

**TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO  
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ**

**REPORTE TÉCNICO DE RESIDENCIA PROFESIONAL  
PRUEBA DE BARRIDO A LA FRECUENCIA EN ROTORES  
DE GENERADORES SÍNCRONOS**

**INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**ARCE PÉREZ DIANA MONSERRAT  
NO. CONTROL 14270457**

**ASESOR INTERNO:  
MC. KARLOS VELÁZQUEZ MORENO**

**ASESOR EXTERNO:  
MC. EDGAR ALEJANDRO PÉREZ OLIVO**

**PERIODO DE REALIZACIÓN:  
AGOSTO – DICIEMBRE 2018**

**TUXTLA GUTIÉRREZ CHIAPAS.**

## Índice

1. Introducción.....	1
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Estado del arte.....	2
1.3 Justificación.....	3
1.4 Objetivo.....	3
1.5 Metodología.....	3
2. Fundamento Teórico.....	5
2.1 Generador Síncrono.....	5
2.1.1 Componentes del generador.....	6
2.2 Rotor.....	10
2.3 Aislamiento.....	13
2.4 Fallas en el sistema de aislamiento.....	14
2.4.1 Falla de cortocircuito entre espiras del devanado de campo.....	16
2.4.2 Falla a tierra del devanado de campo.....	17
2.4.3 Falla por sobre calentamiento en el devanado amortiguador.....	18
2.5 Métodos de diagnóstico de rotores.....	19
2.6 Normatividad vigente de generadores síncronos.....	21
3. Desarrollo.....	24
3.1 Prueba de barrido de frecuencia en rotores de generadores síncronos.....	24
3.2 Método de realización de la prueba.....	28
3.3 Realización de la prueba de barrido.....	31
Resultados.....	36
Conclusión.....	44
Anexos.....	45
Referencias.....	51

## 1. Introducción

### 1.1 Antecedentes

Los generadores síncronos, son máquinas eléctricas utilizadas para transformar la energía mecánica en energía eléctrica de corriente alterna. Funcionando a una velocidad sincrónica precisa. Está compuesto principalmente de una parte móvil que es el rotor y de una parte fija estator. La energía generada es utilizada por todos los sectores de las sociedades modernas: industrial, comercial, agrícola y doméstico.

Con el fin de garantizar que el generador esté operando de forma correcta, es necesario contar con técnicas de medición que permitan detectar la falla. Actualmente existen diferentes metodologías utilizadas para el diagnóstico de rotores eléctricos, pero en muchos casos, no son eficaces y lo suficientemente sensibles como para detectar los procesos de deterioro del aislamiento de los rotores, por lo que se producen fallos que puede conducir fuera de servicio las unidades de generación por largo tiempo.

En reacción a este hecho se pueden tomar medidas con el objetivo de reducir la probabilidad de ocurrencia de estas fallas realizando pruebas periódicas para su mantenimiento y debido a la poca información relacionada con fallas en generadores, se hace necesaria la recopilación y descripción de las fallas más comunes en las diferentes partes del generador síncrono, donde se clasifican las fallas de acuerdo a la parte en que ocurre y si es de naturaleza mecánica o eléctrica, además se muestran registros fotográficos de fallas ocurridas.

La prueba análisis de barrido de frecuencia por sus siglas en inglés SFRA es un método de medición que se utiliza para diagnosticar la composición geométrica de un transformador de potencia pero actualmente se ha adecuado también para los rotores, este método está basado en el diagnóstico que permite detectar e identificar dos fallos importantes en los rotores eléctricos, tales como un cortocircuito entre las bobinas y una falla a tierra.

Esta técnica se basa en el análisis de la impedancia de los devanados en el dominio de la frecuencia. Las causas por las que ocurren estos problemas en el rotor eléctrico son por fallo del material aislante que se ocasionan por la degradación, fallo del esmalte de aislamiento, contaminación interna o sobrecalentamiento de la conexión, ambos son posibles detectar en una etapa temprana antes de que se conviertan en un problema serio para la integridad del rotor.

En México en el año de 1961 se funda la empresa Generadores Mexicanos S.A de C.V que sirve al sector eléctrico nacional e internacional brindando servicios de fabricación de partes para generadores eléctricos de potencia y servicios para reconstrucción, rehabilitación, mantenimiento, reparación, repotenciación y modernización de estos equipos. La empresa se ubica en Monterrey, Nuevo León y cuenta con más de 55 años de experiencia.

Esta empresa mexicana tiene un área específica el cual es la rehabilitación de rotores ya sea de polos salientes y lisos. Ofrece la ejecución de pruebas eléctricas y mecánicas, no destructivas a las partes expuestas del rotor así como la ejecución de trabajos menores tales

como pulido de anillos rozantes, rectificación de laberintos de lubricación o sello, y la reposición de componentes, diodos, líneas de alimentación al campo y balanceo dinámico a baja velocidad.

## 1.2 Estado del arte

A. J. Aranda Carmona CFE-LAPEM México CIGRE 2012 (Consejo Internacional de Grandes Sistemas Eléctricos) Diagnostic method of electrical rotors by applying the sweep frequency response analyzer (SFRA), el Laboratorio de Equipos Eléctricos Pruebas y Materiales (LAPEM), implementó la prueba SFRA como una herramienta para evaluación y diagnóstico de la condición del aislamiento del devanado de campo, en este caso de los rotores eléctricos [1].

C.A.Platero, F.Blázquez, F. R. Blánquez, E. Rebollo Universidad Politécnica de Madrid Spain CIGRE 2012 Application of Sweep Frequency Response Analysis (SFRA) for inter-turn detection of in medium-voltage coils manufacturing, en este artículo se presentan los resultados de las pruebas que usan el SFRA en bobinas de voltaje medio del generador. Con este método debería de ser posible identificar la ubicación exacta de la falla y, posiblemente, en qué etapa de fabricación sucedió [2].

Michael Rädler, OMICRON electronics GmbH LA-SFRA Seminar 2016 SFRA on Power Transformers, hace el desarrollo de la teoría de las mediciones del SFRA contra las mediciones que se hacían convencionalmente, con la desregulación de los mercados de energía el alcance de vida de los activos eléctricos se vuelve crítico. Aproximadamente del 35% al 40% de todas las fallas eléctricas en los generadores y transformadores son causados por averías en el aislamiento envejecido [3].

Synchronous Generators EE 340 Año 2011 Construction of synchronous machines, se describe cuáles son los componentes y el comportamiento de un generador síncrono al igual que su variación de carga depende del factor de potencia de la carga y de si el generador está trabajando solo o en paralelo con otros generadores síncronos y se considera que la velocidad del generador se supone constante [4].

Tze-Fun Chan Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China. Synchronous Machines Electrical Engineering. Vol. III, este artículo explica las características constructivas y los principios operativos de la máquina sincrónica, el rendimiento del generador para aplicaciones autónomas y de la red, al igual que se estudia el comportamiento de una máquina sincrónica y se revisa el sistema de excitación proporcionado [5].

Stephen J. Chapman Maquinas Eléctricas Quinta Edición McGraw-Hill/ Interamericana Editores S.A. de C.V. Año 2012 Capítulo 4 Generadores Síncronos, en este capítulo se estudia la operación de los generadores síncronos, tanto cuando operan solos como cuando lo hacen junto con otros generadores. Uno de los objetivos es comprender las corrientes transitorias que fluyen en condiciones de falla, lo que se le conoce como cortocircuito [6].

Este proyecto propone la implementación de la prueba de respuesta de barrido de frecuencia a los rotores de generadores síncronos el cual es capaz de localizar daños por contaminación al aislamiento o esfuerzos mecánicos. Al localizarlo permite identificar el proceso de deterioro que se está produciendo en un rotor. La componente resistiva de la SFRA sufrirá cambios en su curva de rendimiento para así poder identificar el nivel de riesgo que representa cada uno de estos problemas y corregirlos a tiempo.

### 1.3 Justificación

Este proyecto propone investigar y realizar pruebas para detectar de una manera más fiable y eficiente el deterioro del aislamiento en los rotores de generadores síncronos. A tal fin parte de la pregunta ¿Qué prueba empleada en transformadores puede ayudar a identificar fallas en los rotores eléctricos? Con el propósito de responder a esta pregunta se revisan en primer lugar técnicas basadas en el análisis de barrido de frecuencia para el diagnóstico de devanados del transformador de potencia.

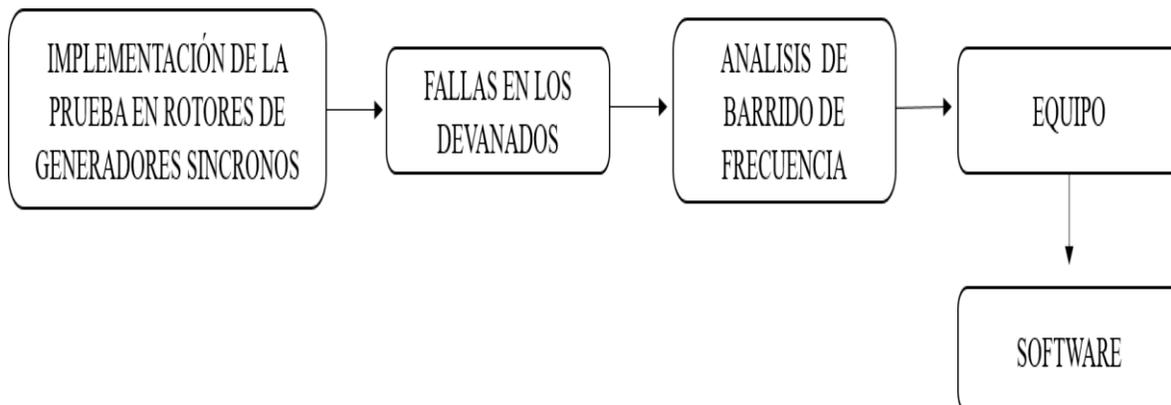
Actualmente existen dos casos exitosos en los que el equipo fue capaz de detectar problemas en el aislamiento los cuales no fueron detectados con pruebas convencionales. Por lo tanto, esta investigación aporta información nueva la cual será aplicada en desarrollar una técnica de un avance tecnológico considerable, con la cual podremos diagnosticar el estado de los equipos de una manera más fiable y eficiente.

El desarrollo de la metodología de la prueba de barrido a la frecuencia en rotores de generadores síncronos permite detectar de manera más fiable el deterioro en el aislamiento de los rotores. Esta herramienta es un avance tecnológico ya que verifica el estado de los equipos. El impacto que ha tenido este método da como resultado la creación de nuevas normas para la aplicación de la prueba, como CIGRE e IEEE.

### 1.4 Objetivo

Elaborar pruebas de barrido a la frecuencia en los rotores de generadores síncronos como parte de las pruebas que se realizan a estos equipos para verificar si está en buen estado y así obtener su óptimo funcionamiento.

### 1.5 Metodología



Esta prueba es una metodología de medición para diagnosticar la composición geométrica de un transformador de potencia basada en la medición de las características del transformador, ya que es un elemento estático, a menos que el estrés electromecánico cambia su composición física. En la actualidad se logró implementar dicha prueba en los rotores de generadores síncronos ya que ambos están conformados por bobinas y es ahí donde surgen los problemas que se detectan realizando la prueba de análisis de barrido de frecuencia.

### **Rotores:**

La herramienta mencionada tiene aplicación directa en el caso de detección de deterioro o daño a los rotores eléctricos. Se usa para detectar las fallas entre espiras causadas por el esfuerzo mecánico en los devanados de polos y los devanados de estator de las máquinas eléctricas, son una red eléctrica compleja de capacitancia, inductancias y resistencias con su propia respuesta en frecuencia.

### **Análisis de prueba de barrido de frecuencia:**

Se creó para comprobar la integridad de transformadores de potencia tras el transporte o la aparición de altas corrientes de falla. El FRANEO 800 responde al principio del Análisis de respuesta en barrido de frecuencia (Sweep Frequency Response Analysis - SFRA) y mide las funciones de transferencia eléctrica en un amplio rango de frecuencias.

### **Equipo:**

FRANEO 800 (Analizador de respuesta en frecuencia) responde al principio del Análisis de respuesta en barrido de frecuencia y mide las funciones de transferencia eléctrica en un amplio rango de frecuencias. Detecta defectos en el devanado y fallos en el núcleo magnético contribuyendo por tanto a aumentar la fiabilidad, reducir los gastos de mantenimiento y evitar averías costosas.

### **Software:**

Es operado por el software Primary Test Manager™ (PTM) que lo respalda durante las pruebas de diagnóstico, la evaluación de la condición y la administración sencilla de datos. Operar FRANEO 800 con PTM significa cumplir con los estándares y pautas IEC y IEEE aplicables a nivel internacional, mientras se mantiene el tiempo de prueba al mínimo. Una base de datos de alto rendimiento garantiza que los equipos instalados y los planes de pruebas asociados puedan administrarse fácilmente.

## 2. Fundamento Teórico

### 2.1 Generador Síncrono

Un generador síncrono es un dispositivo que convierte energía mecánica a energía eléctrica en un voltaje y frecuencia específicos. Se debe de accionar a una velocidad constante, la razón es que la frecuencia del voltaje generado, que es la de la red eléctrica que alimenta, está directamente relacionada con la velocidad, por lo tanto, la velocidad mecánica del generador se debe sincronizar con la frecuencia eléctrica.

Los generadores síncronos se ocupan para producir la mayor parte de potencia eléctrica que se utiliza en todo el mundo. La razón por la que se llama generador síncrono es por la igualdad entre la frecuencia eléctrica como la frecuencia angular es decir que el generador girara a la velocidad del campo magnético, correspondiente a la frecuencia de dicha red eléctrica y controlando la excitación se consigue que la maquina trabaje con cualquier factor de potencia.

Se usan para generar bloques importantes de potencia, los niveles de voltaje a que esta potencia se generan se encuentran en forma típica en el rango de 13.2 kV a 28 kV, el voltaje está prácticamente limitado por consideraciones de aislamiento y adicionalmente el número de conductores que se puedan colocar dentro de las ranuras del estator, ya que estos conductores deben de tener una adecuada sección transversal para conducir corriente y mantener las pérdidas óhmicas a un mínimo práctico, que se puede apreciar en la **Figura 1**.



*Figura 1. Colocación del rotor de polos lisos en el estator. Empresa GENERMEX*

A los niveles de voltaje mencionados sería posible transmitir la potencia generada en forma directa, pero esto podría tener también un nivel de pérdidas inaceptable, así como una excesiva caída de voltaje, aun a distancias cortas, por lo tanto, es absolutamente esencial transmitir potencias a niveles de voltaje altos que pueden ser en forma rutinaria 34.5, 69, 115, 138, 161, 230, 400 kV esta elevación de voltaje se logra por medio de los transformadores en las subestaciones eléctricas elevadoras para ser transmitidos a cientos de kilómetros.



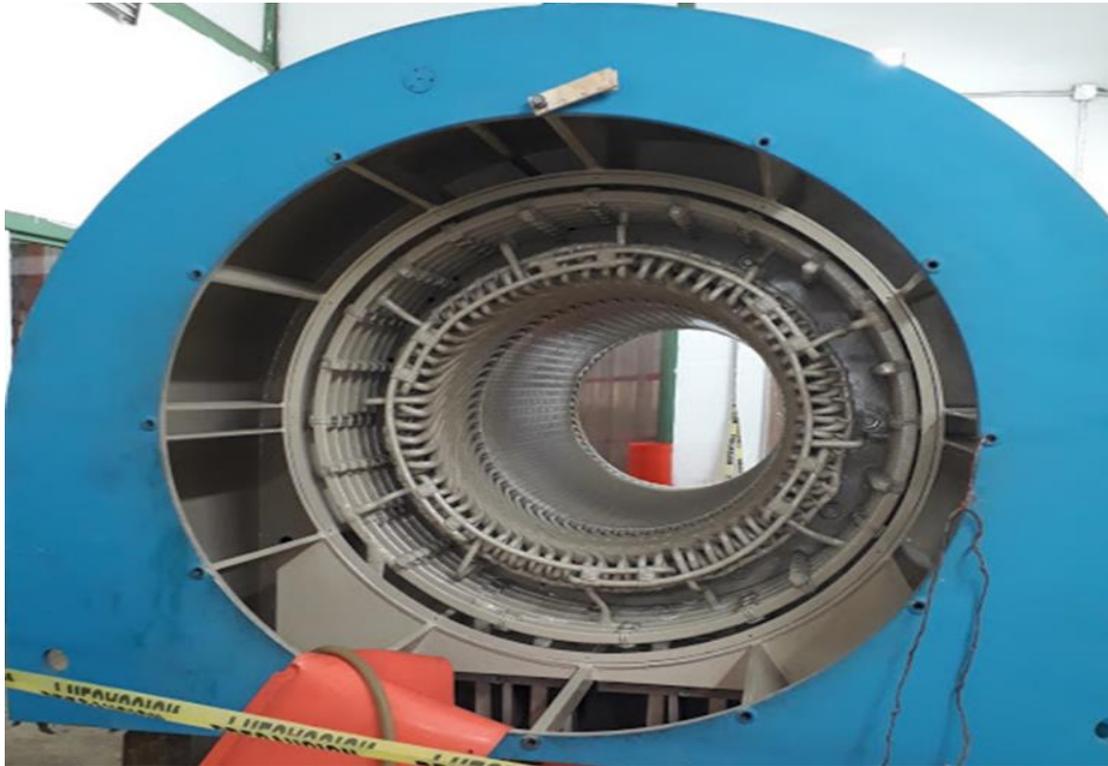
*Figura 2. Colocación del rotor de polos salientes en el estator*

Cuando un generador opera solo, las potencias real y reactiva por suministrar deben estar determinadas por la carga impuesta y los puntos de ajuste del mecanismo regulador y con la corriente de campo controlan la frecuencia y el voltaje de las terminales, respectivamente. Cuando se conecta un generador a un bus infinito, su frecuencia y voltaje son constantes, por lo que los puntos de ajuste del mecanismo regulador y la corriente de campo controlan el flujo de potencia real y reactiva del generador. La colocación se puede ver en la **Figura 2**.

### **2.1.1 Componentes del generador**

#### **Estató**

El estató es la parte fija del exterior de la máquina que va alrededor del rotor véase la **Figura 3**, formando una carcasa metálica que sirve como soporte, de tal manera que el rotor pueda girar en el interior del estató. Está envuelto en un conjunto de bobinas distribuidas a lo largo de su circunferencia que producen la corriente eléctrica que se necesita emplear. Constituido por un devanado trifásico distribuido a  $120^\circ$ .



*Figura 3. Parte interna del estator. GENERMEX*

Constituido por un conjunto de láminas de acero al silicio llamado barra, que tienen la habilidad de permitir que pase a través de ellas el flujo magnético con facilidad; la parte metálica del estator y los devanados proveen los polos magnéticos. Los polos de un motor siempre son pares por ello el mínimo de polos que puede tener un motor para funcionar es dos (un norte y un sur).

Está hecha de acero de buena calidad eléctrica, en forma laminada para minimizar las pérdidas por corrientes circulantes. El concepto de buen acero eléctrico quiere decir que tanto la permeabilidad como la resistividad del material sean altas, generalmente el acero al silicio satisface este requisito. El número de ranuras es el que puede usar un devanado trifásico, esto es posible cuando el número de ranuras dividido por el número de polos y multiplicando este cociente por el número de fases es un entero, expresado de la siguiente forma:

$$\frac{\text{Ranuras} \times \text{Fases}}{\text{Polos}} = \text{Número entero}$$

### Rotor

El rotor (**Figura 4**) está formado por un devanado alimentado desde el exterior a través de escobillas y anillos rozantes mediante corriente continua, el devanado es alimentado con corriente continua que crea un campo magnético fijo. Se hace girar por un medio externo que crea el campo magnético, induce la fuerza electromotriz en el estator y por lo tanto hace circular la corriente por la carga, este proceso genera la transformación de energía mecánica en energía eléctrica.



*Figura 4. Rotor de polos lisos. GENERMEX*

### Excitador

El excitador es el encargado de controlar las variaciones o perturbaciones temporales que se presentan en la tensión de una máquina síncrona, modificando la corriente que circula por su devanado de campo, proporciona la tensión continua al devanado de campo de la máquina síncrona y puede tener diferentes principios de operación. La función básica de un sistema de excitación es suministrar corriente directa al devanado de campo de la máquina síncrona.

Para sincronizar un generador se debe de ajustar la excitación de manera que el voltaje del generador sea igual al voltaje del sistema. Se rectifica una pequeña corriente trifásica y se utiliza para suministrar el circuito de campo del excitador que se encuentra en el estator. Entonces se rectifica la salida del circuito del inducido del excitador en el rotor y se utiliza para suministrar la corriente de campo de la máquina principal.

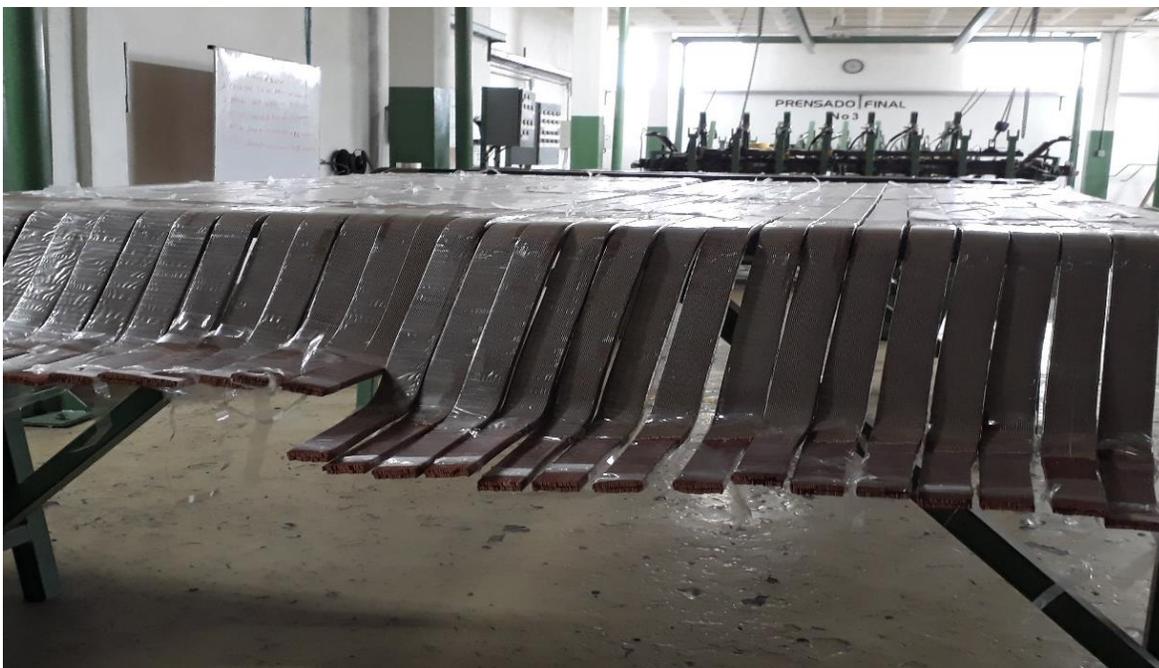
Un excitador sin escobilla es un generador de ca pequeño con un circuito de campo montado en el estator y un circuito de armadura acoplado en el eje del motor. La salida trifásica de generador excitador se rectifica a corriente directa por medio de un circuito rectificador trifásico y luego se alimenta al circuito de campo de cd principal. En los generadores de gran tamaño se utilizan excitadores o excitatrices sin escobillas para suministrar a la máquina corriente de campo en cd.

Este sistema se conoce como de excitación estática y es el más frecuentemente utilizado en los últimos años para los generadores síncronicos por su elevada velocidad de respuesta con

respecto a los electromecánicos aparte de otras ventajas como requerir poco mantenimiento, ocupar poco espacio, y su facilidad de control. A través del control de la tensión y corriente de campo realiza funciones de control y de protección para una operación satisfactoria del sistema de potencia.

### Barras

Medias bobinas o también llamadas bastones que se presenta en la **Figura 5**. Este tipo de construcción se caracteriza por tener los conductores cortocircuitados en sus extremos. El aislamiento principal es Clase “F” y se construye a partir de capas de cinta de mica con resina epóxica. En su parte recta, las bobinas se recubren con cinta semiconductor, para evitar descargas parciales a la ranura. En sus extremos, las bobinas se recubren de cinta graduadora de potencial, para evitar descargas superficiales a la salida del núcleo.



*Figura 5. Barras del estator superiores e inferiores. GENERMEX*

### Bobinas

Las bobinas completas de una o más vueltas que se muestra en la **Figura 6**, conocidas como Diamante se elaboran con aislamiento Clase “F”, con tensiones nominales de hasta 20 KV, procesadas de manera unitaria, en prensas que aplican ciclos de calor y presión, necesarios para obtener un sistema aislante homogéneo, con la misma proporción de mica y resina en todas sus partes, y obtener así los niveles de descargas parciales y factor de potencia del aislamiento, que permiten cumplir las especificaciones y pruebas más demandantes requeridas para su uso.



*Figura 6. Bobina diamante de 4 vueltas. GENERMEX*

## 2.2 Rotor

El rotor es la parte rotatoria de un generador síncrono, que en esencia es un electroimán grande, los polos magnéticos pueden ser tanto salientes como lisos. Un polo saliente es un polo magnético proyectado hacia afuera del eje del rotor y es de velocidades de giro bajas. Por otro lado, la de polos lisos es un polo magnético construido al mismo nivel de la superficie del rotor y tiene elevadas velocidades de giro.



*Figura 7. Rotor de polos lisos. GENERMEX*

La máquina de rotor de polos lisos véase la **Figura 7** (2 o 4 polos) es de alta velocidad. En estas máquinas tanto el estator como el rotor son cilíndricos, por lo que su entrehierro es uniforme. Los conductores del rotor se colocan en ranuras donde están mejor sujetos que en las bobinas de los polos salientes y el diámetro del rotor es pequeño. El hecho de que tengan pocos polos hace que estos quepan en un rotor de diámetro reducido. Por lo tanto, son máquinas de pequeño diámetro y gran longitud axial. Estas máquinas son de eje horizontal.

El devanado de cd está colocado en las ranuras del rotor, como el entre hierro es uniforme se obtiene una mejor distribución del flujo, comparativamente con las máquinas de rotor de polos salientes. Se usan en forma exclusiva en generadores accionados por turbinas de vapor y como tales son conocidos como turbo alternadores o turbogeneradores, tienen por lo general dos o cuatro polos por sus aplicaciones a altas velocidades y debido a que estos rotores son compactos.

La máquina de rotor de polos salientes como se muestra en la **Figura 8**, consiste en unas barras colocadas axialmente en la zapata de parte del polo más ancha y cercana al entrehierro de cada polo. En cada segmento de los conductores unen las barras de un polo por ambos extremos formando un trozo de jaula de ardilla. En algunos casos lo que se hace es utilizar aros de cortocircuito completos, uno a cada lado de la máquina, que unen entre sí las barras de todos los polos.

Debido a que el rotor está sujeto a campos magnéticos variables, se construye con láminas delgadas para reducir las pérdidas por corrientes parasitas. Se debe suministrar una corriente de cd al circuito de campo del rotor. Puesto que este gira, se requiere de un arreglo especial para que la potencia de cd llegue a los devanados de campo y existen dos formas comunes de suministrar la potencia de cd.



*Figura 8. Rotor de 4 polos salientes. GENERMEX*

La primera es suministrando al rotor la potencia de cd desde una fuente externa de cd por medio de anillos rozantes y escobillas. Mientras que la segunda forma es suministrando la potencia de cd desde una fuente de potencia de cd especial montada directamente en el eje del generador síncrono. El rotor gira a la misma velocidad que el campo; llamada velocidad del sincronismo.

El núcleo polar que está presentado en la **Figura 9** es la parte principal de los polos debido a que tiene la función fundamental de cerrar el circuito magnético y mantener el devanado de campo en posición. El núcleo polar está formado por un apilado de láminas de acero al silicio de alta resistencia, con el objetivo de disminuir las pérdidas por corrientes inducidas. El apilado de chapas se mantiene unido mediante tirantes pretensados, tornillos y placas en sus extremos. La función de la placa polar es mantener comprimido el apilado polar con una presión uniforme.



*Figura 9. Polo de un rotor de polos salientes. GENERMEX*

Las espiras del devanado de campo por lo general tienen una forma de sección transversal rectangular, y muchos cientos de giros se enrollan en el polo, se presenta una profundidad de varias capas de conductores. El aislamiento de las espiras del devanado de campo generalmente utiliza resina epóxica, barniz y mica. Mirando axialmente, las láminas se forman para tener una expansión en la punta del polo que se define como la cara del polo, esto es para apoyar el bobinado en contra de la fuerza centrífuga.

Tiene alimentación de cd en el devanado de campo del rotor, para producir el campo magnético. En los generadores con rotor de polos lisos, el devanado de cd está colocado en las ranuras del rotor como el entre hierro es uniforme se obtiene una mejor distribución del flujo, comparativamente con las máquinas de rotor con polos salientes. Se usan en las centrales hidroeléctricas en donde operan a muy baja velocidad y entonces requieren de un elevado número de polos. Esta relación se puede observar de acuerdo a la siguiente expresión:

$$f = \frac{PN}{120}$$

Donde:

P= Numero de polos

N= Velocidad en RPM

El campo magnético del rotor apunta en la dirección en donde gira. Ahora, la tasa de rotación de los campos magnéticos en la maquina está relacionada con la frecuencia eléctrica del estator, es por eso que se utiliza esa ecuación, debido a que el rotor gira a la misma velocidad que el campo magnético. Esta ecuación está relacionada a la velocidad de rotación del rotor con la frecuencia eléctrica resultante.

### 2.3 Aislamiento

El aislamiento es una parte fundamental de la electricidad y por lo cual nos ayuda a mantener aislado un punto de otro por ejemplo una parte energizada para que no se manifieste un corto circuito o falla a tierra se tiene que aislar ya sea con aislamientos de materiales internos o externos y dependiendo de la tensión. El vacío es el único aislante perfecto y tiene conductancia nula, por el no circulan corrientes de fuga.

Los demás materiales aislantes son dieléctricas imperfectos, con conductancia no nula pero tan pequeña que sus corrientes de fuga son despreciables. Se utilizan en las maquinas eléctricas para asegurar el aislamiento eléctrico entre los conductores y entre estos las piezas metálicas. Estos materiales suelen ser la parte más delicada de una maquina eléctrica debido a su sensibilidad a las sollicitaciones térmicas, mecánicas y dieléctricas.

Muchas de las aplicaciones de los materiales aislantes quedan definidos por la temperatura máxima que soporta, por lo tanto es importante conocer la clasificación térmica de los mismos, de forma que no se exponga a una temperatura superior a su capacidad. En este sentido, en siguiente listado se muestran las cuatro principales clases de aislamiento, y que son coincidentes en las normas NEMA e IEC.

Clase “A” (105 °C) Material Aislante O materiales tales como: Algodón, Papel Impregnado, Seda.

Clase “B” (130 °C) Material Aislante o combinación tal como: Mica, Fibra de Vidrio, Asbesto, y/o otros materiales adecuados para recubrimiento.

Clase “F” (155 °C) Materiales o combinación de materiales tales como: mica, fibra de vidrio, Asbesto, materiales orgánicos, o inorgánicos que soportan altas temperaturas.

Clase “H” (180 °C) Materiales o combinación de materiales tales como: silicones, Elastómeros, mica, Fibra de Vidrio, Asbestos, y otros materiales combinados con resina.

Cada material tiene un ciclo de vida como en la naturaleza, pero en el aislamiento interno ese ciclo de vida puede ser que se prolongue o que se acorte eso dependiendo del uso y de las condiciones donde se encuentre. Un cable o barra conductora puede llegar a 20 años de operación de forma corrida, eso dependiendo del tipo de aislamiento y el cuidado con que se trate.

## 2.4 Fallas en el sistema de aislamiento

El rotor de la máquina síncrona es un conjunto de partes interrelacionadas, una alteración en una de estas partes genera consecuencias en otras y es importante mencionar que diferentes fallas o funcionamiento anormales de la máquina pueden originar los mismos síntomas en los elementos que componen el rotor. Las fallas eléctricas del rotor están relacionadas con el estado de los materiales que conforman el sistema aislante del rotor.

Los materiales aislantes y de refuerzo no metálicos se deterioran con el tiempo debido al calor de los devanados. La velocidad a la que se deterioran los componentes de los materiales es una función de sus propiedades térmicas y de las temperaturas a las que están sometidos. Si las valoraciones térmicas de los componentes de los materiales se han seleccionado correctamente, el envejecimiento térmico y el deterioro asociado se producirán gradualmente a lo largo de una vida de servicio aceptable.

Los materiales más susceptibles a la degradación térmica son materiales de unión y refuerzo orgánico, mientras que los componentes inorgánicos tales como la mica, vidrio, y asbestos no se ven afectados a las temperaturas normales de funcionamiento de las máquinas eléctricas. La vida térmica del aislamiento en los puntos calientes de los devanados se reduce significativamente, ya que el margen entre la temperatura de funcionamiento y potencia térmica es mucho menor.

Este efecto es mucho más crítico en los sistemas de aislamiento clase B de más edad y son muy difíciles de detectar tales puntos calientes. Las causas del envejecimiento térmico en los polos salientes pueden ser variadas entre ellas se encuentra:

- Los ciclos de arranque y parada que se presenta en los generadores. Y estos arranques y paradas frecuentes causan expansión y contracción del devanado como resultado de las variaciones en la temperatura. El movimiento relativo debido a los diferentes coeficientes de expansión térmica conduce a la abrasión de los materiales aislantes del rotor.
- La sobrecarga o altas temperaturas del aire que llevan a las temperaturas de funcionamiento muy por encima de los valores de diseño.
- Refrigeración inadecuada, que puede ser de carácter general, por ejemplo, el aire de refrigeración o agua insuficiente, o puntos muertos locales en el circuito de refrigeración debido a un mal diseño, fabricación o procedimiento de mantenimiento.
- El uso de materiales que tienen propiedades térmicas inadecuadas y por consiguiente una tasa de deterioro a un ritmo inaceptable, cuando se opera dentro de los límites de temperatura de diseño.
- Sobreexcitación de los devanados del rotor durante largos periodos de tiempo.
- Corrientes de secuencia negativa en bobinas del estator debido a desequilibrio de tensión del sistema. Lo que conduce a corrientes circulantes en el rotor.

Características comunes de que se está presentando sobrecalentamiento en el rotor de una máquina son deterioro térmico severo, puede dar lugar a cortocircuito entre espiras y/o fallas

a tierra. El envejecimiento se puede dar de manera general o localizada. El envejecimiento térmico general presenta como resultado:

- El ciclo térmico resultante de frecuentes arranques y paradas lleva al agrietamiento de la resina o barniz en las uniones del sistema de aislamiento. Esto provoca el aflojamiento y el movimiento relativo de las partes, lo que conduce a un aumento de la flojedad y abrasión.
- Pérdida entre la unión de los conductores y fragilidad en el barniz o resina de las uniones.
- Contracción térmica de arandelas de los polos y materiales aislantes de refuerzos entre bobinas.
- Fragilidad y oscurecimiento de los materiales del sistema de aislamiento.
- La holgura de los arrollamientos en los polos y la contracción del aislamiento de tierra.
- Distorsión de la forma de los devanados.
- Pérdidas de energía en el devanado de campo.



*Figura 10. Falla en el sistema de aislamiento*

La **Figura 10** presenta un caso de deterioro del aislamiento en puente del rotor. Se ilustra el deterioro del material aislante en un puente del rotor donde se observa cambio de color del material y pérdida en un tramo, dejando descubierto el conductor.

Las fallas mecánicas y fallas eléctricas se encuentran relacionadas, ya siendo una causa de la otra o viceversa. Uno de los puntos más sensibles y relevantes de las máquinas síncronas es el sistema de aislamiento, que puede ser alterado por las condiciones térmicas bajo las cuales opera la máquina, desencadenando fallas de magnitudes considerables que pueden alterar la integridad del devanado de campo y el núcleo magnético del rotor.

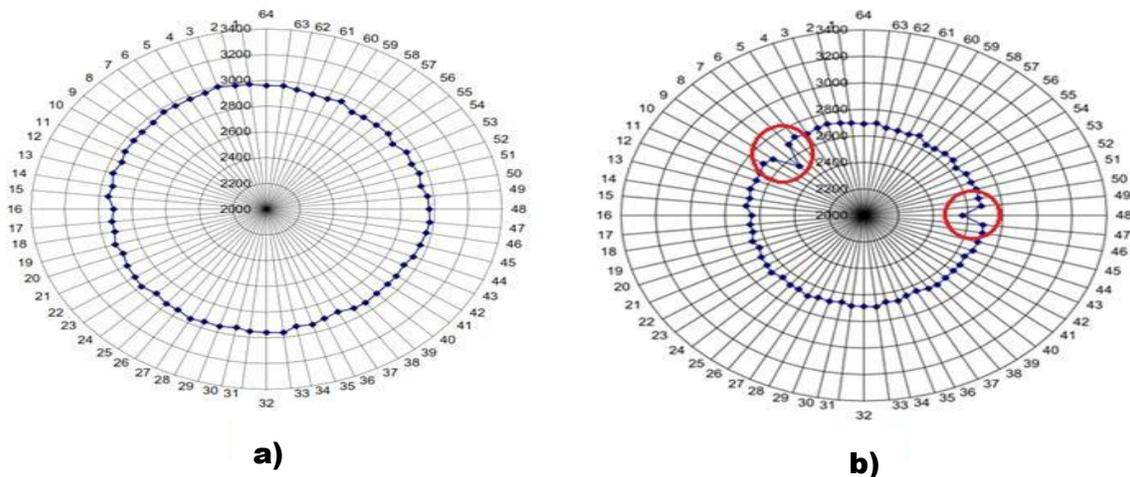
#### 2.4.1 Falla de cortocircuito entre espiras del devanado de campo

Se presentan debido a las condiciones de operación de la máquina como: residuos de limpiadores dieléctricos, Polvo de escobillas, humedad, contaminación, temperaturas elevadas, ciclos de arranque y parada, alteraciones de la línea, el propio envejecimiento del aislamiento y errores cometidos por fabricantes que aceleran el proceso de envejecimiento de los materiales aislantes.

El cortocircuito entre espiras se basa en una reducción de las espiras útiles para la generación de campo magnético, debido a que cuando el aislamiento falla se produce un nuevo camino para la circulación de la corriente. El impacto de la operación de un generador con espiras del devanado de campo en cortocircuito depende del porcentaje de espiras totales cortocircuitadas.

Si el porcentaje de espiras cortocircuitadas es pequeño, el generador puede ser capaz de operar con la carga nominal durante años sin tener mayores consecuencias. Sin embargo cuando se presenta un gran porcentaje de espiras en cortocircuito, es posible que se presenten condiciones de funcionamiento que limiten la carga de las unidades y originen interrupciones forzadas en la operación del generador por incremento de vibraciones.

Los diagramas polares de la **Figura 11** ilustran los resultados de la medición del flujo magnético en el entrehierro, normalmente se utilizan pequeñas bobinas montadas de forma permanente en cuñas o dientes del estator. Las bobinas miden el flujo principal de cada polo del rotor que pasa con cada revolución. Si se presenta cortocircuitos entre las espiras se observara una reducción en la magnitud de flujo magnético, se puede utilizar la comparación de la magnitud de flujo magnético de polo a polo para determinar espiras en cortocircuito.

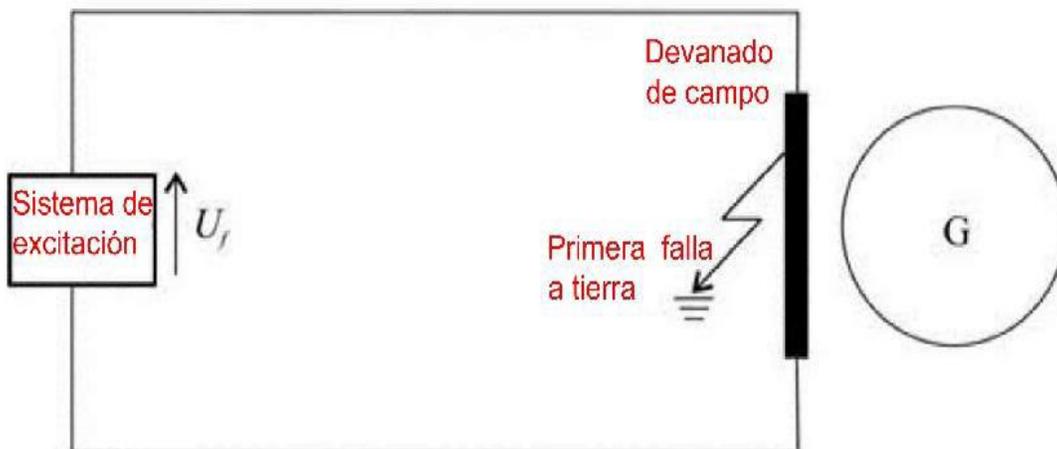


*Figura 11. Medición del flujo magnético en el entrehierro*

Bajo condiciones normales de operación (sin cortocircuitos entre espiras), el flujo magnético es esencialmente uniforme alrededor de la circunferencia, las pequeñas diferencias en la construcción y montaje de los polos y la excentricidad se traducen en un círculo un poco imperfecto como el de la **Figura 11 (a)**. La **Figura 11 (b)** muestra el resultado del mismo rotor de 64 polos con cortocircuitos artificiales en los polos 8 y 48, en los cuales se presenta mayor variación en la uniformidad de la magnitud del flujo magnético medido.

#### 2.4.2 Falla a tierra del devanado de campo

Se presentan por fallas de aislamiento, una sola falla a tierra del devanado de campo no afectara la operación de los generadores y tampoco generara de manera inmediata consecuencias perjudiciales para el estado del generador. Sin embargo, la probabilidad de una segunda falla a tierra es bastante alta después de haberse producido la primera falla, ya que la primera falla a tierra establece una referencia de tierra para tensiones inducidas en el devanado de campo por los transitorios ocurridos en el estator.



*Figura 12. Falla a tierra*

En la **Figura 12** se ilustra la ocurrencia de una primera falla a tierra en el devanado de campo de un generador, en el cual se observa que no se presenta flujo de corriente debido a que no existe un circuito cerrado. Pero en el caso de que ocurriera un segundo fallo a tierra se establecería un cortocircuito del devanado de campo y una circulación de corriente a tierra. Cuando se produce la segunda falla a tierra, una parte del devanado se cortocircuita.

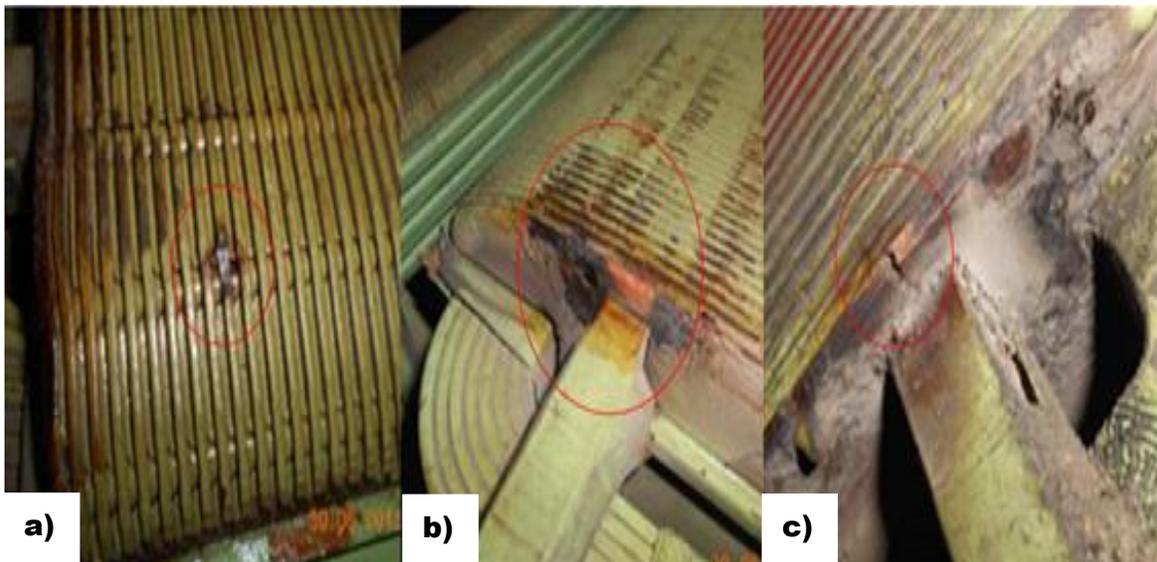
De este modo se genera un desbalance en los flujos del entrehierro de la máquina. Los flujos desequilibrados producen fuerzas magnéticas desequilibradas que se traducen en vibraciones de la máquina y daños. El campo a tierra también produce calentamiento del hierro del rotor desde el desbalance de corrientes que resulta y un desbalance de temperaturas que puede causar vibraciones perjudiciales.

### 2.4.3 Falla por sobre calentamiento en el devanado amortiguador

El devanado amortiguador se puede sobrecalentar debido al flujo de corrientes de secuencia negativa. Las causas más comunes que dan origen a la circulación de corrientes de secuencia negativa se presentan cuando el generador está alimentando cargas desbalanceadas y cuando se presentan fallas a tierra o entre fases. La falla entre fases es la condición que tiene mayor aportación de corrientes de secuencia negativa.

Además, se presentan pérdidas adicionales en el devanado amortiguador debido a factores como: armónicos de forma de onda de tensión, corrientes de Eddy y pérdidas propias de la conducción de corriente en el devanado amortiguador. Cuando el generador opera a un porcentaje de carga, las pérdidas se distribuyen de forma simétrica en las barras del devanado amortiguador, pero cuando el generador opera a una tasa de carga la distribución de las pérdidas y las temperaturas se concentra en una barra.

El diseño del devanado amortiguador para el generador síncrono está orientado a actuar bajo pequeños cambios en la velocidad síncrona, que están relacionados a torques reducidos y a pequeñas corrientes, que actúan con el objetivo de mantener la velocidad síncrona constante del rotor. Las dimensiones y la capacidad de corriente del devanado amortiguador son mínimas.



*Figura 13. Falla de sobrecalentamiento*

La **Figura 13** presenta el caso de un generador síncrono que fue operado de forma incorrecta y tuvo como consecuencia operación inesperada como motor, por tanto el devanado amortiguador funciona como un devanado de arranque, y circuló una gran corriente por el devanado amortiguador. La **Figura 13 (a)**, **(b)** muestra el estrés térmico en la superficie de la zapata polar, la **Figura 13 (c)** muestra una ruptura en el anillo de conexión de una de las barras del devanado amortiguador.

Las consecuencias del arranque de un generador como motor asíncrono, son elevadas corrientes circulando por el devanado amortiguador y debido al efecto Joule se eleva la temperatura hasta fundir el material de los devanados y zapata polar donde se encuentran alojadas las barras del devanado amortiguador, realizando una comparación con las figuras mostradas sobre el aumento de temperatura en el devanado amortiguador.

## 2.5 Métodos de diagnóstico de rotores

Las pruebas de diagnóstico eléctrico pueden revelar mucha información acerca del estado de un generador. Las pruebas eléctricas se hacen al generador por lo general después de fabricada e instalada en planta o durante las comprobaciones periódicas de mantenimiento. Que permiten la evaluación confiable de la condición del aislamiento y de otros componentes de las máquinas rotativas.

Al rotor eléctrico de un generador síncrono se le aplican pruebas las cuales ayudan a saber en qué estado se encuentra, se realizan en lapsos determinados rutinarios para saber si tienen algún problema y poder repararlo. En este capítulo se describirá lo que ocurre en el proceso de cada prueba. Los estándares que deben de cumplir para saber si el rotor se encuentra en su óptimo funcionamiento.

Para empezar a realizar cada una de las pruebas es necesario saber la temperatura ambiente, la temperatura del devanado y la humedad relativa ya que esto influye en los resultados y se podría dar un mal veredicto en el rotor. La temperatura del devanado debe de estar a temperatura ambiente no mayor a 40°C recomendable este valor es medido con un termo higrómetro, mientras que la humedad relativa debe de ser menor al 80%.

- **Prueba de resistencia de aislamiento**

Esta prueba mide la resistencia dieléctrica del aislamiento entre los conductores del cobre y aislamiento a tierra, obtiene también el índice de polarización que es el cociente del valor de la resistencia de aislamiento. La duración es de 10 minutos y se registran manualmente los datos de cada minuto. Se realiza con un megóhmetro que tiene una capacidad de 10 kV hasta 10,000 volts.

Un buen aislamiento es aquel que no se deteriora al aumentar el voltaje y corriente, obteniendo una resistencia alta la cual debe mantenerse e ir aumentando con el tiempo de la prueba. Se debe de cumplir a un minuto  $\leq 100 \text{ M}\Omega$  como resistencia de aislamiento y mayor a 2 en el índice de polarización para que cumpla con los criterios de aceptación. Se deberán registrar los valores durante los primeros 15, 30 y 45 segundos; después se registrara minuto a minuto hasta finalizar los 10 minutos establecidos.

El medidor de resistencia de aislamiento, los cables para las conexiones y pinzas de conexión van conectadas al rotor. El cable rojo va en la terminal del rotor de conexión; ya sea en el poste o anillo de retención, el cual inyecta el voltaje que debe de ser de 500 Vcd, el cable negro es la puesta a tierra, la flecha del rotor también debe de ir a tierra. Con el termohigrómetro se toma la temperatura ambiente y la humedad relativa.

- **Prueba de resistencia óhmica**

Esta prueba es utilizada para conocer el valor de la resistencia óhmica de los devanados, es auxiliar para conocer el valor de las pérdidas en el cobre y detectar falsos contactos en conexiones, soldaduras deficientes y hasta alguna falla incipiente en los devanados. Las medidas se hacen entre anillos y entre polos, teniendo en cuenta la temperatura ambiente y la del devanado.

Pueden producirse problemas de conexión entre las bobinas o en los conectores de los polos del rotor. Ellos causan puntos calientes locales, que pueden eventualmente dañar la máquina. Los orígenes típicos de estas fallas incluyen deficientes contactos de soldadura que se vuelven más débiles con el funcionamiento o conexiones sueltas, así como superficies de contacto oxidadas o dañadas en los conectores de los polos de la máquina.

El micróhmetro, la puesta a tierra, 2 cables que inyectan el voltaje y 2 más que se encargan de la medición van conectados a las terminales de los anillos o a los postes del rotor. La puesta a tierra va en el anillo de retención mientras que 1 de los cables que inyecta voltaje y 1 que hace la medición se conectaran en el polo A y los otros 2 cables al polo B. El aparato que hace la medición de la resistencia óhmica alimenta al rotor con 115 Vca.

- **Hipot**

La prueba de hipot se realiza con un Delta 4000 ca. Consiste en que durante 1 minuto el rotor debe de soportar 3 veces su voltaje nominal, en eso consta su criterio de aceptación. Comprueba el buen aislamiento, asegura que la corriente no fluya entre los puntos donde no debe haber flujo; usando alto voltaje para asegurar que la corriente no fluya. De alguna manera, una prueba de hipot es lo opuesto a una prueba de continuidad. La cual asegura que la corriente fluya fácilmente de un punto a otro.

El megger delta se conecta a la corriente se le coloca el valor del voltaje nominal, se necesitan 2 cables con pinzas para hacer las conexiones, una que inyectara el voltaje que va en el anillo de retención o poste del rotor y otro que ira a un polo haciendo la tierra en la conexión. Consta de un minuto y el resultado es de rechazo o aceptación ya que cuando no cumple ocurre un fallo a tierra y se da por entendido que existe un daño en el aislamiento.

- **Caída de voltaje**

El estrés mecánico en los devanados de rotor produce fallas entre espiras (cortocircuitos), que pueden provocar un desequilibrio magnético. Esto causa mayores vibraciones del eje y, como resultado, un mayor estrés y daño en los cojinetes. La prueba se realiza en devanados de rotor unipolares para detectar fallas entre espiras. Se trata de una sencilla prueba comparativa que se realiza durante las pruebas de aceptación en fábrica, inspecciones de mantenimiento rutinarias o durante renovaciones del devanado de polos de la máquina rotatoria.

Esta prueba se realiza durante el proceso de fabricación de un rotor de polos salientes, ya que consiste en inyectar 20 Amp. Con un variac de voltaje a uno de los polos del rotor, y con un multímetro se realiza la medición entre espiras. Se debe de colocar en un soporte aislado para

evitar algún tipo de accidente. Se miden todas las espiras del polo de forma intercalada espira 1 con la 2 y después la 2 con la 3 hasta la última espira. Después se realiza la medición total que consta de la medición de la espira uno con la última.

- **Mediciones de resistencia en cc**

Se realizan mediciones de la resistencia de CC para detectar posibles problemas de contacto en los devanados de estator y rotor de las máquinas eléctricas rotativas. Pueden producirse problemas de conexión entre las bobinas o barras individuales del devanado o en los conectores de los polos del rotor. Ellos causan puntos calientes locales, que pueden eventualmente dañar la máquina.

Los orígenes típicos de estas fallas incluyen deficientes contactos de soldadura que se vuelven más débiles con el funcionamiento o conexiones sueltas, así como superficies de contacto oxidadas o dañadas en los conectores de los polos de la máquina. Los datos muestran una comparación entre las fases con las mediciones anteriores y debe ser similar para cada fase. Una variación entre las fases indica un posible problema de contacto.

Para medir la resistencia de CC, el instrumento de medida se conecta a las salidas de la máquina. La corriente de CC y la tensión de CC se miden al mismo tiempo por cada fase y se calcula la resistencia. Para la medición de la resistencia de contacto, por ejemplo, en los conectores de los polos, se inyecta una alta corriente de CC entre los contactos. También en este caso, se compara la medición con otras mediciones o con datos anteriores.

## **2.6 Normatividad vigente de generadores síncronos**

ISO por sus siglas Organización Internacional de Normalización es una federación mundial de organismos nacionales de normalización. El trabajo de preparación de las normas internacionales normalmente se realiza a través de los comités técnicos de ISO. Cada organismo miembro interesado en una materia para la cual se haya establecido un comité técnico, tiene el derecho de estar representado en dicho comité.

Las organizaciones internacionales, públicas y privadas, en coordinación con ISO, también participan en el trabajo. ISO colabora estrechamente con la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) en todas las materias de normalización electrotécnica. Se describen los procedimientos utilizados para desarrollar esta norma y para su mantenimiento posterior. En particular debería tomarse nota de los diferentes criterios de aprobación necesarios para los distintos tipos de documentos ISO.

### **ISO 9001:2015**

Esta norma internacional se basa en los principios de la gestión de la calidad descritos en la Norma ISO 9000. Las descripciones incluyen una declaración de cada principio, una base racional de por qué el principio es importante para la organización, algunos ejemplos de los beneficios asociados con el principio y ejemplos de acciones típicas para mejorar el desempeño de la organización cuando se aplique el principio.

Emplea el enfoque a procesos, que incorpora el ciclo Planificar-Hacer-Verificar-Actuar (PHVA) y el pensamiento basado en riesgos. El enfoque a procesos permite a una organización planificar sus procesos y sus interacciones. El ciclo PHVA permite a una organización asegurarse de que sus procesos cuenten con recursos y se gestionen adecuadamente, y que las oportunidades de mejora se determinen y se actúe en consecuencia.

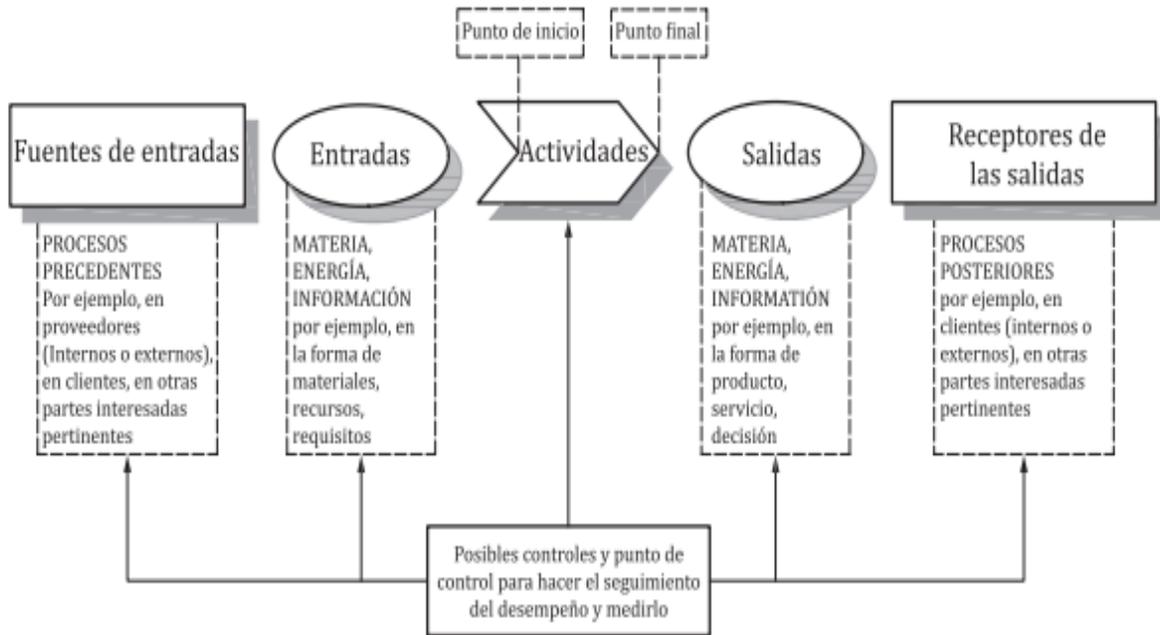


Figura 14. Representación esquemática de los elementos de un proceso.

En la **Figura 14** se muestra la representación que promueve la adopción de un enfoque a procesos al desarrollar, implementar y mejorar la eficacia de un sistema de gestión de la calidad, para aumentar la satisfacción del cliente mediante el cumplimiento de los requisitos del cliente. La comprensión y gestión de los procesos interrelacionados como un sistema contribuye a la eficacia y eficiencia de la organización en el logro de sus resultados previstos.

### IEEE 62.2-2008

El Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica en inglés Institute of Electrical and Electronics Engineers es una asociación mundial de ingenieros dedicada a la estandarización y el desarrollo en áreas técnicas. Su trabajo es promover la creatividad, el desarrollo y la integración, compartir y aplicar los avances en las tecnologías de la información, electrónica y ciencias en general para beneficio de la humanidad y de los mismos profesionales.

Esta guía proporciona técnicas y métodos básicos para realizar inspecciones de todas las categorías de maquinaria eléctrica rotativa. Dependiendo de la máquina que se esté inspeccionando, se pueden proporcionar varios niveles de accesibilidad. Esto se determina por el diseño de la máquina y el grado de desmontaje permitido para la inspección. En general, cuanto mayor sea el grado de desmontaje, más precisos serán los resultados de la inspección.

La condición del aparato de potencia es de primordial importancia para el funcionamiento exitoso de un sistema de potencia. Durante el transporte, la instalación y la operación de servicio, el aparato puede estar expuesto a condiciones que afecten negativamente su confiabilidad y vida útil. Uno de los objetivos principales es detectar defectos en una etapa temprana y tomar las medidas correctivas adecuadas. La detección generalmente se logra mediante una evaluación de diagnóstico de campo que se realiza a intervalos regulares.

Cada inspección debe comenzar con una consulta con el personal operativo para analizar su experiencia operativa antes de la interrupción actual de la máquina. Cualquier condición de funcionamiento inusual reportada puede indicar la necesidad de enfocar atención particular a un área específica de la máquina. También pueden indicar la necesidad de pruebas especiales que normalmente no se aplican durante la inspección de mantenimiento.

Cada prueba tiene una subcláusula de interpretación que sirve de guía al usuario. No hay necesariamente una relación directa entre estas pruebas de campo y las pruebas de fábrica. Para las pruebas realizadas dentro del período de garantía, las mediciones deben coincidir con los datos del fabricante cuando se realicen en condiciones similares. Cuando se realizan mediciones en equipos envejecidos en servicio, puede haber alguna desviación entre los datos de campo y de fábrica.

### **IEEE 115-2009**

Esta guía contiene instrucciones para realizar pruebas generalmente aplicables y aceptadas para determinar las características de rendimiento de las máquinas síncronas. Aunque las pruebas descritas son aplicables en general a generadores síncronos, motores síncronos, condensadores síncronos y cambiadores de frecuencia síncronos, las descripciones hacen referencia principalmente a generadores síncronos y motores síncronos.

Las pruebas descritas pueden aplicarse a motores y generadores, según sea necesario, y no se intenta dividir esta guía en cláusulas que se aplican a motores y cláusulas que se aplican a generadores. El calendario de las pruebas de fábrica y de campo, que pueden requerirse en equipos nuevos, normalmente se especifica en los estándares aplicables o en las especificaciones del contrato.

Esta guía no debe interpretarse como que requiere una prueba específica en una transacción determinada ni implica ninguna garantía sobre índices de rendimiento específicos o condiciones operativas. El término condiciones especificadas para las pruebas como se usa en esta guía se considerará como condiciones clasificadas a menos que se acuerde lo contrario. Las condiciones nominales se aplican generalmente a las cantidades que figuran en la placa de identificación de la máquina.

### 3. Desarrollo

#### 3.1 Prueba de barrido de frecuencia en rotores de generadores síncronos

Con el fin de reducir el número de fallos que ocurren en los rotores síncronos y la búsqueda de una herramienta adicional para tener el diagnóstico adecuado y oportuno al mantenimiento de los rotores se implementó la prueba de barrido de frecuencia en rotores de generadores síncronos como un medio para evaluación y valoración de la condición del aislamiento del devanado de campo.

El análisis permite un diagnóstico confiable del devanado de rotor. La alta sensibilidad permite obtener unos resultados fiables con la máxima seguridad a niveles de baja tensión y cuenta con asistencia mediante un software para lograr el análisis automático de resultados, comparaciones e informes personalizados, para así evitar fallas que no son detectadas a tiempo que dañan completamente al rotor.

Esta prueba se realiza para detectar las fallas entre espiras causadas por estrés mecánico y eléctrico en los devanados de polos de las máquinas durante las pruebas de aceptación en fábrica o durante la prueba de mantenimiento de rutina en los rotores de los generadores síncronos. Este método fue desarrollado para detectar deformaciones en los devanados del transformador y ahora se implementó para la detección de fallas entre espiras de las bobinas del rotor síncrono.

En el caso de deformaciones por grietas o fisuras presentes en el conductor, la componente resistiva de la prueba sufriría cambios en su curva de rendimiento. Donde hay contaminación, con daños al aislamiento, calefacción eléctrica o esfuerzos mecánicos. La capacitancia del rotor sufre cambios con respecto a su capacitancia original, por lo que resultará en una diferencia entre las curvas. Estos cambios nos permitirán identificar el proceso de deterioro que se está produciendo en él.

La capacitancia y la inductancia son elementos pasivos que tienen la propiedad de almacenar energía, y por tanto se dice que pueden tener condiciones iniciales para las variables de voltaje y corriente, esto en función de la energía que tengan almacenada. La capacitancia almacena la energía en un campo eléctrico mientras que la inductancia almacena la energía en un campo magnético.

El rotor forma una red eléctrica compleja de capacitancia, inductancias y resistencias con su propia respuesta en frecuencia. Cualquier defecto en los devanados produce un cambio en la red y la respuesta en frecuencia correspondiente. La medición de esta respuesta en frecuencia permite la detección de la falla. Se aplica una señal sinusoidal a la entrada de la red eléctrica. Se miden tanto la amplitud como el desplazamiento de fase de la señal. La respuesta en frecuencia se determina comparando la amplitud y la fase de las señales de entrada y salida.

El objetivo principal de la prueba es determinar cómo se comporta la impedancia en una prueba a un rango específico de frecuencias aplicadas. La impedancia es la oposición al flujo de corriente, ya que es una red distribuida de componentes eléctricos activos y reactivos. Los

componentes son de naturaleza pasiva y pueden modelarse como resistencias, inductores y capacitores.

-Resistencia eléctrica: Es una medida de oposición al paso de la corriente. Que depende únicamente de su geometría y de su resistividad. Esto significa que, dada una temperatura y un material, la resistencia es un valor que se mantendrá constante. Además, de acuerdo con la Ley de Ohm, la resistencia de un material puede definirse como la razón entre la caída de tensión y la corriente en dicha resistencia.

-Inductor: Es un componente pasivo de un circuito eléctrico que, debido al fenómeno de la autoinducción, almacena energía en forma de campo magnético. Están conformadas por un alambre o hilo de cobre esmaltado enrollado en un núcleo, estos núcleos pueden tener diferente composición ya sea al aire o en un material ferroso como por ejemplo acero magnético para intensificar su capacidad de magnetismo.

-Capacitor: Es un dispositivo pasivo, capaz de almacenar energía sustentando un campo eléctrico. Está formado por un par de superficies conductoras, generalmente en forma de láminas o placas. Cuando están sometidas a una diferencia de potencial, adquieren una determinada carga eléctrica, positiva en una de ellas y negativa en la otra, siendo nula la variación de carga total.

Las respuestas del sistema se pueden representar en el dominio de tiempo o en el dominio de frecuencia. Las señales de voltaje y corriente se pueden observar a lo largo del tiempo, lo que da como resultado una señal del dominio del tiempo, mientras que cualquier señal que pueda representarse por una suma de sinusoidales armónicamente relacionados en magnitudes y fases variables, el resultado se representa en el dominio de la frecuencia.

El resultado es una representación de la función de transferencia de la red RLC en el dominio de la frecuencia. El análisis de respuesta de frecuencia es la característica de respuesta del sistema cuando está sujeto a entradas sinusoidales. La frecuencia de entrada varía y las características de salida se calculan o representan en función a la frecuencia. El análisis de respuesta de frecuencia proporciona información útil sobre las características de rendimiento del sistema.

Cuando en la prueba cambia la amplitud y la fase, la frecuencia sigue siendo la misma. La onda de salida se retrasa detrás de la entrada por un ángulo definido como el desfase. El ángulo de fase también puede ser capacitivo, y en este caso, será la referencia con respecto a la señal de entrada. Esto ocurre de manera similar cada vez que se cambia la frecuencia de la señal de entrada en un intervalo predefinido que mantiene la amplitud de la señal de entrada constante y se calcula la señal de salida.

El análisis de respuesta de frecuencia se aplica generalmente a una red compleja de elementos pasivos, donde solo se consideran las resistencias, los inductores y los condensadores como elementos pasivos del circuito, considerados como ideales. Estos tres elementos fundamentales son los bloques de construcción para varios dispositivos físicos, como transformadores, motores, generadores y otros aparatos eléctricos.

Para los sistemas lineales en el dominio de la frecuencia se utilizan ampliamente los métodos de Fourier y Laplace, que se caracterizan por ser una señal representada por una suma de sinusoidales armónicamente relacionadas, en magnitudes, y fases, las características de resonancia se identifican con claridad y confianza. El ruido y el contenido armónico son otros ejemplos en donde el análisis de respuesta de frecuencia es beneficioso.

La función de transferencia de una red RLC es la relación de la respuesta de frecuencia tanto en la como en la salida cuando las condiciones iniciales de una red son cero. Tanto la magnitud como las relaciones de la fase puedan extraerse de la función de transferencia, ya que representa las características fundamentales de una red y es una herramienta útil para modelar un sistema de este tipo.

La serie de Fourier indica la presencia de una función de dependencia de la frecuencia de entrada y la de salida. Describen señales periódicas como una combinación de señales armónicas. Para poder analizar una señal periódica en términos de contenido sobre la frecuencia o espectro, permite establecer la dualidad entre tiempo y frecuencia, de forma que las operaciones realizadas en el dominio del tiempo tienen su dual en el dominio frecuencia.

La principal característica de una función de transferencia por resonancia da origen a los polinomios. Cuando una función de transferencia se reduce a su forma más simple que genera dos polinomios. Al numerador se le conoce como cero y al denominador polo. Los ceros producen el aumento de ganancia mientras que los polos causan disminución. El objetivo principal es medir la impedancia.

El diagrama de Bode es un tipo de representación gráfica de funciones complejas (en nuestro caso, funciones de transferencia) dependientes de una variable real (la frecuencia angular o lineal), que sirve para caracterizar la respuesta en frecuencia de un sistema, que representa el módulo de la función y de la fase, empleado en el procesado de señal para mostrar la respuesta en frecuencia de un sistema lineal.

Trazando la magnitud de fase, ya que aprovecha la simetría asintótica utilizando una escala logarítmica para la frecuencia. Es una forma efectiva de estimar una función de transferencia. La escala está representada por décadas 1, 10, etc. El efecto de los polos y ceros son exclusivos para este diagrama y crean un cambio de 20 decibels por cada década para cada orden de magnitud.

Ubicar la relación de fase con los datos de magnitud ayudara a determinar si el sistema es inductivo, capacitivo o resistivo, ya que es útil comparar la resonancia de los gráficos de magnitud con los cruces de cero en la relación de la fase. Comparar una misma grafica logarítmica con una gráfica lineal en un rango de frecuencia sustancial para la misma medición.

Los cambios en la configuración geométrica alteran la red de la impedancia y a su vez alteran la función de la transferencia. Los cambios que ocurren en la función de transferencia revelan ampliamente los modos de falla. Esta prueba detecta los cambios de la función de transferencia de los devanados individuales de los rotores.

Los devanados de campo no deben de tener cambios en su vida de operación. Pero cuando llega a ocurrir algún daño de aislamiento, calefacción eléctrica, esfuerzos mecánicos o exista contaminación sufrirá cambios respecto a su capacitancia original, lo que dará como resultado una diferencia entre las curvas del barrido de frecuencia y se podrá identificar el proceso de deterioro en el que se encuentra el rotor.

Este proyecto se desarrolló para experimentar con rotores de generadores síncronos de polos lisos como polos salientes y se detectó que no importa la capacidad de las unidades ya que tienen el mismo comportamiento en la respuesta de frecuencia de barrido en buenas condiciones.

En el caso del rotor de polos salientes independientemente de la capacidad del generador, el comportamiento de la frecuencia de barrido tiene tres puntos principales de resonancia, esto porque cada polo es un solo devanado en donde el aislamiento (admitancia), las bobinas, el núcleo (inductancia) y el conductor (impedancia) interactúan en la medición que se realiza y tienen el mismo principio de diseño, independientemente de la capacidad de los devanados.

En rotores de 2 polos, si llegara a existir 2 bobinas cortocircuitadas en un polo y el otro polo se encuentra en buenas condiciones afectaría por igual en ambos polos debido a que el flujo está unido a la fase y ambos circulan en los dos polos. En el caso de rotores con más de cuatro polos la fuerza magnética puede ser desequilibrada debido a cortocircuitos entre espiras de las bobinas de cada uno de los polos, que causan un desequilibrio térmico y magnético que ocasiona alta vibración en los cojinetes provocando el contacto entre el estator y el rotor.

Las condiciones ambientales, la contaminación y el deterioro del aislamiento en el devanado de campo son causa importante de los daños en el rotor y esto ocasiona cambios en la resistencia del material, así como daños mecánicos ocasionando variaciones la capacitancia. Teniendo en cuenta todos estos factores y la condición eléctrica y mecánica de un circuito RLC se logra determinar que la prueba de barrido de frecuencia logra identificar cada una de las fallas, demostrando el resultado por medio de un secuencial de curvas.

### 3.2 Método de realización de la prueba

El proceso de medición y diagnóstico para los rotores se logró desarrollar en tres etapas, con el fin de realizarlo de una manera más sencilla. La primera etapa consiste en desarrollar un modelo digital, teniendo en cuenta las características típicas del circuito RLC de un rotor estándar. En el que se simula una un número defectos en el aislamiento del rotor para ver los gráficos obtenidos con fines de comparación.

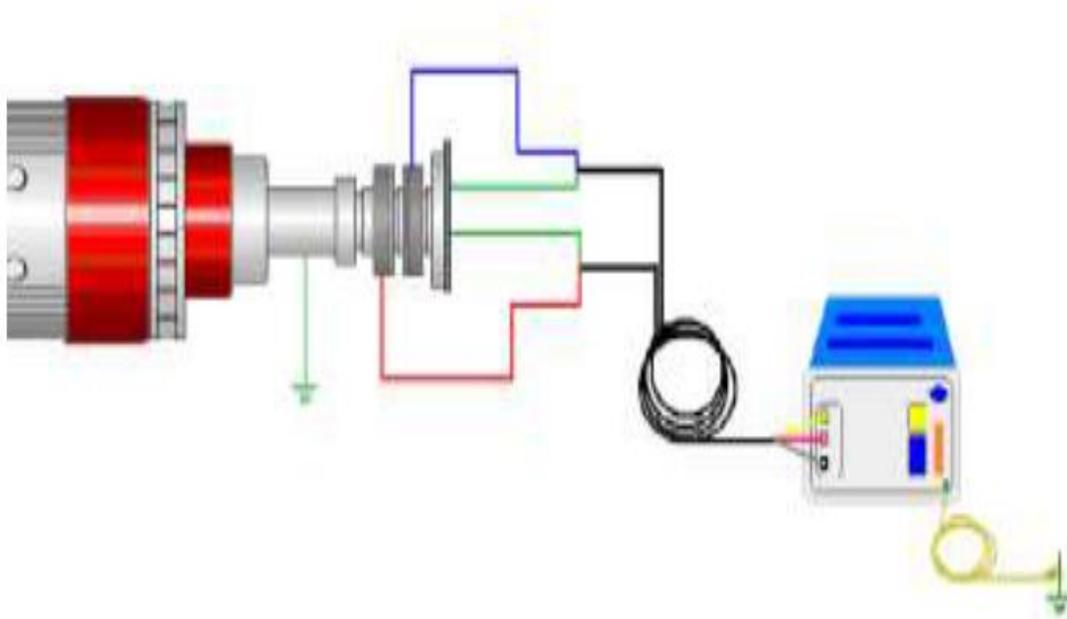
La segunda etapa localiza el método más eficaz de medida en el cual se podrán obtener mejores resultados. Se toman en cuenta las características típicas de resistencia, capacitancia e inductancia del rotor. En base a los resultados obtenidos de los gráficos de la primera etapa y se desarrolla un sistema de comparación de resultados ya que enlazan las dos etapas donde se realiza el método experimental.

En la tercera etapa con las curvas obtenidas y teniendo en cuenta los dos criterios de evaluación anteriores se comienza con el análisis de rotores con diferentes tipos de fallos, de los que se obtuvieron curvas de su respuesta de frecuencia que se comparan con la investigación y ya se tiene una referencia en el cual podrán ver cuál es el tipo de fallo si se tiene registrado en las etapas 1 y 2.

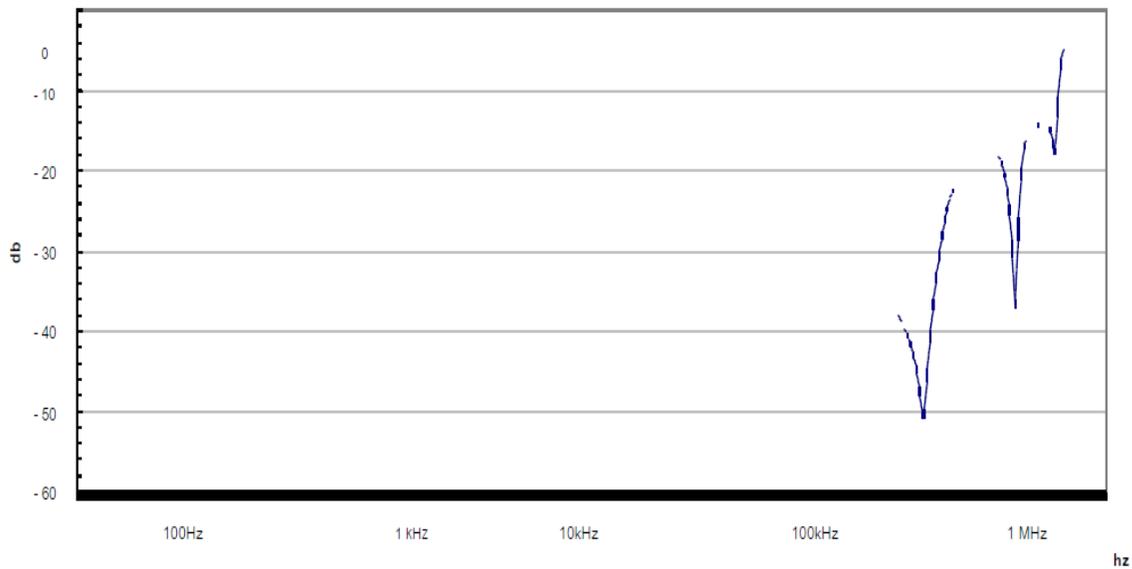
Los resultados obtenidos a partir de las simulaciones y los patrones permiten identificar los diferentes tipos de procesos de deterioro en el aislamiento de los arrollamientos de campo. Las curvas características del rotor fueron resultado de las pruebas de los rotores de diferentes capacidades y características para una mejor metodología para pruebas y para evitar la interferencia en el resultado.

El método se realiza en base a dos pruebas para el rotor, uno para cada polo. Las conexiones dependen si el rotor es de polos lisos o polos salientes y aunque cada curva será diferente representara características comunes que proporciona la curva estándar. Se representa por un número de diferentes puntos de resonancia que indica que hay diferentes niveles de inductancia y capacitancia.

Los cables están configurados de tal manera que se usan 4 terminales. Estas cuatro terminales se pueden dividir en dos pares únicos, un par para la entrada y el otro par para la salida. Estas terminales se pueden modelar en un par de terminales o una configuración de red de dos puertos. Lo que se muestra en la siguiente figura es la conexión de un rotor de polos lisos junto a la curva típica de respuesta de frecuencia. La conexión puede verse en la **Figura 15** y **Figura 16**.

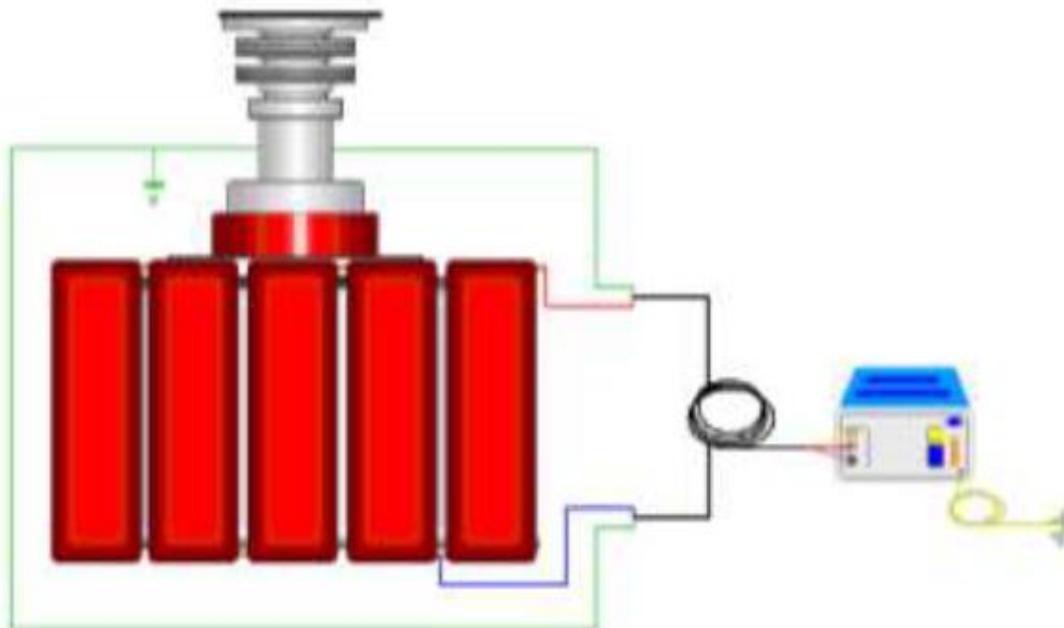


*Figura 15. Conexión de circuito para la medición de la respuesta de frecuencia de los rotores de polos lisos*

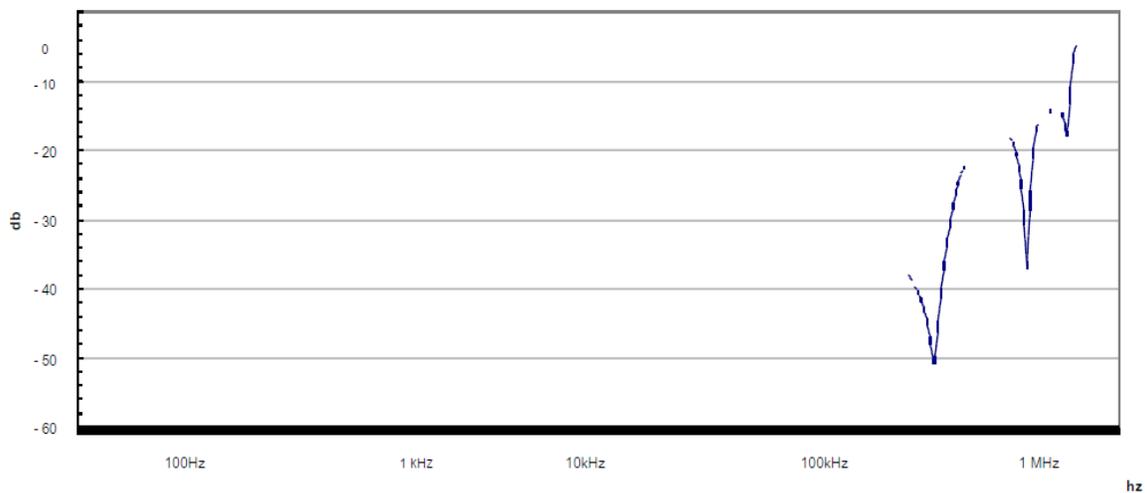


*Figura 16. Curva típica de respuesta de frecuencia para rotor de polos lisos*

Para el rotor de polos salientes las conexiones de prueba son diferentes, se recomienda que la medición de re realice por los postes como se muestra en la siguiente figura, que muestra que el eje sobre el rotor debe de estar conectado a tierra y después se realiza la conexión del equipo. Cada par de cables estarán conectados a la terminal de cada polo, también se muestra la curva característica presentada por el análisis. El rotor de polos salientes tiene 4 puntos de resonancia ya que contiene 2 polos en un solo elemento, como se muestra en la **Figura 17** y **Figura 18**.



*Figura 17. Circuito de conexión para la medición de la respuesta de frecuencia de los rotores de polos salientes*



*Figura 18. Curva característica para rotores de polos salientes*

La evaluación de la prueba de análisis de barrido de frecuencia debe realizarse desde 20 Hz hasta 1 MHz, ya que después de este valor la medición es tan sensible que puede cambiar la forma del espectro. El resultado puede variar tanto al realizar una conexión incorrecta o invertida, ya que al llegar a 1 MHz puede variar tanto el resultado y daría un mal veredicto a la maquina a la que se le está haciendo la prueba de barrido a la frecuencia de rotores.

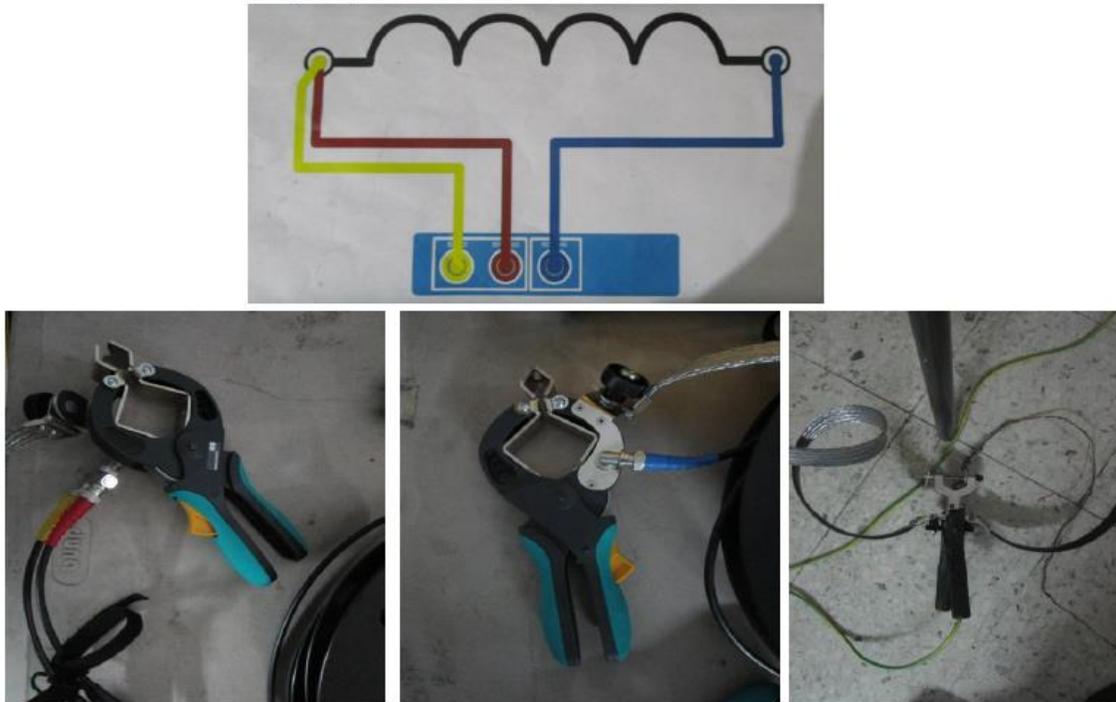
### 3.3 Realización de la prueba de barrido

En este capítulo se describirá cada una de las conexiones que se realizaron para llevar a cabo la prueba de barrido a la frecuencia en rotores de generadores síncronos. Esta prueba se hizo en una bobina polar **Figura 19** de un rotor de polos salientes, simulando cortos entre espiras del devanado para así poder analizar cómo se comporta la onda de salida que da como resultado el análisis que hace el equipo a los rotores síncronos.

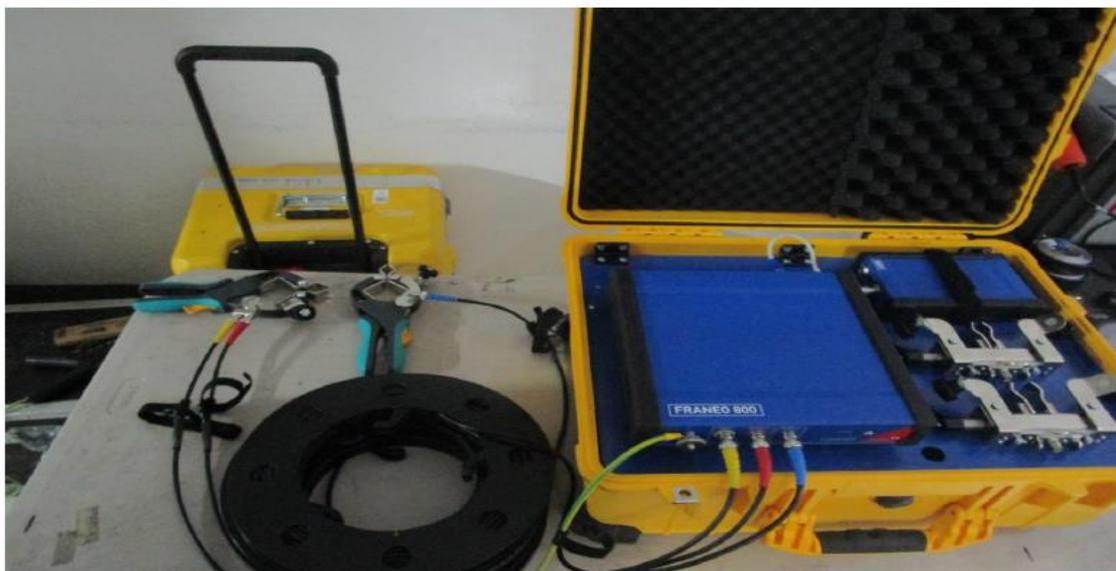


*Figura 19. Bobina polar al que se realizó la prueba de barrido*

Se comenzó con la conexión del equipo; el analizador de frecuencia es el recuadro de color azul que se muestra en la **Figura 20** y **Figura 21**, de ahí se derivan las conexiones principales. Los cables de color amarillo, rojo y celeste son los cables de conexión. Mientras que el cable negro es la conexión que lleva a tierra el equipo. La pinza uno va conectada a los cables amarillo y rojo y el cable celeste va conectada a la pinza dos. Ambas pinzas a sus extremos van conectadas a tierra en color plata.



*Figura 20. Conexiones del analizador de frecuencia*



*Figura 21. Vista de las conexiones puestas al analizador de frecuencia*

Después de realizar todas las conexiones se coloca el cable de comunicación del equipo analizador de frecuencia a la computadora que recopila la información y hace el análisis dando como resultado unas graficas que indica el estado en el que se encuentra el rotor síncrono, como se ve en la **Figura 22** y permite hacer el método de comparación de como estaba antes y como se encuentra ahora.



*Figura 22. Equipo analizador y la conexión a la computadora*

Al tener todas las conexiones listas la pinza uno y dos son colocadas en los extremos de la bobina polar que se muestra en la **Figura 23** y **Figura 24**, se abre el programa en la computadora y comienza el análisis al rotor, esta prueba tiene una duración aproximada de un minuto, ya que el analizador es muy rápido.



*Figura 23. Conexión a la bobina polar*



*Figura 24. Vista frontal de la conexión de las pinzas el equipo*

La prueba consto en hacer corto circuito entre espiras de la bobina polar de un rotor de polos salientes, se simularon 3 tipos de fallas como se muestra en las **Figuras 25, 26 y 27**; la primera en hacer un corto en la vuelta número dos de la bobina, la segunda falla hacer un corto en la antepenúltima vuelta de la bobina y en la falla número tres se hizo que la bobina tuviera tres cortos en diferentes vueltas de la bobina y se muestran en las siguientes imágenes cada uno de los cortos que se realizaron.



*Figura 25. Falla uno*



Figura 26. Falla dos



Figura 27. Falla tres

## Resultados

Al realizar todas las conexiones debidas del equipo a la bobina polar arrojó las siguientes gráficas. Cada una de ellas muestra un comportamiento distinto ya que la primera grafica será la bobina polar en perfecto estado, después se le aplican ciertas fallas a la bobina polar y es ahí donde la prueba de barrido a la frecuencia dará el resultado de cada una de las fallas y se realizara la comparación pertinente para así poder dar una deliberación de en donde se encuentra la falla.

### Bobina polar en buen estado Figura 28



Figura 28. Resultados de la bobina polar

Las siguientes Figuras muestran las fallas que se le aplicaron a la bobina polar de un rotor de polos salientes. En esta primera **Figura 29** muestra la falla número uno que consta en colocar un pedazo de cobre entre la vuelta 2 y 3. El análisis de barrido a la frecuencia es la relación entre la forma de onda de tensión transmitida y la forma de onda de tensión aplicada que está representada en decibelios.

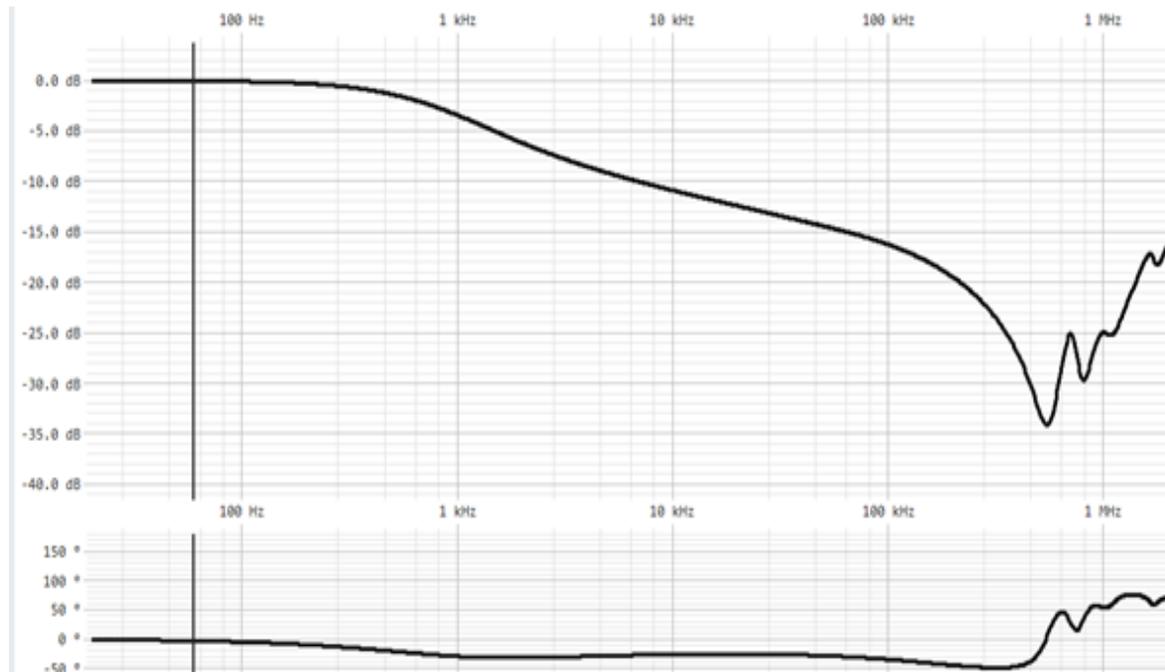
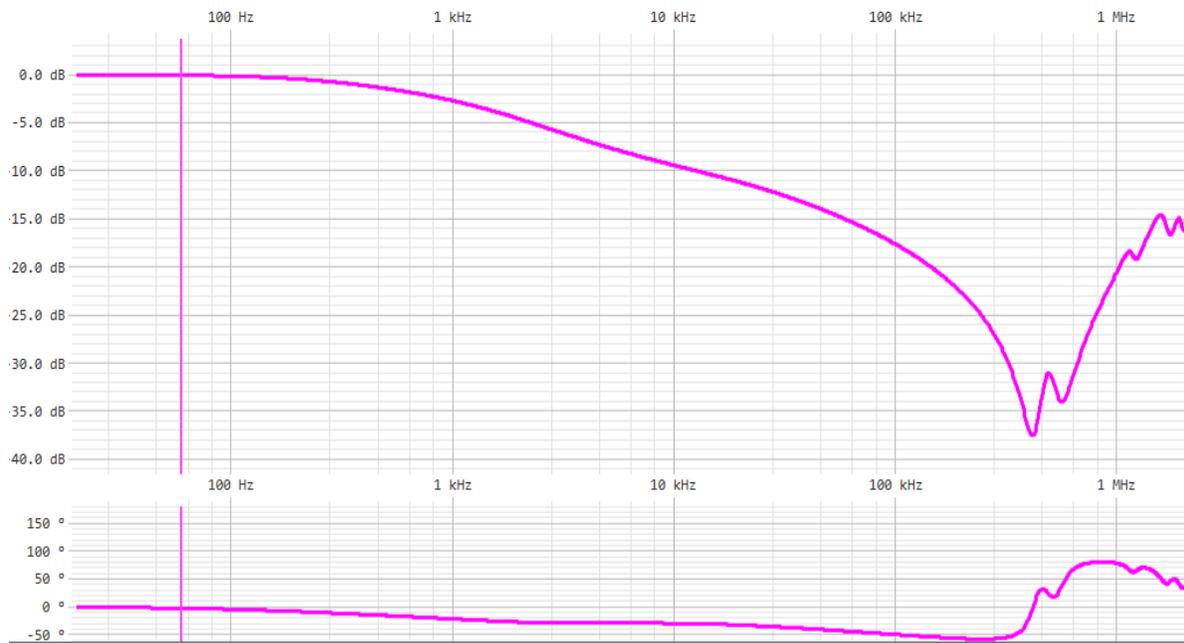


Figura 1

	Frecuencia	Magnitud	Fase	Impedancia	Admitancia	<input checked="" type="checkbox"/> Cerrar tabla de cursores
Cursor A	60 Hz	-0.05 dB	-3.2 °	2.79 Ω	358.77 mS	
Cursor B	60 Hz	-0.05 dB	-3.2 °	2.79 Ω	358.77 mS	
Delta (B - A)	0 Hz	0 dB	0 °	0 Ω	0 S	

Figura 29. Resultados de la falla uno

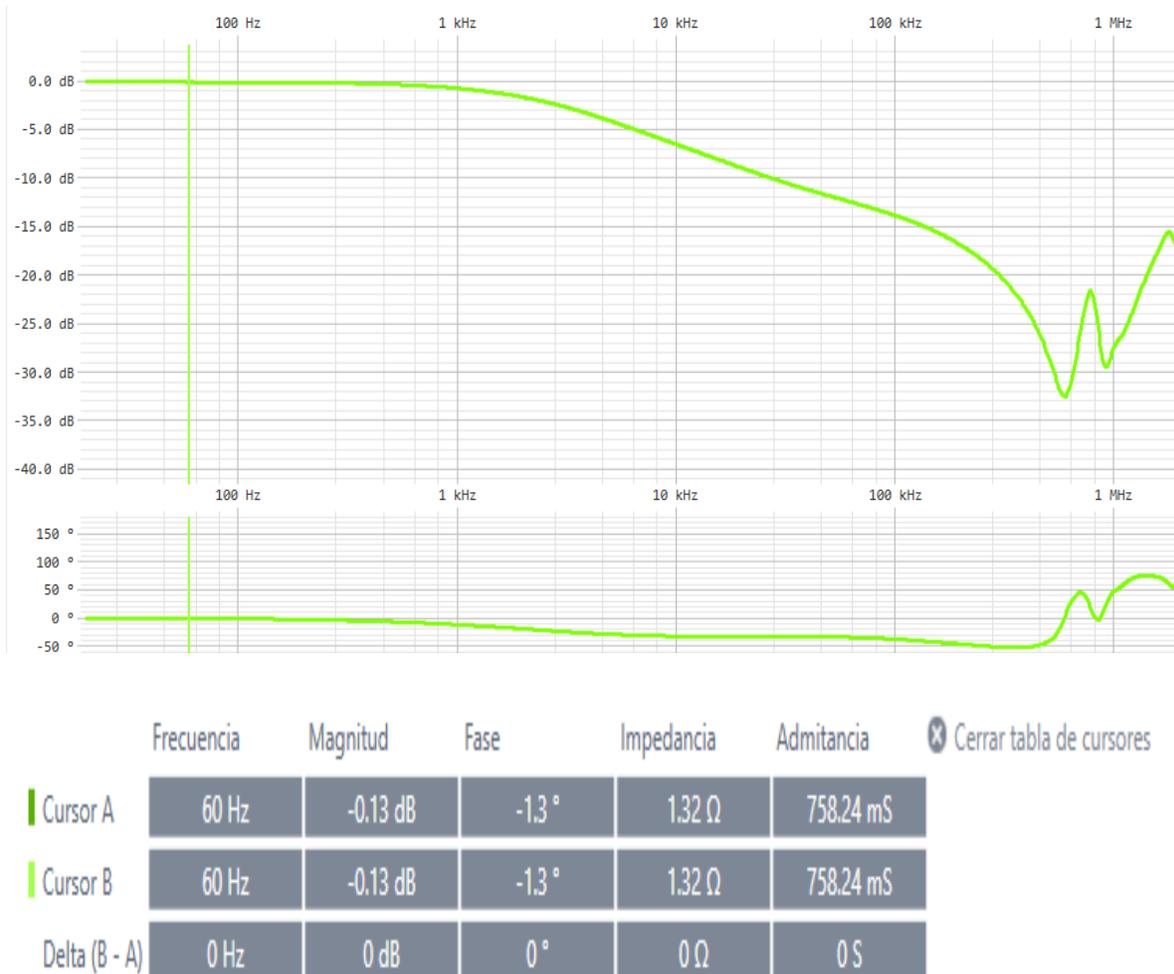
Esta imagen muestra el resultado de la falla dos presentada en la **Figura 30** que se provocó entre la vuelta número 67 y 68. La tabla que se encuentra en la parte inferior indica los valores obtenidos de la onda que se esta representando ya que se utilizará como referencia en la comparación que se tiene que realizar a esta prueba con la inicial en donde la bobina polar no tenia ninguna falla y asi obtener dos graficas distintas y localizar si la falla se encuentra en la impedancia o en la admitancia.



	Frecuencia	Magnitud	Fase	Impedancia	Admitancia	<input checked="" type="checkbox"/> Cerrar tabla de cursores
Cursor A	60 Hz	-0.09 dB	-3.2 °	2.86 Ω	349.11 mS	
Cursor B	60 Hz	-0.09 dB	-3.2 °	2.86 Ω	349.11 mS	
Delta (B - A)	0 Hz	0 dB	0 °	0 Ω	0 S	

**Figura 30.** Falla dos

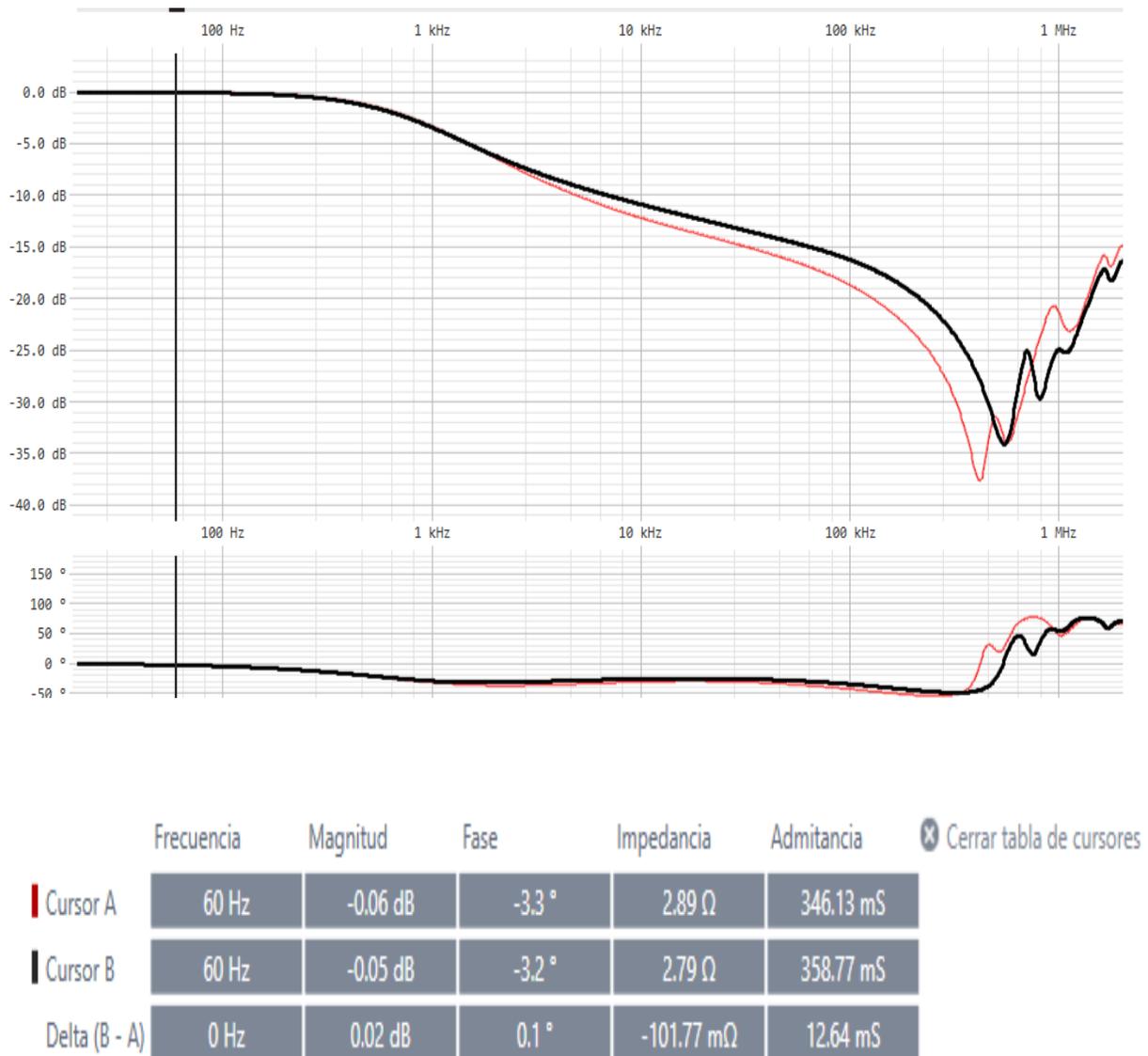
La falla número tres se realizó con tres fallas en diferentes partes de la bobina polar **Figura 31**. Son dos graficas las que se presentan en la imagen porque una refleja la impedancia que es la oposición al flujo de corriente alterna y puede representarse por medio de resistencias y condensadores que son los valores resistivos. Mientras que la segunda grafica representa la admitancia que representa la facilidad con que la corriente alterna puede pasar entre un material en este caso es el cobre.



**Figura 31.** Falla tres

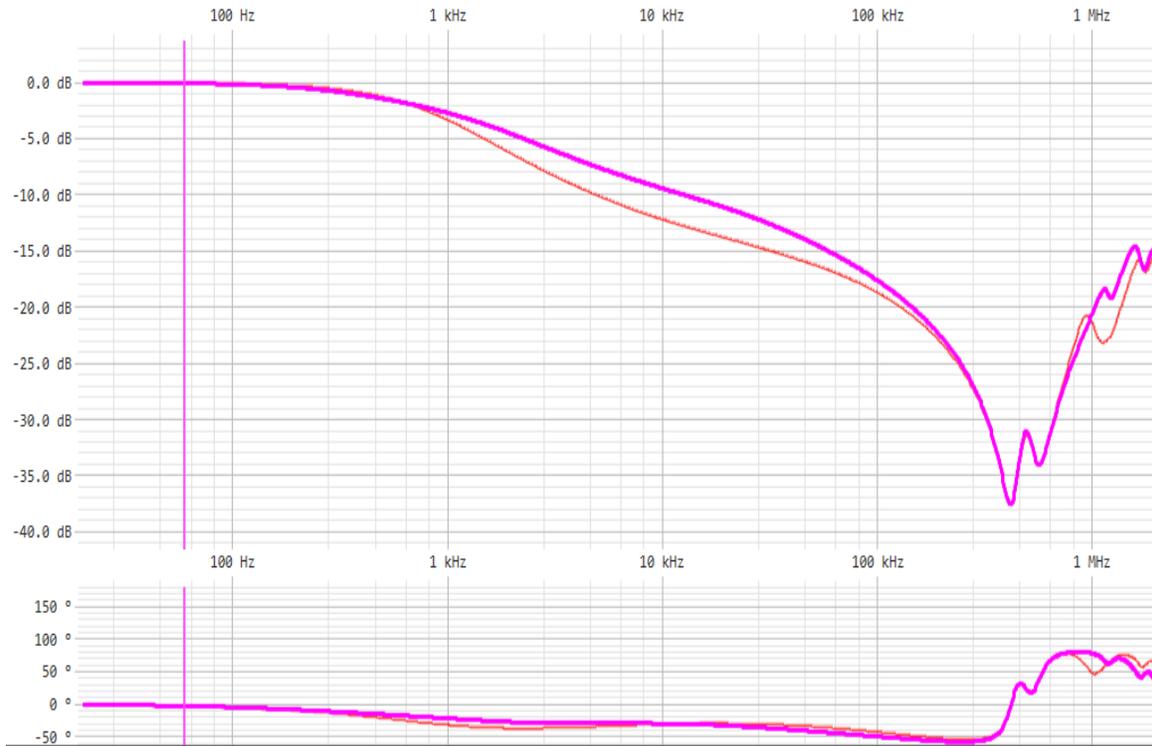
Todos los valores obtenidos en cada una de las fallas eran semejantes ya que se comparaba con la misma gráfica. En esta parte del reporte se analiza cada una de las fallas en base a la primera prueba la cual fue hecha a la bobina polar en buen estado. Cada una de las gráficas es distinta debido a que cada una tiene una reacción y falla distinta. Se siguen toando en cuenta ambas graficas ya que representan la impedancia y admitancia. La **Figura 32** representa la falla uno.

### Falla uno



**Figura 32.** Bobina polar en buen estado comparada con la falla uno

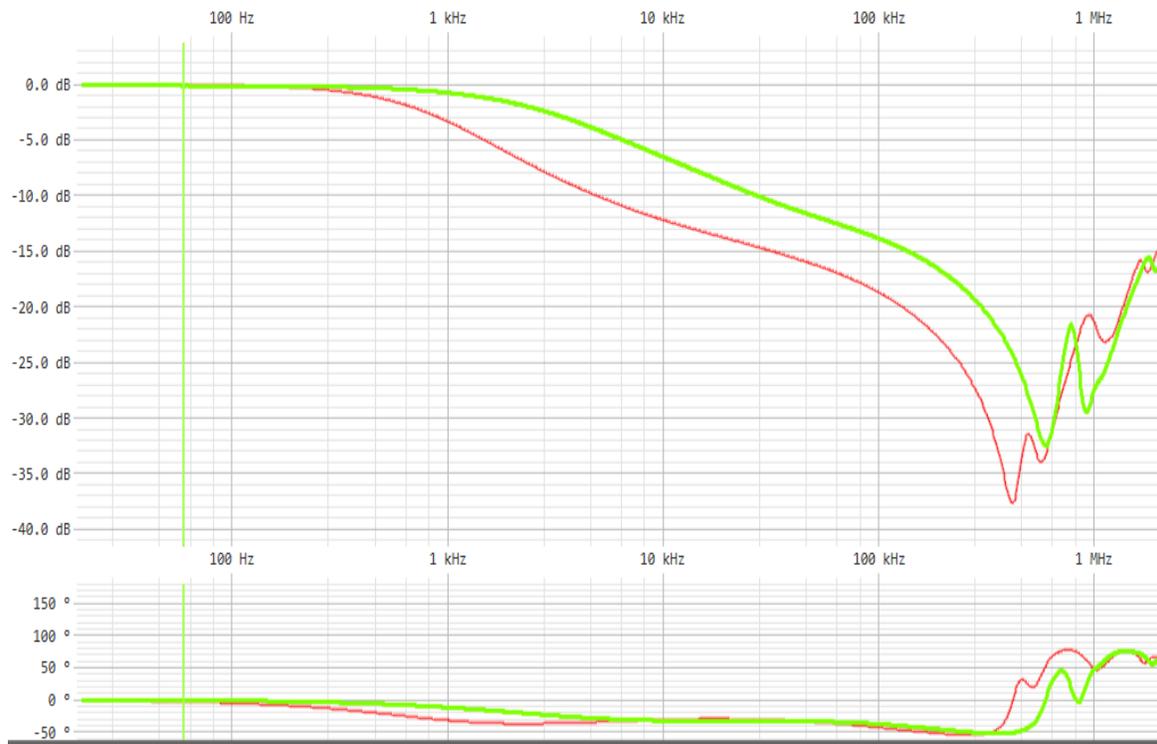
### Falla dos



	Frecuencia	Magnitud	Fase	Impedancia	Admitancia	<input checked="" type="checkbox"/> Cerrar tabla de cursores
Cursor A	60 Hz	-0.06 dB	-3.3 °	2.89 Ω	346.13 mS	
Cursor B	60 Hz	-0.09 dB	-3.2 °	2.86 Ω	349.11 mS	
Delta (B - A)	0 Hz	-0.02 dB	0.1 °	-24.67 mΩ	2.98 mS	

**Figura 33.** Bobina polar en buen estado comparada con la falla dos

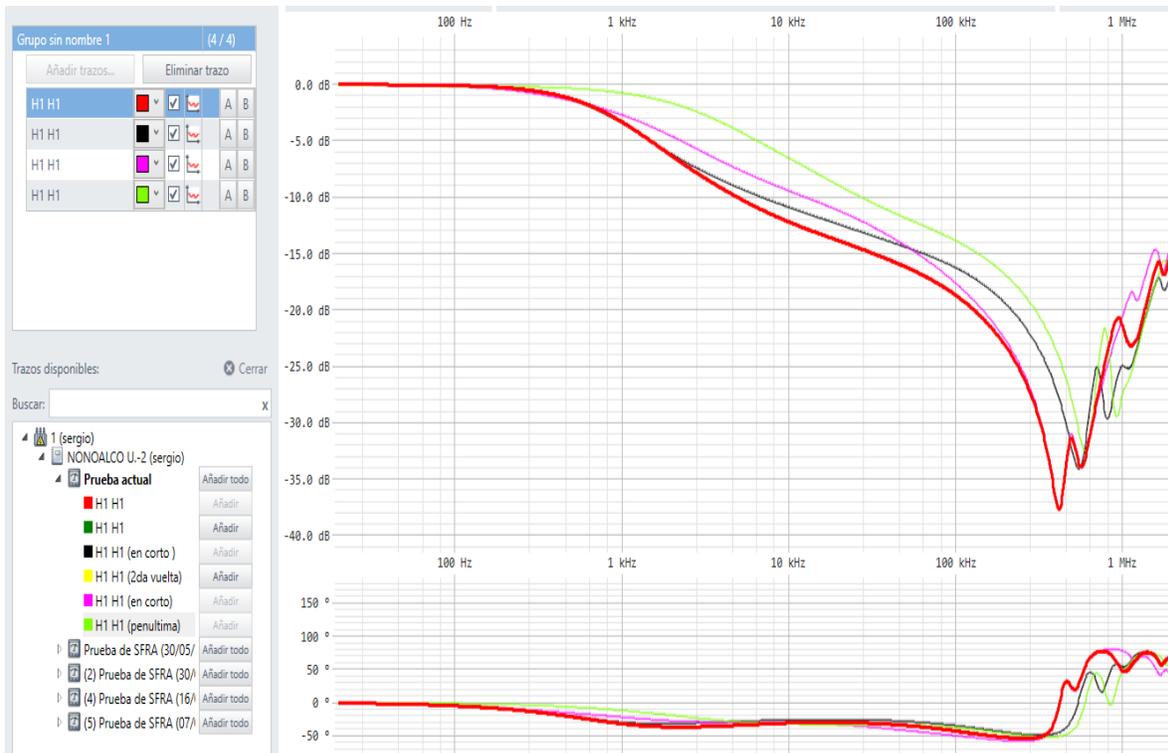
### Falla tres



	Frecuencia	Magnitud	Fase	Impedancia	Admitancia	<input checked="" type="checkbox"/> Cerrar tabla de cursores
Cursor A	60 Hz	-0.06 dB	-3.3 °	2.89 Ω	346.13 mS	
Cursor B	60 Hz	-0.13 dB	-1.3 °	1.32 Ω	758.24 mS	
Delta (B - A)	0 Hz	-0.06 dB	2 °	-1.57 Ω	412.1 mS	

Figura 34. Bobina polar en buen estado comparada con la falla tres

En la **Figura 35** se hace la comparación de la bobina polar en buen estado representada en la curva de color rojo con las tres diferentes fallas a las que fue sometida durante el proceso de prueba. Como se logra ver la gráfica se encuentra dividida en rangos de Hertz en ambas graficas las curvas que llegan hasta los 100 Hz no tienen ningún cambio ya que reflejan el estado en el que se encuentra el núcleo, de los 100 Hz hasta llegar a los 100 kHz representa las espiras de la bobina y de los 100 kHz en adelante muestra el comportamiento del aislamiento.



*Figura 35. Comparación de la bobina polar en buen estado con las tres fallas*

Esta prueba está basada en el método experimental, ya que no existe un valor estándar para todos los rotores, porque cada generador tiene una capacidad distinta y eso hace que cada máquina tenga características únicas.

## Conclusión

La prueba de barrido a la frecuencia en rotores de generadores síncronos determina como es el comportamiento de la impedancia en este caso será de la bobina, al igual que la admitancia reflejada en el aislamiento. Las fallas pueden localizarse a simple vista y dan a conocer si es a causa del aislamiento o en los devanados por algún problema mecánico que este surgiendo en el rotor.

Permite detectar de manera más fiable el deterioro en el aislamiento en los rotores. Es posible determinar qué tipo de fallo puede ocurrir en el rotor, por lo que se puede identificar la causa del problema, corregirlo y detener el deterioro y así poder prolongar la vida del generador. Este beneficio evitara grandes pérdidas debido a la falta de generación y a la reparación o sustitución del equipo.

Es una metodología de medición para diagnosticar la composición del rotor, basada en la medición de las características del RLC, ya que es un elemento invariable en su estructura a menos que el estrés electromecánico cambie su composición física. Al producirse algún cambio la admitancia sufre cambios con respecto a su admitancia original, por lo que resulta una diferencia entre las curvas.

El comportamiento de la prueba de barrido a la frecuencia tiene tres puntos principales de resonancia esto porque cada polo es un devanado en el que interactúan. El primer punto seria el aislamiento (admitancia), el segundo punto es el núcleo y el conductor que es la inductancia. Esa es la medición que lleva al principio de diseño con independencia en la admitancia de los devanados.

Este análisis se realiza para detectar las fallas entre espiras causadas por estrés mecánico en los devanados de polos de las máquinas durante las pruebas de aceptación en fábrica o durante la prueba de mantenimiento de rutina. También se puede utilizar para detectar fallas entre espiras en los devanados. Fue desarrollado para detectar deformaciones mecánicas de los devanados de transformador y también se utiliza para la detección de fallas entre espiras en los devanados de las máquinas rotativas.

El resultado el determina comparando la amplitud y la fase de las señales de entrada y salida. Los valores se desvían respecto a los diferentes polos o respecto a las mediciones anteriores cuando las fallas entre espiras cambian el comportamiento de la respuesta en frecuencia es diferente a la prueba inicial.

La alta sensibilidad permite obtener unos resultados fiables con la máxima seguridad a niveles de baja tensión. Cuenta también con asistencia mediante un software para lograr el análisis automático de resultados, comparaciones e informes personalizados.

## Anexos

### Instrumentación utilizada para la prueba

- Equipo Franeo 800



Figura 36. Equipo Franeo

- Unión para cables a tierra y conexión



Figura 37. Unión para cables a tierra



Figura 38. Unión para cables de conexión

- Cables a tierra y conexión



*Figura 39. Cables a tierra*



*Figura 40. Cables de conexión a las pinzas*

- Cable a tierra y pinzas de conexión del equipo Franeo 800



*Figura 41. Cable a tierra*



*Figura 42. Pinzas de conexión que van al rotor*

Durante el proceso de investigación y realización del proyecto, en la empresa Generadores Mexicanos S.A de C.V ubicada en Monterrey, N.L. Estuve en el área de ingeniería apoyando a los laboratoristas. En donde se realizan pruebas para aprobar el estado de las barras del estator, a continuación se muestra el proceso de elaboración de cada una de las barras y de las pruebas que se le realizan para saber si la fabricación ha sido la ideal y pase cada uno de los estándares de aceptación.

Existen dos tipos de bobinas, las enteras o tipo diamante y de bastones o medias bobinas. Se mostrara el proceso de fabricación de los de tipo bastón **Figura 43**, empleando los materiales y sistemas de manufactura más modernos. El principal aislamiento con la que se fabrican es mica mezclada con resina epóxica **Figura 44** y **45** que se recubren de cinta graduadora de potencial, para evitar descargas superficiales a la salida del núcleo.



*Figura 43. Agrupación de los hilos de cobre para formar una barra Roebel*



*Figura 44. Tejido Roebel*



*Figura 45. Aislamiento de la barra Roebel*



*Figura 46. Proceso de formación de la barra Roebel, completamente aislada.*

En la parte recta o en la parte que va contenida la ranura las barras se recubren con pintura semiconductora de baja resistividad a base de grafito y logra el buen contacto a tierra como se muestra en la **Figura 47**, la cual evita campos eléctricos concentrados en la superficie de la bobina que provoquen descargas en el interior de la bobina. La pintura de alta resistividad se requiere hasta 7 cm alejado del núcleo y en un punto se hace el traslape se unen las 2 pinturas; la semiconductora y la graduadora en los cabezales.



*Figura 47. Aislamiento de la barra Roebel*

A las barras ya terminadas se le aplican una serie de pruebas para ver si cumplen con ciertos estándares de aceptación que son indicados para cada generador, ya que cada proyecto tiene condiciones específicas para su buen funcionamiento a continuación se explicara cada una de las pruebas que se realizan.



*Figura 48. Descargas parciales*

La prueba de descargas parciales presenta como resultado, la existencia no de una, sino de múltiples fuentes activas de degradación, todas ellas actuando en forma simultánea sobre la el aislamiento de la barra a la que se le está haciendo la prueba. En este caso la barra fue sometida a 8, 11.04 y 13.80 Kv, el resultado que arroje a los 8 kV debe de ser menor a 1 pC ya que si sobrepasa este valor será rechazada. La prueba se muestra en la **Figura 48**.

La siguiente prueba es Hipot y consiste en inyectar 41.1 kV a la barra y que resista en ella durante un minuto. Esta prueba no tiene valor de aceptación, es completamente visual, ya que si la barra no resiste este voltaje hace un corto, formando una chispa en uno de los extremos de la barra donde el aislamiento se encuentre con una fisura y queda totalmente inservible presentada en la **Figura 49**.



*Figura 49. Prueba Hipot*

La prueba de ohm por cuadro se realiza colocando tiras de aluminio en los extremos de la barra y una más en medio, con la ayuda de un multímetro se realizan las mediciones este tiene un rango para el modo de aceptación debe de ser mayor a 2 k $\Omega$  y menor a 10 k $\Omega$ . Cuando este valor es sobrepasado la barra se regresa y le vuelven a colocar otro aislamiento para así poder realizar la prueba nuevamente y así cumpla con el estándar de aceptación.

## Referencias

- [1] Chapman, Stephen J., Máquinas Eléctricas Quinta edición, 2012. México, Editorial Mc Graw Hill. Capítulo 4 Generadores síncronos pág. 144-204.
- [2] Harper, Gilberto Enríquez, Máquinas Eléctricas, 2005, México, Editorial LIMUSA. Capítulo 4 Generadores Síncronos, pág. 165-200.
- [3] Eileen Duarte, G. Mathew Kennedy, de Tony Mcgrail. “Diagnóstico de Transformadores y Máquinas Rotatorias Mediante el Análisis de Respuesta al Barrido Frecuencial (SFRA)”. Doble Engineering Company.
- [4] IEEE- 115 “Procedimientos de ensayo para máquinas sincrónicas”. Año 2010.
- [5] Greg C. Stone, Edward A. Boulter, Ian Culbert, Hussein Dhirani. “GE Generator Rotor Design, Operational Issues, and Refurbishment Options- GE Power Systems Generator Insulation Handbook- The Gund Company Electrical Insulation for Rotating Machines– Design, Evaluation, Aging, Testing, and Repair”. 2009.
- [5] Clyde V. Maughan. “Maintenance of Turbine-Driven Generators. President Maughan Engineering”, Chapter 4. Failure.
- [6] I. A. Padilla, D. O. Salinas, and A. R. Messina, “Sensitivity Analysis of the Dynamic Behavior of a Salient-Pole Synchronous Machine Considering the, Static Rotor Eccentricity Effect,” vol. 10, no. October, pp. 724–730, 2012.
- [7] Z. Eleschova, A. Belan, and D. Gasparovsky, “Rotor Ground Fault Protection Of Generator With Static Excitation System” pág. 138–146, 2011.
- [8] P. Agosto, “Protección de Generadores Síncrónicos,” pág. 89, 2013.
- [9] A. Camargo, “Localización de fallas: Gestión de información obtenida en equipos de protecciones instalados en cabeceras de circuitos de distribución” 2012.
- [10] Sánchez Marín F., Pérez González A., Sancho Bru J., Rodríguez Cervantes P., Mantenimiento Mecánico y Eléctrico de Máquinas Síncronas, 2da ed. Castellón, 2009.
- [11] IEEE. 2008. IEEE Guide for Synchronous Generator Modeling Practices and Applications in Power System Stability Analyses. IEEE Power Engineering Society.
- [12] Sweetser Charles y el Dr. Mcgrail Tony. “Análisis de la respuesta de frecuencia de barrido Aplicaciones de transformador”. Ingeniería doble.