplan las siguientes condiciones.

- Que estén inmersos en aceite.
- Transformadores trifásicos.
- Con solo dos devanados (alta tensión y baja tensión)
- Para transformadores clase I (hasta 69 kV).

La prueba Tan δ en VLF puede ser de dos tipos de aceptación o de mantenimiento ambos tipos son cubiertos por este trabajo.

Este manual no aplica a transformadores tridevanados, autotransformadores o para transformadores de clase II (115 kV-765 kV).

Este manual de procedimiento puede ser ejecutado por empleados o trabajadores, ya sea en calidad de Ingenieros, Tecnólogos o Técnicos de mediciones, bajo el aval del laboratorio de alta tensión de la UIS o del departamento de mantenimiento tecnológico de la UIS.

4. DEFINICIONES

Este manual de procedimiento, aplica los términos y definiciones, dictaminados por la *IEEE 100 “la autoridad de estándares IEEE diccionario términos y definiciones”, séptima edición [B4].*

A continuación algunos de los términos más relevantes.

4.1 Askarel: Un término genérico para un grupo de hidrocarburos sintéticos, aromáticas resistentes al fuego, clorados, utilizados como aislantes eléctricos líquidos. Ellos tienen una propiedad en condiciones de formación de arcos de tal manera que los gases producidos consistirán principalmente de cloruro de hidrógeno no combustible con menor cantidad de gases combustibles.

4.2 Buje: Una estructura aislante que incluye un conductor central, o la provee un pasante central para un conductor, con posibilidad de montaje en una barrera, llevase a cabo o no, con el fin de aislar el conductor de la barrera y conducir la corriente de un lado de la barrera a el otro.

4.3 Condiciones de repetibilidad de una medición: condición de medición, dentro de un conjunto de condiciones que incluye el mismo procedimiento de medida, los mismos operadores, el mismo sistema de medida, las mismas condiciones de operación y el mismo lugar, así como mediciones repetidas del mismo objeto o de un objeto similar en un periodo corto de tiempo [B6].

4.4 Condición de reproducibilidad de una medición: condición de medición, dentro de un conjunto de condiciones que incluye diferentes lugares, operadores, sistemas de medida y mediciones repetidas de los mismos objetos u objetos similares [B6].

4.5 Coordinación de aislamiento: El proceso de correlación de las fuerzas de aislamiento del material eléctrico con sobretensiones y con las características de los dispositivos de protección contra sobretensiones transitorias.

4.6 Corriente de fuga: Son sendas de corriente que se deslizan por la superficie de los aislamientos y son constantes en el tiempo. Dependen principalmente de la película de humedad, mezclada con polvo y otras sustancias extrañas depositadas sobre la superficie del material [B7].

4.7 Esfuerzo eléctrico: es el campo eléctrico al cual está sometido un aislamiento [B7].

4.8 Elemento bajo prueba: Un dispositivo o sistema utilizado para la evaluación de un producto representativo que será comercializado.
Un componente Representante de una unidad o sistema que se utilizará para fines de evaluación.

4.9 Factor de disipación: Es la cotangente del ángulo entre el voltaje sinusoidal aplicado al dieléctrico y la corriente resultante a través del mismo. IEEE Std. 62-1995

4.10 Factor de potencia del aislamiento: La relación de la potencia disipada en el aislamiento, en vatios, al producto de la tensión real y actual en voltios-amperios, cuando está probado bajo una tensión sinusoidal y condiciones establecidas.
NOTA: Si la corriente es también sinusoidal, el factor de potencia de aislamiento es igual al coseno del ángulo de fase entre el voltaje aplicado y la corriente resultante.

4.11 Guarda: Uno o más elementos conductores dispuestos y conectados a un instrumento eléctrico o circuito de medición con el fin de desviar las corrientes no deseadas de los medios de medición.

4.12 Nivel básico de aislamiento: Es la tensión de choque que un equipo eléctrico está obligado a soportar sin presentar fallo o descarga disruptiva en un 90% de los casos en condiciones especiales de temperatura y humedad. Se designa en términos de la tensión de cresta [B1].

4.13 Núcleo: Un elemento de material magnético, que actúa como parte de un camino para el flujo magnético.

4.14 Procedimiento de medida: descripción detallada de una medición conforme a uno o más principios de medida y a un método de medida dado, basado en un modelo de medida y que incluye los cálculos necesarios para obtener un resultado de medida [B6].

4.15 Pruebas de conformidad: Los exámenes que se hacen específicamente para demostrar la conformidad con las normas aplicables.

4.16 Pruebas de tensión aplicada: pruebas dieléctricas en el que la tensión de prueba es alterna de baja frecuencia, aplicada por una fuente externa entre las partes conductoras y la tierra, sin excitar el núcleo del transformador que se está probando. Ver también: por pruebas de tensión inducida, pruebas dieléctricas de baja frecuencia. IEEE C57.12.80-2002

4.17 Pruebas de tensión inducida: Son pruebas dieléctricas en bobinas del transformador en el que las tensiones de ensayo adecuados se desarrollan en las bobinas de inducción magnética. Ver también: aplicar pruebas de tensión, pruebas de baja frecuencia dieléctrica.

NOTA- La fuente para las pruebas de tensión inducida, suministra habitualmente con una frecuencia superior a la nominal para evitar la saturación del núcleo y la excitación de corriente excesiva.

4.18 Rigidez dieléctrica: es el máximo esfuerzo al cual se puede someter un dieléctrico sin que cambien sus condiciones de aislamiento, se expresa en kilovoltios por milímetro [B5].

4.19 Rigidez dieléctrica crítica: campo eléctrico que producirá una pérdida de las condiciones de aislamiento, dependiendo del estado del aislamiento, en gases y líquidos la pérdida de su capacidad aislante es momentánea y en sólidos la pérdida de su capacidad aislante es permanente [B5].

4.20 Ruptura: es la descarga disruptiva o desglose a través del aislamiento [B3].

4.21 Transformador de distribución: Un transformador para la transferencia de energía eléctrica de un circuito de distribución primaria a un circuito de distribución secundaria o el circuito de consumo de servicios.

4.22 Tensión del 50% de la descarga disruptiva: Es el valor de la tensión de prueba que tiene la probabilidad del 50% de producir una descarga disruptiva [B12].

4.23 Voltaje de aguante (withstand Voltage): El voltaje que un equipo eléctrico es capaz de soportar sin presentar falla o descarga disruptiva, cuando es probado bajo condiciones específicas. IEEE C57.12.90-2006

5. MÉTODO.

Este manual de procedimiento aborda la prueba de diagnóstico Tan δ VLF y su correspondiente método de prueba se presenta a continuación.

5.1 MÉTODO PRUEBAS TAN δ

El aislamiento de un transformador se puede considerar como un condensador real, lo cual hace prever que en el dieléctrico estará presente una componente resistiva de la corriente, conocida como corriente de fuga I_r , la cual estará en fase con la tensión aplicada y tendrá otra corriente capacitiva la cual estará desfasada 90° de la tensión.

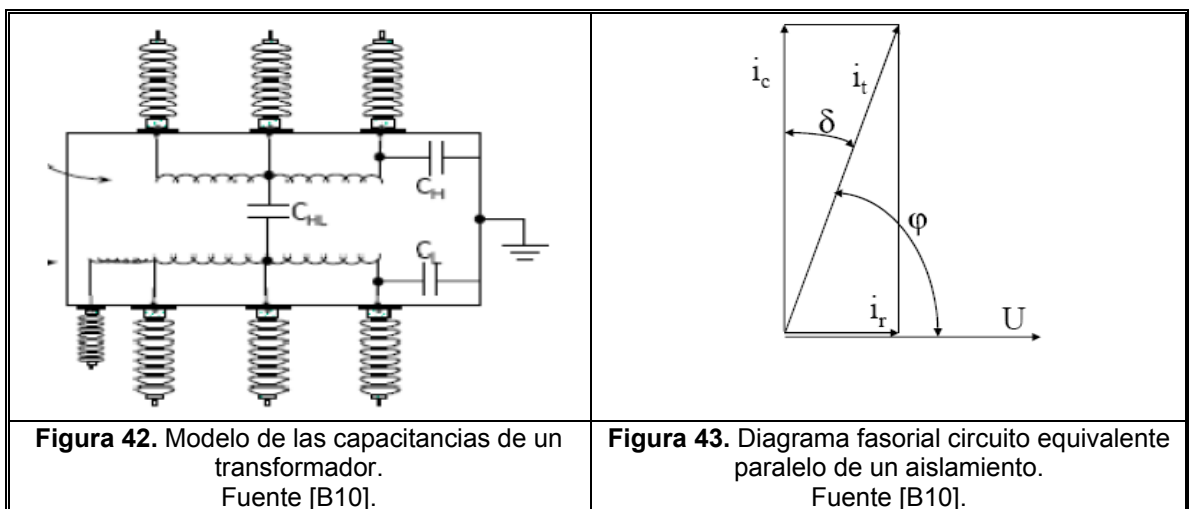
La corriente real I_t en el dieléctrico forma un ángulo δ (ángulo de pérdidas) con la corriente capacitiva I_c , como se observa en la figura 2.

En la figura 1, se puede apreciar un modelo sencillo de las capacitancias presentes en un transformador, reconociendo tres capacitancias básicas.

- C_{HL} es la capacitancia entre los devanados de alta y los devanados de baja tensión.
- C_H es la capacitancia entre los devanados de alta y La kuba del transformador.
- C_L es la capacitancia entre los devanados de baja y La kuba del transformador.

La expresión matemática de la Tan δ en cualquiera de los tres casos viene dada por la ecuación 1

$$\text{Tan } \delta = I_r/I_c \quad (3)$$



6. LISTA DE CHEQUEO

En la tabla 2 se encuentran una serie de ítems que le permitirán al operador revisar que tenga a la mano todo lo necesario para efectuar las pruebas Tan δ VLF, así mismo como una serie de casillas que evidenciarán la realización del chequeo.

Actividad.	Realizada (Fecha: Día, mes y año – Hora: hora, minutos, am/pm)
6.1 Lleva los elementos de seguridad para la prueba, ver tabla 1.	Si <input type="checkbox"/> (__ / __ / 20__) - (__ : __ / __) No <input type="checkbox"/>
Observaciones (Si <input type="checkbox"/> / No <input type="checkbox"/>):	
6.2 Examino el buen estado de los equipos de pruebas HVA60, TD60 y equipos auxiliares, ver sección 11.	Si <input type="checkbox"/> (__ / __ / 20__) - (__ : __ / __) No <input type="checkbox"/>
Observaciones (Si <input type="checkbox"/> / No <input type="checkbox"/>):	
6.3 Verifico la documentación necesaria (ARP, EPS, este manual impreso, y los mencionados en el numeral 7.1.1)	Si <input type="checkbox"/> (__ / __ / 20__) - (__ : __ / __) No <input type="checkbox"/>
Observaciones (Si <input type="checkbox"/> / No <input type="checkbox"/>):	
6.4 Tiene las herramientas necesarias para la prueba (juego de llaves mixtas, extensión eléctrica, lámpara).	Si <input type="checkbox"/> (__ / __ / 20__) - (__ : __ / __) No <input type="checkbox"/>
Observaciones (Si <input type="checkbox"/> / No <input type="checkbox"/>):	
6.5 Reviso los elementos para acordonar la zona de pruebas (conos y cinta de precaución).	Si <input type="checkbox"/> (__ / __ / 20__) - (__ : __ / __) No <input type="checkbox"/>
Observaciones (Si <input type="checkbox"/> / No <input type="checkbox"/>):	
6.6 Comprobó que lleva los consumibles requeridos para adecuar el elemento bajo prueba (grasas, siliconas, cobertores de polietileno, paños, alcohol etílico, cintas aislantes, cintas de amarre).	Si <input type="checkbox"/> (__ / __ / 20__) - (__ : __ / __) No <input type="checkbox"/>
Observaciones (Si <input type="checkbox"/> / No <input type="checkbox"/>):	
6.7 Realice esta inspección antes y después de realizar la prueba.	Si <input type="checkbox"/> (__ / __ / 20__) - (__ : __ / __) No <input type="checkbox"/>
Observaciones (Si <input type="checkbox"/> / No <input type="checkbox"/>):	
Responsable:	
Cargo:	
Tabla 44. Lista de chequeo para pruebas a Transformadores. Fuente [Autores].	

7. ACTIVIDADES DE LA PRUEBA

Las actividades serán separadas en cuatro (4) etapas para facilitar su seguimiento.

7.1 Actividades para preparar el elemento bajo prueba

Esta primera etapa permitirá al operador de la prueba recopilar información del transformador bajo prueba, de las condiciones atmosféricas de prueba y establece un escenario seguro para la ejecución de la prueba.

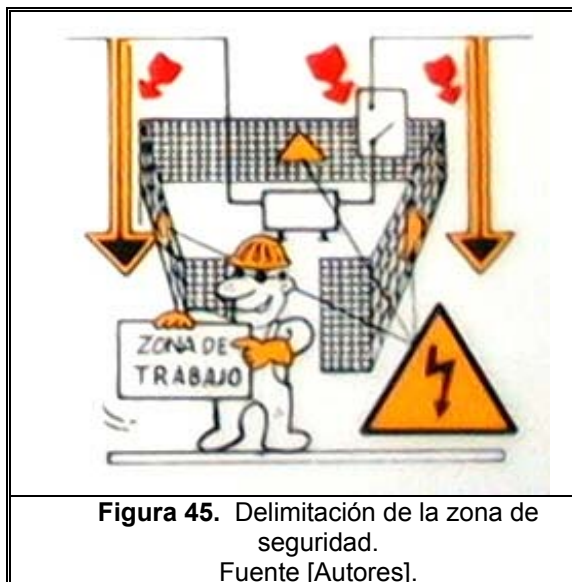
La prueba no puede ser llevada a cabo o se debe suspender si se presentan precipitaciones o si se presentan amagos de lluvia, ya que la presencia de humedad podría influir negativamente en el resultado de la prueba.

A continuación se enumeran las actividades necesarias para esta etapa.

7.1.1 Mantenga en un lugar visible los siguientes documentos:

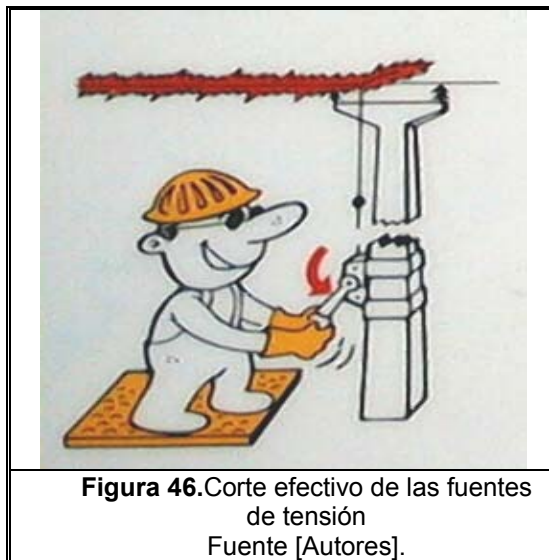
- Informes de prueba ejecutadas al elemento bajo prueba.
- Permiso de trabajo.
- Manual del equipo de pruebas.
- Planos de instalación
- Normas de seguridad del sitio de trabajo (charla de seguridad) y/o permisos de trabajo.
- Certificados de calibración al día del equipo de pruebas.

Solicite los documentos que necesite al jefe de mantenimiento responsable del lugar de trabajo.

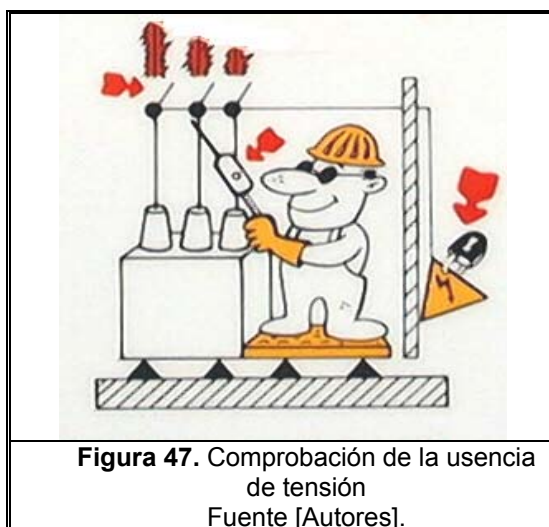


7.1.2 Establezca una zona segura alrededor del transformador. Utilice elementos que resalten el riesgo eléctrico (barreras con advertencias) y no permita que personal no autorizado ingrese a ella (un vigilante en la zona de prueba), ver figura 5.

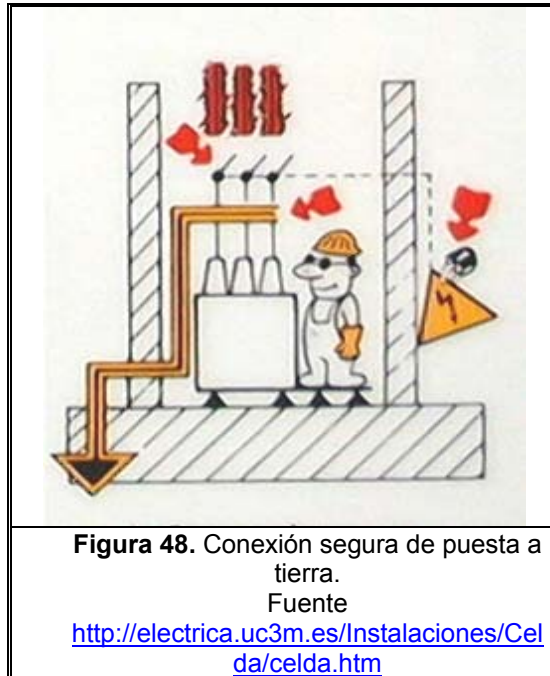
- 7.1.3 Verifique los canales de comunicación (radioteléfono o celular), y de ser necesario mantenga la comunicación abierta a lo largo de la prueba.
- 7.1.4 Verifique que el transformador ha sido desconectado del resto de la red de potencia eléctrica, tanto en los devanados de alta tensión como de los devanados de baja tensión, comprobando que se realizó un corte efectivo de todas las fuentes de tensión ver figura 6.



- 7.1.5 Verifique que el transformador ha sido desconectado de la red de medición y control (CT'S, PT'S, Relés etc), que puedan verse afectados con la tensión de prueba.
- 7.1.6 Compruebe la ausencia de tensión con un medidor de campo antes de manipular el transformador bajo prueba, ver figura 7.



- 7.1.7 Desenergice el/los elemento(s) a ser probado(s), establezca una conexión segura a tierra de las bornas de alta y baja tensión, hasta el momento de la inyección de tensión, ver figura 8.



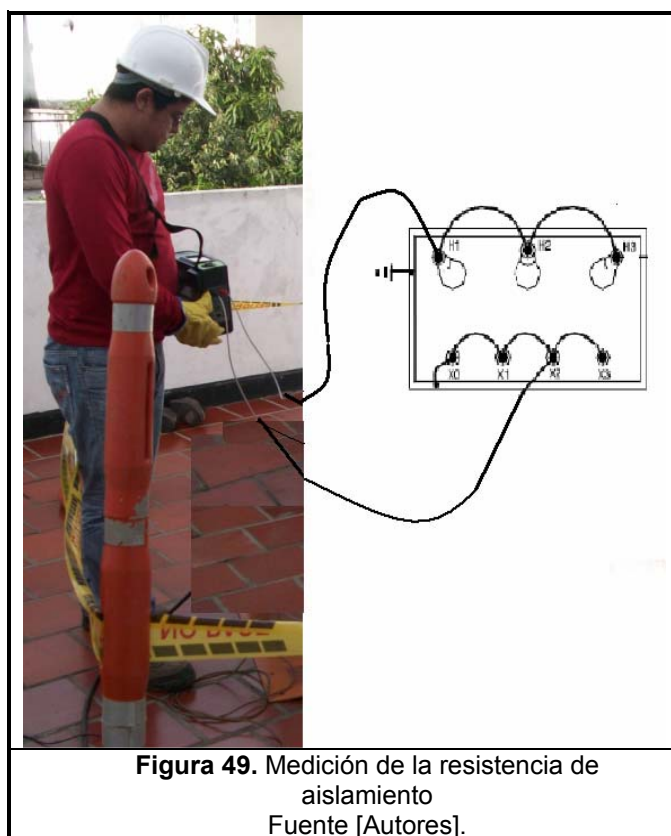
- 7.1.8 Identifique las características del transformador bajo prueba, registrando en el protocolo de pruebas los siguientes datos:

- | | |
|---------------------------|-----------------------------|
| ➤ Circuito | ➤ Clase de aislamiento |
| ➤ Potencia nominal | ➤ Tipo de refrigeración |
| ➤ Tensión nominal de alta | ➤ Volumen de aceite |
| ➤ Tensión nominal de baja | ➤ Nivel del aceite |
| ➤ Grupo de conexión | ➤ Fecha de instalación |
| ➤ Numero de taps | ➤ Fabricante |
| ➤ Valores de los taps | ➤ Estado del transformador. |

Reporte cualquier diferencia entre las especificaciones del transformador bajo prueba y los datos incluidos en los planos.

- 7.1.9 Limpie la superficie de los bornas de alta y baja tensión para liberarlo de contaminantes (utilice un paño seco y alcohol isopropílico o una sustancia aislante).
- 7.1.10 Aplique grasas, siliconas o masillas para minimizar las corrientes de fuga y evitar la combustión súbita generalizada (Flashover), de ser necesario cubra la superficie expuesta de las bornas del transformador con una película de polietileno o vidrio para minimizar el efecto corona.

- 7.1.11 Separe los elementos que no serán sometidos a prueba con una distancia no menor a una pulgada (1") por cada 10 kV aplicados, (2,54 cm por cada 10 kV) de la tensión de prueba, de ser necesario cubra las piezas cercanas que produzcan tensión.
- 7.1.12 Solicite una salida estable para la alimentación del equipo de pruebas HVA60, el cual consume 2 kW, a una tensión 110-240 V, 50-60 Hz. No utilice salidas que alimenten cargas tales como hornos eléctricos o soldadores de arco, pues estas pueden generar fluctuaciones en la tensión de prueba.
- 7.1.13 Mida la humedad relativa y la temperatura ambiental. Registre esos valores en el protocolo de pruebas.
- 7.1.14 Mida y registre en el protocolo de pruebas la temperatura en los bujes del transformador (lo ideal es que sea igual a la temperatura ambiente) también registre la altura sobre el nivel del mar ASNM.
- 7.1.15 Retire la puesta a tierra del numeral 7.1.7.
- 7.1.16 Realice las siguientes prueba de aislamiento puntual en el transformador:



- Medición entre alta y tierra.

- Medición entre alta y baja.
- Medición entre baja y tierra.

Inyecte como máximo 5 kV durante un minuto a cada uno de los casos, para descartar fallas a tensiones superiores. Registre el valor de la resistencia de aislamiento en el protocolo de prueba, ver figura 9.

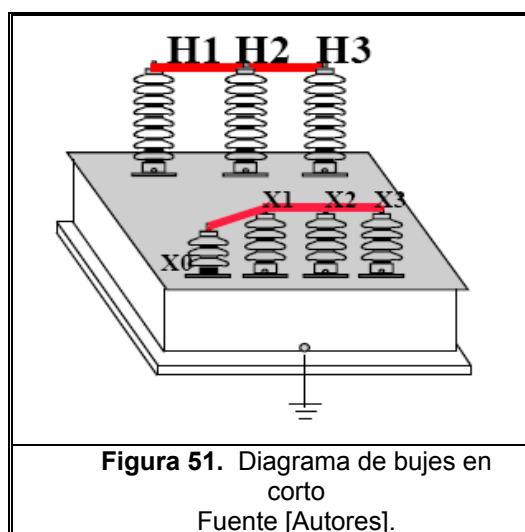
7.1.17 Realice la corrección por temperatura de los valores medidos de la resistencia de aislamiento, usando la tabla 3.

Tabla 50. Factores de corrección por temperatura para transformadores en aceite.

Temperatura ° C	0	5	10	15,6	20	25	30	35
Factores de corrección	0,28	0,43	0,64	1,0	1,43	2,17	3,20	4,77
Temperatura ° C	40	45	50	55	60	65	70	75
Factores de corrección	7,15	10,70	16,00	24,00	36,00	-	-	-

Fuente: Más vale prevenir de AVO International

7.1.18 Cortocircuite cada uno de los bujes de alta y cada unos de los bujes de baja tensión incluyendo el neutro. Ver figura 10.

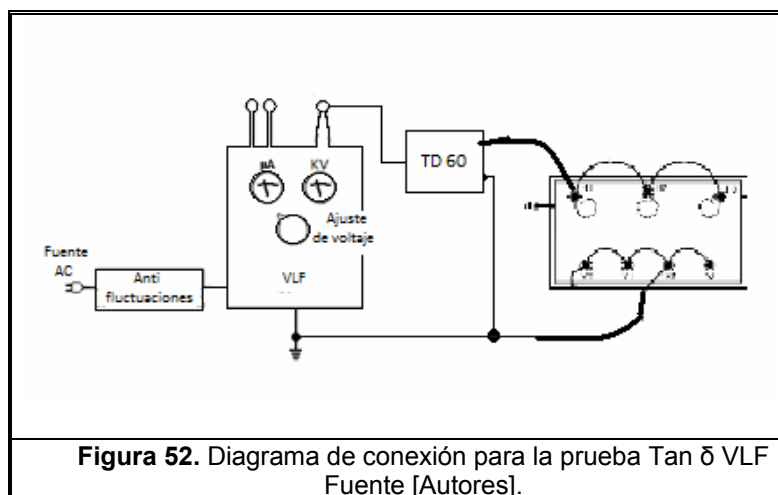


7.1.19 Conecte la referencia de la unidad HV60 al sistema de puesta a tierra disponible, ver figura 11.

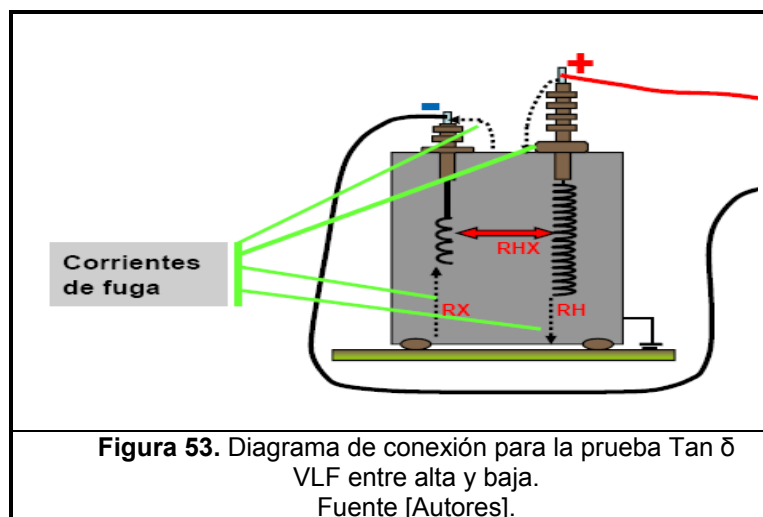
7.1.20 Conecte la referencia del módulo TD60 al sistema de puesta a tierra disponible, ver figura 11.

7.1.21 Ensamble el módulo TD60 a la unidad HV60, como lo ilustra la figura 11.

Esta conexión aplica para los tres casos en los que se dividen las pruebas Tan δ VLF, a un transformador, solo será necesario realizar las variantes que proponen los numerales del 7.1.22 al 7.1.24.

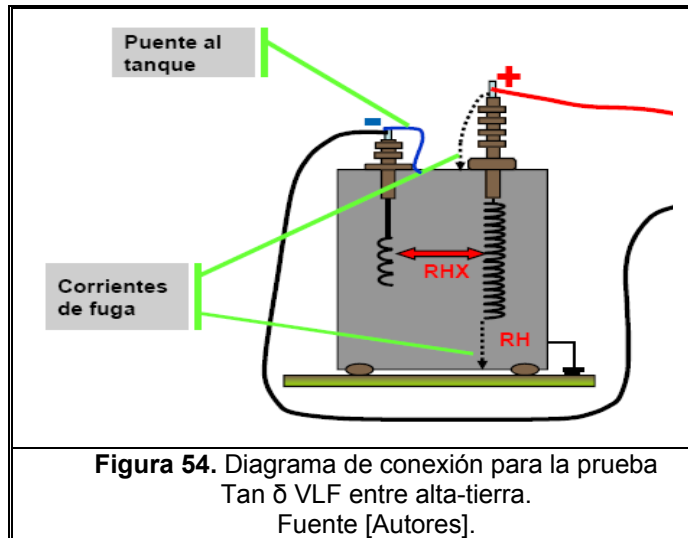


7.1.22 Si su finalidad es realizar la prueba Tan δ VLF, entre alta y baja realice la siguiente conexión.

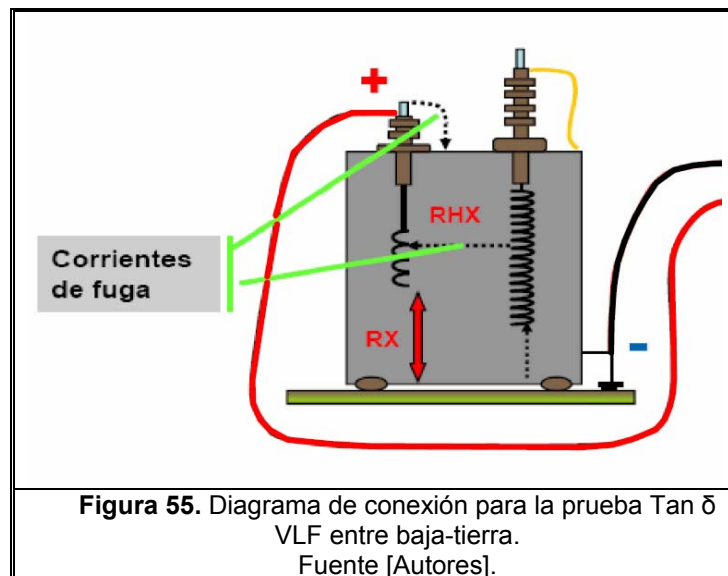


El cable rojo corresponde a la punta de tensión activa del módulo Tan δ VLF.

7.1.23 Si su finalidad es realizar la prueba Tan δ VLF, entre alta-tierra realice la siguiente conexión.



7.1.24 Si su finalidad es realizar la prueba $\tan \delta$ VLF, entre baja-tierra realice la siguiente conexión.



7.2 Establecimiento de la tensión de prueba.

El nivel máximo de tensión de prueba dependerá de la tensión nominal del devanado que se inyecta y del BIL.

La tensión se debe aplicar de manera gradual, realizándose siempre 4 pasos de tensión de igual magnitud, una vez seleccionado el nivel de tensión y establecidos los pasos de tensión, registre estos valores en el protocolo de pruebas.

La norma IEEE C57.12.90 en su numeral 10.10.3 indica que la tensión de prueba en mediciones del factor de disipación no debe superar la mitad de la tensión aplicada en las pruebas de baja frecuencia, cuyos valores se pueden observar en la tabla 4. También aclara que la tensión de prueba no debe ser superior a 10 kV.

APLICACIÓN	Tensión nominal kV rms	Nivel básico de aislamiento BIL kV pico	Prueba de Tensión aplicada a baja frecuencia kV
Transformador de distribución	1.2	30	10
	2.5	45	15
	5.0	60	19
	8.7	75	26
	15.0	95	34
	25.0	150	50
	34.5	200	70
	46.0	250	95
Transformados de potencia	69.0	350	140
	1.2	45	10
	2.5	60	15
	5.0	75	19
	8.7	95	26
	15.0	110	34
	25.0	150	50
	34.5	200	70
46.0	250	95	
69.0	350	140	

Tabla 56. Tiempos para prueba tan δ VLF.
Fuente IEEE C57.12.00-2006

- 7.2.1 Realice la prueba Tan δ VLF, entre los devanados de alta tensión y los devanados de baja tensión (ver figura 11), la tensión de prueba se seleccionara entre el menor de los siguientes tres ítems:
- La mitad de la tensión en pruebas a baja frecuencia (ver tabla 4).
 - 10 kV.
 - Para tensiones menores a 1,2 kV. Aplique la tensión nominal.
 - Otra opción es aplicar la tensión nominal del devanado a probar.
- 7.2.2 Realice la prueba Tan δ VLF, entre los devanados de alta tensión y la tierra (ver figura 12), la tensión de prueba será la misma que se selecciono en el numeral 7.2.1
- 7.2.3 Para finalizar realice la prueba Tan δ VLF, entre los devanados de baja tensión y la tierra (ver figura 13), la tensión de prueba será la obtenida de analizar nuevamente los ítems del numeral 7.2.1

7.3 Establecimiento de los tiempos de prueba.

Para los tres primeros pasos mantenga el nivel de tensión durante tres minutos.

Para el cuarto y último paso consulte la tabla 5. Registre en el protocolo de pruebas, el tiempo seleccionado, la corriente de fuga, la capacitancia y la Tan δ al final de cada paso.

Tiempo en prueba de Instalación Minutos.	Tiempo en pruebas de aceptación. Minutos.	Tiempo en Pruebas De mantenimiento. Minutos.
10	10	5

Tabla 57. Tiempos para prueba tan δ VLF.

7.4 Restablecimiento del elemento bajo prueba.

Una vez terminada la aplicación de tensión al transformador bajo prueba se deberán efectuar los siguientes pasos antes de regresarlo a servicio:

- 7.4.1 Disipe la energía almacenada en el transformador durante la prueba, colocando a tierra cada uno de los bujes del elemento probado.
- 7.4.2 Retire los puentes realizados entre los bujes de alta tensión y entre los bujes de baja tensión, además de los puentes establecidos entre los bujes y la carcasa o el sistema de puesta a tierra.
- 7.4.3 De ser necesario libere los cables de ataduras, para que puedan ser conectados en sus lugares correspondientes.

8. CRITERIOS DE APROBACIÓN

Culminada la prueba se deberán contrastar los valores obtenidos con las recomendaciones establecidas internacionalmente, para entregar un veredicto del estado de la muestra.

8.1 Criterio de aprobación en prueba Tan δ .

Dado que la visión de este tipo de pruebas es la de un mantenimiento predictivo, lo más recomendable es comparar los valores obtenidos actualmente con los valores históricos y así determinar un porcentaje de envejecimiento del aislamiento.

Si no se cuentan con valores históricos, una opción es realizar una inter comparación con otros transformadores del mismo tipo una buena opción es consultar al fabricante así se podrá salir de dudas con respecto a la calidad del aislamiento.

Por último verifique que en ningún momento el valor de la Tan δ en alguna de las fases sobrepase el $5 \cdot 10^{-3}$, para máquinas nuevas y de $10 \cdot 10^{-3}$ para transformadores usadas (recomendación de la IEEE 62-1995), los valores superiores deberán ser analizados con más pruebas.

Valores de la Tan δ cuestionables en la medición entre los devanados de alta y baja, se deben posiblemente a la presencia de humedad, de gases disueltos, o a contaminantes en el aceite.

Valores de la Tan δ cuestionables en la medición entre los devanados de alta y tierra o entre baja y tierra, se deben posiblemente a la degradación del papel del devanado que se tenga bajo prueba.

9. PROTOCOLO DE PRUEBAS

El protocolo de pruebas está dividido en dos partes:

- En la primera parte se registran los datos generales del transformador, de las condiciones ambientales y la medición de la resistencia de aislamiento preliminar.

Información del transformador bajo prueba				Fecha: (___/___/20__) Hora:(___/___)	
Designación del circuito:					
Localización:					
Fabricante del transformador:					
Potencia nominal kVA		Tensión nominal de alta kV		Tensión nominal de baja kV:	
Grupo de conexión		Clase de aislamiento		Tipo de refrigeración	
Volumen del aceite		Nivel del aceite		Numero de taps	
Instalado: (___/___/20__)	Valores de los taps				
Observaciones del estado:					
Condiciones ambientales					
Temperatura de bulbo seco °c:		Temperatura de bulbo húmedo °c:		Temperatura del transformador °c:	
Altura sobre el nivel del mar		m	Humedad relativa:		%
Observación:					
Resistencia de aislamiento MΩ					
Fase A		Fase B		Fase C	
Valor medido		Valor medido		Valor medido	Valor corregido
Factor de corrección a 20 °c =					
Valor corregido		Valor corregido		Valor corregido	
Observación:					

- En la segunda parte utilizara un protocolo diferente para cada tipo de prueba.

- ❖ Para registrar la información referente a la prueba Tan δ VLF a ser efectuada además del dictamen final basado en los datos obtenidos.

Información de la prueba Tan δ VLF a transformadores				
Tipo de prueba				
Instalación <input type="checkbox"/>		Aceptación <input type="checkbox"/>		Mantenimiento <input type="checkbox"/>
Paso de tensión				
Duración s				
PRUEBA DE ALTA – BAJA.				
Tensión de prueba kV				
Tan δ M Ω x10 ⁻³				
Capacitancia nF				
Corriente de fuga mA				
PRUEBA ALTA – TIERRA.				
Tensión de prueba kV				
Tan δ M Ω x10 ⁻³				
Capacitancia nF				
Corriente de fuga mA				
PRUEBA BAJA – TIERRA.				
Tensión de prueba kV				
Tan δ M Ω x10 ⁻³				
Capacitancia nF				
Corriente de fuga mA				
Conclusiones:				
Ejecutado por: Fredy Bautista	Elaborado por: Jorge Villegas	Revisado por: Ing. Julio Chacón MPE	Aprobado por: Ing. José Amaya MIE	

10. DOCUMENTOS DE REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA.

- [B1] IEEE Std 4-1995 “Guía para pruebas de campo y evaluación del aislamiento de sistemas de cables de potencia apantallados”.
- [B2] IEEE Std 62-1995 “Guía para el diagnóstico de pruebas de campo de aparatos de potencia eléctrica – Parte 1 Transformadores de potencia, reguladores y reactores”.
- [B3] IEEE Std C57.12.00-2006 “Norma de los requisitos generales para transformadores de potencia, distribución y de regulación sumergidos en aceite”.
- [B4] IEEE Std C57.12.80-2002 “Estándar de terminología para transformadores de potencia y distribución”.
- [B5] IEEE Std C57.12.90-2006 “Estándar código de pruebas para transformadores de potencia, distribución y de regulación sumergidos en aceite”.
- [B6] IEEE Std C57.12.91-2001 “Estándar código de pruebas para transformadores de potencia, distribución y de regulación tipo seco”.
- [B7] IEEE 100 “la autoridad de estándares IEEE diccionario términos y definiciones”, séptima edición.
- [B8] Rugeles Jones, Julio. Conceptos básicos en técnicas de alta tensión. 2da edición Bucaramanga Col. 1991.
- [B9] VIM Vocabulario Internacional de Metrología, 3ra edición 2008, Centro Español de Metrología.
- [B10] El aislamiento del equipo eléctrico de media tensión, publicación técnica Schneider PT-060, Edición Mayo de 2001.
- [B11] Dieléctricos, Publicación de General cables.
- [B12] “Más vale prevenir...”. AVO International. Tercera edición 1996.
- [B13] Seminario de Megger

11. EQUIPOS UTILIZADOS EN LA PRÁCTICA

Los equipos utilizados en las pruebas Hipot a cables eléctricos, máquinas rotativas y transformadores son los mismos, por lo tanto se dispuso tan solo incluirlos en el instructivo para cables de media tensión.